



Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Centro de Ciências Sociais

Instituto de Filosofia e Ciências Humanas

Mariano Gazineu David

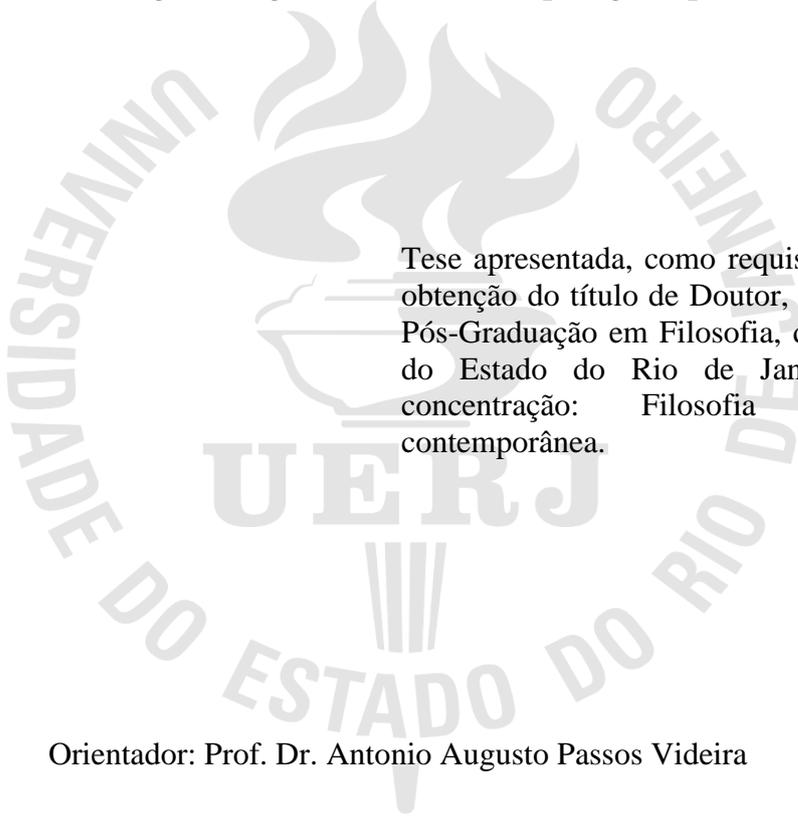
Incerteza de medição: adoção do conceito e implicações epistemológicas

Rio de Janeiro

2022

Mariano Gazineu David

Incerteza de medição: adoção do conceito e implicações epistemológicas



Tese apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor, ao Programa de Pós-Graduação em Filosofia, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Filosofia moderna e contemporânea.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Augusto Passos Videira

Rio de Janeiro

2022

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CCS/A

D250 David, Mariano Gazineu.
Incerteza de medição: adoção do conceito e implicações epistemológicas /
Mariano Gazineu David. – 2022.
300 f.

Orientador: Antonio Augusto Passos Videira.
Tese (Doutorado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Instituto de Filosofia e Ciências Humanas.

1. Filosofia – Teses. 2. Medição – Teses. 3. Metrologia – Teses. I. Videira, Antonio Augusto Passos. II. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Instituto de Filosofia e Ciências Humanas. III. Título.

CDU 1

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta tese, desde que citada a fonte.

Assinatura

Data

Mariano Gazineu David

Incerteza de medição: adoção do conceito e implicações epistemológicas

Tese apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor, ao Programa de Pós-Graduação em Filosofia, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Filosofia moderna e contemporânea.

Aprovada em 10 de maio de 2022.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Antonio Augusto Passos Videira (Orientador)

Instituto de Filosofia e Ciências Humanas – UERJ

Prof. Dr. Américo Tristão Bernardes

Universidade Federal de Ouro Preto

Prof. Dr. Osvaldo Pessoa Júnior

Universidade de São Paulo

Prof. Dr. Rafael de Oliveira Lattanzi Vaz

Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia

Prof. Dr. Félix Flores Pinheiro

Universidade Federal de Uberlândia

Rio de Janeiro

2022

DEDICATÓRIA

Para Mônica, Babi e Nita, com amor.

AGRADECIMENTOS

Sem que houvesse um grupo de estudos com interesses amplos relacionados às ciências, criado e dirigido pelo professor Antonio Augusto Passos Videira, essa tese não teria sido sequer concebida. Agradeço, então, ao Guto por poder participar de um grupo marcado pela diversidade e pela alta qualidade, que vêm produzindo publicações, eventos e disciplinas de destaque na área da filosofia das ciências. Agradeço-o também por ter aceitado o desafio de me orientar no tema da incerteza de medição, por sua disponibilidade ao longo de todo o trabalho e pela orientação perspicaz que, além de tudo, possibilitou a identificação das alternativas possíveis para a abordagem da tese.

A todos os colegas do acima mencionado grupo de Estudos em Ciência Tecnologia e Sociedade (ECTS), agradeço pelas conversas que resultaram em inspirações para a elaboração da tese. Agradeço especialmente: ao Rafael Vaz por abrir caminho dentro do grupo ECTS na linha de pesquisa em filosofia da medição, por sua tese que me ajudou a situar alguns problemas relacionados com a medição e pelas conversas que contribuíram para os rumos desse trabalho; à Maria Helena pela dissertação sobre Bachelard, a partir da qual pude compreender melhor a questão do realismo naquele filósofo; ao Juan pela digitalização de textos sobre a revolução probabilística; e aos colegas de pós-graduação Rafael Velloso, Wigson Rafael, Juan, Leandro, Christian e Eduardo Gradet pelas discussões nas disciplinas que cursamos juntos.

Aos membros da banca de qualificação e de defesa da tese, Guto, Rafael Vaz, Américo Bernardes, Osvaldo Pessoa e Félix Pinheiro, agradeço pelas críticas precisas, dicas e sugestões que contribuíram para correções no texto, para o preenchimento de algumas lacunas e, principalmente, para o redirecionamento do foco da tese.

Na introdução dessa tese, menciono como minha experiência na área da metrologia das radiações ionizantes, que se deu no Laboratório de Ciências Radiológicas (LCR) da UERJ, foi importante como ponto de partida e como fonte de insights para o desenvolvimento do trabalho. Pelo aprendizado e pela convivência enriquecedora, sou grato a toda equipe do LCR. Agradeço especialmente aos colegas e amigos Camila Salata e Sandro pela leitura e comentários das partes da tese relacionadas à radiação ionizante; Beth, Fred, Sandro e Paulo Cunha pelas conversas sobre metrologia, qualidade e incerteza; e Evandro pelas primeiras lições práticas em metrologia e pelo bom humor que tornou o trabalho com as medições mais leve e forneceu a anedota que menciono na introdução.

Aos profissionais do Laboratório Nacional de Metrologia das Radiações Ionizantes (LNMRI), especialmente à Aninha, à Karla Patrão e ao Paulo Rosado, sou grato pelo convívio instrutivo na prática da metrologia das radiações ionizantes.

Ao Gilmar Soares da CERTI agradeço pelos cursos sobre conceitos metrológicos que ele soube ministrar de maneira didática e pelas conversas enriquecedoras.

Embora tenha recebido o auxílio luxuoso de todos os amigos e profissionais acima mencionados, a responsabilidade pelas falhas (certamente) existentes nesse trabalho é inteiramente minha.

Agradeço também aos colegas recentes do Instituto Politécnico de Nova Friburgo (IPRJ) que me acolheram e me abriram as portas para a nova empreitada na arqueometria, especialmente ao Hilton Guaraldi, ao Felipe e ao professor Joaquim Assis.

Na figura de Alexandra Elbakyan, agradeço a todos os idealizadores e elaboradores de ferramentas para acesso livre à produção científica, como o *Sci-Hub* e o *Library Genesis*. Sem o acesso a algumas publicações, principalmente em tempos de pandemia que restringiu a consulta a acervos das bibliotecas, essa tese não teria sido possível.

Agradeço a todos os amigos e familiares que têm compartilhado comigo vivências de diversidade qualitativa e intensidade quantitativa, que certamente me ajudaram a moldar esse trabalho. Sou grato aos felinos Nikita, Ninja e Luke, que também conviveram intensamente comigo durante a elaboração da tese, pelo carinho e pelo aprendizado de outras maneiras de estar no mundo.

À Babi agradeço pelas dicas digitais e à Mônica, pela vida compartilhada, pelas conversas e dicas sobre temas relacionados à tese, pela revisão de algumas partes do trabalho e pela influência no veganismo, que é uma forma de respeitar as emoções de todos os animais, inclusive os humanos.

Meu irmão veio correndo mostrar um brinquedo que inventara com palavras. Era assim:

Besouros não trepam no abstrato.

Manuel de Barros

RESUMO

DAVID, M. G. *Incerteza de medição: adoção do conceito e implicações epistemológicas*. 2022. 300 f. Tese (Doutorado em Filosofia) – Instituto de Filosofia e Ciências Humanas, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2022.

A publicação do *Guia para expressão da incerteza de medição* (GUM), em 1993, que possibilitou a uniformização da metodologia para avaliar a incerteza e para expressar o resultado da medição, constitui um importante marco no âmbito da metrologia. A publicação do guia implicou também a mudança da tradicional abordagem de erro para a abordagem de incerteza. Esta tese discute questões relacionadas à adoção do conceito de incerteza de medição e suas implicações epistemológicas, com foco nas medições científicas de grandezas físicas. Inicialmente, a pesquisa aborda as diversas teorias e filosofias da medição, com destaque para as obras mais recentes. Em seguida, discute conceitos e questões relativos ao emprego da matemática nas medições e os conteúdos das teorias da probabilidade e da estatística empregados para estimar a incerteza. A mudança de abordagem promovida pelo GUM envolve, principalmente, os conceitos de erro de medição, de valor verdadeiro e de incerteza definicional, que a tese discute a partir de trabalhos científicos e filosóficos. A pesquisa aponta que a mudança privilegiou aspectos epistemológicos da medição e que a incerteza, além de ser o mais completo índice da qualidade da medição, desempenha um papel “articulador” na rede metrológica. A tese enfoca ainda o processo de medição do ponto de vista da filosofia do experimento, concentrando-se nas fontes de erros e incertezas experimentais. O trabalho discute o conceito de modelo como mediador entre as teorias e as propriedades físicas visadas e as funções que os modelos desempenham nas medições, em especial a função de possibilitar simplificações, aproximações e correções. A partir de uma investigação genealógica das fontes de incerteza nos processos de medição, a tese identifica três principais instâncias das quais emanam as incertezas: a modelagem, a complexidade do sistema empírico e a aproximação matemática. A inevitabilidade da incerteza nas medições se deve ao escopo limitado das teorias científicas e às interações entre as propriedades do sistema empírico e os instrumentos de medição. Com base nas conclusões obtidas e em publicações recentes, o trabalho argumenta em favor da fertilidade de abordagens epistemológicas das medições e de suas incertezas.

Palavras-chave: Incerteza de medição. Filosofia da medição. Metrologia. Filosofia do experimento.

ABSTRACT

DAVID, M. G. *Measurement uncertainty: concept adoption and epistemological implications*. 2022. 300 f. Tese (Doutorado em Filosofia) – Instituto de Filosofia e Ciências Humanas, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2022.

The publication of the *Guide to the expression of uncertainty in measurement* (GUM) in 1993, which made it possible to standardize the methodology for assessing uncertainty and for expressing the measurement result, constitutes an important milestone in the field of metrology. The publication of the guide also implied a change from the traditional error approach to the uncertainty approach. This thesis discusses issues related to the adoption of the measurement uncertainty concept and its epistemological implications, focusing on scientific measurements of physical quantities. Initially, the research addresses the various theories and philosophies of measurement, with emphasis on the most recent works. It then discusses concepts and issues related to the use of mathematics in measurements and the contents of the theories of probability and statistics used to estimate uncertainty. The change in approach promoted by the GUM mainly involves the concepts of measurement error, true quantity value, and definitional uncertainty, which the thesis discusses based on scientific and philosophical works. The research points out that the change privileged epistemological aspects of measurement and that uncertainty, in addition to being the most complete index of measurement quality, plays an “articulating” role in the metrological network. The thesis also focuses on the measurement process from the point of view of the philosophy of experiment, focusing on the sources of experimental errors and uncertainties. The work discusses the concept of model as a mediator between the theories and the physical properties targeted and the functions that the models play in the measurements, especially the function of enabling simplifications, approximations, and corrections. Based on a genealogical investigation of the sources of uncertainty in measurement processes, the thesis identifies three main instances from which uncertainties emanate: modeling, the complexity of the empirical system and the mathematical approximation. The inevitability of uncertainty in measurements is due to the limited scope of scientific theories and the interactions between the properties of the empirical system and the measuring instruments. Based on the conclusions obtained and on recent publications, the work argues in favor of the fertility of epistemological approaches to measurements and their uncertainties.

Key words: Measurement uncertainty. Philosophy of measurement. Metrology. Philosophy of experiment.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 –	Padronização da unidade de comprimento “pé”, gravura de Jakob Köbel...	22
Figura 2 –	Hierarquia do sistema metrológico e os conceitos de rastreabilidade, disseminação e comparabilidade.....	35
Figura 3 –	Definições das unidades de base, em vigor a partir de 20 de maio de 2019, tendo como referência constantes fundamentais da natureza e a nova relação de interdependência entre elas.....	39
Figura 4 –	Representação esquemática do novo SI.....	40
Figura 5 –	<i>Phantom</i> não antropomórfico.....	42
Figura 6 –	Calorímetro de água para determinação de D_w	43
Figura 7 –	Câmara de ionização e arranjo experimental para a determinação de D_w por ionometria.....	43
Figura 8 –	Frascos para dosimetria Fricke para determinação de D_w com fontes de radiação empregadas em braquiterapia.....	44
Figura 9 –	Câmaras de ionização usadas para a disseminação de D_w	45
Figura 10 –	Arranjo experimental para a calibração de câmaras de ionização na grandeza D_w em feixes de ^{60}Co	46
Tabela 1 –	Tipos de escalas, segundo STEVENS, 1946.....	76
Figura 11 –	Etapas do processo de medição descritas em MARI et al., 2017.....	99
Figura 12 –	Imagens de jogos na antiguidade.....	133
Figura 13 –	Representação gráfica da avaliação de erro aleatório para 20 medidas de temperatura (t).....	157
Figura 14 –	Ilustração da lei de propagação de incertezas para $N=3$ grandezas de entrada independentes.....	187
Figura 15 –	Ilustração da propagação de distribuições (PDFs) para $N=3$ grandezas de entrada independentes.....	190
Tabela 2 –	Planilha de incertezas para a determinação primária de D_w pelo método da dosimetria Fricke para fontes de ^{192}Ir	192
Tabela 3 –	Estimativa de incerteza na calibração de câmaras de ionização na grandeza D_w , para feixes de ^{60}Co , pelo BIPM	193
Figura 16 –	Representação gráfica dos conceitos envolvidos na abordagem de erro.....	205

Figura 17 – Representação gráfica dos conceitos envolvidos na abordagem de incerteza.....	206
Figura 18 – Diagrama de Ishikawa, também chamado de diagrama de causa e efeito.....	235
Figura 19 – Diagrama da modelização em um processo de medição genérico.....	251

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
ATM	Teoria Analítica das Medições (<i>Analytic Theory of Measurement</i>)
BIPM	Bureau Internacional de Pesos e Medidas (<i>Bureau International des Poids et Measure</i>)
CGCRE	Coordenação Geral de Acreditação
CGPM	Conferência Geral de Pesos e Medidas
CI	Câmara de Ionização
CIPM	Comitê Internacional de Pesos e Medidas
CITAC	<i>Cooperation on International Traceability in Analytical Chemistry</i>
CMC	Capacidade de Medição e Calibração (<i>Calibration and Measurement Capabilities</i>)
CODATA	<i>Committee on Data International Science Council</i>
DIN	<i>Deutsches Institut für Normung</i>
ECTS	Grupo de Estudos Conceituais em Ciência Tecnologia e Sociedade
EURACHEM	<i>Analytical Chemistry in Europe</i>
GUM	Guia para Expressão da Incerteza de Medição
IAEA	Agência Internacional de Energia Atômica (<i>International Atomic Energy Agency</i>)
IEC	Comissão Internacional de Eletrotécnica (<i>International Electrotechnical Commission</i>)
IFCC	Federação Internacional de Química Clínica e Medicina Laboratorial
ILAC	Cooperação Internacional de Acreditação de Laboratórios
INM	Institutos Nacionais de Metrologia
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INM do Brasil)
IRD	Instituto de Radioproteção e Dosimetria
ISO	Organização Internacional de Normatização (<i>International Standardization Organization</i>)
ISO/TAG4/WG3	Grupo de trabalho da ISO para elaboração do GUM
ISQ	Sistema Internacional de Grandezas

IUPAC	União Internacional de Química Pura e Aplicada
IUPAP	União Internacional de Física Pura e Aplicada
JCGM	<i>Joint Committee for Guides in Metrology</i>
JCGM-WG	Grupos de trabalho (<i>Working Group</i>) da JCGM
KCDB	<i>Key Comparison Database</i>
MMC	Método de Monte Carlo
MS	Sistema de Medição (<i>Measuring System</i>)
MT	Teoria da Medição (<i>Measurement Theory</i>)
NBS	<i>National Bureau of Standards</i> (antigo nome do NIST)
NIST	<i>National Institute for Standards and Technology</i> (INM dos Estados Unidos da América)
NPL	<i>National Physical Laboratory</i> (INM da Inglaterra)
NRC	<i>National Research Council</i> (INM do Canadá)
OIML	Organização Internacional de Metrologia Legal
PDF	Função de Densidade de Probabilidade (<i>Probability Density Function</i>)
PPGFIL/UERJ	Programa de Pós-Graduação em Filosofia da UERJ
PSDL	Primary Standards Dosimetry Laboratory
PTB	<i>Physikalisch-Technische Bundesanstalt</i> (INM da Alemanha)
RBC	Rede Brasileira de Calibração
RBE	Rede Brasileira de Ensaio
RC	Condições de Robustez (<i>Robustness Conditions</i>)
RTM	Teoria Representacional das Medições (<i>Representational Theory of Measurement</i>)
SI	Sistema Internacional de Unidades
SSDL	<i>Secondary Standards Dosimetry Laboratory</i>
VIM	Vocabulário Internacional de Metrologia
VV	Valor Verdadeiro (de uma grandeza)
WHO	Organização Mundial da Saúde (<i>World Health Organization</i>)

SUMÁRIO

	INTRODUÇÃO	15
1	TEORIAS E FILOSOFIAS DA MEDIÇÃO	20
1.1	Padronização e conceitos básicos	20
1.1.1	<u>Padronização e unidades</u>	21
1.1.2	<u>Conceitos básicos e a evolução do sistema métrico no século XX</u>	26
1.2	Estudos histórico-epistemológicos	46
1.2.1	<u>A filosofia do conhecimento aproximado de Bachelard</u>	47
1.2.2	<u>A função da medição e a virada experimental</u>	54
1.2.3	<u>O problema da coordenação e a construção de escalas</u>	61
1.3	Filosofias e teorias da medição	70
1.3.1	<u>Realismo</u>	71
1.3.2	<u>Teorias lógico-matemáticas</u>	74
1.3.3	<u>Operacionalismo</u>	78
1.3.4	<u>Convencionalismo</u>	83
1.3.5	<u>Realismo versus antirrealismo das grandezas</u>	86
1.4	Filosofia da medição no século XXI: epistemologia e metrologia	88
1.4.1	<u>Epistemologia e sistemas de medição (MSs)</u>	89
1.4.2	<u>Coerência e modelos</u>	92
1.4.3	<u>Estrutura e etapas da medição</u>	98
1.4.4	<u>Padronização e harmonização</u>	101
1.5	Comentários finais do primeiro capítulo	104
2	O EMPREGO DA MATEMÁTICA NAS MEDIÇÕES	109
2.1	Questões históricas e conceituais	110
2.1.1	<u>Quantificação e matematização</u>	110
2.1.2	<u>Duas tradições de pesquisa</u>	117
2.1.3	<u>Modelagens para medir D_M</u>	121
2.1.4	<u>A efetividade da matemática</u>	125
2.2	Probabilidade e estatística	130
2.2.1	<u>Painel histórico</u>	132

2.3	Estimativa de erros e incertezas	147
2.3.1	<u>Os conceitos de erro aleatório e sistemático</u>	148
2.3.2	<u>Estatística frequentista e erros aleatórios</u>	150
2.3.3	<u>Erros sistemáticos e estatística bayesiana</u>	158
2.4	Comentários finais do segundo capítulo	166
3	ADOÇÃO DO CONCEITO DE INCERTEZA DE MEDIÇÃO	170
3.1	Antecedentes do GUM	171
3.1.1	<u>Valor verdadeiro e definição do mensurando</u>	171
3.1.2	<u>Combinação dos erros aleatório e sistemático</u>	174
3.1.3	<u>Origem do GUM</u>	177
3.2	A metodologia do GUM	183
3.2.1	<u>Metodologia básica do GUM</u>	183
3.2.2	<u>Expressão da incerteza e seu papel “articulador”</u>	191
3.3	Mudança de abordagem e suas implicações	197
3.3.1	<u>De erro para incerteza: abordagem operacional</u>	198
3.3.2	<u>Os conceitos de VV e de incerteza definicional</u>	203
3.3.3	<u>Índice da qualidade da medição</u>	217
3.3.4	<u>Perspectivas filosóficas na metrologia</u>	223
3.4	Comentários finais do terceiro capítulo	227
4	EPISTEMOLOGIA DAS INCERTEZAS	232
4.1	Experimento, erro e incerteza	233
4.1.1	<u>O erro experimental como fonte de incerteza</u>	234
4.1.2	<u>Tipologia de erros e incertezas</u>	237
4.2	A filosofia da medição e os papéis dos modelos	243
4.2.1	<u>Modelos como mediadores</u>	244
4.2.2	<u>A coerência e a consistência dada pelos modelos</u>	252
4.2.3	<u>Esboço de uma genealogia das fontes de incerteza</u>	256
4.3	Epistemologia das incertezas	268
4.4	Comentários finais do quarto capítulo	273
	CONCLUSÃO	280
	REFERÊNCIAS	286

INTRODUÇÃO

Todo local de trabalho tem suas mitologias, histórias e anedotas que dizem muito sobre as atividades ali desenvolvidas. No laboratório de metrologia das radiações ionizantes em que trabalhei entre os anos 2003 e 2019 não era diferente. Dentre os criadores e propagadores de anedotas e situações cômicas destacava-se um grande amigo, excelente físico metrologista e renomado gaiato. Fazia parte de sua estratégia cômica explorar situações que se repetiam com frequência. Uma delas ocorria quando um pequeno grupo estava conversando sobre amenidades e algum chefe do laboratório se aproximava. Meu amigo, então, aumentava o tom de voz para falar sobre algum assunto de trabalho, deixando claro para todos que ele estava acintosamente fingindo que conversávamos sobre assuntos de trabalho e não sobre amenidades ou assuntos particulares.

A graça era deixar explícita uma tentativa de disfarçar o interesse por outras coisas que não o trabalho. O que me interessa nessa situação cômica é que o assunto de trabalho sobre o qual meu amigo fingia estar conversando era, em geral, a **avaliação de incertezas**. Ele dizia em voz alta algo como “acho que podemos mudar a abordagem daquele componente de incerteza...”, ou, “a planilha de incertezas está dando muito trabalho...”, ou ainda, “precisamos rever os cálculos de incerteza...” etc.

É significativo que a avaliação de incertezas seja o assunto preferencial para expressar nossa dedicação ao trabalho em um laboratório de metrologia. Essa preferência se dá, a meu ver, por três motivos: porque a estimativa de incertezas ocupa boa parte das preocupações do metrologista, porque é uma operação complexa e, em alguns casos, difícil, e, principalmente, porque é uma atividade crucial para qualquer medição. Em paralelo ao enfrentamento das questões centrais, procuro fornecer ao longo do trabalho um quadro mais detalhado dos motivos pelos quais a avaliação de incerteza de medição ocupa um lugar de destaque entre as atividades dos metrologistas.

A história protagonizada pelo meu amigo ecoa também um dos motivos pelos quais resolvi investigar o conceito de incerteza de medição. Tendo, além da formação técnico-científica em engenharia química, graduação na área das ciências humanas, em filosofia, a frequente discussão sobre incertezas no laboratório em que trabalhei despertou o interesse filosófico pelo tema. O projeto foi elaborado no contexto da linha de pesquisa em filosofia da medição no âmbito do grupo de estudos **ECTS** (Estudos Conceituais em Ciência Tecnologia e Sociedade) dirigido pelo prof. Antonio Augusto Passos Videira. A tese de doutorado defendida no PPGFIL/UERJ em 2017 pelo colega de ECTS e pesquisador do INMETRO,

Rafael Vaz, sobre os conceitos de confiabilidade e confiança na filosofia da medição (VAZ, 2017), foi também fruto dessa linha de pesquisa e um estímulo à minha investigação.

A pesquisa bibliográfica exhibe um bom número de trabalhos filosóficos sobre **medições** publicados ao longo do século XX (p. ex. CAMPBELL, 1920; BRIDGMAN, 1958; KRANTZ *et al.*, 1971). No âmbito da filosofia das ciências, desde as últimas décadas do século passado, houve uma valorização do aspecto experimental das ciências físicas e, a partir dessa valorização, um renovado interesse pelo tema da medição. Como fruto dessa “virada experimental”, os trabalhos mais recentes exibem um olhar atento para a prática da medição e para os problemas relacionados ao **erro** e à **incerteza de medição** (p. ex. TAL, 2012; BOUMANS; HON; PETERSEN, 2014; GRÉGIS, 2016).

A publicação do *Guia para expressão da incerteza de medição (GUM)*, em 1993, pelo BIPM¹ teve ampla repercussão na metrologia e nos estudos sobre medições. Encontra-se no GUM a afirmação de que mesmo nas melhores condições de realização de uma medição, “ainda permanece uma incerteza sobre quão correto é o resultado declarado, isto é, uma dúvida acerca de quão corretamente o resultado de uma medição representa o valor da grandeza que está sendo medida” (INMETRO, 2012a). O reconhecimento científico da presença **incontornável** da incerteza nos processos de quantificação constituiu um dos estímulos à pesquisa desta tese. Alguns trabalhos mais recentes em filosofia da medição discutem a **mudança da abordagem** realizada pelo GUM (p. ex. MARI, 2015; GRÉGIS, 2015; DE COUTNAY; GRÉGIS, 2017), mas poucos tomam o conceito de **incerteza** como foco central da pesquisa (p. ex. MARI; GIORDANI, 2014; GRÉGIS, 2015). A tese busca dialogar com esses trabalhos e apresentar novas perspectivas sobre questões relacionadas com o conceito de incerteza de medição. O foco da tese é direcionado para **medições científicas de grandezas físicas**, deixando em segundo plano as medições realizadas nas indústrias, no comércio e nas demais ciências.

Os **objetivos** do presente trabalho podem ser divididos em **dois grupos**. No **primeiro** grupo, estão os objetivos relacionados à própria adoção institucional do conceito. Qual o significado e quais as implicações dessa adoção? Como se avalia a incerteza de medição e quais os papéis que a incerteza desempenha na rede metrológica? Como os conceitos de valor verdadeiro e de incerteza definicional estão envolvidos na mudança de abordagem? Quais as perspectivas filosóficas envolvidas na discussão sobre o conceito? No **segundo** grupo, situam-

¹ BIPM: *Bureau International des Poids et Mesure*, instituição responsável por promover a compatibilidade das medições na rede metrológica internacional. A publicação original do GUM foi realizada em parceria com ISO (*International Standardization Organization*).

se os objetivos concernentes à investigação das fontes de erros e incertezas nos processos de medição. Como a filosofia do experimento pode nos ajudar a pensar os erros e incertezas de medição? Qual a relação entre os modelos de medição e as incertezas? Por que algumas fontes de incerteza são inevitáveis? Quais as instâncias de origem das fontes de incerteza em procedimentos experimentais de medição? Como as incertezas podem ser interpretadas do ponto de vista epistemológico? A tese busca responder a essas questões, mesmo que para algumas delas não tenha fornecido respostas exaustivas.

Como reflexo de uma pesquisa que envolve áreas das ciências e da filosofia, **dois tipos de referências** para esse trabalho podem ser **destacados**: os documentos publicados pelas instituições metrológicas e os trabalhos em filosofia da medição contemporânea. Os documentos oficiais da metrologia fornecem informações fundamentais para estudo das práticas de medição. Sendo uma ciência interdisciplinar, a metrologia se vale de vocabulários, guias e normas para fornecer as diretrizes que possam levar a práticas harmonizadas. Os trabalhos filosóficos contemporâneos sobre medição, por seu turno, sendo tributários das diversas teorias e filosofias da medição propostas durante o século XX, fornecem as principais ideias a partir das quais se dá a reflexão dessa tese. Esses trabalhos se inspiram em estudos filosóficos dos experimentos e, por isso, colocam as práticas metrológicas sob foco.

Além dos tipos de referências acima destacados, a pesquisa se vale de **artigos científicos** e publicações de caráter **filosófico** não estritamente voltados para as medições. A maior parte das referências empregadas nesse trabalho não possuem tradução para a língua portuguesa e as citações de obras cujas referências são publicações originais em inglês, francês e espanhol foram traduzidas por mim. Para evitar um número excessivo de notas, não reproduzo os textos originais, entendendo que é possível consultá-los nas próprias obras referenciadas.

A perspectiva da pesquisa é direcionada pelos aprendizados e pelas vivências em metrologia e em filosofia das ciências, mas também por certa **concepção empirista** das ciências. Segundo essa concepção, a produção de conhecimentos científicos depende de atividades **experimentais** que possuem características próprias, irredutíveis a uma visão puramente teórica das ciências. Isso não significa diminuir a importância da dimensão teórica, mas chamar atenção para a relevância dos aspectos empíricos na produção de conhecimentos. Inclusive, defendo ao longo da tese que a atividade experimental de medição é, em larga medida, dependente de modelos construídos a partir das teorias. Ainda assim, a dimensão experimental está sempre presente e é a principal responsável pela **inevitabilidade da incerteza** nas medições. Ademais, como esse trabalho em filosofia da ciência teve sua origem

na lida com os conceitos metrológicos e com a prática da medição, busquei manter ao longo da tese as intuições e perspectivas advindas dessas experiências.

Uma vez que o tema da medição ainda não é um muito comum em trabalhos filosóficos, busquei fornecer os elementos conceituais básicos nos dois primeiros capítulos desse trabalho. No **primeiro**, discuto as diversas filosofias e teorias das medições produzidas durante o século XX e destaco as principais questões enfrentadas nas publicações mais recentes em filosofia da medição. Grande parte dos conceitos e problemas apresentados no primeiro capítulo são retomados nas discussões dos capítulos terceiro e quarto. O primeiro capítulo funciona também como **introdução** aos problemas tratados na tese, por isso, em todas as questões relacionadas à medição ali enfrentadas, busco situar o problema da incerteza.

Ao focar o emprego da matemática nas medições no segundo **capítulo**, procurei, primeiramente, discutir alguns conceitos como, por exemplo, os de matematização e quantificação. Em função da importância das teorias das probabilidades e dos métodos estatísticos para a avaliação da incerteza de medição, apresento um painel histórico dos principais desenvolvimentos dessas disciplinas. Na sequência do capítulo, trago comentários sobre a introdução da estatística na metrologia e discuto os conceitos relacionados às metodologias para estimar as incertezas. No segundo capítulo, acompanho tais desenvolvimentos até meados do século XX.

No **terceiro** capítulo, apresento a situação das metodologias para calcular erros e incertezas antes da adoção do conceito de incerteza de medição para, em seguida, examinar as origens do GUM e sua metodologia básica. Problematizo a mudança de abordagem de erro para incerteza enfocando os conceitos de valor verdadeiro e de incerteza definicional. Por fim, discuto as possibilidades de expressão da qualidade da medição e as perspectivas filosóficas que ecoam na discussão sobre a incerteza. A abordagem do terceiro capítulo é pautada pelas questões que constam no primeiro grupo de objetivos acima relacionados.

Coloco o erro e a incerteza no centro da investigação sobre a medição do ponto de vista da filosofia do experimento no **quarto** capítulo da tese. Como mediadores entre as teorias científicas e as propriedades físicas submetidas à medição, os modelos constituem os elementos a serem enfocados nessa investigação, pois estão estreitamente relacionados com os erros e incertezas experimentais. A partir da reflexão sobre as funções dos modelos, esboço uma genealogia geral das fontes de incerteza nas medições. As questões relacionadas acima no segundo grupo de objetivos constituem os fios condutores do quarto capítulo.

Toda a discussão dos dois últimos capítulos visa enfrentar questões epistemológicas relacionadas à medição e, especialmente, à incerteza de medição. Da mesma forma que na maioria dos trabalhos mais recentes em filosofia da medição, a ênfase na pesquisa é direcionada para a abordagem epistemológica dos problemas. Uma vez que os focos nessa tese são a centralidade do conceito de incerteza, as metodologias para estimar incertezas e as razões pelas quais as incertezas são inevitáveis em procedimentos experimentais de medição, entendo que a perspectiva desenvolvida nos possibilita pensar em uma **epistemologia das incertezas**.

Nos quatro capítulos do presente trabalho, emprego um tom menos pessoal, na primeira pessoa do plural. Retomo o tom que empreguei nessa introdução na conclusão da tese.

1 TEORIAS E FILOSOFIAS DA MEDIÇÃO

a medida do possível

a curva oculta cova ou ninho?

1 l de suor
ou 10 m² de carinho?

meia tonelada de burocracia
ou 30 cm de boa poesia?

finda o atalho
na parede
ou será mais funda
a lagoa que a sede?

Mariano GD

O objetivo deste primeiro capítulo é discutir as bases do conceito de medição para fornecer um quadro teórico que possibilite, no capítulo dois, focar o emprego da matemática nas medições e, principalmente, problematizar o conceito de incerteza de medição nos capítulos terceiro e quarto. Na seção introdutória (1.1), são apresentados aspectos históricos e gerais das medições. Nas três seções seguintes são discutidas diferentes formas de abordar as medições. As abordagens histórico-epistemológicas (seção 1.2) apresentam enfoques menos sistemáticos, mas discutem conceitos importantes para a compreensão das medições. As perspectivas filosóficas ou teorias das medições, tratadas na seção 1.3, foram desenvolvidas, principalmente, ao longo do século XX e são ainda hoje influentes. Fechamos o capítulo (seção 1.4) com elementos da filosofia (ou epistemologia) das medições produzida nas duas últimas décadas. Os assuntos tratados neste capítulo são delimitados segundo o objetivo acima mencionado, ou seja, prover as bases históricas, conceituais e institucionais da medição para os capítulos seguintes.

1.1 Padronização e conceitos básicos

Procedimentos de medição são quase tão antigos quanto a história humana pode relatar. Registros sobre padrões de unidades de medição são encontrados em muitas culturas antigas como a chinesa, a suméria, a egípcia e a grega. Além de historicamente presentes nas primeiras civilizações, as medições também estiveram geograficamente bem disseminadas

(JONES, 2000, p. 90-1; CREASE, 2013, p. 31; WILLIAMS, 2014, p. 1-2 a 1-7). Como disse o filósofo e historiador da ciência canadense Ian Hacking, “[P]arece que temos praticado a medição desde sempre” (HACKING, 2012, p. 333). As atividades humanas que emergiram com a revolução agrícola, tais como a agricultura, a estocagem e o comércio de produtos e o cálculo dos diversos impostos para financiar a administração de reinados e impérios, exigiam o estabelecimento de unidades de pesos e medidas. A unidade funciona como a referência, ou seja, o “padrão” da medição: o valor de uma medida é uma razão entre o valor da grandeza obtido pela medição e o valor da unidade padronizada. O estabelecimento de unidades padrões para pesos e medidas é fundamental para fornecer estabilidade e segurança nas medições.

1.1.1 Padronização e unidades

1.1.1.1 As unidades antes do sistema métrico

As primeiras unidades de medida empregadas foram sementes, como a de alfarroba, e partes do corpo humano: um pé (unidade empregada em várias culturas), um dedo, uma parte do braço (o cúbito, por exemplo) etc. Segundo o historiador polonês Witold Kula (1916-1988), a **diversidade** de unidades de medida empregada por diferentes civilizações em diferentes períodos históricos é simplesmente “impressionante” (KULA, 1986, p. 7). O clássico livro de Kula sobre história dos padrões de medição, *Measures and men*, constitui um vasto repertório de exemplos de unidades de medida criadas para fins particulares das civilizações. Discute também os significados que pesos e medidas assumiram ao longo da história e das culturas. O uso ou não de pesos e medidas em determinada cultura já foi tomado, inclusive, como critério para distinguir civilização de barbárie (KULA, 1986, p. 11).

Em relação à “evolução” das unidades, Kula assinala que, primitivamente, foram usadas partes do corpo humano para medir os objetos, tendo ocorrido uma significativa mudança com a transição de conceitos **concretos** (particulares) para **abstratos** (gerais): do particular “meu dedo” para o geral “o dedo” (KULA, 1986, p. 24-25). A gravura de Jakob Köbel (1460-1533), reproduzida na figura 1, ilustra o processo de padronização da unidade de comprimento “pé”, no século XVI, baseada na medição dos pés de dezesseis homens “após a

missa”². Ainda mais significativa, sem dúvida, foi a transição para um sistema de unidades “independente” do homem, cuja referência era a circunferência da terra, representada pela criação do sistema métrico francês no final século XVIII, do qual tratamos mais à frente.

Figura 1 – Padronização da unidade de comprimento pé (*feet*) no século XVI



Fonte: Jakob Köbel - *Geometrei. Von künstlichem Feldmessen und absehen* (publicada primeiramente em 1535 ou 1536, reimpressa em 1608).³

Segundo a interpretação bíblica do historiador judeu Flavius Josephus (37 – c. 100 d.C.), Caim, o filho amaldiçoado de Adão, teria sido o inventor do sistema de pesos e medidas: uma inovação que teria mudado o mundo de “inocente e nobre simplicidade” para um mundo “para sempre cheio de desonestidade” (KULA, 1986, p. 3; CREASE, 2013, p. 25, 256). Segundo essa interpretação, a instituição de um sistema, por si só, significa que não podemos simplesmente confiar uns nos outros, precisamos de uma terceira parte para arbitrar nossas negociações. Ainda por cima, o sistema pode ser usado para **enviesar** as relações. De fato, sistemas de medição nem sempre primam pela simplicidade, nem estão isentos de fraude. Porém, o objetivo de instituí-los é fornecer **equilíbrio** entre as partes, justiça nas relações comerciais. Na verdade, de uma forma geral, o esforço para empregar um sistema coerente para medições está associado à honestidade e à justiça e, por isso, a deusa da justiça

² Pode-se indagar: por que as medições dos pés dos dezesseis homens foram feitas “após a missa”? Aspectos religiosos à parte, podemos supor que a participação desses homens na mesma atividade, que exige as mesmas posturas corporais, garante certa homogeneidade nos comprimentos de seus pés.

³ Domínio público: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=21198693>

é representada segurando uma balança. Muito cedo na história, encontra-se a “justa medida” como símbolo da justiça de um modo geral (KULA, 1984, p. 9).

Da mesma forma, as raízes etimológicas do termo “medida” apontam para um sentido subjetivo de “avaliação sábia” (embora também haja um sentido etimológico objetivo de “mês”) (MARI, 2003, p. 19-20). Para evitar que os cidadãos tirem proveito particular do sistema de medição, costuma ser uma atribuição da **autoridade política** o estabelecimento do sistema e a custódia dos padrões. Isso porque, devido à influência que as unidades podem ter nas relações entre os indivíduos e entre classes sociais, a escolha dos padrões pode favorecer certos grupos ou indivíduos (KULA, 1984, p. 17-18). A ambiguidade no modo de compreender o sistema de pesos e medidas, ora visto como fonte de conflitos, ora como princípio harmonizador, tende a persistir no papel regulador das relações entre agentes econômicos que o sistema desempenha. Além das funções relacionadas ao comércio e à indústria, o sistema é hoje em dia de fundamental importância para as medições científicas de uma forma geral.

Para que os **padrões de unidades** tenham sucesso em seu emprego não devem ser escolhidos arbitrariamente. O filósofo e historiador da ciência inglês Robert Crease, em seu livro sobre a evolução dos sistemas de medição, *A medida do mundo*, menciona três propriedades que a unidade deve ter: **acessibilidade**, **adequação aos propósitos** e **consistência** (no sentido de ser segura e confiável) (CREASE, 2013, p. 13-14). Os cidadãos que usarão a unidade de medida devem ter fácil acesso ao seu valor para poder empregá-lo, devem poder usá-lo com praticidade em sua rotina e devem poder confiar em sua aplicação. Alguns padrões, como as sementes e os grãos que foram empregados em certas culturas, podem variar seu peso e seu comprimento dependendo da estação do ano, o que gerava insegurança no seu emprego (CREASE, 2013, p. 13). A ciência que estuda as medições e suas aplicações é denominada **metrologia** (INMETRO, 2012b, def. 2.2).

1.1.1.2 A criação do sistema métrico

Segundo José Luciano Dias, em *Medida, Normalização e Qualidade – Aspectos da história da metrologia no Brasil* (1998), “[N]ão é exagerado afirmar que, sob o impressionante número de pesos e medidas em uso até o início do século XIX, vemos a existência de sistemas de medidas específicos para cada tipo de atividade econômica e mesmo para cada região geográfica” (DIAS, 1998, p. 13). A diversidade de sistemas de unidades empregados em diferentes locais e épocas ao longo da história vem diminuindo a partir da criação do **sistema**

métrico. Desde sua concepção, o sistema já se propunha a servir para “todos os tempos” e “todos os povos” (CREASE, 2013, 89). O uso de um único sistema coerente e confiável exerce um papel decisivo para as ciências, funcionando como uma espécie de língua comum das ciências (QUINN, 2007, p. 59; WILLIAMS, 2014, p. 8-1 a 8-6). Sua criação só foi possível devido à mentalidade promovida pelas ciências modernas de que as grandezas deviam ter um caráter universal, podendo ser medidas da mesma forma em todos os tempos e lugares.

Juntamente com os ideais universalizantes das ciências empíricas modernas, também colaboraram para o espírito do sistema métrico a ideia dos direitos universais dos cidadãos, promovida pela Revolução Francesa, e a busca pela uniformidade das mercadorias. Tal uniformidade (“alienação” das mercadorias, nas palavras de Kula) interessava às forças econômicas do capitalismo emergente, uma vez que tornavam as mercadorias mais aptas ao comércio internacional (CREASE, 2013, p. 71-72; KULA, 1984, p. 121-123; WILLIAMS, 2014, p. 2-5 a 2-6). Sem dúvida, ainda hoje (principalmente em face da globalização), a uniformização as mercadorias é uma das razões que embasam investimentos para a melhoria do sistema.

A **história da criação do sistema métrico** está eivada de jornadas épicas e ações políticas e científicas ousadas. Basta dizer que a elaboração de suas bases científicas aconteceu durante os tempos agitados da Revolução Francesa, boa parte, inclusive, durante o período do “Terror”. O sistema foi concebido para se basear na unidade da grandeza comprimento, o metro, e esse, para apresentar universalidade, deveria se desfazer das referências antropomórficas e tomar o globo terrestre como referência. A metodologia que vingou (após a consideração de alternativas, como o uso do pêndulo) foi padronizar o metro como a décima milionésima parte (1/10.000.000) do trecho do meridiano terrestre que vai do polo norte até a linha do equador, tendo o meridiano que passa por Paris como referência. Esse trecho do meridiano já havia sido medido algumas vezes por astrônomos, mas a comissão criada pelo governo francês para forjar o sistema decidiu que novas medições deveriam ser feitas com as técnicas de melhor exatidão disponíveis. A unidade de massas, o quilograma⁴, seria padronizado a partir do metro, como a massa de água que ocupa um volume de 1 dm³ (ou seja, 1 litro).

⁴ Usamos aqui a grafia adotada pela tradução brasileira do VIM3 e em outros documentos metrológicos brasileiros. Cabe ressaltar no entanto que, para os dicionários da língua portuguesa, a grafia correta é quilograma.

Assim, em 1791, os astrônomos e agrimensores franceses Pierre François-André Merchain (1744–1804) e Jean-Baptiste Delambre (1749–1822) foram designados pelo rei Luís XVI (que ainda reinava, mas cuja prisão havia sido decretada pelos revolucionários) para a missão de medir o trecho do meridiano parisiense que vai de Dunquerque até Barcelona. A difícil empreitada, cheia de percalços políticos e dificuldades econômicas, levou mais de seis anos para ser concluída (de maio de 1792 a setembro de 1798). A partir das medições realizadas do meridiano parisiense foi confeccionada uma barra metálica de platina para funcionar como **protótipo-padrão do metro**. Em 1799, o padrão foi oficialmente apresentado para a legislatura francesa e adotado como padrão nacional francês. Ao ganhar esse status, o padrão passou a ser devidamente protegido, ficando conhecido como “Metro dos arquivos”. Algumas réplicas metálicas também foram confeccionadas para serem colocadas em diferentes pontos de Paris, ao alcance dos cidadãos (CREASE, 2013, p. 73-87; WILLIAMS, 2014, p. 3-4 a 3-19).

Uma vez que desde o início do projeto a ideia era criar um sistema universal, o governo francês convidou representantes de outros países para participarem do processo científico de estabelecimento e confecção dos padrões. Após a adoção pela França, o governo revolucionário empenhou grande esforço diplomático para que o sistema fosse internacionalizado. Fruto desse esforço, a **Convenção do Metro** foi realizada em Paris, em 20 de maio de 1875 e seu relatório assinado por representantes de dezessete países, inclusive o Brasil. Como desdobramento do acordo internacional, novos protótipos-padrão do metro e do kilograma foram confeccionados com uma liga metálica de platina (90 %) com irídio, bem como foram encomendadas cópias desses protótipos para serem entregues aos representantes dos países signatários. A Convenção criou também uma estrutura organizacional permanente para discutir e implementar atividades relacionadas à padronização de pesos e medidas. Três corpos institucionais permanecem até os dias de hoje como as principais instituições da rede metrológica internacional: a Conferência Geral de Pesos e Medidas (CGPM), o Comitê Internacional de Pesos e Medidas (CIPM) e o Bureau Internacional de Pesos e Medidas (BIPM).

A CGPM é a organização diplomática responsável pela manutenção e evolução do sistema métrico, composta por delegados dos países signatários da Convenção, que se reúnem na sede do BIPM a cada quatro anos. Ao CIPM, composto por dezoito membros que se reúnem anualmente, cabe, além de considerar as propostas dos seus comitês consultivos, discutir as atividades do BIPM e preparar relatórios para serem submetidos à CGPM. As

tarefas técnicas ficam por conta do BIPM⁵, cuja missão principal é trabalhar junto com os Institutos Nacionais de Metrologia (INM) dos estados-membros da Convenção para promover a “compatibilidade global das medições”. Sua sede em Sèvres, na periferia de Paris, mas considerada território internacional, possui laboratórios para a pesquisa metrológica de padrões primários em diversas áreas das medições e dedica-se à guarda de protótipos de padrões históricos.

Uma discussão aprofundada da estrutura metrológica internacional pode ser encontrada na tese de Rafael Vaz defendida no PPGFIL/UERJ em 2017 (VAZ, 2017, seção 1.7.1). A já citada obra de José Luciano Dias fornece uma história detalhada da criação do sistema métrico e da Convenção do metro, em especial da participação brasileira nessa história (DIAS, 1998). O INM brasileiro é o Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO), cuja sede se situa no município de Duque de Caxias, RJ.

O sistema adotado pela Convenção baseava-se no sistema métrico francês original. Os novo protótipos-padrão do metro e do quilograma foram guardados e protegidos na sede do BIPM em Sèvres. Ao longo do tempo, o sistema métrico passou por diversas redefinições e teve novas unidades de base incorporadas. Da mesma forma, a aceitação do sistema foi um processo paulatino que recebeu a adesão de novos estados conforme sua estrutura foi se mostrando robusta.

Somente em 1960 foi criado o Sistema Internacional de Unidades⁶ (SI) com seis unidades de base: além do **metro** (*m*) e do **kilograma** (kg), fazem parte do SI o **segundo** (s), para a grandeza tempo, o **ampere** (A), para corrente elétrica, o **kelvin** (K), para temperatura termodinâmica e o **candela** (cd), para intensidade luminosa. Em 1971, foi incluída a unidade **mol** para a grandeza quantidade de matéria, completando as sete unidades de base que fazem parte do atual SI. Combinando-se as unidades de base, chega-se às **unidades derivadas** para todas as demais grandezas físicas (QUINN, 2017, p. 15).

1.1.2 Conceitos básicos e a evolução do sistema métrico no século XX

Algumas distinções conceituais precisam ser esclarecidas para seguirmos adiante. Para minimizar os problemas causados pela compreensão diversificada dos conceitos com os quais trabalha, a metrologia, por meio de suas instituições internacionais, notadamente, por meio do

⁵ Website: <https://www.bipm.org/en/about-us/>.

⁶ O SI é baseado no Sistema Internacional de Grandezas (ISQ), fundamentado nas sete grandezas de base (INMETRO, 2012B, 1.16).

BIPM, recorre à publicação de documentos que buscam sistematizar de modo coerente sua estrutura conceitual. Fala-se em **harmonização** dos conceitos para se referir ao emprego pela comunidade metrológica desses conceitos de modo comum, isto é, empregando-os com o mesmo sentido. Vamos, a seguir, apresentar os documentos a que nos referimos e comentar os significados de alguns conceitos básicos empregados neste trabalho. Muitos desses conceitos serão discutidos de forma mais aprofundada ao longo da tese. A apresentação que fazemos aqui desses conceitos é, em geral, de objetivo apenas introdutório.

1.1.2.1 Documentos do JCGM, grandeza, unidade e padronização

Dentre os principais documentos que visam a coerência e a harmonização dos conceitos, destacamos duas publicações às quais faremos referência com muita frequência ao longo da tese. A primeira é aquela que já mencionamos na introdução, que constitui a referência central para nossa discussão: trata-se do volume intitulado *Avaliação de dados de medição* – Guia para a expressão de incerteza de medição (**GUM**). Como guia metrológico editado pela comissão formada por oito instituições⁷ e lideradas pelo BIPM, denominada *Joint Committee for Guides in Metrology* (JCGM), sua codificação é JCGM 100: 2008, mas, preferencialmente, faremos referência à edição de 2012 da tradução brasileira (INMETRO, 2012a). Além de apresentar definições de termos relacionados à incerteza de medição, o GUM fornece metodologias para estimar a incerteza de processos de medição e discute questões correlatas. Atualmente, o GUM possui quatro suplementos, mas nosso foco nesse trabalho recai sobre a metodologia básica apresentada no guia propriamente dito. Ao longo da tese, tecemos comentários pontuais sobre os suplementos apenas quando o assunto em questão os implica.

Como a metrologia é uma ciência interdisciplinar, a coesão terminológica, embora muito difícil de ser alcançada, precisa ser perseguida, ao menos em relação aos termos básicos. Com essa intenção, o BIPM publicou em 1984, o *Vocabulário Internacional de Metrologia* (**VIM**) – Conceitos básicos e gerais e termos associados, cuja edição chamamos de VIM1. O VIM é a segunda publicação oficial da metrologia que mencionamos acima. Duas outras edições foram publicadas pela JCGM em 1993 (VIM2) e em 2007 (VIM3), sendo

⁷ As instituições que compõem o JCGM são BIPM, IEC (Comissão Internacional de Eletrotécnica), IFCC (Federação Internacional de Química Clínica e Medicina Laboratorial), ILAC (Cooperação Internacional de Acreditação de Laboratórios), ISO (Organização Internacional de Normatização), IUPAC (União Internacional de Química Pura e Aplicada), IUPAP (União Internacional de Física Pura e Aplicada) e OIML (Organização Internacional de Metrologia Legal).

que essa última foi republicada em 2012 com pequenas alterações, com o código JCGM 200: 2012. A versão que fazemos referência com mais frequência nesta tese é a primeira edição luso-brasileira do VIM3 (INMETRO, 2012b).

Vejamos, primeiramente os conceitos basilares de grandeza, unidade de medida e padronização. Chamamos de **grandeza** a propriedade que pode ser submetida à quantificação⁸. No VIM3, grandeza é definida como a “propriedade dum fenômeno, dum corpo ou duma substância, que pode ser expressa quantitativamente sob a forma dum número e duma referência”. A **unidade de medida** é a referência que se expressa juntamente com o número, ela é uma “grandeza escalar real, definida e adotada por convenção, com a qual qualquer outra grandeza da mesma natureza pode ser comparada para expressar, na forma dum número, a razão entre as duas grandezas” (INMETRO, 2012b, def. 1.1 e 1.9). O comprimento de uma mesa e o comprimento de onda de uma radiação são grandezas do mesmo **tipo** e, portanto, podem ser expressas na mesma unidade.

A partir de sua definição, a unidade de medida tem que ser **realizada**, isto é, seu valor deve ser obtido através de uma operação **experimental**. A realização se dá pelo emprego de um objeto exemplar (um protótipo-padrão) ou de um procedimento de medição padrão. Em *Defining and measuring nature* (2014), o físico e metrologista Jeffrey Williams chama atenção para a distinção entre unidade de base e protótipo metrológico ou medição padrão:

Uma unidade de base é fixada por sua definição [...] e é independente das condições físicas, tal como temperatura. Por contraste, um protótipo metrológico ou uma medição padrão é um objeto físico que pode ser estudado num laboratório; ele é a realização física da unidade de base e realiza aquela unidade de base somente sob certas condições físicas. Por exemplo, o metro é uma unidade, enquanto uma barra de comprimento de um metro é uma medição padrão. Um metro é o mesmo comprimento independente da temperatura, mas a barra de metal terá um metro de comprimento somente sob certa temperatura precisa, devido à expansão (WILLIAMS, 2014, p. 7-7 a 7-8).

As grandezas podem ser medidas por **procedimento primário** ou lançar mão de **padrão do mesmo tipo de grandeza**. Um **procedimento de medição primário** é aquele que **não** emprega padrões “de uma grandeza do mesmo tipo” (INMETRO, 2012b, 2.8), ou seja, só pode empregar padrões que não sejam do mesmo tipo da grandeza que se pretende medir. Se vamos medir o comprimento de um objeto por um procedimento primário, podemos empregar um padrão para a medição da temperatura (que afeta o comprimento a ser medido), mas não podemos empregar um padrão da grandeza comprimento. O padrão estabelecido com o

⁸ Uma vez que dirigimos o foco desta tese para grandezas físicas, associamos diretamente grandeza a quantificação que permite cálculos matemáticos com as variáveis envolvidas.

auxílio de um procedimento primário é denominado **padrão primário**. Quando usamos o padrão primário para calibrar outros padrões esses são denominados padrões secundários. Grandezas compostas a partir das sete grandezas básicas (que compõem o Sistema Internacional de Grandezas) são denominadas de **grandezas derivadas**.

Ao realizar a medição primária de uma grandeza, cria-se **padrões** para medições subsequentes de grandezas do mesmo tipo. Tais padrões podem ser instrumentos de medição, medidas materializadas (por exemplo, um peso-padrão) ou materiais de referência (por exemplo, uma substância química com alto grau de pureza). Em função da sua importância e de seu caráter peculiar, os padrões guardam uma posição de destaque na metrologia. Todas as grandezas derivadas precisam de padrões (de diferentes níveis) para que o sistema metrológico possa cumprir o seu papel em diversas áreas, isto é, para que as medições das grandezas de todas as áreas possam ser disseminadas.

Outro termo importante no vocabulário metrológico é o de **mensurando**, que significa a “grandeza que se pretende (*intended*) medir” (INMETRO, 2012b, def. 2.3). Em nota, o VIM esclarece que “a especificação do mensurando requer o conhecimento da natureza da grandeza e a descrição do estado do fenômeno, do corpo ou da substância da qual a grandeza é uma propriedade [...]” (INMETRO, 2012b, def. 2.3, nota 1). Ao se referir à **intenção** de medir a grandeza em foco, a definição reconhece que essa intenção pode não ser completamente alcançada. Ou seja, no processo experimental, nem sempre se consegue fazer com que o instrumento de medição interaja exclusivamente com o mensurando (MARI, 2015, p. 74-5). Além disso, a definição do mensurando não tem como ser completa, fazendo com que a grandeza efetivamente medida possa não corresponder exatamente àquela que se pretende medir. Em função dessa limitação, fala-se, como veremos mais adiante, de uma incerteza definicional ou intrínseca, como a menor incerteza a que um mensurando está sujeito devido à limitação em sua definição.

1.1.2.2 A qualidade da medição

É de fundamental importância que a **qualidade** de uma medição seja conhecida. A **confiança** que se pode depositar no valor medido de uma grandeza é dependente de sua qualidade e o conhecimento dessa qualidade orienta o futuro emprego do resultado. Uma maneira tradicional, mas em desuso, de expressar a qualidade é através do erro de medição. O VIM3 define **erro de medição** como a “[D]iferença entre o valor medido de uma grandeza e um valor de referência” (INMETRO, 2012b, 2.16). Dessa forma, um erro de medição é

sempre **a mais** ou **a menos** que o valor de referência, ou seja, **possui um sinal positivo ou negativo**. Nas situações em que um valor de referência está disponível (por exemplo, quando se emprega um padrão de medição numa calibração⁹), pode-se conhecer o erro de medição. Entretanto, em muitas situações, um valor de referência não está disponível e, nesses casos, o erro de medição não é conhecido. É a situação em que se pretende referenciar o erro de medição ao valor verdadeiro do mensurando, supostamente único “ou um conjunto de valores verdadeiros de amplitude desprezível” (INMETRO, 2012b, 2.16 Nota 1.b). Justamente devido a essa limitação o erro de medição perdeu proeminência dentro da estrutura conceitual da metrologia.

Uma vez que a medição é uma atividade empírico-experimental¹⁰ está sujeita a erros que fazem com que o resultado da medição não seja absolutamente exato. São muitas as **fontes de erro** que podem afetar os resultados das medições, como a **variabilidade** dos dados obtidos pela observação durante o processo de medição e os valores **aproximados** de constantes e variáveis empregados. Os erros são classificados em aleatórios (que variam aleatoriamente) e sistemáticos (constantes). É importante distinguir entre **os erros** que afetam as medições (aleatórios e sistemáticos) e **o erro de medição** discutido no parágrafo acima. Os erros que afetam as medições contribuem para o erro de medição, mas não podem ser conhecidos exatamente. Por outro lado, é possível estimar as contribuições dos erros como **fontes de incerteza** que afetam o resultado da medição. Ao fazer a estimativa das incertezas de um procedimento de medição e “combinar” suas contribuições, obtemos um valor global que se denomina **incerteza de medição**.

O valor da incerteza pode afetar **para mais ou para menos** o resultado (valor médio obtido) da medição, por isso ele fornece uma **faixa de valores** em torno do valor médio que melhor representa o resultado da medição. A definição dada para o conceito de incerteza de medição no VIM3, em consonância com a abordagem do GUM, é: “[P]arâmetro não negativo que caracteriza a dispersão dos valores atribuídos a um mensurando, com base nas informações utilizadas” (INMETRO, 2012b, 2.26). A incerteza de medição é uma forma de **estimar**, quantitativamente, a qualidade da medição: quanto menor a incerteza, melhor a

⁹ Discutimos o conceito de calibração mais adiante nesta mesma subseção.

¹⁰ Assimilamos os termos empírico e experimental para falar de atividades que envolvem intervenções no mundo físico, material, e que, no contexto desta tese, contrastam com atividades puramente teóricas. Deve-se observar, entretanto, que as atividades experimentais nas ciências físicas são realizadas, em geral, com base em teorias científicas. Assim, a atividade empírico-experimental ocorre com a intervenção num sistema físico, mas envolve também a dimensão teórica. A associação entre o empírico e o experimental visa concentrar o foco da investigação desta tese em questões relacionadas ao aspecto experimental da medição, ao invés de problematizar o conceito de observação. Essa associação reaparece em diversas passagens ao longo da tese.

medição. Dizendo de outra maneira: **a incerteza quantifica** (aproximadamente) **a qualidade da medição**.

A dispersão de valores dada pela incerteza significa que o resultado da medição **não** é um valor único, mas um conjunto de valores consistentes com o procedimento e as informações empregadas na medição. Os valores atribuídos ao mensurando dispersam-se em torno da média, constituindo, como dissemos, uma margem acima e abaixo do valor médio. Por exemplo, quando expressamos o resultado da medição do comprimento de um objeto como $10,5 \pm 0,2$ m, o parâmetro que constitui a incerteza é 0,2 m e os valores que podem ser atribuídos ao mensurando vão de 10,3 a 10,7 m. Em contraste com o erro de medição que possui sinal positivo **ou** negativo, a incerteza é um parâmetro com valor positivo mas que admite o sinal “±” para expressar o intervalo de valores que representa o resultado da medição.

De fato, o VIM3 define **resultado de medição** como o “[C]onjunto de valores atribuídos a um mensurando, juntamente com toda outra informação pertinente disponível” (INMETRO, 2012b, 2.9). Na nota 2 dessa definição, o vocabulário esclarece que geralmente o resultado é expresso por um **valor medido** e uma **incerteza de medição**¹¹. A **indicação**, que é o valor fornecido pelo instrumento ou pelo sistema de medição (INMETRO, 2012b, 4.1), em geral, não é ainda o valor medido, pois esse valor depende de cálculos baseados nos modelos matemático e estatístico. Sobretudo, a indicação não deve ser confundida com o resultado de medição que compreende o valor medido e a incerteza.

O conceito de incerteza de medição foi adotado pela metrologia com a publicação do GUM (1993) e, na terceira edição do VIM (2007), os termos metrológicos foram ajustados para torná-los coerentes com o espírito do GUM. Segundo os próprios documentos, esse ajuste constitui uma mudança da tradicional abordagem de erro de medição para a abordagem de incerteza. Nesse contexto, a incerteza passou a ser recomendada como a principal maneira de expressar, de forma quantitativa, a qualidade de uma medição. Vejamos, a seguir, outros conceitos que são empregados para falar sobre aspectos relacionados à qualidade da medição.

Precisão de medição é o “[G]rau de concordância entre indicações ou valores medidos, obtidos por medições repetidas no mesmo objeto ou em objetos similares, sob condições especificadas” (INMETRO, 2012b, 2.15). As condições especificadas são as (i) de

¹¹ A nota prossegue ponderando que se a incerteza for considerada “desprezável para alguma finalidade, o resultado de medição pode ser expresso como um único valor medido” e que “[E]m muitos domínios, esta é a maneira mais comum de expressar um resultado de medição” (INMETRO, 2012b, 2.9, nota 2). Cabe ressaltar que a expressão da qualidade da medição é usualmente exigida nas medições científicas.

repetibilidade (os mesmos procedimento, operador, sistema de medição, condições de operação, local e objeto ou em objetos similares, durante um curto período de tempo); (ii) de **precisão intermediária** (os mesmos procedimento de medição, local e objeto ou em objetos similares, ao longo de um período extenso de tempo); ou (iii) de **reprodutibilidade** (diferentes locais, operadores e sistemas de medição, mas no mesmo objeto ou em objetos similares) (INMETRO, 2012b, 2.20; 2.22; 2.24).

A precisão mede o **grau de consistência** entre medições repetidas sob condições especificadas. Ao relatar os conceitos estatísticos empregados e especificar as condições em que o grau de concordância foi avaliado, é possível expressar a precisão **quantitativamente**. Isto é, a precisão pode ser considerada uma grandeza para a qual atribuímos valores. A precisão avaliada sob condições de repetibilidade constitui uma estimativa do erro aleatório de um procedimento de medição. Algumas vezes o termo é empregado de modo genérico e pouco rigoroso para falar da qualidade de uma medição. Na tese, vamos empregar apenas no sentido do VIM3, a não ser quando aparece em citações, nas quais pode ter um significado menos técnico.

O termo **exatidão de medição** (*measurement accuracy*) também possui um sentido técnico: “Grau de concordância entre um valor medido e um valor verdadeiro dum mensurando” (INMETRO, 2012b, 2.13). Quanto menor o erro de medição, melhor a exatidão. O VIM3 ressalta que **a exatidão não é uma grandeza e a ela não pode ser atribuído um valor numérico**. Emprega-se o conceito para dizer que a medição possui boa exatidão ou possui melhor exatidão do que outra. Em nota, o VIM esclarece que algumas vezes a exatidão é associada ao “grau de concordância entre valores medidos que são atribuídos ao mensurando” (INMETRO, 2012b, 2.13, Nota 3). Isso significa que a exatidão se refere à qualidade da medição quando comparada com um valor verdadeiro ou com outros resultados de medição, mas que essa comparação não deve ser quantificada.

Entretanto, em relação a essa limitação, na proposta de revisão do VIM para uma nova edição (o futuro VIM4), cujo *draft* está disponível no site do BIPM, a exatidão poderá, em algumas situações, ser considerada uma **grandeza** e ser **quantificada**. Nessa nova definição, a exatidão deixa de se referir a “um valor verdadeiro” e passa ser o grau de concordância do valor medido com “um valor de referência do mensurando” (JCGM, 2021, 3.15).

Um outro conceito correlato é o de **classe de exatidão**, que expressa os requisitos metrológicos que instrumentos ou sistemas de medição atendem (INMETRO, 2012b, 4.25). Além dos sentidos técnicos dados pela definição 2.13 do VIM3 e pela nota da mesma definição, a literatura científica e filosófica emprega o termo exatidão (*accuracy*) em outros

sentidos (TAL, 2012, p. 29-33). No terceiro capítulo da tese (subseção 3.1.4.3), discutimos de modo mais aprofundado a questão dos **diversos sentidos da exatidão** e da qualidade de medição. Antecipamos aqui que estamos de acordo com os documentos da JCGM quanto à incerteza constituir o melhor índice da qualidade da medição.

Apesar disso, em vários momentos da tese, vamos empregar o termo “exatidão” ao invés do conceito de incerteza para nos referir à qualidade da medição. Justamente por não evocar, necessariamente, um sentido quantitativo, a exatidão expressa a qualidade da medição de **maneira genérica** e é extensivamente empregada para essa finalidade. Ademais, o termo é mais apropriado em algumas situações discursivas. Vamos falar de medições e de medidas **mais exatas** ou **menos exatas**, bem como de medições e de medidas com **melhor** ou **pior exatidão**. Em algumas situações vamos falar de **exatidão mais alta** ou **mais baixa**, mas, ainda assim, sem tratar o conceito como uma grandeza.

Alguns conceitos relacionados com as propriedades dos dispositivos de medição têm implicações sobre a qualidade da medição, serão mencionados em algumas passagens da tese e, por isso, os apresentamos aqui. A **resolução** é definida como a “[M]enor variação da grandeza medida que causa uma variação perceptível na indicação correspondente” (INMETRO, 2012b, 4.14). Obviamente, uma baixa resolução compromete a qualidade e aumenta a incerteza de medição. Quando se refere ao mostrador do instrumento de medição, a resolução é a “[M]enor diferença entre indicações mostradas que pode ser significativamente percebida (INMETRO, 2012b, 4.15). Num mostrador digital a resolução corresponde a uma unidade no dígito mais à direita, mas num mostrador analógico a resolução adotada depende da capacidade de percepção das indicações pelo operador do instrumento. Já a **sensibilidade** é definida como o “[Q]uociente entre a variação dum indicação dum sistema de medição e a variação correspondente do valor da grandeza medida” (INMETRO, 2012b, 4.12). Quanto maior a variação da indicação do sistema devido a determinada variação da grandeza, mais sensível o sistema. Para estimar a sensibilidade de um sistema, a variação da grandeza tem que ser bem maior que a resolução do dispositivo (cf. nota 2 da definição acima referida), caso contrário a sensibilidade será subestimada pela limitação da resolução.

A seguir, descrevemos brevemente um exemplo de aplicação de alguns conceitos metrológicos. Um laboratório de metrologia proficiente na medição e na calibração de uma grandeza deve possuir um sistema (ou instrumento) de medição calibrado que funcionará como seu padrão de referência. O certificado de calibração do instrumento pode ser expresso em termos de erro de medição, como a diferença nas respostas do instrumento calibrado e do padrão de referência da instituição que realizou a calibração. Ao fazer uma série de medições

repetidas nas mesmas condições, o laboratório poderá estimar a precisão de repetibilidade de seu instrumento analisando estatisticamente a dispersão dos valores obtidos¹². A precisão de intermediária poderá ser avaliada observando a resposta do instrumento ao longo do tempo, digamos, com medições realizadas uma vez por mês. Se o laboratório comparar os seus resultados com um sistema de outro laboratório considerado como referência da comparação, também poderá ser atribuído um erro de medição à diferença entre os valores obtidos pelos dois laboratórios. Todos esses dados (e mais alguns outros) serão usados para estimar a incerteza de todas as medições que o laboratório vier a realizar.

1.1.2.3 Rede e hierarquia metrológica

Um conceito metrológico importante é o de **calibração**: uma operação que, através de medições, estabelece a relação entre “os valores e as incertezas de medição fornecidos por padrões e as indicações correspondentes com as incertezas associadas” do instrumento sob calibração (INMETRO, 2012b, 2.39). Dessa forma, o instrumento calibrado tem suas indicações relacionadas com um padrão, o que fornece confiança nas medições daquele instrumento. O resultado da calibração deve ser expresso em um documento, geralmente denominado “certificado de calibração”, emitido pelo laboratório que realizou a operação. O certificado deve conter a relação entre as grandezas nas faixas em que foram medidas, as incertezas associadas às medições e informações complementares necessárias para a compreensão do documento. A calibração dos padrões, materiais de referência e instrumentos de medição mantêm os elementos da rede metrológica interligados de forma coerente. Tal rede desempenha um papel de relevo para assegurar medições exatas e confiáveis.

Pode-se dizer que a metrologia é parte de uma infraestrutura essencial para o mundo moderno que, no entanto, é “largamente invisível” para os cidadãos comuns (QUINN; KOVALEVSKY, 2004, p. 791; QUINN, 2017, p. 8). As atividades científicas dependem de medições cada vez mais exatas para seu desenvolvimento. Porém, o impacto da estrutura de padronização das medições, que desde seus primeiros passos na Antiguidade já tinha por objetivo promover a justiça no comércio, se faz notar, atualmente, muito além da ciência:

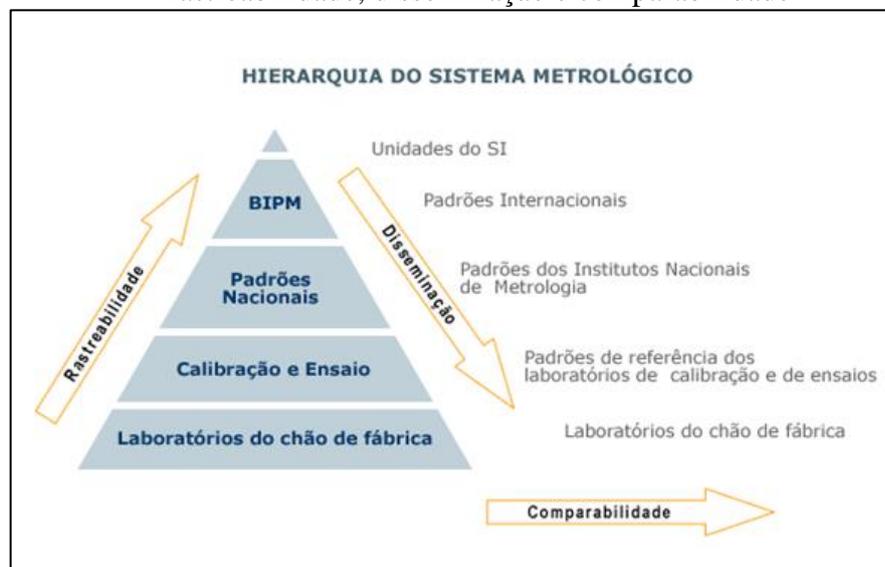
Nós precisamos dela [da metrologia] para a indústria de alta tecnologia, a saúde e segurança humanas, a proteção do meio ambiente, o estudo global do clima e a ciência básica que sustenta todas essas áreas. Medições altamente exatas não são

¹² As ferramentas estatísticas usadas para estas análises são discutidas no segundo capítulo, em especial na seção 2.3.

exclusivamente para a preservação das ciências físicas e engenharias: muitas áreas da química, biologia molecular e medicina são agora dependentes de medições quantitativas exatas. O comércio internacional de todos os produtos manufaturados e agrícolas é estritamente controlado por regulações que precisam de metrologia acurada para sua implementação (QUINN, 2017, p. 8).

Para que a padronização funcione a contento, a metrologia se baseia na **hierarquia** das instituições e dos padrões metrológicos, bem como nos conceitos de **rastreabilidade** e de **comparação** entre medições. A **rastreabilidade metrológica** é definida como a “propriedade dum resultado de medição pela qual tal resultado pode ser relacionado a uma referência através duma cadeia ininterrupta e documentada de calibrações, cada uma contribuindo para a incerteza de medição” (INMETRO, 2012b, 2.41). Isso significa que a cadeia de referências relaciona um resultado de medição a um padrão primário que realiza a medição da mesma grandeza, de acordo com sua definição. Conforme descemos na hierarquia metrológica, a **incerteza de medição** aumenta, uma vez que a medição (ou calibração) inferior incorpora a incerteza de medição do padrão frente ao qual foi medido (ou calibrado) mas também as **incertezas** inerentes ao seu processo de medição.

Figura 2 – Hierarquia do sistema metrológico e os conceitos de rastreabilidade, disseminação e comparabilidade



Fonte: INMETRO (<http://inmetro.gov.br/metcientifica/estrutura.asp>).

Padrões de mesmo nível metrológico, digamos de medições primárias realizadas em laboratórios nacionais, têm que ser **comparados** entre si. Nesse caso, também a incerteza de medição desempenha um papel fundamental: compara-se resultados de medições levando-se

em conta as respectivas incertezas, pois não se pode esperar a concordância “dígito a dígito” dos resultados. A figura 2 mostra como funciona a hier

arquia das instituições metrológicas. Toda medição deve estar rastreada a um padrão de nível hierárquico superior, que, em última instância, está rastreado às realizações primárias das unidades de base do SI. As instituições superiores têm a missão de **disseminar** as grandezas nas quais são proficientes. Num mesmo nível hierárquico as instituições devem comparar seus resultados de medição.

Vaz (2017), na tese acima referida, intitulada *Análise dos conceitos de confiabilidade e confiança na metrologia*, discute a importância dos conceitos que aparecem no título e esclarece a distinção entre eles. Enquanto a **confiabilidade** (*reliability*) se refere à esfera objetiva da rastreabilidade metrológica, a **confiança** (*trust*) e refere à esfera subjetiva da rede de instituições metrológicas:

A rastreabilidade metrológica é a representação metrológica da confiabilidade, uma vez que proporciona controle sobre disseminação e comparabilidade de dados entre diferentes contextos de aplicação. A confiança decorre da crença na capacidade técnica do ator. Sua **legitimidade** para a consecução dos processos de produção e disseminação de resultados de medição é institucionalizada. A legitimidade, no entanto, não está centrada em uma única rede ou ator: ela também é distribuída (VAZ, 2017, p. 106; grifo do autor).

Esses conceitos ajudam a compreender a complexidade do sistema metrológico internacional, que tem o objetivo de prover confiança nas medições e que se estrutura em forma de rede, cujos nós são ligados pela confiabilidade. Nesse contexto, a incerteza de medição, como índice de qualidade da medição, desempenha um papel primordial. Na citação acima, bem como ao longo da tese, Vaz ressalta o caráter institucionalizado da metrologia que visa garantir confiança e confiabilidade dos resultados. Para que o sistema possa funcionar a contento, é necessário que haja, em primeiro lugar, **coerência e harmonização** conceitual, o que se busca através da observação a normas, guias e outros documentos orientadores. Ao mesmo tempo, isso faz da metrologia um campo explicitamente problemático do ponto de vista conceitual, pois torna crítica a atenção aos conceitos metrológicos e incessante a discussão acerca desses.

Uma vez que o funcionamento regular do sistema depende da observação de boas práticas por parte de seus integrantes, foram criados organismos independentes para avaliar os laboratórios candidatos a participar oficialmente da rede metrológica internacional. O processo de avaliação dos laboratórios é denominado **acreditação** e os organismos que o

realizam são liderados pela *International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC)*¹³. A acreditação consiste na avaliação dos laboratórios para a realização das atividades metrológicas nas quais são proficientes. Baseada em normas, essa avaliação verifica se o laboratório possui competência para realizar as atividades nas quais pretende ser acreditado e se as realiza de modo imparcial. Aqui no Brasil, a avaliação dos laboratórios que pretendem integrar as redes brasileiras de calibração (RBC) e de ensaio (RBE) é de responsabilidade da Coordenação Geral de Acreditação (CGCRE), organismo vinculado ao INMETRO.

1.1.2.4 O novo SI

As definições do metro e do segundo foram sendo alteradas, ao longo do tempo, em função de novos conhecimentos proporcionados pelas pesquisas científicas. O protótipo-padrão do metro, guardado no BIPM em 1889, foi substituído em 1960 pela definição do metro baseada em fenômeno quântico e, em 1983, “se tornou a primeira unidade do SI a ser definida pelo valor numérico fixo de uma constante fundamental: a velocidade da luz”¹⁴. As definições das unidades de base não são totalmente independentes umas das outras: por exemplo, como mencionado acima, originalmente, o quilograma foi definido em função do metro.

A despeito da consistência e da exatidão alcançada pelo sistema metrológico internacional nas últimas décadas do século XX, alguns elementos do sistema apresentavam motivos para preocupação. O principal deles dizia respeito à única das sete unidades que ainda era baseada em um protótipo: a unidade de massa. As seis cópias do padrão de massa guardadas no BIPM apresentaram uma pequena deriva na verificação periódica de suas massas comparadas com o protótipo padrão de massa (conhecido por IPK). Apesar de as diferenças entre as massas serem de, no máximo, 60 μg (ou seja $6 \cdot 10^{-6} \%$), para fins metrológicos tal deriva representa uma instabilidade indesejada na padronização de unidades, comprometendo, assim, o método baseado em protótipos¹⁵. Ademais, as pesquisas recentes com as **constantes fundamentais da natureza** têm demonstrado sua alta estabilidade¹⁶ e, portanto, a possibilidade de empregá-las como base das

¹³ <https://ilac.org/> (acessado em janeiro de 2022).

¹⁴ <https://www.bipm.org/metrology/length/> (acessado em junho de 2019).

¹⁵ No site do BIPM estão disponíveis detalhes das verificações dos padrões desde 1889 e um gráfico onde se visualiza os resultados: <https://www.bipm.org/en/bipm/mass/ipk/#verifications> (acessado em março de 2021).

¹⁶ Inclusive (e principalmente) com as constantes elétricas presentes em efeitos Hall e Josephson, descobertos nas últimas décadas do século XX.

unidades (QUINN, 2017, p. 15-6). Essas condições fizeram renascer uma ideia esboçada por James Maxwell (1831-1879), em 1870, de empregar as constantes fundamentais como base para as unidades de medição (WILLIAMS, 2014, p. 11-4).

Assim, na 26ª reunião da CGPM realizada em 2018 foi aprovada a “introdução de uma nova abordagem para articular as definições das unidades em geral, e das sete unidades básicas em particular, pela fixação dos valores numéricos de sete constantes ‘definidoras’” (BIPM, 2019, p. 122). Dessa forma, todas as demais unidades seguem a mesma estratégia adotada de forma pioneira para o metro em 1983. A partir de valores medidos anteriormente em vários laboratórios ao redor do mundo, os valores das sete constantes que passaram a servir de fundamento para as unidades de base foram fixados de modo que não “dependem” de novas medições e possuem incerteza nula. Isso significa que seus valores passam a ser convenções, da mesma forma como antes o protótipo IPK era convencional. A definição de cada uma das sete unidades menciona apenas a constante fundamental a partir da qual a unidade pode ser realizada, não menciona protótipos, propriedades, métodos ou procedimentos de medição¹⁷.

As mudanças sancionadas pela reunião da CGPM de 2018 passaram a valer em 20 de maio de 2019, dia mundial da metrologia, em homenagem à data da Convenção do Metro em 1875. A ampla reformulação do sistema implementada em 2019 nos lembra que, embora seja instituído para dar estabilidade às medições, o sistema está em constante evolução¹⁸. Um aspecto importante dessa mudança é que ela coloca definitivamente a metrologia em sintonia com as tecnologias de ponta e com a física fundamental (CREASE, 2013, p. 252; WILLIAMS, 2014, 12-6 a 12-15). A nona edição da brochura do SI, que descreve o estado da arte do sistema, destaca pontos fundamentais da mudança:

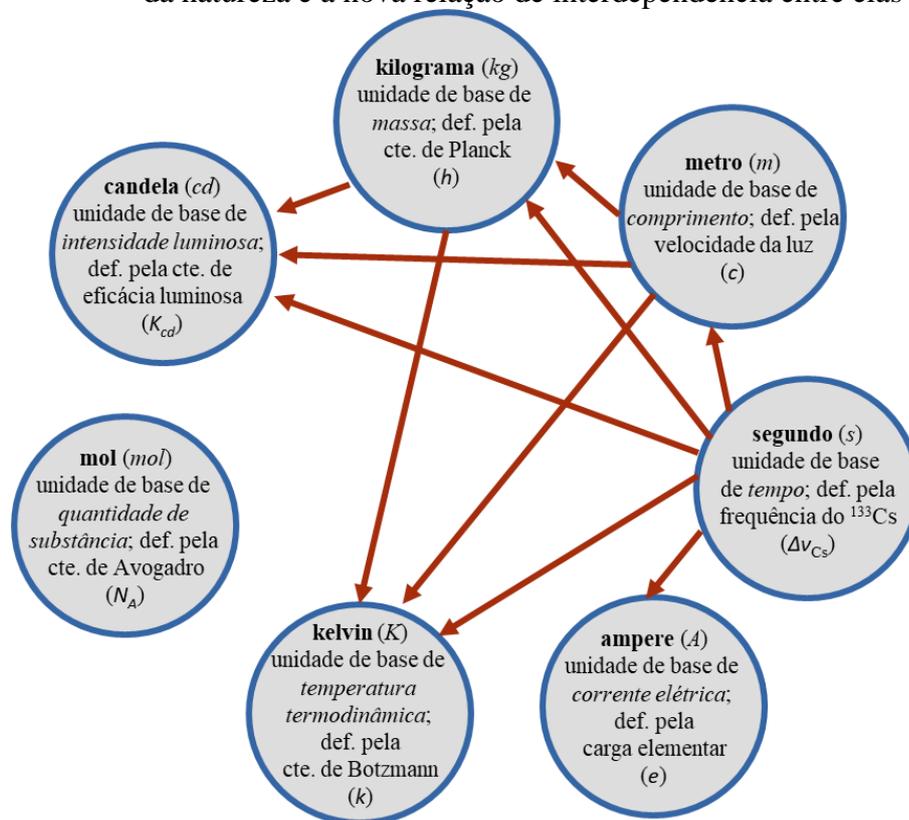
Pela primeira vez, um conjunto completo de definições está disponível que não faz referência a qualquer artefato padrão, propriedades de materiais ou descrições de medições. Essas mudanças proporcionam a realização de todas as unidades com uma exatidão que é em última instância limitada somente pela estrutura quântica da natureza e por nossas habilidades técnicas, mas não pelas definições em si mesmas. [...] Assim, essa redefinição marca um passo significativo e histórico à frente (BIPM, 2019, p. 122).

¹⁷ Para as unidades que dependem de outras unidades de base, estas últimas também são mencionadas. Por exemplo, a nova definição do quilograma é a seguinte: “O quilograma, símbolo kg, é a unidade de massa do SI. Ele é definido tomando-se o valor numérico fixo da constante de Planck h como sendo $6,626\ 070\ 15 \times 10^{-34}$ quando expresso na unidade J s, que é igual a $\text{kg m}^2 \text{s}^{-1}$, onde o metro e o segundo são definidos em termos de c e $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ (BIPM, 2019, p. 131).

¹⁸ Embora a alteração seja bastante significativa em termos conceituais e científicos, é preciso ressaltar que ela praticamente não altera os resultados das medições, o que preserva o objetivo do SI de fornecer estabilidade.

Com a nova estratégia, espera-se que as incertezas de realização das unidades sejam reduzidas e as que não puderem ser reduzidas devem ficar na mesma ordem de grandeza que se obtinha com as definições anteriores. A interdependência entre as sete unidades de base também muda: a partir das definições que constam na brochura do SI e no site do BIPM, construímos o diagrama da figura 3 que mostra a nova relação entre as unidades. Somente as unidades de tempo e de quantidade de substância não dependem de nenhuma outra.

Figura 3 – Definições das unidades de base, em vigor a partir de 20 de maio de 2019, tendo como referência constantes fundamentais da natureza e a nova relação de interdependência entre elas



Fonte: Adaptado de WILLIAMS, 2014, p. 12-7.

Na figura 4, reproduzimos representação esquemática do novo SI divulgada pelo BIPM. O sistema metrológico tem crescido e tem buscado incluir as novas fronteiras da nanociência, da biologia (biotecnologia) e das ciências sociais. Nas sociedades modernas, a tendência histórica das civilizações humanas para quantificar os fenômenos da natureza e os aspectos sociais de suas relações tomou o rumo da **institucionalização** e da abordagem **especializada**. O conceito de incerteza de medição desempenha um papel de destaque nas vias que a ciência metrológica trilhou nas últimas quatro décadas. Tendências desse tipo

demandam a atenção filosófica e crítica do processo e, por isso mesmo, novas abordagens filosóficas das medições têm ganhado relevo no cenário científico-filosófico internacional.

Nas três seções a seguir, buscamos compreender as características e o significado do processo de medição segundo três tipos de abordagens. Os estudos histórico-epistemológicos (seção 1.2) se baseiam na dinâmica histórica da ciência para problematizar o conceito de medição, a produção de conhecimentos envolvida e seu impacto nas ciências. As filosofias e teorias das medições elaboradas ao longo do século XX (seção 1.3) procuram definir o processo de medição, compreender seu significado e/ou formalizar logicamente o processo. As novas filosofias ou epistemologias das medições (1.4), produzidas nas décadas mais recentes, levam em conta tanto os estudos históricos, quanto as teorias lógico-matemáticas das medições, mas, sobretudo, buscam na metrologia os conceitos relativos às medições que permitam apreender o significado epistêmico do processo.

Figura 4 – Representação esquemática do novo SI



Legenda: O diagrama mostra o símbolo de cada uma das sete unidades básicas juntamente com o símbolo da constante fundamental na qual a definição de cada unidade se baseia.

Fonte: BIPM.

1.1.2.5 Grandezas da metrologia das radiações ionizantes

Em algumas passagens da tese, será necessário apresentar exemplos para ilustrar o uso dos conceitos. Por vezes, lançaremos mão de exemplos referentes a medições mais comuns, como de comprimento ou de temperatura. Em outras passagens, recorreremos a exemplos de grandezas da área da metrologia das radiações ionizantes. Isso porque temos experiência nessa área, mas também porque acreditamos que tais exemplos podem ser elucidativos. Nessa subseção, apresentamos algumas questões e conceitos da referida área para que os exemplos possam ser mais bem compreendidos. Como literatura técnica básica sobre as radiações

ionizantes, em português, sugerimos o livro das especialistas Emico Okuno e Elisabeth Yoshimura (2010) e a apostila escrita por pesquisadores do Instituto de Radioproteção e Dosimetria (IRD), liderados por Luiz Tauhata (TAUHATA *et al.*, 2013). Uma referência técnica mais aprofundada, muito empregada na área, é o livro do físico estadunidense Frank Attix (ATTIX, 2004). Indicamos também dois artigos sobre grandezas empregadas na subárea da proteção radiológica, com viés filosófico, para os quais colaboramos (DAVID; CORRÊA; VIDEIRA, 2019a, 2019b).

A necessidade de medição das radiações ionizantes surgiu assim que os fenômenos relacionados com os raios-X (1895) e com a radioatividade (1896) foram relatados e começaram a ser usados em aplicações na medicina. Hoje a metrologia assegura o uso eficaz e seguro das radiações¹⁹ em uma ampla faixa de atividades humanas, que vai da produção de energia elétrica ao tratamento do câncer. A principal característica das radiações ionizantes, estreitamente relacionada com os danos causados pelas radiações nos materiais com os quais interage, refere-se à transferência de energia do feixe de radiação para o material. Essa transferência se dá porque os átomos presentes no material são ionizados e desencadeiam uma série de fenômenos que resultam na deposição da energia (TAUHATA *et al.*, 2013, p. 77).

Atualmente, a principal grandeza para medir as radiações é a dose absorvida (D), em geral, expressa como dose absorvida na água (D_w), pois esse meio possui características semelhantes aos tecidos moles do corpo humano e é mais prático de ser empregado nas medições. A dose absorvida é definida para fins de medição como a energia média depositada por unidade de massa, sendo a sua unidade no SI o joule por quilograma (J/kg), que recebe o nome especial de gray (Gy) (OKUNO; YOSHIMURA, 2010, p. 186). Por fins de simplicidade, em termos de grandezas, vamos limitar nossa abordagem a D e focar na água como meio empregado para medição, ou seja, vamos tratar basicamente das medições de D_w . Pelo mesmo motivo, vamos privilegiar os métodos primários de medição de D_w para feixes de fótons do radionuclídeo cobalto de número de massa 60 (^{60}Co), que são usados como referência para calibração de câmaras de ionização empregadas na dosimetria de feixes empregados em teleterapia²⁰.

Os arranjos experimentais para medir D_w são constituídos por uma fonte de radiação, um sistema de posicionamento e colimação do feixe de radiação e uma “caixa” de PMMA²¹

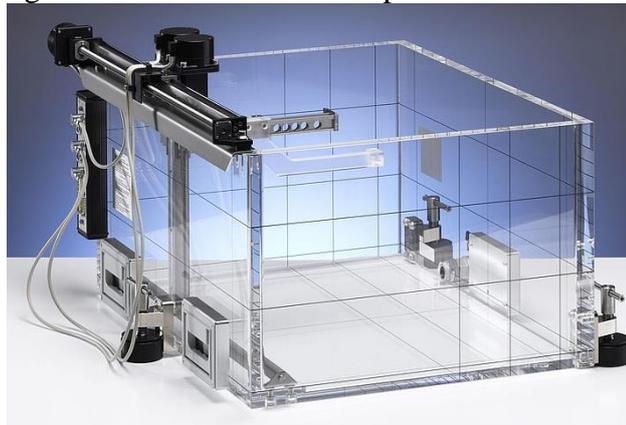
¹⁹ Nesta tese, o termo “radiações” será empregado para fazer referência às radiações ionizantes.

²⁰ A teleterapia é a radioterapia na qual a fonte de radiação permanece distante do corpo do paciente. A radioterapia que emprega fontes de radiação junto ao corpo ou no interior do corpo do paciente é denominada braquiterapia.

²¹ PMMA: sigla para poli(metilmetacrilato), um tipo de acrílico.

com água (denominada *phantom*) para reproduzir o meio no qual a dose de radiação será depositada e para posicionar o instrumento de medição da dose. Além de *phantoms* desse tipo, em algumas situações, também são empregados *phantoms* com a forma de partes do corpo humano, denominados antropomórficos. Para efeito ilustrativo, mostramos na figura 5 um *phantom* que é empregado na dosimetria de feixes de teleterapia ou na calibração de câmaras de ionização. Em geral, a janela do *phantom* é posicionada a 1,0 m da fonte de radiação.

Figura 5 – *Phantom* não antropomórfico



Nota: As paredes do *phantom* são de PMMA. Quando efetivamente empregado em dosimetrias de feixes de radiação, o *phantom* é preenchido com água.

Fonte: Catálogo da PTW Freiburg GmbH²².

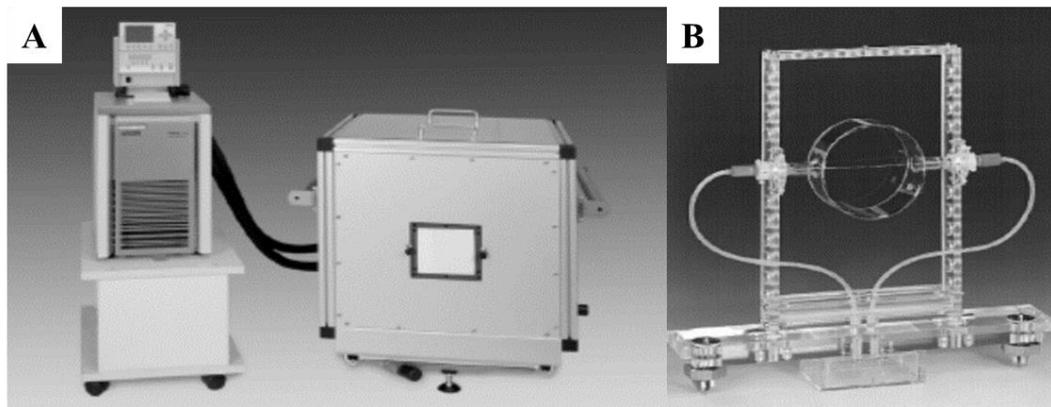
Há três métodos reconhecidos para determinar D_w de forma primária, quais sejam, por calorimetria, por ionometria e por dosimetria química Fricke. Por **calorimetria**, mede-se o aumento da temperatura no meio devido à transferência de energia do feixe de radiação. Como esse aumento de temperatura é muito baixo, da ordem de micro graus kelvin por gray de radiação, a medição da variação da temperatura tem que ser feita com alta exatidão (ATTIX, 2004, p. 427-8). Os calorímetros para essa finalidade são construídos com o núcleo de grafite (carbono) ou de água. Como a temperatura entorno do núcleo do calorímetro tem que ser mantida constante, o *phantom* onde o núcleo está inserido possui alto isolamento térmico e um rigoroso controle da temperatura, como se vê na figura 6.

Por **ionometria**, emprega-se uma **câmara de ionização** (CI), que contém uma cavidade, em geral preenchida por ar, com eletrodos aos quais é aplicada uma diferença de potencial elétrico. A CI é conectada a um medidor da corrente ou da carga elétrica formada pela ionização do ar que preenche a cavidade. Para o procedimento de medição primário, o

²² PTW The Dosimetry Company: <https://www.ptwdosimetry.com/en/>.

volume da cavidade tem que ser muito bem conhecido pois a intensidade do sinal é proporcional à massa de ar. Como a medição da corrente ou da carga elétrica produzidas são muito baixas, têm que ser medidas com ótima exatidão (ATTIX, 2004, p. 346-7). Em geral, as câmaras construídas para essa finalidade possuem paredes de grafite. Na figura 7, aparecem esquemas de câmaras de ionização para determinação primária de D_w e de arranjo experimental empregado nessa determinação.

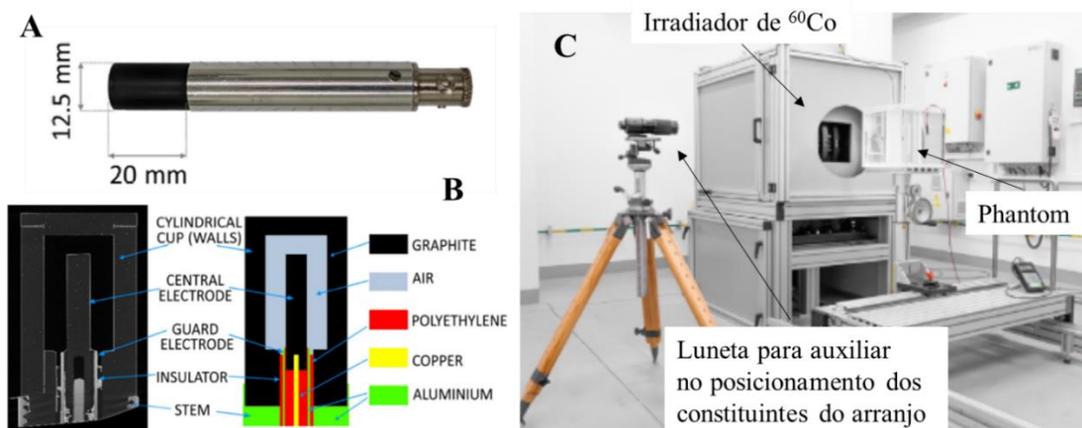
Figura 6 – Calorímetro de água para determinação de D_w



Legenda: A. Foto do calorímetro transportável de água com a unidade refrigeradora à esquerda. B. Foto do núcleo do calorímetro, isto é, da região onde o aumento de temperatura devido à deposição de energia é medido.

Fonte: KRAUSS *et al.*, 2012.

Figura 7 – Câmara de ionização e arranjo experimental para medição de D_w por ionometria

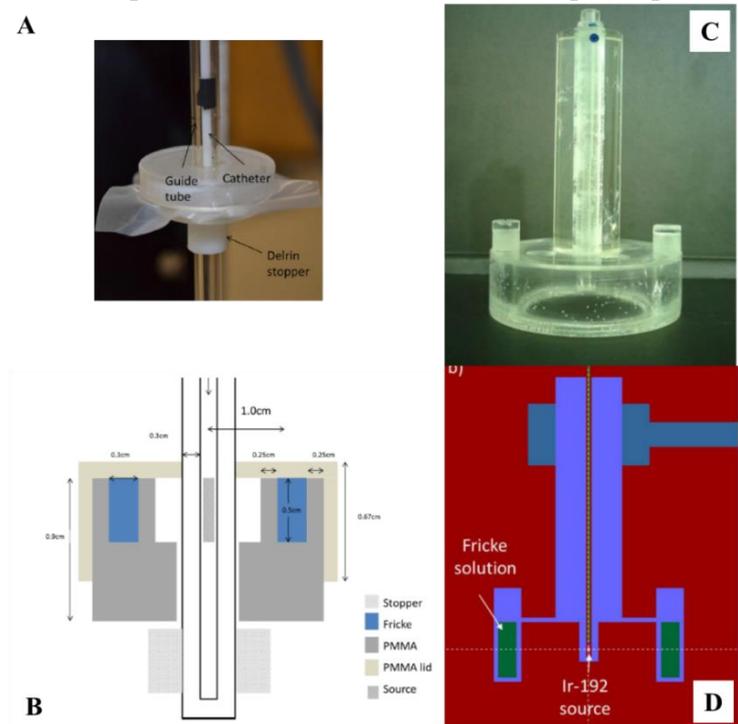


Legenda: A. Dimensões de uma câmara de ionização cilíndrica com paredes de grafite para determinação primária de D_w . B. Corte longitudinal da câmara mostrando os materiais que compõem a cavidade de interesse. C. Foto do arranjo experimental com o irradiador de ^{60}Co e o *phantom* com água, no interior do qual a câmara é posicionada para irradiação. À esquerda aparece uma luneta para auxiliar no posicionamento do *phantom* e da câmara dentro desse.

Fonte: SZIMKO; KNYZIAK; DERLACINSKI, 2022.

Na **dosimetria química Fricke**, que emprega uma solução ácida de íons ferrosos (Fe^{+2}), mede-se a quantidade de íons oxidados a Fe^{+3} (fêrricos) na solução devido a espécies oxidantes que a radiação produz. O aumento dos íons fêrricos é determinado por espectrofotometria, sendo que a dificuldade desse método reside no controle de contaminantes que possam interferir no processo de oxidação dos íons (ATTIX, 2004, p. 421-2). Como os métodos que usam calorímetro ou câmara de ionização proporcionam melhor precisão e exatidão, a dosimetria química não vem sendo empregada como método primário para feixes de ^{60}C , como o foi no passado. Além do uso como padrão secundário para várias aplicações, o método Fricke vêm sendo estudado para funcionar como procedimento primário em situações nas quais os outros métodos não exibem um bom desempenho (EL GAMAL *et al.*, 2015; SALATA *et al.*, 2018).

Figura 8 – Fotos e esquemas de frascos para suporte da solução Fricke empregados em estudos para o desenvolvimento de determinação primária de D_w para fontes de ^{192}Ir usadas em braquiterapia



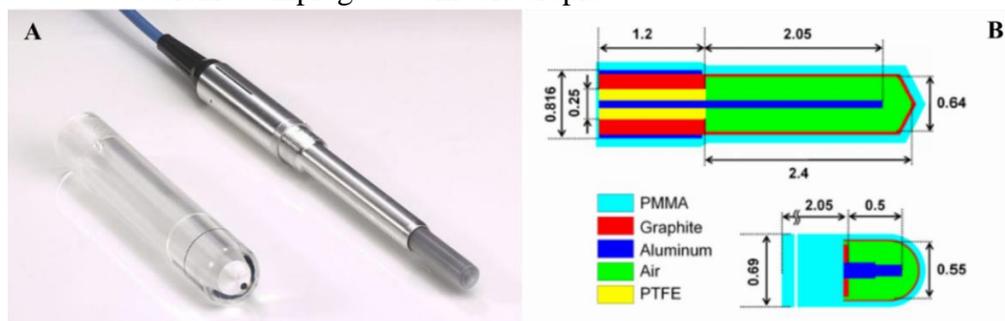
Legenda: A. Foto do frasco de paredes de PMMA desenvolvido pelo *National Research Council Canada* (NRC). B. Esquema do frasco do NRC. C. Foto do frasco de PMMA desenvolvido pelo LCR/UERJ, Brasil. D. Esquema do frasco do LCR. As figuras não estão em escala.

Fontes: EL GAMAL *et al.*, 2015; SALATA *et al.*, 2018.

Um exemplo desses estudos são pesquisas que buscam desenvolver metodologia para a determinação primária de D_w por dosimetria Fricke para fontes de ^{192}Ir empregadas em braquiterapia²³. Nesse caso, também são empregados *phantoms* preenchidos com água, mas o irradiador é uma fonte cilíndrica de pequenas dimensões. Essa fonte de radiação fica no centro do suporte da solução Fricke e a distância de referência do centro da fonte ao centro do dosímetro é de 1,0 cm. A figura 8 mostra fotos e esquemas de arranjos para determinação de D_w por dosimetria Fricke.

De nada serviriam as padronizações primárias de D_w se não fosse possível disseminar o valor dessa grandeza para os laboratórios secundários e, daí em diante, até as clínicas de radioterapia que empregam feixes de fótons para tratamento de diversos tipos de câncer. Essa disseminação é, em geral, feita pela calibração de câmaras de ionização fabricadas para essa finalidade. O design da câmara (formato, espessura e material das paredes etc.) depende do tipo de aplicação, principalmente da energia média do feixe de radiação. Na figura 9, estão representados uma foto e esquemas de câmaras de ionização empregadas para disseminar a grandeza D_w e, na figura 10, um croqui do arranjo experimental empregado para calibração de câmaras e para dosimetrias de feixes de radiação.

Figura 9 – Foto e esquema de câmaras de ionização tipo dedal usadas para a disseminação de D_w e para a medição dessa grandeza em dosimetria de feixes empregados em teleterapia



Legenda: A. Foto de uma câmara de ionização tipo dedal. B. Esquema com corte transversal de câmaras de ionização tipo dedal, indicando, entre outros componentes, a cavidade de ar, a parede da câmara e o eletrodo central.

Fonte: A: Catálogo da PTW Freiburg GmbH. B: WULFF; HEVERHAGEN; ZINK, 2008.

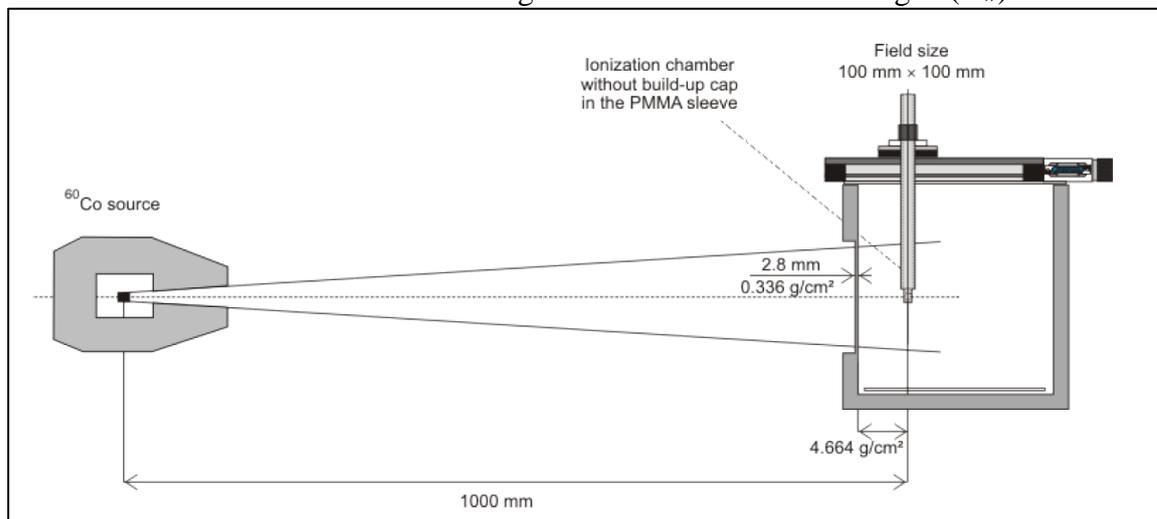
A possibilidade de medir D_w por métodos que empregam princípios físicos tão diferentes constitui uma das características que pretendemos explorar aqui. Outra característica interessante na medição das radiações é que os fenômenos que ocorrem na

²³ Braquiterapia é um tipo de radioterapia na qual a fonte de radiação é posicionada próxima ou no interior do corpo do paciente.

interação com os meios materiais são estocásticos, constituindo um desafio a mais para as atividades metrológicas. Além disso, os fenômenos envolvidos na interação da radiação com a matéria são, em sua grande maioria, fortemente dependentes da energia do feixe de radiação. Muitas vezes, como no caso da radiação emitidas por tubos de raios-X ou por alguns radioisótopos, o feixe de radiação primário contém um vasto espectro de energias. Mesmo quando o feixe primário é monoenergético, ao interagir com os meios materiais, são produzidas partículas eletricamente carregadas e fótons de diferentes energias.

No segundo capítulo, vamos apresentar as funções matemáticas empregadas nas medições primárias de D_w e o formalismo para a calibração de câmaras de ionização que são empregadas na disseminação da grandeza ao longo da rede metrológica. Devido à complexidade sempre presente nas medições das radiações, vamos discutir os problemas de forma **esquemática**, de modo a contribuir para a compreensão dos conceitos envolvidos, sem pretender abordar todas as questões envolvidas. Exemplificamos a aplicação de conceitos metrológicos na área ao longo da tese.

Figura 10 – Esquema do arranjo experimental de calibração de câmaras de ionização em feixes de ^{60}Co em termos da grandeza dose absorvida na água (D_w)



Legenda: À esquerda está representada a fonte de ^{60}Co blindada, mas com uma colimação que possibilita a emissão de um feixe de fótons com tamanho de campo de $100 \times 100 \text{ mm}^2$ a 1,0 m de distância do centro da fonte. À direita está representada a câmara de ionização inserida em um *phantom* de PMMA preenchido com água.

Fonte: Apêndice do certificado de calibração emitido pela IAEA, documento *DOLP.011: Appendix 3A*, de 28/08/2020.

1.2 Estudos histórico-epistemológicos

Nesta seção, vamos abordar textos que recorrem à **história das ciências** e à **prática da medição** para discutir o conceito de medição e suas implicações **epistemológicas**. Entendemos que os trabalhos que colocam a história das ciências no centro de suas referências iluminam aspectos fundamentais das medições que julgamos importante discutir aqui. Uma narrativa histórica que envolve aquele que é considerado o primeiro filósofo grego da antiguidade, Tales de Mileto, relaciona o nascimento da geometria com o emprego de uma técnica de medição. Nascido na colônia jônica de Mileto, no século VI a.C., Tales viajou ao Egito e, segundo o historiador Diógenes Laércio (séc. III d.C.), “mediu a altura das pirâmides pela sombra das mesmas, fazendo a medição na hora em que nossa própria sombra corresponde ao nosso tamanho” (LAËRTIOS, 1988, p. 19). Essa operação, ao mesmo tempo que possibilita a medição de objetos fora do nosso alcance, enseja o nascimento da ciência teórica da “geo-metria”. Tales transpôs os conhecimentos práticos da determinação da hora pelo relógio de sol (*gnômon*) para a medição de objetos de difícil alcance (a altura das pirâmides), criando assim a lei da semelhança de triângulos (SERRES, 1990, p. 39-40).

No ensaio “O que Tales viu aos pés da pirâmide?” (1972), o filósofo e historiador francês da ciência Michel Serres (1930-2019) ressalta que, na história de Tales, sobressai uma característica essencial da medição: a **comparação** entre duas “entidades”. O que é próprio do processo da medição é, desde sempre, a comparação com padrões de referência. Medir é, então, comparar, “**referir**” (SERRES, 1990, p. 39). Uma medida é sempre relativa à unidade de medida padronizada; simplesmente não tem como ser absoluta. Embora tal caráter seja notório, não é incomum encontrar menções a “medições absolutas” até mesmo em textos técnicos de metrologia. O relato da história da medição da altura das pirâmides egípcias por Tales reúne elementos que simbolizam as questões abordadas nesta seção da tese: recurso à **história das ciências**, ênfase nas **práticas** e preocupação com as questões **epistemológicas** envolvidas na medição. Mais do que desenvolver uma filosofia sistematizada dos problemas que envolvem as medições, os estudos histórico-epistemológicos enfocam **problemas específicos das medições** e sua relação com as demais instâncias das ciências. Mesmo que as obras de alguns autores aqui abordadas possam ser associadas a perspectivas filosóficas das ciências mais amplas, o interesse e a ênfase recaem, nessa seção, nas questões acima apontadas.

1.2.1 A filosofia do conhecimento aproximado de Bachelard

Tendo lecionado as disciplinas de física e de química, o filósofo francês Gaston Bachelard (1884-1962) levou para suas obras de filosofia das ciências reflexões baseadas na história dessas disciplinas, bem como aspectos teóricos e práticos destas. A originalidade de sua filosofia consiste exatamente em propor interpretações epistemológicas do progresso das ciências a partir dos processos históricos das ciências. O filósofo recorre à história para identificar como a produção do conhecimento e o progresso das ciências ocorrem. Por isso, seu estilo de investigação foi denominado de “**epistemologia histórica**” pelo filósofo francês Dominique Lecourt (1944-), na obra *L'Épistémologie historique de Gaston Bachelard* (1969).

A filósofa estadunidense Mary Tiles afirma que Bachelard buscou, nas obras em que tratou da epistemologia das ciências, investigar as formas do pensamento teórico, da estrutura experimental e dos modos como essas interagem. Diferentemente dos enfoques analíticos geralmente empregados pelos filósofos da ciência na primeira metade do século XX, “Bachelard não estava interessado na forma estática dos enunciados científicos, mas na dinâmica da prática teórica e experimental” (TILES, 1984, p. 9), nas práticas que fazem o conhecimento avançar. Segundo Tiles, para Bachelard, a tarefa do filósofo da ciência é trazer à tona as diferenças metafísicas e metodológicas entre ciências e entre estágios de desenvolvimento de uma ciência em particular. Daí a importância da história das ciências. O progresso da ciência, que se dá por **ruptura** epistemológica, é demonstrável e, até mesmo, faz parte da própria educação científica (TILES, 1984, p. 13, 17).

Para Bachelard, a realidade suscita uma “pesquisa sem fim” pois sua essência “reside na resistência ao conhecimento” e o “ato do conhecimento não é um ato pleno” que esgote o conhecimento dos objetos (BACHELARD, 2004, p. 16-7). Se o trabalho do cientista se realiza com muita facilidade é, provavelmente, porque se desenvolve num plano irreal, pois a presença do **erro** não pode ser eliminada na investigação da natureza e, por isso, temos que nos contentar com um conhecimento **aproximado**. Deve-se, pois, reconhecer “os elementos de incerteza” em cada momento e em cada esforço da ciência (BACHELARD, 2004, p. 16-7).

O progresso das ciências se dá por **retificação** de conteúdos anteriores, que não é um simples retorno a uma experiência malsucedida, “mas sim o princípio fundamental que sustenta e dirige o conhecimento e o instiga sem cessar a novas conquistas” (BACHELARD, 2004, p. 19). A necessidade de **aproximação** se impõe em função de nossa incapacidade de esgotar o conhecimento dos objetos estudados. Bachelard trabalha com os conceitos de retificação e de aproximação de modo a trazê-los de seus contextos usuais (respectivamente, o

idealismo e o realismo) (BACHELARD, 2004, p. 295), para uma síntese²⁴ que busca dar conta da dinâmica do conhecimento científico.

Em uma de suas teses de doutorado em filosofia, *Ensaio sobre o conhecimento aproximado*, publicada em 1928, Bachelard apresenta considerações originais sobre o processo de medição de grandezas que julgamos pertinente destacar aqui. Em primeiro lugar, Bachelard argumenta que a medida é um tipo de **descrição** que se vale da **comparação quantitativa**. Da mesma forma que as descrições podem comparar qualidades, **a medição é um tipo de comparação facilitada pela linguagem matemática**, que lhe permite ser mais exata (BACHELARD, 2004, p. 54). Pode-se dizer que “a medida é uma descrição numa linguagem nova; goza da clareza, da precisão, da universalidade tradicionalmente atribuídas à linguagem matemática” (BACHELARD, 2004, p. 55). A quantificação se tornou imperativa para a física moderna, a tal ponto que, segundo Bachelard, pode-se enunciar a epistemologia da física com um duplo postulado: “o que se mede existe e é conhecido na proporção em que a medida é precisa”. Esse tipo de comparação especial que a medição representa sobressai perante as demais formas de conhecimento. O status que a medição alcançou na física moderna praticamente impõe que as relações do mundo sensível sejam traduzidas na linguagem matemática, na “aritmética da experiência” (BACHELARD, 2004, p. 56).

Bachelard afirma também que a medição se dá pela seleção arbitrária de uma qualidade (ou propriedade), dentre as múltiplas qualidades que o “ser” apresenta, de forma que seja possível conferir certa estabilidade ao objeto do conhecimento. A escolha da qualidade pode ser arbitrária, “mas é oportuna”: “[O] objeto recebe dela uma fixidez que lhe permite resistir ao movimento qualitativo geral”. Porém, a seleção de qualidades, que possibilita a medição, implica a **simplificação** do real e pode nos fazer crer, que estamos “diante das qualidades primordiais” (BACHELARD, 2004, p. 57). A qualidade medida se destaca frente às demais qualidades do objeto e pode ser tomada como a única que realmente importa. A medição extrai da complexidade do mundo um valor que pode ser reproduzido, embora apenas dentro de certos limites. Se a medição dá acesso ao **ser**, ou seja, se toma parte no processo de conhecimento do objeto medido, por outro lado, ela nos fornece um conhecimento sempre **limitado**. Além de conhecermos algo apenas da propriedade

²⁴ Em *Le Rationalisme Appliqué* (1949), Bachelard denomina a síntese que realiza das perspectivas filosóficas do conhecimento científico de “racionalismo aplicado” e “materialismo técnico”. Essas últimas se encontram na posição central com relação às perspectivas tradicionais. O idealismo ingênuo e o realismo ingênuo se encontram nas extremidades e em posições opostas, sendo que entre as extremidades e o centro encontram-se perspectivas tradicionais intermediárias (BACHELARD, [1949] 1966, p. 4-5).

selecionada, o resultado da medição é, necessariamente, um valor aproximado (BACHELARD, 2004, p. 52, 57).

A medida contribui para a **objetivação** do conhecimento. Bachelard concorda com o também filósofo da ciência francês Abel Rey (1873-1940) sobre a presença do **erro** comprovar o processo de objetivação e a necessidade de retificação (BACHELARD, 2004, p. 248-249). A objetivação da realidade exige a aproximação: “[A] aproximação é a objetivação inacabada, mas é a objetivação prudente, fecunda, verdadeiramente racional, pois é ao mesmo tempo **consciente de sua insuficiência** e de **seu progresso**” (BACHELARD, 2004, p. 330). Essa formulação, com a qual Bachelard fecha o *Ensaio*, enfatiza a ideia de que uma das marcas do conhecimento científico é o reconhecimento, a um só tempo, de seus limites e de sua dinâmica. A realidade resiste ao empreendimento humano para conhecê-la, impõe limites que se manifestam na forma de erro e na necessidade de aproximação e de retificação. O processo de medição que avança por meio de aproximações e retificações serve ao filósofo como guia para a dinâmica do conhecimento científico.

A aproximação, como veremos na seção 1.3.1, é um termo empregado pela abordagem realista, pois se pensamos que o conhecimento se aproxima de algo, significa que acreditamos que há uma “verdade” da qual o conhecimento se aproxima. Em termos de medições, os resultados de medidas mais exatas significam valores mais próximos do “valor verdadeiro”. Entretanto, na obra de Bachelard, a metafísica que envolve a relação entre o real e o produto do conhecimento científico é bem diferente da relação de correspondência presente no realismo tradicional. A noção de “aproximação” talvez seja, justamente, a mais apropriada para entendermos a concepção bachelardiana daquela relação. A aproximação é uma condição intrínseca ao processo de conhecimento, o critério da exatidão não é uma “verdade em si” como “um atributo da realidade”:

A nosso ver, uma verdade refere-se unicamente aos processos de conhecimento. Ela não paira acima das condições de sua verificação. E uma verificação cada vez mais perfeita só se desenvolve por uma incorporação cada vez mais coerente num sistema de conhecimentos cada vez mais rico. A verdade deve estar de acordo com o próprio pensamento; é uma propriedade do conhecimento que encontra sua aplicação em todos os níveis de precisão desse conhecimento (BACHELARD, 2004, p. 230).

É o próprio conhecimento científico que estabelece o critério de verdade e o critério da exatidão para suas realizações. O tipo de realismo bachelardiano é “sem substância”: “a realidade física [...] é apresentada como uma categoria do pensamento inteiramente funcional” (TILES, 1984, p. 127-8). Ademais, os fenômenos estudados pelas ciências físicas são

produtos de uma construção, denominada “fenomenotécnica”, na qual a teoria e a prática científica estão implicadas (SOARES, 2015, p. 42). Há, então, algum realismo nas posições bachelardianas, mas bem diferente do realismo tradicional. Um realismo de “segunda posição”²⁵, constituído pela razão experimental (BACHELARD, 1979, p. 93). Nessa perspectiva, não faz sentido perguntar pela realidade da grandeza física real antes da medição, pois é o próprio empreendimento científico que indica as condições para a quantificação. Do mesmo modo, é a aliança entre teoria e técnica que poderá apontar e estimar os erros experimentais. Não aprofundaremos as questões que subjazem à sofisticada metafísica bachelardiana do conhecimento científico por entendermos que esse movimento está além dos objetivos da tese. Para um tratamento mais detalhado dessas questões, remetemos aos trabalhos de comentadores (BONTEMS, 2010; LECOURT, 1969; SOARES, 2015; TILES, 1984) e às obras originais do filósofo.

Para o contexto de nossa tese, é importante ressaltar que a ideia de valor **exato** de uma grandeza física, para Bachelard, é uma abstração à qual não corresponde nenhuma realidade. “Uma grandeza física comporta positivamente uma atmosfera de imprecisão que se agrega a sua própria realidade” (BACHELARD, 2004, p. 75). A exatidão absoluta só tem sentido como um “conceito-limite” da matemática; na física só podemos falar de “pseudo-exatidão”. Para esclarecer essa distinção, Bachelard cita o matemático francês Émile Borel (1871-1956):

A noção do valor numérico *exato* de uma grandeza física qualquer é uma pura abstração matemática, à qual não corresponde nenhuma realidade. [...] O número de decimais que temos direito de ver como exatas aumentará, aliás, com o aperfeiçoamento das técnicas; mas, mesmo que o número de decimais *exatas* chegasse a cem, ou a mil, o que é pouco provável, continuaríamos afastados da exatidão *absoluta* com a qual o matemático define a relação da diagonal com o lado do quadrado²⁶ (BOREL, 1914, p. 94-5; grifo no original do autor).

Para justificar sua afirmação, Borel comenta que, simplesmente para **definir** uma grandeza com precisão infinita, precisaríamos dar um número infinito de detalhes, o que é

²⁵ No realismo bachelardiano, o real não é algo passivo, mas projetado pela teoria e pelo experimento: “O real que lhe corresponde [ao realismo proposto pelo autor] não é relegado ao domínio da coisa em si incognoscível. Tem uma riqueza numenal inteiramente diversa. Enquanto a coisa em si é um número por exclusão dos valores fenomênicos, parece-nos que o real científico é feito de uma contextura numenal apropriada para indicar as linhas axiais da experimentação” (BACHELARD, 1979, p. 93). Em relação ao tratamento da realidade e ao realismo em Bachelard, Maria Helena Soares acrescenta: “A realidade, por isso, também é vista como um obstáculo epistemológico, mais que uma conquista ou um porto seguro. Não há um real a ser desvelado, não existem respostas prontas esperando apenas a pergunta correta. Para Bachelard, a discussão sobre natureza, realidade e verdade está intimamente ligada às noções de aproximação, realização e construção. [...] Não se trata mais de descobrir o real, mas antes de transformá-lo a partir de análises judicativas recorrentes (SOARES, 2015, p. 59).

²⁶ Para as ideias de Borel sobre grandeza física, consultamos seu livro original referenciado, mas o texto em português reproduzido acima foi retirado da tradução brasileira do ensaio de Bachelard (2004, p. 75).

impossível. Tal limitação na definição da grandeza é mencionada no GUM, constituindo uma das fontes de incerteza de medição (INMETRO, 2012a, p. 6). Complementando a ideia de que qualquer grandeza física carrega consigo uma margem de imprecisão, Bachelard sustenta:

Nenhuma medida, nenhum raciocínio permitem abstrair essa zona de flutuação; com mais razão, nada justifica uma passagem ao limite que nos leve a postular um objeto nitidamente definido. Assim, a meditação da aproximação física nos afasta de uma ontologia-limite. A exatidão, nítida separação entre o ser e o não-ser, é aí essencialmente relativa a um meio de conhecer. Em si, ela não é nada (BACHELARD, 2004, p. 75).

Embora os estudos recentes sobre medições girem em torno de questões levantadas por Bachelard no *Ensaio*, seu trabalho e suas intuições não costumam ser referenciados nesses estudos. Vamos ressaltar aqui mais alguns aspectos da abordagem do filósofo francês. Bachelard chama atenção para a maneira descontínua com que os fenômenos são tratados nos laboratórios, tanto do ponto de vista da qualidade, quanto da quantidade. Não se busca ali uma “ontologia geral” dos fenômenos, pois esses são “estratificados” de acordo com “um verdadeiro descontínuo instrumental” (BACHELARD, 2004, p. 78). Os instrumentos para identificar e quantificar as propriedades são empregados em função do objetivo a ser alcançado. Faixas diferentes de valores das grandezas podem exigir métodos e instrumentos de medição distintos. Da mesma forma, para graus de precisão diferentes, podem ser necessárias técnicas de medição distintas:

Os graus de precisão não estão ligados como se poderia crer por zonas de transição, porque para tornar-se mais preciso não basta refazer com mais precauções as medidas anteriores, mas sim afastar por meio de novos métodos os erros contidos no sistema de medida escolhido anteriormente. Cada ordem de grandeza exige uma medida especial (BACHELARD, 2004, p. 78).

A educação científica ensina “a pensar de acordo com a ordem de grandeza”. A abordagem do objeto já se dá a partir dessa primeira aproximação que a **ordem de grandeza** representa. Não é possível separar a medida da ordem de grandeza em que ela é efetuada: ela nunca goza de uma continuidade ideal e infinita, mas é obtida sob certas condições inseparáveis dos valores registrados. Da mesma forma, os resultados estão relacionados às técnicas de medição empregadas. Bachelard dá exemplos de medições em química, nas quais os métodos de detecção e quantificação exercem um papel notório. Nesses casos, “é tão falso quanto inútil fazer uma distinção entre o critério de pureza e os instrumentos que o estudam” (BACHELARD, 2004, p. 79-83). As boas práticas metrológicas atuais recomendam que um resultado de medição faça menção ao procedimento empregado, dentre outras informações

(INMETRO, 2012a, p. 25). O cuidado descritivo e a especificação dos métodos e procedimentos colocam ênfase no contexto em que se realiza a medição, ao mesmo tempo que isentam a expressão do resultado da medição de um compromisso ontológico irrestrito com a grandeza em questão.

Bachelard destaca outro aspecto da medição, relacionado à ordem de grandeza, cuja educação científica busca esclarecer: a expressão adequada da “precisão” no resultado da medição. Se uma medição é realizada com métodos que não permitem alcançar resultados muito precisos, não se deve expressar o resultado dessa medição com muitos algarismos significativos. Segundo Bachelard, a prática da medida ensina um relativismo quanto à precisão que se pode obter, quanto ao “peso” do real examinado. A expressão de um resultado que sugira uma precisão cujo método empregado jamais poderia alcançar é característica justamente de falta de espírito científico:

Não há nada mais avesso ao espírito científico que a falsa precisão, que a interferência do acidental e do geral. Outras disciplinas prezam o detalhe. A ciência o integra no devido lugar, com seu “peso”, e considera uma falha o esforço inútil: prosseguir o cálculo até decimais que experimentalmente não podem ser discriminadas, medir com minúcia por meio de instrumentos grosseiros, levar em conta um erro sutil quando o resultado já está obstruído por um erro bem maior etc. (BACHELARD, 2004, p. 79).

A menção à atividade metrológica, rara entre os filósofos da primeira metade do século XX, está presente no *Ensaio* de Bachelard sobre o conhecimento aproximado. O filósofo afirma que os sistemas de medidas desempenham papéis importantes nas ciências, que os “progressos científicos são quase sempre progressos nos sistemas de unidades” (BACHELARD, 2004, p. 93). A recíproca também é verdadeira: melhores sistemas de medidas tornam as medições mais precisas e seguras, facilitando a atividade teórica e experimental das ciências. Porém, essas não podem cair na “monotonia” dos métodos de medição, devem “mobilizar o conhecimento” para que possa haver progresso na investigação da realidade. O conhecimento que vem das medidas para as ideias é “infecundo”: é pela via “que vem do espírito para as coisas, que se pode mobilizar o conhecimento e dar-lhe flexibilidade suficiente para tocar o real” (BACHELARD, 2004, p. 93-4).

No mesmo instante que o filósofo francês reconhece o papel da metrologia para o desenvolvimento científico, faz a ressalva que o puro indutivismo da quantificação seria incapaz de levar a ciência adiante. Foi justamente aliando-se à ciência de ponta que os conceitos metrológicos puderam dar saltos de qualidade no decorrer do século XX. É possível ver nessas observações de Bachelard elementos da função que os modelos teórico e estatístico

vieram a desempenhar nas filosofias da medição do século XXI, que discutimos na subseção 1.4.2. Muitos dos insights trazidos pelo filósofo, reaparecerão ao longo da tese. Acreditamos que suas reflexões podem enriquecer a compreensão de conceitos com os quais a metrologia e a filosofia da medição vêm trabalhando.

1.2.2 A função da medição e a virada experimental

Com o auxílio de obras de destacados historiadores e filósofos da ciência, nesta seção discutimos duas questões. A primeira se refere às funções que a medição exerce nas ciências físicas. Uma das funções da medição é a de validar as teorias científicas. Como as medições cumprem essa função? A segunda questão diz respeito ao enfoque tradicionalmente privilegiado com que a filosofia da ciência tratou os aspectos teóricos das ciências, em detrimento dos aspectos experimentais. A partir dos anos 1980, houve um sensível aumento no interesse por questões relacionadas à prática científica, tendência conhecida por virada experimental, que levou também a um maior interesse pelas medições e pela metrologia de uma forma geral. A reboque do relevo dado à prática da medição, emerge também o papel do erro e da incerteza.

1.2.2.1 Kuhn e a função da medição

Se Bachelard é pouco referenciado nos trabalhos filosóficos sobre medições, ocorre exatamente o oposto com a obra do físico, historiador e filósofo da ciência estadunidense Thomas Kuhn (1922-1996). No importante artigo “A função da medição na física moderna” (KUNH, [1961] 2011, p. 195-240), Kuhn analisa as funções que a medição vem desempenhando ao longo da história das ciências físicas. Sobretudo, o artigo de Kuhn focaliza a relação entre as teorias físicas e as medições experimentais, mostrando que tal relação é diferente daquela que os manuais (livros-textos das ciências físicas) fazem supor. Kuhn reconhece que “os métodos quantitativos têm sido centrais no desenvolvimento” da física. Por isso, se propõe a tratar, principalmente, de duas questões no artigo: (i) como a medição efetivamente tem funcionado na física e (ii) qual tem sido a fonte de sua eficácia especial. Ambas as questões demandam o recurso à história das ciências (KUNH, 2011, p. 196-7).

Inicialmente, Kuhn examina como os manuais geralmente apresentam a relação entre teoria e experimento. Na exposição de uma teoria, os manuais costumam apresentar uma tabela de resultados ou um gráfico no qual aparecem os valores obtidos pela teoria para certas

condições e os valores obtidos experimentalmente para as mesmas condições. Embora, em geral, os valores teóricos e experimentais não apresentem coincidências numéricas em todas as casas decimais, fica implícito, em função à autoridade dos cientistas da área e do autor do livro, que aqueles resultados experimentais confirmam a teoria (KUHN, 2011, p. 198-9). Devido às diversas aproximações que têm de ser levadas em conta, tanto do ponto de vista da teoria, quanto em relação ao instrumental empregado na medição, os físicos raramente esperam uma concordância absoluta entre valores teóricos e experimentais. O que os cientistas buscam é o que chamam de “concordância razoável”, mas o grau em que a concordância é considerada razoável varia muito entre as áreas de conhecimento, bem como ao longo do tempo. Kuhn acredita que as tabelas aparecem nos manuais justamente para dar uma ideia no nível de concordância razoável: “[A]o estudá-las o leitor aprende o que pode ser esperado da teoria” (KUHN, 2011, p. 202).

No artigo, Kuhn já trabalha com a distinção entre ciência normal e extraordinária que aparece em seu livro canônico publicado no ano seguinte, *A estrutura das revoluções científicas* (1962). Nos períodos ditos normais, quando a produção científica é guiada e apoiada pela teoria paradigmática, a maior parte da prática científica é uma imensa “operação de limpeza” que consolida as rupturas recentes e prepara o terreno para as futuras rupturas: “A nova ordem fornecida por uma nova e revolucionária teoria nas ciências naturais é sempre uma ordem *potencial*. São necessários muito trabalho e capacidade, aliados por vezes à genialidade, para torná-la *efetiva*” (KUHN, 2011, p. 205; grifo do autor). Essa “limpeza” é o tipo de atividade a que se dedica a maioria dos físicos que trabalham com medições e constitui uma das funções da medição. Seu objetivo é tornar efetiva as potencialidades da teoria e melhorar a “concordância razoável” (KUHN, 2011, p. 205; 208-9).

Tal como são apresentados nos manuais, os dados parecem ser “irredutíveis”, parecem ser valores aos quais a teoria tem que se adequar. Afinal, os fatos representariam a autoridade daquela que teria a última palavra: a própria natureza. Se, ao invés dos manuais, recorrermos aos periódicos científicos, veremos que a história é bem mais sutil e complexa: os cientistas têm que “batalhar” para fazer com que os resultados experimentais “estejam em conformidade com a teoria, que não é posta em dúvida”. Na verdade, os cientistas usam a teoria como guia para o experimento e até para calcular os valores que têm que obter: “[M]uitas vezes, os cientistas não podem obter números bem ajustados à teoria até que saibam quais são os números que devem forçar a natureza a fornecer” (KUHN, 2011, 209-10). Durante os períodos normais de uma ciência, as medições buscam consolidar aspectos da teoria, reduzir a dispersão de resultados e melhorar a exatidão dos procedimentos.

Kuhn sustenta que nos períodos em que surgem “situações anormais” ou **extraordinárias**, nos quais os projetos de pesquisa entram em crise, “a medição mostra suas maiores virtudes”, pois “pode desempenhar, certas vezes, um dos mais importantes papéis na descoberta e na confirmação” (KUHN, 2011, 218). A situação anormal nas ciências consiste num estado de crise que ocorre devido a **anomalias**, isto é, a discrepâncias observadas entre a teoria e os experimentos. Muitas das anomalias são desconsideradas pelos cientistas pois são atribuídas a problemas experimentais e não a inadequações da teoria. No entanto, se as anomalias persistem após todas as correções, então tem início a “crise” e os cientistas passam a se perguntar se a abordagem baseada na teoria é descabida. “Com frequência, a crise é resolvida com a descoberta de um novo fenômeno natural; ocasionalmente, sua resolução exige uma revisão dos fundamentos da teoria existente” (KUHN, 2011, p. 220).

As medições desempenham, então, o papel de apontar anomalias e de indicar a presença de novos fenômenos. Elas não podem dar informações sobre a natureza do fenômeno, mas podem fornecer direções para a busca dos cientistas. Sobretudo, enfatiza Kuhn, “os números registram o afastamento da teoria com uma **autoridade** e **sutilezas** impossíveis de serem repetidas por meio de técnicas qualitativas” (KUHN, 2011, p. 222; grifo nosso). Kuhn afirma desconhecer inovação teórica que não tenha sido precedida do reconhecimento de que havia algo de errado com a teoria em vigor (KUHN, 2011, p. 222-4).

A função da medição em épocas de ciência extraordinária é ainda mais importante no que se refere às invenções de novas teorias. Nas crises, “a medição exerce uma de suas duas principais contribuições para o avanço científico” (KUHN, 2011, p. 224). As crises provocadas por anomalias **quantitativas** que resistiram aos esforços de superá-las são as mais difíceis de conter. Nesses casos, a medição não apenas expõe a anomalia que coloca a teoria em crise, mas ela também tem grande poder para decidir a batalha entre duas teorias. Kuhn sustenta que é nas situações em que duas teorias concorrentes são defrontadas com o mundo, isto é, com os experimentos, que se pode falar em “confirmação”. A vantagem peculiar das medições estaria nas comparações “tríplices” que envolvem duas teorias e o mundo, estando aí “a segunda grande função” (KUHN, 2011, p. 227) das medições. Nessa situação, o poder dos resultados quantitativos costuma falar mais alto, pois a “precisão”²⁷ das medições parece ser um fator de peso nas considerações sobre a melhor teoria. Kuhn coloca essa constatação nos seguintes termos:

²⁷ Ao que tudo indica, Kuhn se referia à qualidade **geral** das medições a que, hoje, nos referimos como exatidão.

Não conheço nenhum episódio no desenvolvimento da ciência que exiba perda de precisão quantitativa como consequência de uma transição de uma teoria mais antiga para outra mais recente. [...] Talvez pelas mesmas razões que a tornaram particularmente eficaz na geração de crises científicas, a comparação de previsões numéricas, *quando estavam disponíveis*, foi particularmente bem-sucedida na condução das controvérsias científicas à sua conclusão. Quaisquer que sejam as consequências de seus métodos e objetivos em termos de redefinição da ciência, os cientistas têm se mostrado relutantes em abrir mão dos sucessos numéricos de suas teorias (KUHN, 2011, p. 229; grifo do autor).

Depois de discutidas as funções da medição na física, Kuhn se pergunta como as quantificações passaram a ser empregadas nas ciências físicas. Para analisar essa questão, Kuhn divide as ciências físicas em dois grandes blocos: as tradicionais e as baconianas. As primeiras são ciências como astronomia, óptica e mecânica que passaram por desenvolvimentos desde a antiguidade e por ampla matematização de suas teorias durante a revolução científica do século XVII. Kuhn argumenta que o que tornou possível a introdução de leis matemáticas e da medição das grandezas envolvidas nas ciências tradicionais foi justamente o fato de ter havido anteriormente muita investigação nessas disciplinas. Tais investigações nas ciências tradicionais anteriores ao século XVII se concentraram em trabalhos qualitativos e no desenvolvimento de instrumentos para observar os fenômenos (KUHN, 2011, p. 230-2).

Já as ciências baconianas, tais como a química, a eletricidade, o magnetismo e os fenômenos do calor, só passaram a ser estudadas de modo mais intenso e essencialmente qualitativo no século XVII, quando também começaram a ser desenvolvidos instrumentos específicos para abordar esses fenômenos. Como consequência desses estudos, cerca de dois séculos depois (início do século XIX), esses fenômenos também conheceram extensa matematização teórica e quantificação experimental²⁸ (KUHN, 2011, p. 233-6). Essa tendência, levou Kuhn a “classificar a matematização das ciências baconianas como um aspecto de uma segunda revolução científica” (KUHN, 2011, p. 236).

As considerações acima, baseadas nas interpretações da história das ciências, servem para o físico e filósofo estadunidense enunciar a “tese mais constante” do artigo: “[O] caminho da lei científica até a medição científica raramente pode ser percorrido no sentido inverso” (KUHN, 2011, p. 235; grifo do autor). De fato, em várias passagens do artigo, o autor sublinha sua tese de que os dados gerados por medições realizadas sem uma base teórica dificilmente podem ser generalizados de forma a dar lugar à teoria. Ou seja, Kuhn está afirmando que o processo indutivo baseado em medições sem bases teóricas teve e tem

²⁸ Os conceitos de matematização e quantificação são problematizados na seção 2.1 do segundo capítulo da tese, onde também abordamos as tradições matemática e experimental na física, segundo Kuhn.

poucas chances de produzir desenvolvimentos científicos consistentes. No entanto, mais importante para a presente tese são as respostas dadas pelo artigo às duas questões colocadas na sua abertura.

A medição possui funções diferentes nas fases normais e nas fases extraordinárias das ciências físicas. Nos períodos normais de consolidação da teoria paradigmática e de efetivação de suas potencialidades, as medições, guiadas pela teoria, participam ativamente da “limpeza”, buscando melhorar a exatidão dos procedimentos quantitativos. Nos períodos extraordinários em que a teoria entra em crise, a medição pode oferecer as melhores evidências das anomalias, além de fornecer indícios da presença de novos fenômenos ou direções para a busca de novas teorias. Aliado a essas funções, Kuhn enfatiza que a exatidão alcançada pelas medições parece servir de parâmetro para a escolha das melhores teorias, o que justificaria a “eficácia” das medições. Para fazer valer sua eficácia na escolha entre teorias, é necessário **quantificar** as “concordâncias razoáveis”, isto é, as exatidões²⁹ ou as incertezas de medição. Como veremos no desenrolar da tese, o grau de razoabilidade nas comparações que envolvem medições, para a metrologia atual, é representado pela estimativa da **incerteza de medição**, o que faz com que esse conceito seja fundamental para a relação entre teoria e experimento.

O artigo de Kuhn pode ser visto como uma discussão que envolve a ideia de que a medição é um processo “carregado de teoria” (*theory-ladenness*), “contra o pano de fundo da distinção dos positivistas lógicos entre linguagem teórica e observacional” (TAL, 2017b, p. 41). Esse tipo de discussão transparece na ênfase colocada por Kuhn na ideia de que, em geral, a teoria guia as medições. Para o filósofo e historiador da ciência canadense Ian Hacking, o artigo de Kuhn sobre medição nos mostra que “precisamos distinguir a função da medição das razões pelas quais nos aplicamos à medição” (HACKING, 2012, p. 345-6). As razões para buscar melhorar os sistemas de medição, intrínsecas aos problemas experimentais (ou seja, sem o objetivo primeiro de testar teorias), levam a resultados que podem apontar problemas na teoria: “[N]estes casos, caracteriza-se uma anomalia, a qual, muitas vezes, vem a ser chamada de ‘efeito’” (HACKING, 2012, p. 346). Tais efeitos seriam um subproduto da função normal da medição de efetivar a teoria aceita. Hacking observa que as medições, ao quantificar as anomalias, exercem um papel importante na dinâmica histórica kuhniana envolvendo “ciência normal – crise – revolução – nova ciência normal” (HACKING, 2012, p. 347).

²⁹ No terceiro capítulo (3.3.3), discutimos a possibilidade de empregar o conceito de exatidão, de modo quantitativo, para expressar a qualidade da medição.

O trabalho de Kuhn tem, portanto, o mérito de ressaltar a importância do contexto científico em que as medições acontecem. Embora dependam de concepções teóricas para desempenhar sua função, as medições possuem um conteúdo prático-experimental e tecnológico necessariamente implicado em seus resultados. Os valores numéricos obtidos pelas medições estão sempre vinculados ao contexto em que foram obtidos. Da mesma forma, o grau de concordância entre os valores teóricos e experimentais, ou seja, o que pode ser considerado razoável depende fortemente das condições em que os valores foram obtidos. As funções e a eficácia das medições são claramente dependentes do contexto em que elas se dão.

1.2.2.2 Peirce, Hacking e a virada experimental

O papel de essencial e específico que os **experimentos** exercem nas ciências físicas foi muitas vezes negligenciado pelos estudos históricos e filosóficos das ciências. Nessa subseção, vamos apenas introduzir a questão do valor próprio dos experimentos tal como foi tratada em algumas obras. Como atividade experimental, a medição possui particularidades que apontaremos em alguns pontos da tese. No quarto capítulo (seção 4.1), vamos focar questões relacionadas à filosofia do experimento que nos permitem avançar em direção a uma epistemologia das incertezas. Aqui vamos apenas discutir algumas observações de cientistas e filósofos que fornecem elementos para a reflexão sobre a medição.

Um dos fundadores do pragmatismo, o filósofo e cientista estadunidense Charles S. Peirce (1839-1914) trabalhou desde muito jovem com a atividade de medição em diversas áreas da metrologia e desenvolveu instrumentos de medição. Peirce chegou a dar contribuições importantes para a metrologia americana e teve sua visão de mundo muito influenciada pelo trabalho com medições (CREASE, 2013, p. 171-95). A **vida diária com medições** fez com que o filósofo desenvolvesse uma concepção da ciência como processo colaborativo de **correção de erros**: o que impulsiona a ciência não são “estudiosos solitários enfrentando charadas em particular”, mas “redes de pessoas competentes trabalhando em redes de laboratórios num empreendimento inerentemente público”. Ele entendia, segundo Crease, que “jamais poderia haver precisão absoluta”, que os físicos, lidando com medições, “dificilmente concebem chegar à verdade absoluta, e, portanto, em vez de perguntar se uma proposição é verdadeira ou falsa, perguntam qual o tamanho do erro” (CREASE, 2013, p. 186).

A metrologia é a ciência do detalhe, da minúcia, do refinamento técnico. A prática da medição busca superar a instabilidade e a variabilidade dos valores das grandezas e, justamente por isso, termina por testemunhar impossibilidade da exatidão absoluta, da apreensão definitiva do valor das grandezas. Peirce aprendeu essa lição em seu trabalho com as medições, a estendeu para o funcionamento das ciências e até mesmo para o comportamento humano. De acordo com Crease, o filósofo-cientista entendia que “do mesmo modo como um sistema de medição nunca é perfeito [...], assim nossas crenças nunca se encaixam com o mundo de forma absoluta” (CREASE, 2013, p. 185).

A essa concepção não idealista do processo de medição, Peirce aliava a convicção de que o universo é forjado pelo **acaso**, de que a “natureza é estocástica o tempo todo” (CREASE, 2013, p. 191). Em *Taming of chance* (1990), Hacking também enfatizou a relação entre o trabalho experimental em medições de Peirce e suas concepções sobre a impossibilidade da exatidão absoluta e o indeterminismo. Hacking considera que Peirce simboliza o processo histórico de reconhecer o acaso como pertencente ao mundo e de tratá-lo cientificamente por meio da teoria das probabilidades (HACKING, 1990, p. 200-15).

Apesar das observações de Peirce e de outros cientistas e filósofos do final do século XIX e início do século XX, nem sempre o valor próprio dos experimentos foi reconhecido e estudado pela filosofia da ciência. Em *Representar e intervir* (1983), Ian Hacking chamou atenção para essa tendência e afirmou que a história e a filosofia da ciência costumavam privilegiar as teorias, mas que a “experimentação possui vida própria” que deve ser investigada (HACKING, [1983] 2012, p. 236). Sustentou que os experimentos, de modo independente das teorias, comportam particularidades para as quais deveríamos estar atentos. Seus trabalhos são considerados fundamentais para a “virada experimental” na filosofia das ciências do final do século XX (RADDER, 2009). A vida própria das **medições** comporta especificidades que procuramos ressaltar e avaliar nessa tese, em especial na seção 4.1.

Para Hacking, o experimento é “criação de fenômenos”, de “regularidades discerníveis”, e não observação passiva (HACKING, 2012, p. 329). Fazer um experimento funcionar requer conhecimento específico, que se adquire na vivência dos laboratórios. Em geral, nas práticas escolares, os experimentos não funcionam, justamente para que os alunos aprendam quão difícil é produzir bons resultados experimentais e os cuidados necessários para produzi-los (HACKING, 2012, p. 330). Acrescentaríamos que a medição, como recurso fundamental da experimentação, possui uma vida própria **meticulosa e laboriosa**. Boa parte do trabalho se dá na esfera tecnológica, buscando alternativas para melhorar a exatidão das medições, ou seja, buscando reduzir as incertezas dos procedimentos. Justamente por não

perseguir valores absolutamente exatos, mas resultados com menor incerteza, os cientistas também dedicam boa parte dos seus esforços para estimar e reduzir as incertezas experimentais. Poderíamos, aqui, distinguir as atividades do cientista experimental que trabalha na pesquisa básica e do cientista-metrologista que busca desenvolver melhores sistemas de medição. Entretanto, para ambos, é fundamental focar nas incertezas envolvidas em seus experimentos.

Hacking também aborda, de modo crítico, a busca incessante por medições com melhor exatidão, principalmente em relação às constantes da natureza. Seria válido buscar reduzir as incertezas na determinação das constantes fundamentais como um fim em si mesmo? Ele lembra que os valores publicados pelos laboratórios mundialmente mais capacitados são obtidos por um ajuste entre os valores e que periodicamente os resultados são revisados. Apoiando o ceticismo de Peirce e de Pierre Duhem (1861-1916) em relação a valores exatos para as constantes, Hacking argumenta que “estamos apenas descobrindo o conjunto de números mais convenientes para acoplar às nossas constantes” (HACKING, 2012, p. 341-3).

Pode-se tomar a crítica de Hacking como procedente se entendermos a conquista de uma casa decimal no valor de uma constante como um tipo de fetichismo científico, com parcos benefícios para as ciências em geral. Os recursos para pesquisas são sempre limitados e distribuídos de acordo com as prioridades. Porém, temos que considerar também que a busca por medições mais exatas tem desempenhado uma função evidente no desenvolvimento da metrologia. Em especial, o novo papel que as constantes fundamentais passaram a exercer na padronização das unidades de base mostra o quanto a alta exatidão das medições dessas constantes foi determinante para a nova “revolução” metrológica.

Boa parte da filosofia da medição produzida e publicada no século XXI é tributária da virada experimental. Os novos enfoques filosóficos partem do interesse pela prática para problematizar aspectos epistemológicos das medições, dentre eles o conceito de incerteza. Abordamos esses enfoques na última seção deste capítulo (1.4), mas, como os trabalhos da filosofia da medição constituem nossas principais fontes, de alguma forma, a questão dos experimentos aqui introduzida reverbera ao longo de toda a tese.

1.2.3 O problema da coordenação e a construção de escalas

Nesta subseção discutimos um problema filosófico fundamental que envolve as grandezas a serem medidas e os respectivos procedimentos de medição. Como é possível

afirmar que certo instrumento ou procedimento de medição, de fato, mede certa grandeza? Essa questão é conhecida como o **problema da coordenação** e está relacionada ao estabelecimento de escalas de medição para as grandezas. Primeiramente vamos discutir como o problema é colocado e pode ser superado, para em seguida apontar pesquisas históricas que descrevem exemplos práticos do processo de superação do problema.

1.2.3.1 Van Fraassen: o problema da coordenação de grandezas

Em *Scientific Representation* (2008), o filósofo da ciência de origem holandesa, radicado nos Estados Unidos da América, Bas van Fraassen discute o problema da coordenação das grandezas a partir de vários autores que o abordaram e aponta que esse não pode ser resolvido a partir de considerações lógico-fundacionais, mas que o empirismo é o caminho pelo qual as soluções podem ser encontradas. Não pretendemos dar conta aqui da longa e detalhada discussão que van Fraassen realiza sobre o assunto. Vamos apenas nos valer de parte de seu tratamento para introduzir o problema. Segundo van Fraassen, o termo “problema da coordenação” apareceu primeiramente nos escritos do físico e filósofo tcheco-alemão Ernst Mach (1838-1916) sobre mecânica e termodinâmica e ganhou proeminência no âmbito do empirismo lógico³⁰ (VAN FRAASSEN, 2008, p. 115).

Duas questões imbricadas estão envolvidas no problema da coordenação: (i) o que conta como medição da grandeza física X ? e (ii) o que é a grandeza física X ? Essas questões parecem gerar uma **circularidade** pois só posso responder a primeira se consigo responder a segunda, mas para responder esta última tenho que lançar mão de um procedimento de medição (VAN FRAASSEN, 2008, p. 116). Por exemplo: como posso medir a temperatura ambiente? Resposta óbvia e simples: posso medir, por exemplo, com um termômetro. O que é a grandeza temperatura ambiente? Resposta circular: aquilo que meço com um termômetro. Também é possível responder a segunda questão com a definição teórica da grandeza³¹, mas

³⁰ Vamos empregar o termo “empirismo lógico” para nos referir ao amplo movimento das primeiras décadas do século XX de valorização dos aspectos empíricos do conhecimento científico, que inclui os membros do Círculo de Viena e da Sociedade de Berlim para Filosofia Empírica. Seguimos Richard Creath nesse rótulo genérico para o movimento, mais apropriado do que o também usual “positivismo lógico” ou o menos usual “neopositivismo” (CREATH, 2021).

³¹ O livro-texto sobre termodinâmica *Thermal Physics* fornece, inicialmente, uma definição da temperatura como sendo uma grandeza empírica, medida por um termômetro, que é proporcional à expansão que ocorre quando a energia é cedida à matéria por meio da transferência de calor (SEKERKA, 2015, p. 3-4). Mais adiante, o mesmo livro fornece uma definição mais técnica e matemática da temperatura absoluta termodinâmica como sendo a derivada parcial da energia interna em relação à entropia de um sistema (p. 32, nota 2). Dicionários usualmente fornecem definições como as seguintes: (a) O grau de calor ou frio de um corpo ou ambiente; (b) Uma medida da energia cinética média das partículas de uma amostra de matéria,

esta resposta deixará a primeira no vazio, pois não tenho como relacionar, teoricamente, as definições das grandezas ao funcionamento correto dos instrumentos de medição e aos valores fornecidos por eles.

Como é possível estabelecer teoricamente a proporcionalidade da escala de medição do instrumento (no nosso exemplo, a proporcionalidade da escala do termômetro que indica a dilatação do mercúrio dentro coluna do instrumento) com a definição da grandeza (no nosso exemplo, a temperatura ambiente)? Embora seja possível enunciar teoricamente a relação entre um fenômeno (a dilatação do mercúrio) e outro (a temperatura ambiente), **não** é possível estabelecer, **a priori e teoricamente**, uma relação de proporcionalidade entre os fenômenos. Sem tal relação, não posso dizer o que contra como medição da grandeza *X*. Ou seja, o conhecimento da grandeza *X* permanecerá no âmbito teórico e não poderá ser medida.

Van Fraassen examina as noções de “axiomas de coordenação” e de “definições coordenativas” propostas pelo filósofo alemão Hans Reichenbach (1891-1953) como princípios a priori para realizar a coordenação entre as grandezas e os procedimentos de medição. Mas observa que essas definições só podem ser introduzidas de forma significativa **num contexto histórico onde já existam coordenações anteriores**. A simples escolha de padrões não nos ajuda muito a resolver o problema da coordenação, pois a obtenção de valores na medição pressupõe “uma compreensão tanto do procedimento de medição quanto do que é medido – isto é, dos termos entre os quais essa relação é estabelecida através da coordenação” (VAN FRAASSEN, 2008, p. 121). Sem que tenhamos a compreensão de como a relação mencionada é estabelecida, a própria questão “o que é medido?” não pode ser adequadamente respondida.

Porém, o problema colocado desaparece quando olhamos a questão “de cima”, isto é, “*em retrospecto* de dentro de uma teoria que já é estável e estabelecida e lida com a magnitude física”, ou quando olhamos a questão “de dentro”, isto é, “se nós investigamos a introdução de procedimentos *nos estágios históricos onde já havia procedimentos de medição* para certas outras magnitudes físicas *tomados como dados*” (VAN FRAASSEN, 2008, p. 122; grifo do autor). Temos como compreender a relação que possibilita a medição tanto do ponto de vista **atual**, no qual a medição de uma grandeza se justifica à luz da teoria estabelecida

expressa em termos de unidades ou graus fornecidos por uma escala padrão (THE AMERICAN HERITAGE). Resumidamente, podemos dizer que a temperatura ambiente é uma medida da energia cinética média das moléculas dos gases que compõem a atmosfera de certo ambiente. De todo modo, nosso objetivo é mostrar que a medição de qualquer grandeza depende de algo mais que o conhecimento teórico da propriedade em causa, depende de uma coordenação entre teoria e medição experimental que é dada pelo processo de desenvolvimento da quantificação da grandeza.

(medição para a qual estaríamos olhando ‘**de cima**’), quanto do ponto de vista da **reconstrução histórica** do processo de medição de uma grandeza baseado em outras coordenações grandeza-medição já dadas (processo que estaríamos vendo ‘**de dentro**’). “É somente se tentarmos entender a coordenação sem nos localizarmos no a-histórico "de cima" ou no histórico "de dentro", mas fingirmos uma "visão de lugar nenhum", que nos colocamos um problema impossível – ou caímos em metáforas metafísicas” (VAN FRAASSEN, 2008, p. 122). Para entender como o problema é superado pelo desenvolvimento científico, temos que seguir a **evolução histórica** do processo de coordenação que se dá concomitantemente (e de forma entrelaçada) com a investigação de procedimentos de medição, de meios de padronização e de reformulações teóricas.

Observando da perspectiva histórica, podemos distinguir um “fato empírico” referente à descoberta de procedimentos que tornam os fenômenos estáveis e um “fato histórico” que se refere às escolhas dos procedimentos de medição que se dão **par e passo** com o desenvolvimento das teorias. “O que agora conta para nós como medição simples e passiva é uma conquista duramente alcançada” (VAN FRAASSEN, 2008, p. 124). O filósofo analisa os trabalhos de Mach (desenvolvimento do termômetro) e de Poincaré (medição do tempo) enfatizando a busca por coerência entre a teoria e os resultados das medições. A análise busca mostrar que a prática da medição e a teoria evoluem juntas de modo **entrelaçado**. Pode-se dizer que “o parâmetro medido – ou pelo menos, seu conceito – é *constituído* no curso do desenvolvimento histórico” (VAN FRAASSEN, 2008, p. 138). Assim, o problema da coordenação só pode ser compreendido do ponto de vista da construção paulatina e correlacionada da teoria e das realizações empíricas. Podemos ver esse desenvolvimento de dois pontos de vista e devemos, segundo van Fraassen, adotar ambos:

Devemos combinar numa visão sinóptica duas maneiras de ver o assunto. A primeira é ‘de dentro’ do processo histórico no qual o procedimento e a teoria são estabilizados. A segunda é ‘de cima’ com a descrição teórica do domínio incluindo as interações da medição já em mão, um estágio alcançado naquele processo histórico, mas não mais envolvendo qualquer referência explícita a sua própria história (VAN FRAASSEN, 2008, p. 139).

Buscamos aqui apenas apresentar o problema e indicar o modo como os desenvolvimentos teórico e empírico, de modo concomitante, podem levar a superá-lo em prol de teorias e medições estáveis e com boa exatidão. Os trabalhos de reconstituição histórica que discutimos a seguir, realizados por Gooday (medição de grandezas elétricas) e por Chang (medição de temperatura), servirão como exemplos de superação do problema da

coordenação nos moldes descritos por van Fraassen. Na seção voltada para a epistemologia da medição baseada em modelos de Eran Tal (1.4.2.1), o problema é tratado de modo formal e mais amplo, juntamente com outras questões. O tema também será retomado ao longo da tese, como, por exemplo, no âmbito da discussão das teorias e filosofias da medição (seção 1.3).

1.2.3.2 Gooday: o estabelecimento das medidas elétricas

O atual estado da arte da metrologia, principalmente no que se refere às grandezas físicas, no qual os procedimentos de medição e os padrões estão bem estabelecidos, pode passar a ideia de que esse estado foi alcançado simplesmente por raciocínios teóricos e por deliberações científicas consensuais. A investigação histórica dessa conquista, como veremos, revela progressos erráticos e muitas controvérsias envolvidas. Revela também que algumas das características da metrologia atual não constituem condição *sine qua non* para a realização de medições com boa exatidão.

Ao analisar a dinâmica histórica da medição de grandezas elétricas no final do século XIX, em *The Morals of Measurement*, o historiador da ciência inglês Graeme Gooday ressalta que a historiografia da medição não pode ser simplesmente sobre padrões. Baseado em documentos sobre medidas elétricas na Inglaterra vitoriana, o historiador afirma que, para a realização de medições bem-sucedidas (avalizadas por especialistas), não é suficiente, nem sequer necessária, a existência de padrões de medição universalmente acordados (GOODAY, 2004, p. 11).

A existência de padrões não garante “boas” medições porque a realização a contento das metodologias exige um conhecimento que vai além do que é descrito nos textos técnicos. Não basta ter acesso a padrões confiáveis, é preciso saber empregá-los nas medições de forma a se valer do grau de precisão que o instrumento ou artefato proporciona. Gooday argumenta que boa parte desse conhecimento prático para a realização das medições depende de treinamento “*face-to-face*”, ou seja, exige o **aprendizado presencial** das sutilezas envolvidas na realização experimental (GOODAY, 2004, p. 11). A intensa atividade de medição de grandezas elétricas no século XIX se deu baseada em padrões passíveis de falha e de unidades localmente definidas. A ausência de padrões e unidades confiáveis e universais não impediu o sucesso, nem o aprimoramento dessas atividades. Gooday ressalta que William Thomson (Lorde Kelvin) (1824-1907), que participou ativamente das discussões sobre tais medições, apoiou um “pluralismo pragmático” de padrões de medição (GOODAY, 2004, p. 14).

O esforço de padronização e disseminação dos conceitos básicos exercido atualmente pelas instituições metrológicas tem, sem dúvida, grande valor para a prática das medições e proporciona resultados de alta qualidade. Entretanto, da perspectiva histórica, constata-se que a prática das medições subsistiu e se desenvolveu sem o aparato metrológico. Quando se pensa na concepção contemporânea de medição, sem dúvida, a padronização ocupa um lugar de destaque, mas essa, de fato, embora desejável e eficaz, não foi indispensável para o desenvolvimento das medições de grandezas elétricas.

Na virada do século XX, segundo Gooday, os diferentes especialistas em grandezas elétricas respondiam à pergunta “o que é uma medição?” de duas formas diferentes. A medição de grandeza elétrica podia ser vista como a **redução** da grandeza medida à grandeza comprimento ou como **comparação** com um padrão da mesma grandeza medida (GOODAY, 2004, p. 43-6). A perspectiva da redução ao comprimento era defendida porque os instrumentos de medição das grandezas elétricas indicavam sua resposta em termos de comprimento. Por exemplo, uma forma de padronizar a resistência elétrica era pelo comprimento de certo material (de seção reta definida). A criação da metodologia de calibração das resistências por “balanceamento” das correntes (pela ponte de Wheatstone), que emula a calibração de massas pelo equilíbrio dos pratos da balança, fez com que não fosse mais necessária a medição do comprimento para a padronização de resistências (GOODAY, 2004, p. 46-9).

Hoje, fala-se em medições **diretas**, para quando medimos a própria grandeza de interesse diretamente (por exemplo, a medição do comprimento de um objeto com uma trena calibrada) e **indiretas**, para quando o instrumento de medição fornece o valor de outra grandeza a partir da qual se obtém a grandeza de interesse³². Muitos instrumentos de medição de que dispomos hoje nos permitem fazer medições através da comparação de grandezas do mesmo tipo, mas isso se deve ao projeto desses instrumentos. As escalas de um termômetro de coluna de mercúrio são linearmente graduadas, isto é, indicam a temperatura em função do comprimento da coluna. O que “lemos” nessa escala não é o comprimento da coluna, mas, diretamente, a temperatura. Entretanto, o projeto do instrumento se baseia na transposição do comprimento da coluna para a temperatura. A construção desses instrumentos depende da infraestrutura metrológica da qual muitas vezes não nos damos conta, até porque as escalas necessitam ser calibradas para fornecerem resultados consistentes. A história mostra que

³² Por exemplo, a câmara de ionização empregada para medições de grandezas da área de radiações ionizantes, funciona conectada a um medidor de grandezas elétricas e os valores destas grandezas indicadas pelo medidor devem ser convertidas, por um coeficiente de calibração, para o valor da grandeza de interesse.

mesmo os conceitos de medição e de padronização não são, em si mesmos, intuitivos e livres de controvérsias e que tiveram de superar barreiras operacionais para chegarmos a suas concepções atuais.

O desenvolvimento das medições, seja em termos de construção de escalas, de padronização ou de melhoria da exatidão das medições, requer a comparação entre os resultados obtidos por diferentes laboratórios e por diferentes metodologias de medição. Entretanto, em função da precisão e da exatidão limitadas de qualquer medição experimental, é necessário que haja algum critério para a comparação. Ela não pode ser “dígito a dígito”, mas tem que obedecer, nos termos de Kuhn, a uma “concordância razoável” (GOODAY, 2004, p. 12, 58). Gooday nos dá um relato de como os critérios para avaliar a “**razoabilidade**” da concordância entre os resultados das medições divergiram localmente no final do século XIX (GOODAY, 2004, p. 43-6). Os conceitos de precisão, exatidão e erro, ainda hoje objeto de discussão, foram disputados por diferentes perspectivas.

Na investigação, Gooday recorre a diversos tipos de documentos, como artigos científicos, livros-texto, manuais práticos, anais de congressos e outros. Do ponto de vista da historiografia empregada, observa que as propostas conceituais, por exemplo, em relação ao conceito de exatidão, **não são neutras** no que diz respeito aos atores envolvidos. “Uma ambivalência interessante se repete nas discussões do final do século XIX sobre a quem ou a que a exatidão (ou erro) de uma medição ou produção tecnológica poderia ser atribuída” (GOODAY, 2004, p. 66). A autoria da medição e os conceitos envolvidos para avaliar a qualidade da medição – geralmente tratada como sua exatidão (*accuracy*) – têm implicações na **confiança** que está em jogo. Atualizando as questões, quem mede e como é medido o consumo de energia elétrica? A quem interessa esse ou aquele método de medição ou meio de avaliação da qualidade da medição empregados? Questões de natureza ética não só estão presentes nas atividades metrológicas, como, de algum modo, contribuíram para forjar o sistema metrológico que herdamos.

1.2.3.3 Chang: a construção das escalas de temperatura

O historiador e filósofo da ciência estadunidense Hasok Chang, de origem sul-coreana, narra e interpreta do ponto de vista epistemológico, em *Inventing temperature* (2004), as diversas etapas históricas que levaram à conquista de medições confiáveis da grandeza temperatura. Tais etapas correspondem aos problemas enfrentados pelos cientistas engajados neste propósito: o estabelecimento dos pontos fixos da escala de temperatura, a escolha dos

fluidos para servirem de padrão, a extensão da escala para faixas nas quais as medições exigiam outros métodos e o estabelecimento da escala “absoluta” de temperatura.

Embora desde o século XVII já fossem construídos instrumentos que empregavam o mesmo princípio de funcionamento do termômetro de mercúrio, as respostas desses instrumentos não eram confiáveis, pois as escalas eram “arbitrárias”. Esses instrumentos, que Chang prefere chamar de “termoscópios”, apenas indicavam aumento ou diminuição de temperatura, mas nenhuma quantificação útil (CHANG, 2004, p. 41). Até chegar às medições de temperatura num sistema coerente, os desafios de cada etapa tiveram de ser superados com muito **engenho** e **colaboração** entre os cientistas. Chang acompanha detalhadamente as propostas teóricas e, principalmente, experimentais que levaram à superação daqueles desafios. Mas, o que nos interessa aqui são suas discussões sobre a dinâmica dos acontecimentos que proporcionaram a gradual conquista de metodologias e conceitos úteis para a medição de temperaturas e que lançaram as bases da atual termometria.

É particularmente importante destacar o conceito de “**iteração epistêmica**” que Chang propõe para explicar o avanço passo a passo nas propostas para as medições. Iteração é um termo empregado na matemática para o processo de obtenção de resultados (por exemplo, as raízes de uma equação) através de aproximações sucessivas. Na matemática, parte-se de valores arbitrariamente escolhidos (“chutados”) que são testados na equação para se obter novos valores mais aproximados que, em seguida, numa nova iteração, são novamente testados para obter valores ainda melhores. Segue-se, assim por diante, realizando quantas iterações forem necessárias até obter resultados satisfatórios. Na iteração epistêmica, cada novo padrão, ou nova metodologia, ou novo desenho de instrumento de medição proposto por um investigador proporciona resultados, nem sempre satisfatórios, que são empregados por outros investigadores para obter melhores resultados. Essa dinâmica, quando bem-sucedida (pois, de fato, isso pode não acontecer), forma uma espiral que leva a **progressos epistêmicos** (CHANG, 2004, p. 44-5).

Nas palavras de Chang, a “iteração epistêmica é um processo no qual sucessivos estágios do conhecimento, cada um construído sobre o estágio precedente, são criados para aumentar o alcance de certos objetivos epistêmicos” (CHANG, 2004, p. 45). Além de ter ocorrido um processo desse tipo para a superação das etapas que mencionamos no primeiro parágrafo da subseção, ele teria ocorrido também na busca de uma boa exatidão na construção da escala absoluta de temperatura (CHANG, 2004, p. 213).

Willian Thompson propôs que a escala de temperatura absoluta fosse ajustada através dos desvios de comportamento de alguns gases em relação à lei dos gases ideais e de outros

dados experimentais obtidos para esses gases. O ajuste da escala teve de ser realizado por “aproximações sucessivas”, baseadas nos diversos resultados experimentais alcançados. De acordo com Chang, a **convergência** entre os valores forneceu uma indicação da exatidão funcional do método empregado, pois não havia valores “corretos” ou “verdadeiros” contra os quais os resultados pudessem ser comparados e a exatidão do método determinada (CHANG, 2004, p. 214-7). Apontando uma dinâmica semelhante, Kuhn comenta sobre os estágios finais de desenvolvimento dos conceitos de calor específico e de calor latente que teriam contado com “uma interação constante entre hipóteses intuídas e medições contumazes, cada qual forçando a outra a se adequar”³³ (KUHN, 2011, p. 235).

A narrativa e a análise que Chang faz do desenvolvimento histórico da termometria mostram que o progresso se deu muito mais pela busca de **coerência** do que a partir de **fundações teóricas** propostas pelos cientistas. Trata-se de propor uma solução **coerentista** para o problema da coordenação entre teoria e observação, no qual a relação entre proposição teórica e observação empírica ameaça levar à circularidade viciosa, pois a observação, em geral, se dá com base na teoria. “No contexto das medições, onde a justificação necessita ser feita mais precisamente, o problema da circularidade emerge com mais clareza” (CHANG, 2004, p. 221).

Na solução proposta por Chang, bem como naquela apresentada por van Fraassen (2008) (subseção 1.2.3.1), ao invés de “tentar evitar a circularidade da coordenação completamente, como seus predecessores o fizeram, eles se propuseram a mostrar que a circularidade não é viciosa” (TAL, 2013, p. 1161). As medições constituem, quase sempre, o terreno no qual ajustes são realizados para levar a teorias mais consistentes e resultados experimentais de melhor exatidão. A convergência dos resultados assegura aos cientistas a “identidade” do objeto sob medição, ao mesmo tempo que possibilita o aumento da exatidão dos procedimentos. Para Chang, “a construção do conceito de uma grandeza e a padronização de sua medição são tarefas **co-dependentes e iterativas**” (TAL, 2017b, p. 38; grifo nosso).

Tendo alcançado alto grau de coerência, proporcionando medições com excelente exatidão, o atual sistema metrológico pode parecer perfeito demais para ter passado por fases em que as teorias físicas eram vagas e as medições grosseiras. Esse é o risco que corremos atualmente ao contemplar a sofisticada articulação entre teoria e experimento quantitativo que muitas áreas da física exibem. A história das ciências mostra que a coerência atual de muitas áreas foi conquistada passando por tentativas baseadas em resultados anteriores,

³³ Para esta observação, Kuhn se baseou na obra de McKie e Heathcote: *The Discovery of Specific and Latent Heats*. London: E. Arnold, 1935.

aproximações, reformulações com novas tentativas etc. Nesse sentido, as obras de Chang (2004) e Goodway (2004) são exemplares. Medições exatas não emanam espontaneamente de mentes de cientistas iluminados, mas são conquistas que contaram com boas ideias em todas as fases do processo, **colaboração** entre os cientistas e **muito trabalho teórico e experimental**. Podemos acrescentar que, ainda hoje, na verdade, as medições precisas e exatas continuam demandando os mesmos ingredientes.

A história das medições fornece elementos fundamentais para compormos de modo **menos idealizado** o conceito de medição. Estudos históricos das medições mostram que para chegar a procedimentos de medição confiáveis é preciso superar alguns desafios. Dentre as tarefas a serem implementadas, podemos apontar: (i) o estabelecimento de bases científicas teóricas, mesmo que incipientes, que possibilitem a identificação e a definição de grandezas; (ii) a adoção de unidades de medição e suas padronizações; (iii) o estabelecimento de escalas de trabalho; (iv) o desenvolvimento de métodos, procedimentos e instrumentos de medição; (v) a comparação entre medições realizadas por diferentes instituições e por diferentes métodos e procedimentos; e (vi) a disseminação das unidades, dos padrões e dos métodos de medição. Obviamente, a importância relativa dessas tarefas e a dificuldade no tratamento delas varia de área para área e de grandeza para grandeza.

Os cinco tópicos acima são os desafios comumente enfrentados para desenvolver a quantificação de grandezas físicas. No segundo capítulo (seção 2.1), onde discutimos os conceitos de matematização e de quantificação, essas tarefas são mencionadas. Na seção seguinte, abordamos as perspectivas filosóficas e as teorias das medições propostas, essencialmente, no século XX.

1.3 Filosofias e teorias da medição

O desenvolvimento das medições das grandezas físicas (tais como comprimento, massa, tempo, temperatura, corrente elétrica, resistência elétrica etc.) não dependeu de uma teoria formal das medições. A instituição do sistema métrico francês, no final do século XVIII emprestou um caráter científico às medições sem, para isso, demandar uma teoria matemática ou lógica das medições (WILLIAMS, 2014). Durante todo o século XIX, o desenvolvimento das medições de temperatura e de grandezas elétricas também se deu sem as bases de uma estrutura formal (CHANG, 2004; GOODAY, 2004). Porém, somente nas últimas décadas surgem os primeiros trabalhos sobre medições com preocupações formais, como os trabalhos de Maxwell (1873), Helmholtz (1887), Mach (1896) e Poincaré (1898) (TAL, 2017b, p. 6).

Cientistas e filósofos se deram conta de que a introdução de métodos quantitativos para novas áreas do conhecimento, mesmo no que concerne às ciências físicas, podia ser problemática e suscitar dúvidas quanto à validade do procedimento. E quando se tratava de ciências sociais, econômicas e comportamentais, compreendia-se que era ainda maior a necessidade de uma base lógica para as quantificações.

Durante o século XX, diversas filosofias e teorias da medição foram propostas por filósofos e cientistas. Os estudos filosóficos de base histórico-epistemológica, discutidos na seção anterior, abordam apenas certos aspectos das medições. Diferentemente desses, os trabalhos discutidos nessa seção buscam **interpretar** as medições no quadro geral das perspectivas filosóficas das ciências ou fornecer uma **teoria sistematizada** das medições. A seguir buscamos abordar brevemente o significado das perspectivas realista (1.3.1); das teorias lógico-matemáticas (1.3.2); operacionalista (1.3.3); e convencionalista (1.3.4). Essas perspectivas não são excludentes entre si e muitos dos trabalhos produzidos nas últimas décadas discutem e/ou as tomam como referência. Na subseção 1.3.5, fazemos uma breve ponderação sobre a disputa entre perspectivas realistas e antirrealistas.

1.3.1 Realismo

Pode-se compreender o realismo a respeito das teorias científicas sob três dimensões: metafísica, semântica e epistemológica. Na dimensão metafísica, o realismo compromete-se com a existência, de modo independente da mente, “do mundo investigado pelas ciências”, na semântica, “compromete-se com a interpretação literal das alegações científicas sobre o mundo” e, na dimensão epistemológica, “compromete-se com a ideia de que as alegações teóricas [...] constituem conhecimento do mundo”. Numa formulação geral, compartilhada por muitas de suas versões, o realismo entende que “nossas melhores teorias fornecem descrições verdadeiras ou aproximadamente verdadeiras de aspectos observáveis e inobserváveis do mundo independente da mente” (CHAKRAVARTTY, 2017, p. 4-7).

Cientistas e filósofos trataram as medições, majoritariamente, até o final do século XIX, sob a perspectiva realista: as propriedades medidas são consideradas inerentes às próprias coisas e a objetividade do processo é garantida pela existência real dessas propriedades. A afirmação da realidade dos números na natureza, conforme sustentada pela escola pitagórica na Grécia Antiga e a observação de Galileu sobre a linguagem numérica na qual a natureza teria sido escrita são exemplos de concepções realistas (MARI, 2003, p. 20-1). As abordagens realistas sustentam que “a medição é mais bem compreendida como uma

estimativa empírica de uma propriedade ou relação objetiva” (TAL, 2017b, p. 22). Mesmo que se possa dizer que as medições são sempre relativas, pois expressam a relação a um padrão (materializado na unidade de medição), as abordagens realistas ressaltam que a **relação** entre as grandezas (como a **razão** entre elas) é **real** e existe de forma independente da intervenção humana. O termo **estimativa** é empregado para ressaltar que os resultados das medições empíricas são **aproximações** do **valor verdadeiro, real**, da grandeza (TAL, 2017b, p. 22).

Eran Tal distingue entre o realismo a respeito de **propriedades** e o realismo apenas a respeito das **relações** entre as propriedades (TAL, 2017b, p. 22-3). Vamos, nesta tese, falar do realismo em relação às grandezas físicas³⁴, quer esse realismo se restrinja à relação entre grandezas ou se refira às próprias grandezas. Ademais, como observa Tal, a maioria dos filósofos que defenderam o realismo sobre a medição, o fizeram argumentando em favor de alguma forma de realismo sobre as propriedades:

Esses realistas argumentam que pelo menos algumas propriedades mensuráveis existem independentemente das crenças ou convenções dos humanos que as medem e que a existência e a estrutura dessas propriedades fornecem a melhor explicação para as características chave da medição, incluindo a utilidade dos números para expressar os resultados de medições e a confiabilidade dos instrumentos de medição (TAL, 2017b, p. 23)

Conforme escreve o filósofo da ciência estadunidense Richard Boyd, os realistas sustentam que “o produto característico da pesquisa científica de sucesso é o conhecimento de fenômenos largamente independentes da teoria”, mesmo nos casos em que “os fenômenos relevantes não são [...] observáveis” (BOYD, 1990, p. 355). Boyd argumenta que a modificação ou a extensão de procedimentos operacionais para medição de grandezas com base em novos desenvolvimentos teóricos é explicável de forma confiável pela “concepção realista da medição e do progresso teórico”, enquanto outras abordagens empiristas teriam dificuldade em explicar o sucesso das extensões teóricas (BOYD, 1990, p. 361). Dessa forma, o realismo científico explicaria “o progresso cumulativo, embora não necessariamente convergente, por aproximações sucessivas da verdade” e “pela relação dialética entre a teoria corrente e a metodologia”:

A verdade aproximada das teorias correntes explica porque nossos procedimentos de medição são (aproximadamente) confiáveis. A confiabilidade, por sua vez, auxilia a

³⁴ Grandezas, conforme sua definição no VIM3 (ver subseção 1.1.2.1), são propriedades às quais podem ser atribuídos valores, isto é, são mensuráveis.

explicar porque investigações experimentais ou observacionais são bem sucedidas em descobrir novos conhecimentos teóricos, os quais, por sua vez, podem produzir melhorias em técnicas de medição etc. (BOYD, 1990, p. 361).

Um argumento comumente empregado em favor do realismo (denominado argumento do milagre ou argumento sem milagres) é o de que o “extraordinário sucesso” das teorias científicas largamente aceitas, incluindo os sucessos de suas previsões marcados por “surpreendente exatidão”, é mais bem explicado se consideramos essas teorias “verdadeiras”. Do contrário, tal sucesso teria que ser creditado a um “milagre” (CHAKRAVARTTY, 2017, p. 10).

A constatação de que o conhecimento gerado pela medição é necessariamente aproximado pode ser interpretada sob diferentes perspectivas, mas em qualquer uma delas, o erro e/ou a incerteza de medição estão implicados. Para as perspectivas operacionalista e convencionalista, trata-se da impossibilidade de obter valores exatos em processos empíricos coordenados por operações ou por convenções, como veremos nos tópicos 1.3.3 e 1.3.4. **Para o realismo, trata-se da aproximação do “valor verdadeiro da grandeza”.** Como não podemos, de fato, conhecer o valor verdadeiro de uma grandeza, esse conceito é problemático. Na abordagem de incerteza adotada pelo GUM, o termo “verdadeiro” é considerado redundante (INMETRO, 2012a, D.3.5) e o valor verdadeiro é definido apenas como “um valor compatível com a definição do mensurando” (INMETRO, 2012a, 2.11). Buscando trabalhar prioritariamente com grandezas conhecíveis, os documentos da JCGM (GUM e VIM3) apresentam uma abordagem operacional que evita se comprometer com um realismo em relação às grandezas. Entretanto, como veremos no terceiro capítulo, a discussão sobre o conceito de valor verdadeiro continua viva no âmbito da metrologia, fazendo com que perspectivas realistas continuem a ser valorizadas.

Domotor e Batistky (2008) desenvolveram, de forma analítica e do ponto de vista não representacional, a proposta de uma teoria das medições sob a perspectiva do realismo científico. Denominam sua abordagem de “Teoria Analítica das Medições” (*Analytic Theory of Measurement*, referida pelo acrônimo ATM). Para eles, as teorias lógico-matemáticas enfrentam diversos problemas devido à sua base empírica, e mesmo que essas teorias abandonassem a base empírica ainda assim apresentariam algumas desvantagens. Dente elas, a forma como tratam o erro e a incerteza: para abordar as imperfeições lógicas de erros induzidos nos resultados de medições, as teorias atribuem as imperfeições “ao que está sendo medido” e não a aspectos “de nossos modelos e procedimentos” (DOMOTOR; BATISTSKY, 2008, p. 131-3). Os autores apresentam os pressupostos da concepção realista que advogam

em quatro itens que reproduzimos abaixo porque entendemos que resumem de forma fidedigna a concepção realista das medições:

- (i) grandezas são entidades teóricas da ciência, interpretadas como características objetivas dos sistemas naturais e não meramente como nossos meios de representação conveniente de um mundo inerentemente qualitativo;
- (ii) grandezas e suas relações matemáticas (leis de representação) são descobertas por cientistas, mais do que impostas por eles a um mundo inerentemente qualitativo;
- (iii) o propósito da medição é a determinação de propriedades de sistemas naturais, alcançada pelo ato físico de avaliar grandezas que produz um número real (ou complexo), mais do que um ato de atribuir números à realidade não-quantitativa como representações numéricas convenientes;
- (iv) enquanto grandezas são instanciadas (em várias quantidades, graus de intensidade) por sistemas naturais, elas têm, por assim dizer, ‘uma vida própria’ [...] (DOMOTOR; BATISTSKY, 2008, p. 134).

No quarto item, os autores atribuem “vida própria” às grandezas, numa referência talvez irônica ao ponto de vista empirista de que “os experimentos possuem vida própria”³⁵. Respeitando esses quatro princípios, os autores desenvolvem formulações algébricas das grandezas envolvidas nas teorias físicas, inclusive suas dependências temporais, para modelar analiticamente os processos de medição.

As concepções realistas foram formuladas em oposição às versões operacionalistas e convencionalistas que dominaram as discussões filosóficas sobre medições entre os anos 1930 e 1960 (TAL, 2017b, p. 24). Isso porque a influência exercida pelo empirismo lógico do Círculo de Viena não deixou espaço para teses realistas. Os realistas são menos críticos às teorias matemáticas das medições, mas uma interessante consequência do realismo com relação aos números é que, desse ponto de vista, “a medição não é uma atividade de representação, mas uma atividade de aproximação de números independentes da mente” (TAL, 2017b, p. 24-5). Por sua vez, como referimos, o trabalho de Domotor e Batistisky é crítico a abordagens empiristas, inclusive às teorias representacionais. Na subseção 1.3.5, tecemos alguns comentários sobre a contenda entre as perspectivas realistas e antirrealistas relacionadas às medições.

1.3.2 Teorias lógico-matemáticas

As teorias lógico-matemáticas das medições (abreviadamente, conforme algumas publicações, MTs, acrônimo de *measurement theories*) desenvolveram-se a partir das obras

³⁵ Embora Hacking, que cunhou o termo “vida própria do experimento”, se autodenomine um realista de entidades, sua abordagem tem uma ampla base histórica, empírica e experimental.

publicadas no final do século XIX sobre medição, mencionadas no primeiro parágrafo da seção 1.3. Dentre aquelas obras, a do físico alemão Herman von Helmholtz (1821-1894), sobre “contagem e medição”, foi a que mais influenciou o desenvolvimento posterior das teorias. Por sua vez, o físico inglês Norman Campbell (1880-1949) publicou, nas primeiras décadas do século XX, trabalhos seminais sobre os fundamentos da medição (FILKELSTEIN; LEANING, 1984, p. 25). Podemos destacar aqui o volume *Physics: The Elements*, de 1920, no qual Campbell afirma que as medições são tão importantes para a física que essa disciplina pode ser distinguida exatamente pelo papel que as medições nela desempenham (CAMPBELL, 1920, p. 267).

Cada versão da MT é moldada pela **definição de medição** adotada. Em geral, a definição enfatiza que a medição é uma operação que visa relacionar conteúdos **empíricos** (propriedades, fenômenos etc.) a sistemas de **representação** (em geral, numéricos) que preservam as relações empíricas. Para Campbell, por exemplo, “a medição é um processo de assinalar números para representar qualidades”, dessa forma os números indicam uma “ordem” presente na propriedade qualitativa (CAMPBELL, 1920, p. 267). As MTs empregam princípios lógicos para formalizar o processo de medição, mas entendem que os números obtidos nas medições são **atribuídos** às propriedades empíricas, eles não são, em geral, tratados como características a priori do sistema empírico.

Os trabalhos em MT interessaram, sobretudo, aos pesquisadores de outras áreas para além das ciências físicas que buscavam implantar métodos quantitativos em suas disciplinas. A aplicação de princípios fundamentais foi considerada “essencial para o estabelecimento de métodos de medição, em particular nas ciências no estágio formativo de desenvolvimento” (FILKELSTEIN; LEANING, 1984, p. 25). Assim, a demanda de ciências tais como a psicologia e a economia por processos de quantificação fez com que os próprios pesquisadores dessas áreas, em meados do século XX, passassem a produzir trabalhos influentes em MT.

O psicólogo estadunidense Stanley Smith Stevens (1906-1993) deu importante contribuição ao ressaltar a necessidade da classificação de escalas de medição. Em artigo publicado em 1946, Stevens relata a dificuldade para a comunidade científica chegar a algum consenso sobre a quantificação da percepção sensorial humana e aponta que a causa do dissenso estava no **sentido** do que seja medição. Stevens entendia que seria mais fácil chegar a um acordo se os envolvidos no debate reconhecessem que a medição admite uma “variedade de formas” e que as escalas de medição podem ser divididas em classes definidas. “Essas classes são determinadas tanto pelas operações empíricas invocadas no processo de ‘medir’,

quanto pelas propriedades formais (matemáticas) das escalas” (STEVENS, 1946, p. 677). Stevens sustenta que, num sentido mais amplo, “a medição é a atribuição de numerais a objetos ou eventos **segundo regras**”. As diferentes regras empregadas nas medições levam a diferentes tipos de escalas e de medições (STEVENS, 1946, p. 677, grifo nosso). Na Tabela 1, adaptada da obra de Stevens, são mostradas características de quatro tipos de escalas.

Tabela 1 – Tipos de escalas com as respectivas operações empíricas envolvidas e estrutura matemática³⁶, segundo Stevens

Escola	Operações empíricas básicas	Grupo de estrutura matemática	Exemplo
Nominal	Determinação de igualdade	Permutação $x' = f(x)$ <i>f(x)</i> significa qualquer substituição um-para-um	Numeração de jogadores de uma equipe
Ordinal	Determinação de maior ou menor	Isotônico $x' = f(x)$ <i>f(x)</i> significa qualquer aumento monotônico	Escala Mohrs de dureza de minérios
Intervalo	Determinação de igualdade ou diferenças de intervalos	Linear $x' = ax + b$	Escala de temperatura em graus Celsius ou Fahrenheit
Razão	Determinação da igualdade de razões	Similaridade $x' = ax$	Escala de temperatura termodinâmica em graus kelvin

Legenda: Para simplificar, não foram incluídos na tabela as operações estatísticas possíveis para cada tipo de escala, que constam na tabela original. Por outro lado, incluímos exemplos de escalas. Fonte: Adaptado de STEVENS, 1946, p. 678.

Nos trabalhos realizados a partir da metade do século XX, as preocupações da MT que se concentravam nas condições empíricas da quantificação e na classificação de escalas convergiram na obra do filósofo estadunidense Patrick Suppes (1922-2014) e colaboradores (DÍEZ, 1997, p. 267). A abordagem de Suppes, com as extensões realizadas por outros autores, é chamada de Teoria Representacional das Medições (*Representational Theory of Measurement*, RTM). Suppes e colaboradores publicaram aquela que é considerada a “opus

³⁶ Embora um conceito de medição mais amplo envolva as escalas nominal e ordinal, as grandezas para as quais concentramos nosso foco nesta tese são aquelas que envolvem operações matemáticas como as escalas de intervalos e de razões. Um dos motivos do foco que adotamos é que a avaliação da incerteza de medição é muito mais importante em grandezas que envolvem as operações matemáticas mencionadas.

magna” (DÍEZ, 1997, p. 253) da RTM, em três volumes: *Foundations of Measurement* (KRANTZ *et al*, 1971; SUPPES *et al*, 1989; e LUCE *et al*, 1990).

A RTM define as medições como “construções de mapas” ou o **mapeamento** de “estruturas empíricas relacionais em estruturas numéricas relacionais”, dessa forma, os números **representam** as propriedades empíricas (TAL, 2017b, p. 16-7). Na exposição da RTM, encontram-se três seções principais: (1) uma descrição do sistema relacional empírico; (2) um teorema de representação; e (3) uma condição (ou teorema) de unicidade (*uniqueness condition*); sendo todas estas seções apresentadas em termos lógico-formais a partir dos axiomas (FILKELSTEIN; LEANING, 1984, p. 26). O teorema de representação se baseia em algum tipo de **homomorfismo** entre o sistema empírico e o sistema numérico (ou simbólico) empregado. A condição de unicidade, que satisfaz o teorema de representação, envolve uma função de transformação lógico-matemática que pode ser chamada de escala de medição (FILKELSTEIN; LEANING, 1984, p. 26).

O filósofo da medição israelense Eran Tal descreve a RTM da seguinte forma:

Das suposições ou axiomas, os autores da RTM derivam a adequação representacional de cada tipo de escala, bem como as famílias de transformações possíveis que faz aquele tipo de escala único. Dessa forma, a RTM fornece uma ligação conceitual entre a base empírica da medição e a tipologia de escalas (TAL, 2017b, p. 16).

Tendo em vista os objetivos da tese, optamos por não apresentar aqui o conteúdo formal das MTs ou da RTM. Para uma análise cuidadosa da RTM, remetemos o leitor para a tese de doutorado em filosofia de Félix Flores Pinheiro, defendida em 2021 na Universidade Federal de Santa Catarina, intitulada *Investigações Epistêmicas das Medições Científicas: representações numéricas, conhecimento e objetividade* (PINHEIRO, 2021, cap. 3). A tese de Pinheiro não apenas apresenta a evolução das teorias matemáticas da medição como discute o papel da RTM no fornecimento de justificativas para o conhecimento aportado pelas medições.

Mesmo em face da preocupação geral com a incerteza de medição que tem prevalecido no âmbito da metrologia, desde as últimas décadas do século XX, “a maior parte dos desenvolvimentos da teoria das medições tem se preocupado com o caso da medição precisa” (FILKELSTEIN; LEANING, 1984, p. 26), isto é, na qual o erro e/ou a incerteza são tratados como desprezíveis e por isso não são levados em conta.

A preocupação original das MTs é com a formalização lógica do processo de medição, sendo esse processo tomado como a atribuição de **um número** a uma qualidade do sistema

empírico – e não como a determinação de **um intervalo** de valores que pode ser atribuído ao sistema. Dessa forma, o foco das MTs concentrou-se em estabelecer as bases lógicas para os diversos tipos de medição de forma idealizada, sem ênfase nos erros e na incerteza. Os autores argumentam que os métodos refinados empregados na física, para medições de propriedades como massa e distância, eliminam as “intransitividades” presentes nos métodos mais grosseiros ou aquelas são tratadas como erros sistemáticos introduzidos. Nessas situações, a idealização na qual a RTM se baseia é considerada suficiente (SUPPES *et al.*, 1989, p. 299).

As teorias lógico-matemáticas jogam luz sobre alguns aspectos das medições: essas não são **apenas** comparações com padrões estabelecidos. As propriedades e os fenômenos submetidos às medições devem ser modelados na forma de **funções** baseadas em teorias. Conteúdos lógicos suportam o conhecimento obtido pelos processos de medição, mas tal conhecimento deve ser tomado no âmbito da teoria que possibilita a modelagem da propriedade ou do fenômeno. As MTs fornecem um “enquadramento abstrato para construção de escalas e para a significância da representação” (MARI *et al.*, 2017, p. 48).

Não é incomum encontrar em obras mais recentes de filosofia da medição críticas às limitações das MTs. Por exemplo, Mari e colaboradores afirmam que o tratamento dado por essas teorias é tão genérico que é “incapaz de distinguir entre medição e representação consistente” (MARI *et al.*, 2017, p. 48). Eran Tal comenta que a RTM emprega modelos (no sentido da teoria dos conjuntos) para elucidar a adequação dos diferentes tipos de escala, mas não enfrenta capciosos problemas epistêmicos concernentes à medição, que ele discute em sua tese e que relatamos na seção 1.4 (TAL, 2012, p. 18). Entretanto, filósofos e cientistas, especialmente os que trabalham com medições em psicologia e ciências sociais, seguem produzindo trabalhos com os mesmos objetivos das MTs (LUCE; SUPPES, 2002). Além disso, alguns trabalhos da nova filosofia da medição, que buscam abordagens alternativas às formalizações, mantêm os trabalhos das MTs como referência (p. ex. FRIGERIO; GIORDANI; MARI, 2010).

1.3.3 Operacionalismo

O físico experimental estadunidense Percy Bridgman (1882-1961), ganhador do prêmio Nobel em 1946 pelo seu trabalho sobre o comportamento da matéria sob altas pressões, apresentou na obra de cunho filosófico *The Logic of the Modern Physics*, de 1927 (republicado em 1958), a polêmica concepção de que os significados dos conceitos em física são dados **pelas operações** envolvidas para apreendê-los. Na formulação de Bridgman: “[E]m

geral, nós queremos significar [*mean*] por qualquer conceito nada mais do que um conjunto de operações; *o conceito é sinônimo do conjunto de operações correspondentes*” (BRIDGMAN, 1958, p. 5; grifo do autor). O conceito de comprimento seria dado pelas operações que empreendemos para medi-lo e, se o fazemos por diferentes métodos, temos diferentes conceitos. Uma coisa é medir o comprimento de um objeto aqui na terra, outra é medir a distância entre corpos celestes e outra, ainda, distâncias no mundo microscópico: as operações empregadas para as medições são completamente diferentes e, por isso, Bridgman propôs que fossem tratados como conceitos diferentes. Uma vez que é o próprio procedimento de medição que fornece o significado do mesurando, o problema da coordenação não se coloca, pois, as operações fornecem a identidade entre procedimento e grandeza submetida à medição.

O enfoque de Bridgman ficou conhecido como **operacionalismo**; sua ênfase no âmbito empírico-operacional se opõe à concepção realista das medições. Diferentemente das MTs que se baseiam em princípios teóricos para determinar as “propriedades matemáticas das escalas e as condições de suas aplicações”, o operacionalismo foca no “significado” e no “uso das grandezas” (TAL, 2017b, p. 17-8). Baseia-se no “puro empirismo” (BRIDGMAN, 1958, p. 4) dos métodos de medição para fornecer as bases conceituais da física. Ambos, operacionalismo e MTs, porém, têm bases empíricas e alguns teóricos das MTs, como Stevens, também sustentaram aspectos operacionais. Da mesma forma que as MTs, o operacionalismo foi bem recebido pelos empiristas lógicos, que o relacionaram ao verificacionismo (TAL, 2017b, p. 19-20).

O objetivo do físico estadunidense ao propor que as definições de um conceito fossem dadas pelas suas operações era conferir bases mais sólidas aos conceitos empregados, de modo a não correr o risco de ter que revisar amplamente os conceitos (BRIDGMAN, 1958, p. 6-12). Segundo Bridgman, a completa revisão de conceitos básicos como os de tempo, espaço, simultaneidade etc., provocada pelas teorias da relatividade de Einstein, foi necessária porque os conceitos da física newtoniana eram abstratos e alguns não correspondiam a nada na natureza (BRIDGMAN, 1958, p. 4-5). Se um conceito for definido pelas suas operações, e não por suas propriedades, as chances de ter que revisá-lo são muito menores. Em função disso, deve-se “exigir que o conjunto de operações equivalente a qualquer conceito seja um único conjunto”, para que não ocorram ambiguidades em aplicações práticas (BRIDGMAN, 1958, p. 6).

A proposta do operacionalismo de Bridgman foi criticada pelo filósofo alemão Carl Hempel (1905-1997) (em *Philosophy of Natural Science*, 1966): ela faria proliferar

infinitamente o número de conceitos, comprometendo o critério de simplicidade e de abordagem unificada da ciência (CHANG, 2017, p. 27). De fato, o operacionalismo tal como proposto por Bridgman, apesar do “entusiasmo com que foi recebido inicialmente pelos positivistas lógicos, que o viram como similar ao verificacionismo”, revelou-se problemático como base para uma teoria do significado e não permaneceu influente na física ou na metrologia na segunda metade do século XX (TAL, 2017b, p. 20).

Mesmo que o operacionalismo de Bridgman tenha graves problemas, sua obra possui perspectivas interessantes para o tema desta tese. A inspiração experimental da obra de Bridgman fez com que o físico tratasse a questão da medição com um viés **empírico** que encontra ressonância em muitas abordagens das medições e dos problemas relacionados à exatidão das medições. Além disso, Hasok Chang baseia-se no operacionalismo de Bridgman para oferecer uma perspectiva filosófica que denomina de “realismo ativo” no qual a medição constitui importante instância ativa de intervenção na realidade. Abordamos a seguir essas questões.

Tanto no livro de 1927, quanto na palestra que ministrou num congresso de Métodos Axiomáticos em 1959, intitulada “*How much rigor is possible in Physics?*”, a questão da impossibilidade da exatidão absoluta das medições foi ressaltada por Bridgman. Apontando na mesma direção que a tese de Bachelard (subseção 1.2.1 desta tese), Bridgman sustenta que nunca temos um conhecimento experimental perfeitamente nítido, pois há sempre uma “**penumbra de incerteza**” envolvendo qualquer determinação quantitativa. Tal penumbra pode ser diminuída com a melhoria da exatidão da medição, mas é “uma consequência geral do caráter **aproximado** de toda medição, que nenhuma ciência empírica pode jamais fazer declarações exatas” (BRIDGMAN, 1958, p. 34-6; grifo nosso). As situações em que as ciências veem os fenômenos com menos nitidez e nas quais, portanto, as medições são menos exatas, correspondem, em geral, às pesquisas em novas zonas dos fenômenos³⁷.

Se buscamos saber o quanto a física pode ser rigorosa, ou seja, “nítida” e “precisa” em suas afirmações e quantificações, temos que compreender que **nunca é possível alcançar nitidez e precisão absolutas**. Toda medição realizada em laboratório é **nebulosa** (confusa, *fuzzy*) em função da inevitável presença do **erro** (BRIDGMAN, 1959, p. 225-6). Alguns tratam os erros nas medidas físicas como “epifenômenos mais ou menos irrelevantes que

³⁷ Bridgman se refere tanto às medições em Mecânica Quântica que estavam em foco no final dos anos 1920, quanto ao seu próprio campo de pesquisas em altas pressões. Em condições de altas pressões (cerca de 200 katm), os procedimentos de medição têm de ser específicos, pois os instrumentos usados a baixas pressões entram em colapso.

poderiam ser evitados” com a construção de instrumentos mais precisos. Porém, a investigação da estrutura atômica da matéria mostrou que o instrumento de medição está envolvido no limite de exatidão que se pode alcançar. “Agora parece que a ligação do erro com todo tipo de medição física deve ser vista como inevitável”, uma vez que a medição resulta da ligação entre o mundo externo e o cérebro humano (BRIDGMAN, 1959, p. 227-8).

Bridgman abordou também o problema da relação entre física e matemática. Há nessa última um ideal de perfeição que os fenômenos empíricos não podem alcançar. É possível dar certo sentido físico real ao ideal de perfeição quando se consegue gradativamente diminuir a imprecisão das medições. Dessa conquista, muitas vezes, se deduz, de forma enganosa, que as imperfeições podem ser futuramente eliminadas para se chegar à verificação exata das relações matemáticas. Destacamos a seguir sua linha de raciocínio:

Daí surge a visão comum de que se pudéssemos eliminar todas as imperfeições de nossas medições, as relações da matemática seriam exatamente verificadas; supõe-se que os princípios matemáticos são ativos na natureza, controlando os fenômenos naturais, como Pitágoras tentou expressar com a harmonia das esferas e as relações místicas dos números. [...] Essa visão idealizada só podia ser mantida no período em que a exatidão nas medições era baixa, mas agora deve ser abandonada. [...] Não há mais base para a idealização em matemática e para a visão de que nosso conhecimento imperfeito da natureza é responsável pela falha em encontrar na natureza as relações matemáticas precisas (BRIDGMAN, 1958, p. 61).

A perspectiva de Bridgman, que associa a ideia de exatidão absoluta a certo idealismo, segue o mesmo ponto de vista de Bachelard e de Borel que discutimos na subseção 1.1.2. O caráter “aproximado”, no sentido de “não absoluto”, do conhecimento obtido pelo processo de medição de grandezas indica a impossibilidade de exatidão absoluta que se expressa na incerteza. Como o próprio Bachelard havia mencionado, o termo aproximado é empregado sem o compromisso realista de que a aproximação se faz em relação a um “valor verdadeiro”. No segundo capítulo (subseção 2.1.3), discutimos a questão da perfeita adequação da matemática para os processos de quantificação das grandezas físicas criticado por Bridgman.

Embora o operacionalismo possa ser visto como antagonista do realismo científico, Hasok Chang se baseou nas teses operacionalistas de Bridgman para propor um tipo de **realismo ativo** que leva ao progresso da ciência. A ideia de Chang é que **o sistema como um todo** das práticas científicas, incluindo aí operações mentais e de “papel-e-lápis”, é que faz “contato” com a realidade. Os conceitos “multifacetados”, empregados na prática científica, fazem a ligação entre teoria e observação e facilitam a “aprendizagem da realidade” (CHANG, 2017, p. 34-5). A multiplicidade de métodos de medição, ao invés de contradizer o operacionalismo, deve ser “celebrada como riqueza de significado”, mas, “essa riqueza deve

ser formatada de um modo coerente” (CHANG, 2017, p. 35). Para Chang, Bridgman estava certo ao dizer não podemos supor **simplesmente** que métodos diferentes que medem a mesma coisa realmente o façam. Porém, em alguns casos, a conexão pode ser estabelecida empregando diversas estratégias: desde a “apuração da concordância numérica em resultados de medição” até a “demonstração teórica” de que os métodos medem a mesma grandeza. O objetivo é “estabelecer tantas ligações confiáveis quanto possíveis no todo do sistema de práticas envolvendo o conceito em questão” (CHANG, 2017, p. 35).

De fato, a comparação entre resultados de medição da mesma grandeza obtidos por métodos diferentes constitui uma das facetas notáveis das ciências físicas. Tais comparações, em geral, ocorrem no âmbito do sistema metrológico e o que fornece o critério para a comparação entre resultados, como mencionamos anteriormente, são as incertezas de medição estimadas. Como consequência de uma comparação bem-sucedida entre medições da mesma grandeza baseadas em teorias distintas, os cientistas são levados a falar da propriedade física como um atributo da realidade. Tratam tais propriedades como pertencentes ao mundo, mas evitam fazer afirmações metafísicas sobre a realidade. Comportam-se de acordo com um realismo científico **implícito**, embora sem compromissos metafísicos.

A partir do empirismo operacionalista de Bridgman, Chang formula um “realismo ativo”, no qual as diferentes operações convergem para caracterizar as propriedades físicas estudadas. Mas, com esse tipo de realismo, Chang não está interessado na realidade **metafísica** das grandezas, pois quer “reenquadrar o debate como um todo, tirando-o de seu foco na verdade” (CHANG, 2017, p. 32). Do mesmo modo que os cientistas, em geral, se empenham para extrair conhecimento dos fenômenos estudados, Chang reconhece que todos os recursos (teóricos e experimentais) devem ser empenhados para vencer as **resistências** da “realidade” ao conhecimento:

Então, eu tomo o realismo como um compromisso a se engajar com e aprender da realidade. Mas, o que é a realidade? Ao invés de entrar na metafísica séria, dou uma definição *operacional* da realidade. Proponho pensar na realidade (externa) como o que quer que não esteja sujeito à própria vontade. Como os pragmatistas apontaram, a *resistência* da natureza aos nossos mal concebidos planos é uma das mais importantes fontes da nossa própria noção de realidade (CHANG, 2017, p. 33; grifos do autor).

Nesse resgate do operacionalismo, permanece a ênfase nas **operações**, inclusive as teóricas, e permanece a base **empirista**, mas esses focos são reenquadrados pela perspectiva de que o conhecimento produzido pelas ciências tem por alvo e por baliza a **realidade**. Na versão de Chang, o operacionalismo “não deveria destruir a unidade sistemática; pelo

contrário, é uma estratégia otimizada para atingir a mais sistemática unidade que a natureza permitir, num forte sistema empirista do conhecimento” (CHANG, 2017, p. 36).

1.3.4 Convencionalismo

Da mesma forma que o operacionalismo, o convencionalismo também sustenta que o processo de medição depende de escolhas realizadas previamente. Porém, ao invés de relacionar a identidade das grandezas com as operações envolvidas em sua medição, enfatiza a existência de elementos escolhidos de forma **relativamente** arbitrária, **convencional**, no processo de medição (TAL, 2017b, p. 18; 20). Os padrões e as escalas de medição são exemplos de instâncias convencionais no estabelecimento de procedimentos de medição. Convencionalismo é um rótulo sob o qual são reunidas diferentes formas de conceber o papel desempenhado pelas convenções nas ciências. Os principais nomes relacionados a essa corrente são Mach, Poincaré, Carnap e Reichenbach. Como vimos na subseção 1.2.3.1, Mach apontou o emprego de convenções no desenvolvimento da termometria, enquanto Poincaré as identificou em medições do espaço e do tempo. Já Reichenbach, no âmbito do empirismo lógico, propôs a noção de “definições coordenativas” como “uma ligação semântica entre os termos teóricos e observacionais” (TAL, 2017b, p. 21).

Na concepção convencionalista, o problema da coordenação é superado sob a égide das convenções ou dos princípios que estabelecem a relação entre as grandezas, as escalas e os procedimentos de medição. Apesar da convenção escolhida guardar certo grau de arbitrariedade, é importante frisar que sua escolha se dá fundada em razões **teóricas** e **empíricas**. A realização de medições exatas e a viabilidade do emprego de procedimentos de medição exequíveis dependem, em larga medida, do modo como foram assentados os fundamentos da uma grandeza. Uma questão muito sensível no estabelecimento de tais fundamentos refere-se à relação da grandeza em questão (e sua unidade) com as demais grandezas envolvidas (e suas unidades).

Mach investigou “a noção de igualdade entre intervalos de temperatura” (TAL, 2017b, p. 20). Ele observou que diferentes tipos de fluidos termométricos se expandem a diferentes taxas quando aquecidos. A questão que se colocava era qual deles se expandia de forma mais uniforme. Porém, sem uma escala previamente escolhida, não há como indicar qual expansão é mais uniforme. Foi para enfrentar essa questão que Mach cunhou o termo “princípio de coordenação”, indicando que é necessária uma escolha **convencional** para permitir a aplicação de um conceito de grandeza (TAL, 2017b, p. 20-1). É por convenção que são

adotadas as escalas de medição e os padrões de unidades que servem de referência para as medições: “nós temos primeiro que escolher um objeto para comparação ou unidade de medida e estabelecer como outro objeto deve ser julgado igual ao padrão” (MACH, 1976, p. 248). Como relatamos na subseção 1.2.3.3, em *Inventing temperature* (2004), Chang reconstrói a história do estabelecimento de escalas de temperatura e das etapas enfrentadas para obter medições mais exatas.

O matemático, físico e filósofo da ciência francês Jules Henri Poincaré (1854-1912) aplicou tratamento semelhante ao de Mach aos conceitos de uniformidade do tempo e do espaço. Poincaré argumentou que “os procedimentos usados para determinar a igualdade entre durações derivam da preferência inconsciente dos cientistas por simplicidade descritiva, ao invés de [derivarem de] qualquer fato sobre a natureza” (TAL, 2017b, p. 21). Embora os fatos empíricos não determinem as convenções adotadas, Poincaré enfatiza que, **nem por isso**, as convenções são escolhidas de forma totalmente arbitrária. Para o físico francês, os **princípios** da mecânica também são convenções, da mesma forma que as escalas de medição das grandezas e suas unidades.

Investigando o conceito de “convenção” na concepção de mecânica de Poincaré, Jacobi e Reech, María de Paz identifica a origem do termo e de seu significado no campo **jurídico**. O emprego do termo na mecânica guarda relação com seu sentido no direito, onde as convenções significam

a livre decisão, isso é, as partes são livres para adotar a convenção; elas são reguladoras no sentido que elas *regulam* certas ações [...]; a não rigidez, i. e. convenções são capazes de ser mudadas e são flexíveis porque podem ser ajustadas, ou alguma parte ser suprimida; elas não são arbitrárias, significando que elas são baseadas em alguma razão; e finalmente, elas definem sua própria faixa de uso e sua adoção implica a adoção do que é uma consequência delas (PAZ, 2018, p. 227; grifo da autora).

Assim, juridicamente, as convenções são livremente escolhidas, reguladoras, flexíveis, não arbitrárias e definidoras de seu campo de ação. Há afinidades entre essas características encontradas no plano jurídico e o uso que Poincaré faz da convenção em suas reflexões sobre as ciências. Quando examina o sentido do termo nos textos do físico francês, Paz destaca a não arbitrariedade da seguinte forma: “[C]onvenções são escolhidas para fornecer uma descrição sistemática conveniente dos fenômenos, mas elas não são arbitrárias porque a experiência nos guia na escolha daquelas mais simples e convenientes” (PAZ, 2018, p. 240). Ou seja, há boas e restritivas **razões** para a escolha das convenções. As histórias que Chang e Gooday nos contam sobre as medições de grandezas pertencentes às ciências baconianas são

testemunhas do cuidado demandado pelas escolhas. Quando os primeiros “chutes” são ruins, será necessário um maior número de iterações (no sentido das iterações epistêmicas de Chang) para alcançar estabilidade na medição de uma grandeza.

As “definições coordenativas” propostas por Reichenbach, no espírito do empirismo lógico, são “afirmações [...] a priori” que regulariam o “uso de termos teóricos conectando-os com procedimentos empíricos” (TAL, 2017b, p. 21). Essas definições não podem ser empiricamente verificadas, por isso não são nem verdadeiras nem falsas. Segundo Tal, Reichenbach interpreta a definição coordenativa como uma **regra** arbitrária para regular o uso dos conceitos de grandezas, como, por exemplo, para estabelecer a igualdade dos valores das grandezas em dadas condições. “Sob o ponto de vista convencionalista”, enfatiza Tal, “a especificação de operações de medição” não exaure o sentido de conceitos das grandezas ou da igualdade entre elas, “dessa forma, evitando muitos dos problemas associados com o operacionalismo” (TAL, 2017b, p. 21-2).

Como vimos na subseção 1.2.3.1, van Fraassen aponta que as definições coordenativas só podem ser enunciadas num contexto histórico em que já existam coordenações anteriores. Embora, sem dúvida, necessárias, as convenções profícuas são enunciadas dentro de um **horizonte teórico** e a partir de **conhecimentos previamente** adquiridos. Como os procedimentos de medição evoluem de acordo com os aprimoramentos teóricos e técnicos, as convenções tendem a ser revisadas e, para isso requerem *feedbacks* dos resultados empíricos. A conjugação das propostas teóricas com os conhecimentos oriundos da experimentação é que possibilita o estabelecimento de convenções que garantam a coerência do sistema conceitual e dos resultados de medição.

O convencionalismo coloca ênfase numa etapa fundamental do desenvolvimento das medições e da metrologia como um todo, qual seja, a do estabelecimento de **convenções reguladoras** do sistema. Tendo em vista o tema da incerteza de medição, cabe ressaltar que resultados empíricos só podem ser analisados levando-se em conta a exatidão das medições. Assim, o processo de refinamento baseado nos resultados experimentais tem que ser compreendido como elemento imprescindível para o sucesso das convenções. Ao menos no que se refere à postura empirista de Mach, essa compreensão parecia estar presente: “[P]ois nós não podemos observar com exatidão sem limite” a relação entre a escala de medição e o objeto a ser medido (MACH, 1976, p. 247). Tal como o operacionalismo, o convencionalismo sublinha aspectos importantes do processo de medição, mas encontra limitações e/ou necessidade de reformulações para dar conta da atividade de medição.

1.3.5 Realismo versus antirrealismo das grandezas

Não se pode apontar uma única perspectiva desenvolvida durante o século XX como influência dominante no atual cenário das medições, seja no âmbito da metrologia, seja nas abordagens da filosofia das ciências. Ademais, como mencionamos no início dessa seção, as perspectivas não são excludentes entre si. Os trabalhos contemporâneos em filosofia da medição, que constituem as principais referências da tese, se baseiam em diferentes perspectivas desenvolvidas ao longo do século XX, fazendo com que o enfoque aqui desenvolvido seja também tributário dessas perspectivas. Apesar da influência geral dessas perspectivas, elas podem ser divididas segundo a polarização no que diz respeito ao realismo das grandezas. Vamos, a seguir, discutir, ao menos em linhas gerais, essa polarização.

O operacionalismo e o convencionalismo podem ser tomados como tipos de instrumentalismo ou de nominalismo³⁸ que tendem a tratar as grandezas pela perspectiva **antirrealista**, como instrumentos para a construção do conhecimento. São também variedades do empirismo que colocam ênfase “na experiência como fonte e matéria do conhecimento” (CHAKRAVARTTY, 2017, p. 26). Para o antirrealismo, apesar do reconhecido sucesso em termos de convergência de resultados de medição obtidos por diferentes métodos, não é possível sustentar que as grandezas sejam entidades realmente existentes e que possuam um valor verdadeiro a priori. A inferência **metafísica** (ou o salto metafísico) do reconhecimento de que a grandeza pode ser medida com boa exatidão para a afirmação da existência real da grandeza com valor verdadeiro careceria de bases lógicas e racionais. Sobretudo, o salto indutivo da adequação para a verdade não seria necessário, pois a adequação das teorias envolvidas e dos procedimentos de medição empregados para fornecer resultados empíricos coerentes fala por si só do sucesso de suas propostas. Sob influência do empirismo lógico, o antirrealismo foi dominante durante boa parte do século XX e fez prevalecer seu entendimento do que sejam as grandezas.

No outro polo, temos o **realismo** que foi dominante desde a antiguidade até fins do século XIX e que, com a perda de influência do empirismo lógico, na segunda metade do século XX, conheceu considerável revitalização. O realismo sustenta o oposto das perspectivas instrumentalistas: somente a existência real da grandeza e de seu valor

³⁸ Conforme classificaram Cartwright e Chang no verbete “*Measurement*” (CARTWRIGHT; CHANG, 2008, p. 367).

verdadeiro explicam a convergência de resultados de medição. Se, em função de limitações concernentes à determinação experimental, não podemos conhecer exatamente o valor verdadeiro da grandeza, podemos obter valores cada vez **mais próximos** daquele valor. Os bons resultados de medição de grandezas físicas pertencentes às nossas melhores teorias mostrariam que, de fato, isso vem ocorrendo. Em face da convergência geral de resultados e da expressiva melhora na exatidão das medições, o realismo defende que seria uma inferência óbvia reconhecer a existência real das propriedades correspondentes aos mensurandos. Essa aceitação evitaria a atribuição do sucesso das medições a um “milagre”.

Hoje é possível identificar filósofos e cientistas influentes trabalhando tanto sob a perspectiva realista quanto contrária a ela. Na verdade, em face de problemas filosóficos que ambas as teses enfrentam quando defendidas de modo ingênuo ou radical, o mais comum é que sejam defendidas perspectivas **qualificadas** e/ou **moderadas**. A qualificação se dá, por exemplo, com a proposta de diferentes realismos (aproximativo, de entidades, estrutural etc.). Ou ainda pela restrição dos conteúdos das teorias aos quais o realismo se aplica, indicando um realismo mais específico (CHAKRAVARTTY, 2017, p. 7-10). Por outro lado, há também diferentes posições e qualificações antirrealistas, tal como o empirismo construtivo. Muitas vezes, a qualificação por si só implica certa moderação. Esse movimento leva ao esmaecimento da disputa intelectual entre realismo e antirrealismo.

No que concerne às medições, a diferença entre as duas perspectivas repousa, praticamente, na **aceitação ou não da tese metafísica da real (pré) existência de grandezas**. Como observamos no tópico sobre realismo (subseção 1.3.1), quando o assunto é medição, o realismo se refere à tese metafísica da existência real das propriedades mensuráveis ou de suas relações, que aqui chamamos de realismo sobre as grandezas. Trata-se de uma inferência metafísica a partir da convergência de resultados de medição. Essa inferência da real existência pressupõe também que uma grandeza possui um valor verdadeiro próprio, intrínseco. Isso porque o conceito de grandeza implica quantificação, isto é, implica que a propriedade seja mensurável³⁹. Se a grandeza de fato existe, ela é quantificável (possui uma magnitude), então tem que possuir um valor a priori. Esse é o ponto (a inferência metafísica) que distingue as posições moderadas de realismo e antirrealismo na filosofia da medição.

³⁹ Numa possível tradução **literal** da definição em inglês, grandeza é uma propriedade que “possui **uma magnitude** que pode ser expressa por um número e uma referência” (JCGM, 2012, 1.1; grifo nosso). Note-se que estamos tratando, principalmente, de grandezas que podem empregar operações matemáticas em seu cálculo e que podem ser empregadas em cálculos de outras grandezas.

A adesão a uma perspectiva realista ou antirrealista tem um impacto moderado no desenvolvimento desta tese, até porque, nosso foco é direcionado mais para as questões **epistemológicas** do que para as **ontológicas**. Além disso, as instituições metrológicas têm adotado conceitos **operacionais**⁴⁰ como forma de mantê-los afinados com a prática científica. Os recentes trabalhos publicados em filosofia da medição, com os quais buscamos dialogar, se inspiram na prática metrológica e, em geral, têm encaminhado as discussões de forma a não centralizar o foco na questão da realidade física das grandezas⁴¹. De todo modo, entendemos ser procedente esclarecer nossa posição em relação à referida disputa, o que fazemos nos comentários finais desse capítulo (seção 1.5).

1.4 Filosofia da medição no século XXI: epistemologia e metrologia

Nos trabalhos publicados a partir dos primeiros anos do século XXI, pode-se identificar uma nova tendência na filosofia da medição: a de acompanhar de perto a prática da medição, seja na esfera metrológica, seja fora dela. Tais trabalhos se inspiram na “virada experimental” das últimas décadas do século anterior para trazer questões do âmbito prático para a reflexão, mas também levam em consideração enfoques filosóficos, sociológicos e históricos das medições (MITCHELL; TAL; CHANG, 2017, p. 1-2). Dessa tendência, podemos destacar a publicação de diversos artigos científicos tanto em revistas de escopo técnico em metrologia (p. ex.: o periódico *Measurement*), quanto de escopo histórico-filosófico, três importantes volumes de ensaios (BOUMANS; HON; PETERSEN, 2014; SCHLAUDT; HUBER, 2015; MÖßNER; NORDMANN, 2017); e uma edição especial do periódico *Studies in History and Philosophy of Science* (“*The making of measurement*”, 2017, vol. 65-66). Algumas dessas publicações resultam de trabalhos apresentados em congressos internacionais sobre os temas da medição e da padronização.

Esse programa de pesquisas contemporâneo em filosofia da medição é muitas vezes denominado “epistemologia da medição”⁴², pois a questão dos conhecimentos envolvidos e produzidos nos processos de medição constitui uma de suas preocupações centrais. O filósofo

⁴⁰ A abordagem do GUM, em comum com a do VIM3, é dita operacional por privilegiar as grandezas conhecíveis. É importante ressaltar que a abordagem é dita operacional, não operacionalista.

⁴¹ Apontamos exemplos de trabalhos contemporâneos em filosofia da medição que tratam da questão do realismo, sem colocá-la em foco, na seção de comentários finais desse capítulo (seção 1.5).

⁴² Não significa, entretanto, que a filosofia da medição produzida entre o final do século XIX e o final do século XX não estivesse preocupada com questões epistemológicas, nem que as recentes publicações em filosofia da medição enfoquem apenas questões epistemológicas.

da ciência israelense Eran Tal, um dos principais pesquisadores da filosofia da medição contemporânea, descreve da seguinte forma a tendência dos trabalhos recentes:

Em vez de enfatizar as fundações matemáticas, a metafísica ou a semântica da medição, o trabalho filosófico nos últimos anos tende a se concentrar nos pressupostos e padrões inferenciais envolvidos nas práticas concretas de medição e nas dimensões histórica, social e material da medição (TAL, 2017b, p. 36).

Como o surgimento desses trabalhos coincide com a maior preocupação, no âmbito da metrologia, com a harmonização dos métodos de estimativa e expressão da incerteza de medição, questões relacionadas à incerteza também ganham relevância nas discussões nas novas abordagens filosóficas. Por isso mesmo, essas abordagens são fundamentais para aprofundarmos o que discutimos até aqui sobre medição, bem como para discutirmos o conceito de incerteza de medição nos capítulos terceiro e quarto da tese.

Eran Tal identifica quatro características no programa de pesquisas das publicações recentes sobre medições: (1) a discussão **epistemológica**, que já destacamos acima; (2) o apelo à “**coerência** entre os elementos da metodologia científica” para explicar o ganho epistemológico do processo; (3) a abordagem orientada pela **prática metrológica**, que também já mencionamos; e (4) o destaque dado ao papel que os “**modelos teórico e estatístico**” desempenham “na produção e validação [...] dos resultados de medições” (TAL, 2013, p. 1168-9). Se a ênfase no ganho epistemológico e a perspectiva metrológica constituem a marca registrada desses trabalhos, o coerentismo e a importância dos modelos constituem dois aspectos interligados que colaboram para dar sustentação às abordagens. Ao invés de recorrerem a “conhecimentos observacionais ou fundações a priori”, os textos sublinham a coerência entre “instrumentos, modelos, ferramentas de análise estatística e teorias de base” (TAL, 2013, p. 1168). A preocupação com a questão epistemológica muitas vezes coloca em foco o papel **informacional** das medições. Vamos discutir cada uma dessas características da forma como são problematizadas por alguns trabalhos da filosofia contemporânea das medições.

1.4.1 Epistemologia e sistemas de medição (MSs)

Não por coincidência, um dos artigos mais influentes dessa nova abordagem, do físico e especialista em metrologia italiano Luca Mari, tem o título de “*Epistemology of measurement*” (Epistemologia da medição) (MARI, 2003). No artigo, Mari parte da

constatação de que a medição é um tipo de **avaliação** para mostrar como, ao longo da história do estudo das medições, essas foram compreendidas como diferentes formas de avaliação.

Num primeiro período histórico, abrangendo desde a antiguidade até o século XIX, a concepção dominante era de que a objetividade estava presente nos próprios fenômenos ou propriedades sujeitos à medição. Portanto, para os filósofos e cientistas desse período, as “medidas são propriedades inerentes às coisas medidas” (MARI, 2003, p. 21). Com a proeminência do empirismo lógico na primeira metade do século XX, emergem tanto as concepções nominalistas (operacionalismo e convencionalismo), quanto as teorias com preocupações fundacionais e formais. As medições são, então, concebidas como “operações que preservam as relações observadas entre as coisas medidas” (MARI, 2003, p. 22-3). Entretanto, em função dos questionamentos levantados contra o empirismo lógico, as medições passam a ser entendidas como “resultados de operações reconhecidas como adequadas para seus objetivos de obter informações sobre as coisas medidas” (MARI, 2003, p. 23-4).

A definição geral, esboçada acima, segundo Mari, não é suficiente para responder à questão inicialmente colocada sobre que tipo de avaliação a medição constitui. Dizer que os resultados de medições são **adequados** aos fins propostos, pouco acrescenta sobre sua especificidade enquanto técnica experimental. Indo além do simples objetivo da adequação, Mari acrescenta que (i) a medição obedece a **objetivos** muito específicos, que (ii) alguns “componentes pragmáticos” devem ser levados em conta, além das características formais ou empíricas, e que (iii) a declaração de sua **fidelidade** (*faithfulness*) estimada faz parte integral da expressão de um resultado de medição. Assim, pode-se complementar os requisitos para o reconhecimento de um processo de medição de grandezas físicas dizendo que os resultados de uma medição devem transmitir “a mesma observação a diferentes observadores; i. e., devem ser intersubjetivamente comunicáveis” e devem transmitir “informações relacionadas somente às coisas medidas, e não do seu meio ambiente” (i. e.: são objetivamente visadas). De forma sintética, podemos dizer que “medições são avaliações **intersubjetivas e objetivas**”. Os dois requisitos são providos pelo “sistema de medição” (*measuring system, MS*): a intersubjetividade é assegurada pela padronização (rastreabilidade) e a objetividade pela escolha do instrumental adequado ⁴³ (MARI, 2003, p. 28).

⁴³ A análise dos conceitos de confiança e confiabilidade realizada por Vaz, que comentamos na subseção 1.1.2.3, difere da **perspectiva** de Mari. Para Vaz, a confiança nos “atores” institucionais é de ordem subjetiva, enquanto a confiabilidade dada pela rastreabilidade dos resultados de medição é de ordem objetiva. Embora a subjetividade e a objetividade sejam atribuídas a instâncias diferentes de acordo com as perspectivas de Mari e de Vaz, entendemos que ambas concorrem para enriquecer o conceito de medição.

Os MSs constituem os elementos chaves no processo de medição, eles “são os componentes essenciais para nos tornar capazes de dar fundações epistemológicas consistentes para a medição”. Embora a filosofia da medição tenha avançado na caracterização das medições sob o ponto de vista experimental, no âmbito do artigo de Mari de 2003, as respostas ainda são muito genéricas. Na verdade, poderíamos dizer que suas conclusões constituem as bases do programa de pesquisas da filosofia da medição, pois fornecem as lacunas a serem preenchidas e as direções que os estudos tendem a seguir. Os trabalhos seguintes visarão “formalizar a estrutura e a função operativa” dos MSs, com vistas a compreender o papel epistêmico exercido pelas medições (MARI, 2003, p. 29).

Em artigo mais recente, Mari e colaboradores ressaltam também que a medição é **um processo dirigido por sua finalidade** e que não pode ser levada a contento sem um **propósito claro**. Os objetivos que mobilizam o processo de medição devem ser estabelecidos de antemão: “[A] medição é um processo feito com um propósito e então seu primeiro passo é prover uma descrição da propriedade que se pretende medir, possivelmente com informação adicional sobre os recursos disponíveis e as restrições a serem levadas em conta” (MARI *et al.*, 2017, p. 51). Por isso, o resultado da medição deve ser adequado ao propósito estabelecido.

Medir uma constante fundamental em um laboratório escolar com fins didáticos é bem diferente de medi-la em um laboratório nacional de metrologia para comparar o resultado com outros laboratórios do mesmo nível. Propósitos diferentes, MSs diferentes e, certamente, resultados com valores de incerteza bem diferentes. Na formulação dos autores: “[A] medição é um processo dirigido por objetivo e, como tal, a harmonização de alvos específicos e recursos usados é um componente crucial para caracterizar aquilo que faz uma ‘boa’ medição” (Mari *et al.*, 2017, p. 55). A “boa” medição é aquela que emprega recursos para obter um resultado que pode ser expresso com incerteza adequada ao propósito. A medição realizada em laboratório escolar, com recursos instrumentais limitados, é “boa” para propósitos didáticos, porém não fornece resultados com qualidade (baixa incerteza) para serem empregados no âmbito da rede metrológica internacional.

Os MSs são responsáveis por duas outras características dos novos trabalhos em filosofia da medição apontadas por Eran Tal, que destacamos acima, quais sejam, a coerência metodológica e a função dos modelos. A interligação entre “coerentismo” e as abordagens “baseadas em modelo” se dá pela participação dos modelos no estabelecimento da coerência geral do sistema metrológico, participação essa que buscamos mostrar à frente. Nas seções a seguir, vamos discutir textos da filosofia contemporânea das medições que abordam essas

duas características interligadas. Para o tema deste capítulo, é particularmente interessante a frequente implicação da incerteza da medição nas argumentações que buscam dar conta das características essenciais das medições. A característica informacional das medições, que está relacionada com a questão epistemológica sempre problematizada pelos novos trabalhos, será abordada em paralelo às duas características mencionadas.

1.4.2 Coerência e modelos

A **coerência** dos sistemas de medição tem sido apontada em recentes trabalhos da filosofia da medição como meio para superar alguns problemas conceituais, como, por exemplo, o “problema da coordenação das grandezas” como mostramos na seção 1.2.3. A solução coerentista para o problema da coordenação da grandeza se baseia no aprimoramento passo-a-passo do processo de medição como um todo, buscando manter a coerência entre os diversos aspectos envolvidos. Segundo Chang, o meio mais produtivo de lidar com o problema da coordenação é “aceitar a circularidade e admitir que a justificação na ciência empírica tem que ser coerentista” (CHANG, 2004, p. 220). Como descrevemos na subseção 1.2.3.3, Chang propõe o conceito de “iteração epistêmica”, que opera como um método baseado na coerência entre os resultados obtidos, seguida pela “autocorreção” das premissas que propicia o “progresso científico”.

O **coerentismo** é uma forma empírica de interpretar a concordância entre resultados das medições como decorrência de ajustes que visam a própria convergência dos valores obtidos e constitui uma alternativa à interpretação fundacionalista. As comparações entre resultados de medições realizadas atualmente por diferentes instituições e, em alguns casos, entre diferentes métodos de medição da mesma grandeza, baseiam-se na **coerência** geral dos resultados. Nessas comparações, os valores de incertezas de medição estimados funcionam como parâmetros que estabelecem os limites para que os resultados possam ser considerados coincidentes. A coerência que possibilitou a construção de escalas de medição e proporcionou a progressiva melhoria das qualidades de medição em diversas áreas da ciência está presente no atual estado da arte da metrologia como consistência interna do sistema. Certamente, o esforço contínuo na padronização da rede é uma das formas de intensificar a coerência do sistema. Para funcionar adequadamente, porém, a coerência precisa ser buscada com base em **modelos teóricos que vinculam as atividades empíricas às teorias científicas**.

Diversas abordagens recentes da filosofia da medição destacam o papel de modelos teóricos como intermediários entre as interações empíricas dos objetos e fenômenos

envolvidos e a obtenção dos resultados das medições (TAL, 2017b, p. 28). Os processos de medição pressupõem modelagens teóricas dos fenômenos físicos envolvidos na quantificação, ou seja, “representações abstratas, locais e simplificadas” (TAL, 2013, p. 1166). Somente com base no **modelo** é possível obter resultados de medições a partir das “indicações” observadas na interação física entre o sensor do instrumento de medição o sistema empírico. Os filósofos têm apontado que muitos dos conceitos envolvidos na medição, como calibração e incerteza de medição, podem ser mais bem compreendidos levando-se em conta o papel do modelo e, dessa forma, também lançam luz sobre a contribuição epistêmica das medições (FRIGERIO; GIORDANI; MARI, 2010; MARI, 2013; MARI *et al.*, 2017; TAL, 2012; TAL, 2017a). O que caracteriza o processo de medição, para esses autores, é a atribuição de valores “a um ou mais parâmetros de interesse no modelo de maneira que satisfaça certos desideratos (*desiderata*) epistêmicos, em particular coerência e consistência” (TAL, 2017b, p. 28). Embora tenham bases empíricas e façam referências às práticas metrológicas, essas abordagens jogam luz na função dos modelos teóricos na medição, mas fazem isso de forma a evidenciar tanto o papel das teorias quanto das práticas nas medições.

1.4.2.1 Eran Tal: epistemologia baseada em modelo

Na tese de doutorado defendida na Universidade de Toronto, Canadá, intitulada *The Epistemology of Measurement: A Model-Based Account*, Eran Tal sustenta que sua versão do processo de medição “baseada em modelo” é capaz de resolver alguns problemas recorrentes nas abordagens das medições (TAL, 2012, p. 20-1). Seu enfoque se vale extensivamente da maneira como as instituições metrológicas operam, em especial da padronização da unidade de tempo, o segundo. O autor descreve três problemas relativos às medições que são mutuamente dependentes (de fato, emaranhados): os problemas (i) da coordenação, (ii) da exatidão⁴⁴ e (iii) da individuação da grandeza. Esses problemas podem ser sintetizados da seguinte forma:

- (i) Dados um procedimento *P* e uma grandeza (*quantity*) *Q*, como é possível dizer se *P* mede *Q*?
- (ii) Supondo que o procedimento *P* mede a grandeza *Q*, como é possível dizer o quão exatamente (*accurately*) *P* mede *Q*?

⁴⁴ Eran Tal esclarece que o termo “exatidão de medição” pode ser tomado em cinco sentidos diferentes, que discutimos no terceiro capítulo. No presente contexto, o autor se refere ao sentido “epistêmico” do termo, que está relacionado com a “proximidade da concordância entre valores razoavelmente atribuídos a uma grandeza em suas medições”, cujo conceito correlato é a incerteza (TAL, 2012, p. 30).

(iii) Supondo que P e P' são dois procedimentos de medição, como é possível dizer se P e P' medem a mesma grandeza? (TAL, 2012, p. 5-6)

O problema da coordenação (*i*), que introduzimos na subseção 1.2.3, não pode ser resolvido simplesmente apresentando respostas do tipo: um procedimento empregando um termômetro mede temperaturas, pois essa resposta lança mão de todo o conhecimento acumulado sobre medições de temperaturas que já possuímos. Reapresentamos aqui o problema para relatar a solução que Tal oferece. Se tentarmos estabelecer a relação entre um procedimento e um resultado de medição, conceitualmente, sem conhecimentos prévios, ficamos presos em um círculo vicioso: só posso conhecer a grandeza pelo procedimento de medição, mas para fazer isso tenho que já partir do princípio de que o procedimento mede a grandeza. “Parece ser impossível coordenar a noção abstrata de temperatura a qualquer método concreto de medição de temperatura sem cair em petição de princípio” (TAL, 2012, p. 8). Soluções para esse problema foram apresentadas das perspectivas convencionalista (Mach, Poincaré e Reichenbach), operacionalista (Bridgman) e histórico-contextual-coerentista (Chang e van Fraassen), mas Tal busca dar uma solução mais geral e formal ao problema, partindo, deve-se ressaltar, das contribuições das perspectivas mencionadas (TAL, 2012, p. 9-11).

Os problemas (*ii*) e (*iii*), da mesma forma que o problema da coordenação, não podem ser determinados por evidências (isto é, são subdeterminados por evidências). Tais problemas foram negligenciados pelos teóricos que abordaram as medições ou receberam respostas que não contemplaram adequadamente o papel epistemológico exercido pelos padrões e pela comparação entre medições. Eran Tal argumenta que, embora os três problemas sejam conceitualmente distintos, não podem ser resolvidos de forma independente uns dos outros. E se propõe a mostrar que, do ponto de vista epistêmico (e não puramente lógico):

(*i*) é impossível testar se um dado procedimento P mede uma dada grandeza Q sem, ao mesmo tempo, testar quão exatamente P mede a grandeza Q ; (*ii*) é impossível testar quão exatamente P mede a grandeza Q sem compará-lo a algum outro procedimento P' ; e (*iii*) é impossível testar se P e P' medem a mesma grandeza sem, ao mesmo tempo, testar se eles medem alguma dada grandeza, p. ex. Q (TAL, 2012, p. 14).

A abordagem baseada em modelo se propõe a resolver os três problemas simultaneamente, levando em conta os conceitos e práticas metrológicos. Na verdade, a atribuição de valores a grandezas de forma “coerente e consistente”, que caracteriza o processo de medição, tem que se dar baseada em um **modelo idealizado e simplificado dos**

fenômenos físicos envolvidos. Esse modelo reúne as suposições **teóricas** e **estatísticas** para os processos físicos, que podem incluir leis e princípios de uma ou mais teorias, generalizações empíricas dos dados disponíveis etc. Os processos físicos incluem todas as interações entre amostras sob medição, instrumentos, operadores e ambiente, mas os modelos **simplificam** algumas dessas interações. A construção do modelo é pré-condição para fornecer significado ao resultado da medição: é somente contra o pano de fundo do modelo que o resultado pode ser candidato a conhecimento objetivo (TAL, 2012, p. 17; 78-9).

Eran Tal discute duas concepções de medição que se propõem a explicar a **estabilidade** das medições de grandezas físicas. Para o **convencionalismo**, a estabilidade se deve a propriedades presentes **na natureza** que são identificadas como estáveis e escolhidas pelos cientistas como padrões. Para o **construtivismo** a estabilidade só pode ser explicada pelas **atividades metroológicas**. Porém, Tal argumenta que ambas as explicações são parciais e modifica as premissas das duas escolas para compor a abordagem baseada em modelo. Em sua proposta afirma que os conceitos teóricos dependem também “da forma como os instrumentos concretos são modelados”. E, ainda, que os metrologistas se valem de “ajustes” na rede e nos modelos dos instrumentos, buscando “maximizar a estabilidade da rede de padrões” e que, com isso, “descobrem e exploram regularidades empíricas no comportamento de seus instrumentos” (TAL, 2012, 125). Dessa forma, a função teórica dos modelos incorporada na abordagem proposta por Tal permite reunir as explicações das duas escolas.

O modelo que representa o processo de medição deve estabelecer como determinar o resultado a partir dos dados empíricos obtidos, ou seja, dos valores das indicações observadas nos instrumentos e demais parâmetros. Para tanto, os modelos devem incluir suposições sobre os erros sistemáticos envolvidos nos procedimentos, pois somente assim dois resultados de medição são comparáveis. Além disso, as incertezas envolvidas nos procedimentos são avaliadas a partir dos respectivos modelos de medição e fornecem as margens para a comparação entre medições. Assim obtidas, as incertezas fornecem valores que podem ser considerados como estimativas da exatidão do processo de medição⁴⁵.

No cerne da argumentação de Tal em favor da necessidade do modelo do processo de medição e de sua importância para resolver os três problemas básicos e conceituais das medições acima mencionados, encontra-se a avaliação das incertezas. Na expressão do resultado da medição, o cientista deve relatar o valor medido e o valor estimado para a

⁴⁵ Conforme o sentido epistêmico de exatidão reproduzido nota de pé de página anterior e conforme esclarece Tal na nota 55 do cap. 2 do seu trabalho: TAL, 2012, p. 82.

incerteza de medição. Caso a medição se dê num contexto em que se busca comparar seu valor com os de outras medições, como é o caso de comparações entre valores obtidos por instituições metrológicas, pode ser necessário que o cientista apresente também a planilha de avaliação de incerteza (*uncertainty budget*): uma tabela em que são apresentados os componentes de incerteza considerados para o processo. Tal chama esse levantamento que os metrologistas fazem das incertezas envolvidas de “de-idealização” (TAL, 2012, p. 37). Isso porque os metrologistas levantam as fontes de incerteza identificando cada elemento do seu modelo que se afasta da definição **ideal** da grandeza; eles empregam ferramentas estatísticas para quantificar cada uma das fontes de incerteza e para combinar todas as fontes e chegar à incerteza-padrão global do processo.

A epistemologia das medições de Eran Tal, conforme apresentada em sua tese e num capítulo de livro publicado mais recentemente (2017a, p. 246-7), destaca o papel **epistêmico** das atribuições de incerteza, estimadas a partir dos modelos, para “manter a coerência geral” da grande rede de instrumentação metrológica internacional. Sua abordagem enfatiza o papel desempenhado pelos modelos teórico e estatístico para a obtenção de medições de alto nível e aponta a impossibilidade de resolver os três problemas referidos no início dessa subseção pela via do “empirismo fundacionalista” (TAL, 2012, p. 78). Apesar dessa dependência das teorias, a abordagem também deixa ver a impossibilidade de resolver os problemas e explicar o sucesso das medições somente por princípios teóricos. No quarto capítulo da tese, quando enfocarmos as fontes de incerteza em procedimentos de medição, lançamos mão da abordagem proposta por Tal e incorporamos outros argumentos do autor na discussão ali desenvolvida.

1.4.2.2 Outras abordagens baseadas em modelo

Em vários trabalhos publicados por Luca Mari e colaboradores, a função essencial dos modelos teórico e estatístico é também apontada (FRIGERIO; GIORDANI; MARI, 2010; MARI, 2013; MARI *et al.*, 2017). No artigo de 2010, os autores buscam fornecer um “modelo geral da medição” que possa ser aplicado tanto a medições físicas quanto em medições “*soft*” (ciências sociais e cognitivas). Fazem uma análise do formalismo proposto pela RTM e buscam complementá-lo. Segundo os autores, a “RTM é muito abstrata para ser útil no contexto científico onde, desde muito tempo, instrumentos de medição têm sido desenhados, construídos e usados propriamente” (FRIGERIO; GIORDANI; MARI, 2010. p. 126). Os autores mostram também que a RTM só enfoca parte do processo de medição e deixa escapar

aspectos essenciais da prática metrológica. Particularmente, os autores enfatizam o papel dos MSs, conforme Mari já havia definido no artigo de 2003, que discutimos acima.

Resumidamente, a medição é qualificada no artigo de Frigerio, Giordani e Mari pelas seguintes características: (i) a medição é um processo que requer a interação empírica do sistema sob medição com o MS; (ii) o MS é tal que o resultado de sua interação fornece informações sobre relações empíricas do sistema sob medição; (iii) o valor do mensurando é dado pelo mapeamento do conjunto de relações empíricas para um conjunto de símbolos; (iv) tal mapeamento incorpora informações obtidas na calibração do MS (FRIGERIO; GIORDANI; MARI, 2010, p. 147). Todas as quatro características podem ser especificadas com mais detalhes dependendo do contexto, sendo que a interação empírica realizada pelo **MS** tem que ser **modelada**⁴⁶ para levar em conta as grandezas de influência e a função que relaciona os valores das indicações ao resultado da medição (FRIGERIO; GIORDANI; MARI, 2010, p. 148).

No texto “*Modelling Measurement: Error and Uncertainty*”, Luca Mari e Alessandro Giordani (2014) defendem que a posição **mediadora** do modelo entre a teoria e sistema empírico permite conciliar a abordagem de erro das medições com a abordagem de incerteza. Os autores sustentam que “uma proposição pode ser verdadeira com respeito ao modelo e um modelo é mais ou menos similar ao mundo” (MARI; GIORDANI, 2014, p. 83). Para calcular o erro de medição, o resultado pode ser comparado ao **valor da grandeza modelada** e não a um valor verdadeiro da grandeza. A incerteza, por sua vez, é estimada levando-se em conta as limitações das teorias que embasam o modelo e a simplificação do próprio modelo (as variáveis levadas em conta no modelo, que podem influenciar no resultado da medição). Dessa forma, o conceito de erro seria ainda relevante no atual contexto em que prevalece a abordagem de incerteza. Tanto o erro quanto a incerteza dependem da modelagem para suas estimativas.

Os trabalhos recentes da filosofia da medição **convergem** no que diz respeito ao emprego dos modelos no processo de medição. Embora foquem em aspectos diferentes dos papéis desempenhados pelos modelos, os trabalhos apontam de modo coerente para a importância do modelo como **mediador** entre as teorias e o sistema empírico. Como partes do mesmo programa de pesquisas, esses trabalhos buscam discutir as questões epistemológicas

⁴⁶ Os autores se propõem, no artigo, a fornecer um “modelo geral” para a medição, ao mesmo tempo que destacam o papel dos modelos teórico e estatístico nas medições. O termo “modelo” aparece, então, no artigo com dois sentidos diferentes: o modelo geral no qual toda medição pode ser encaixada e a modelagem da interação entre o MS e o sistema empírico. Então, a modelagem do procedimento de medição é apenas uma etapa do modelo geral proposto no artigo de Frigerio, Giordani e Mari para qualquer processo de medição.

que envolvem os diversos papéis desempenhados pelos modelos. No quarto capítulo da tese, recorreremos aos modelos para esboçar uma genealogia das fontes de incerteza.

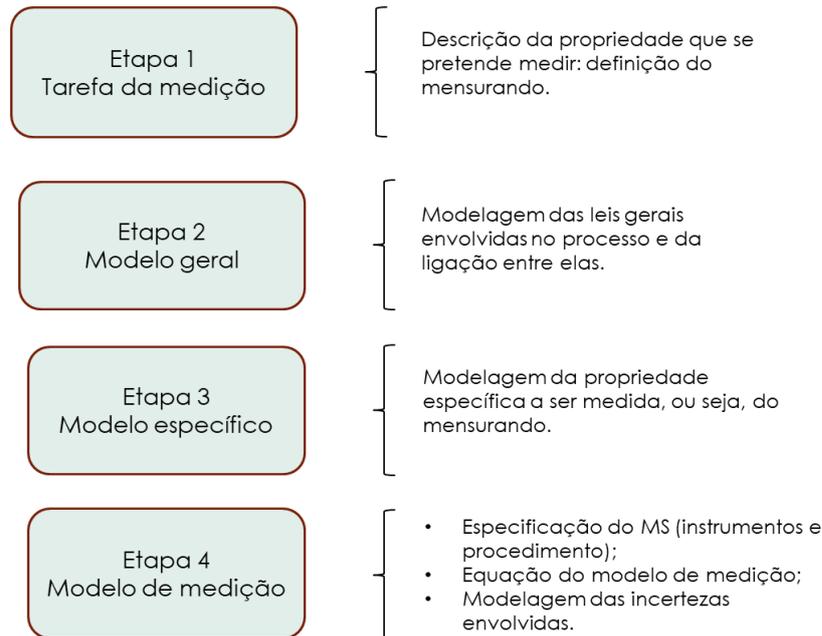
1.4.3 Estrutura e etapas da medição

Na edição especial do periódico *Studies in History and Philosophy of Science* dedicada à medição (“*The making of measurement*”, vol. 66-65, 2017), Mari e colaboradores publicaram um artigo no qual buscam identificar uma “**estrutura**” comum aos processos de medição. Nessa busca, discutem conceitos recorrentes nos estudos da filosofia da medição, dentre eles, os diversos níveis de modelagem empregados. O objetivo do artigo é ir além das interpretações “ingênuo-realistas”, “operacionalistas” e “representacionalistas” das medições que, segundo os autores, as tratam como “caixas pretas”. A filosofia da medição se propõe a **abrir essas caixas pretas**, discutindo as fases de seleção e funcionamento dos MSs, bem como a base de conhecimentos necessários em todas as fases do processo (MARI *et al.*, 2017, 47-8).

Os elementos cruciais no processo de medição seriam, primeiramente, “a especificação do objeto sob medição; a definição da propriedade geral considerada e a definição do mensurando”. Em segundo lugar, são relacionados “a especificação” do MS, incluindo a “escolha” do instrumental e o “design do procedimento”. Por último, os autores apontam “a modelagem da atividade que subjaz a execução da medição” (MARI *et al.*, 2017, 48-9). O artigo discute os passos envolvidos em dois exemplos bem diversos de medição, quais sejam, a determinação da massa de estrelas em sistemas binários e a avaliação de performances de pesquisa científica. Ao identificar as **etapas** comuns aos processos de medição, inclusive no caso dos dois exemplos díspares analisados, os autores buscam revelar a **estrutura** que subjaz aos processos de medição (MARI *et al.*, 2017, 49). Representamos as etapas identificadas pelos pesquisadores na forma de um diagrama na figura 11, com vistas a sintetizar os achados e apresentá-los de forma didática.

A quarta etapa é aquela na qual toda complexidade da rede metrológica entra em cena. A seleção do MS deve prover a rastreabilidade dos valores obtidos a medições realizadas com padrões primários e, dessa forma, assegurar a “intersubjetividade” do processo. Ao mesmo tempo, ao estabelecer a ligação entre as leis gerais e a propriedade sob medição, a modelagem justifica a “objetividade do processo” (MARI *et al.*, 2017, 52).

Figura 11 – Etapas do processo de medição descritas em MARI *et al.*, 2017



Fonte: Adaptado do texto de MARI *et al.*, 2017, p. 51-3.

Os autores subdividem a estrutura do conhecimento de fundo, que subjaz à medição, em conhecimento da pré-medição e da pós-medição. O conhecimento mobilizado na pré-medição deve proporcionar toda a modelagem necessária e ser capaz de enfrentar os problemas teóricos da relação da propriedade a ser medida com as demais grandezas que influenciam o resultado. Além disso, esse conhecimento tem que contemplar a definição o mensurando como propriedade “única” a ser avaliada (MARI *et al.*, 2017, 52). Segundo os autores, as seguintes suposições devem ser levadas em conta na pré-medição:

Primeiro, o objeto sob medição tem que ser modelado como suporte da propriedade enquanto a medição é executada e ele deve ser modelado como estável durante o processo [...]

Segundo, a propriedade geral tem que ser modelada de acordo com o tipo de avaliação da propriedade conectada com um procedimento de medição que é, em princípio, realizável. [...]

Terceiro, o modelo da propriedade individual deve propiciar a solução dos problemas definicional e teóricos. O modelo deve justificar a suposição da existência e exclusividade do mensurando no momento da execução e deve descrever como as propriedades com as quais o sistema de medição interage são conectadas com o mensurando.

Além disso, e mais importante, a cadeia teórica tem que ser modelada ligando o mensurando ao conjunto de propriedades com as quais os instrumentos de medição interagem. [...]

Finalmente, as **fontes de incerteza de medição** devem ser modeladas. [...] (MARI *et al.*, 2017, 52-3; grifo nosso).

Na fase pós-medição, depois da obtenção dos valores das indicações, um modelo estatístico para processamento de dados deve ser produzido e empregado. A estrutura apresentada, segundo os autores, aplica-se especificamente ao tipo de avaliação que caracteriza a medição e está presente nos mais variados tipos de medição. Ao detalhar as etapas e os conhecimentos envolvidos no processo, a análise ressalta a dependência da medição em relação à teoria (*theory-ladenness*), ao mesmo tempo que mostra que “a confiança pública socialmente atribuída à medição tem razões estruturais” (MARI *et al.*, 2017, 55-6).

Embora a filosofia da medição tenha os pés fincados na prática metrológica e na evolução histórica das teorias e práticas, alguns trabalhos dessa tendência filosófica buscam compreender o que pode dar **unidade** ao conceito de medição, a despeito das diversidades de estratégias empregadas pelas diferentes áreas científicas em que as medições ocupam um lugar de relevo. Especialmente os trabalhos de Mari e colaboradores objetivam identificar o denominador comum aos processos de medição. O artigo que comentamos acima (MARI *et al.*, 2017) identifica uma “estrutura” comum a esses processos. Em artigo anterior, com o foco na definição de medição, Mari também enfatiza o papel da estrutura e as características que já havia destacado em seu artigo de 2003: “a medição é caracterizada como uma avaliação própria cuja estrutura experimental é capaz de produzir valores que têm graus suficientes de objetividade e de intersubjetividade com respeito aos seus propósitos de uso” (MARI, 2013, p. 2894). Já em artigo mais recente, Mari e colaboradores apontam que os diversos tipos de medição apresentam uma “ênfase comum na confiabilidade (*trustworthiness*⁴⁷)” e o requisito de que os resultados das medições sejam “explicitamente justificáveis” (MARI; MAUL; WILSON, 2019, p. 3-5). A medição deve, então, prover confiabilidade e informações que possam ser justificadas pelos meios e conhecimentos disponíveis.

Dois aspectos que costumam ser mencionados no tratamento que Mari e colaboradores dão ao processo de medição merecem ser destacados aqui. O primeiro deles se refere à finalidade da medição: ela é dirigida por um **propósito** que deve ficar claro de antemão, conforme já mencionamos anteriormente. O outro importante aspecto das medições a ser ressaltado é sua natureza **informacional**. Na fase “pré-medição”, o processo obviamente se baseia em uma grande quantidade de conhecimento e de informação. Dados científicos de

⁴⁷ Em passagens anteriores traduzimos o termo em inglês *reliability* por “confiabilidade”, mesma tradução empregada por Vaz em sua tese (2018). Mari, Maul e Wilson usam o termo *trustworthiness* para se referir à característica a qual as medições são comumente associadas. Na falta de um termo mais apropriado em português, traduzimos *trustworthiness* também por “confiabilidade”. Com esse termo, os autores buscam englobar os requisitos anteriormente mencionados de objetividade e intersubjetividade. Mas Mari, Maul e Wilson acrescentam que o termo *dependability* às vezes também é usado para falar de algo semelhante a *trustworthiness*.

natureza diversa são necessários: valores de constantes, dados das calibrações dos instrumentos envolvidos, especificação dos instrumentos, teorias científicas envolvidas etc. Na fase “pós-medição”, podemos distinguir a aquisição de conhecimentos para chegar aos resultados (como as técnicas estatísticas) e à expressão do resultado que será emitido. O resultado da medição certamente circulará na rede de informações constituída pelas instituições metrológicas e nos ramos dessa rede que se estendem por outras áreas. Assim, o processo de medição toma parte numa vasta rede de circulação de informações. Uma vez mais, a **qualidade** da informação, representada pela incerteza de medição, é fundamental para os rumos que a informação toma no sistema. Os componentes empírico e informacional encontram-se “entrelaçados e dirigidos pelo alvo da medição” (MARI *et al.*, 2017).

1.4.4 Padronização e harmonização

A padronização na rede metrológica, como meio de fornecer coerência e estabilidade ao sistema, vem sendo repetidamente enfatizada pelos estudos da filosofia da medição. Nos trabalhos de Luca Mari e colaboradores, o aspecto intersubjetivo das medições, reputado como fundamental para o conceito de medição, é fornecido pela calibração do instrumento de medição empregado, que garante a rastreabilidade do processo aos padrões primários.

No já mencionado volume, *Standardization in Measurement* (editado por SCHLAUDT; HUBER, 2015), quinze ensaios abordam temas que envolvem a noção de padronização, desde a implantação de métodos de padronização em novas áreas até a relação da padronização com o poder e com a democracia. A padronização constitui um elemento do sistema metrológico que é socialmente construído. Uma vez que as unidades básicas são “definidas e adotadas por convenção” (INMETRO, 2012b, 1.9), a construção institucional está presente no cerne do sistema. Além disso, a estrutura da padronização de todas as grandezas é coordenada pelo BIPM, que tem o papel de “promover a compatibilidade geral das medições”. Parte dessa compatibilidade pode ser acompanhada através do site do BIPM, que disponibiliza os dados relativos às comparações entre resultados de medição e as capacidades de medição e calibração dos laboratórios⁴⁸.

A construção social da padronização metrológica é realizada pela “institucionalização, legitimação e manutenção” (VERA, 2015, p. 175). Essas três ações baseiam-se no conhecimento acumulado, mas, em larga medida, são também o resultado do trabalho de

⁴⁸ Os resultados das comparações-chave promovidas pelo BIPM ficam disponíveis em: www.bipm.org/kcdb/.

especialistas, que são responsáveis pelo caráter dinâmico que os elementos do sistema apresentam, sempre sujeito a revisões e inovações. A atuação dos estados nacionais é altamente significativa nas instituições metrológicas internacionais que promovem o sistema métrico: “*os estados nacionais modernos precisam de sistemas de medição homogêneos, como o sistema métrico, e a metrificação precisa dos estados*” (VERA, 2015, p. 176; 182; grifo do autor).

É importante esclarecer que o termo **padronização** pode ser empregado em dois sentidos distintos, embora não independentes: como referente ao **padrão metrológico** de uma grandeza (um instrumento, um método de medição ou um material de referência) ou como referente a uma **norma científica** (*standard*) que estabelece requisitos para certa finalidade. Por exemplo, um instrumento que meça a temperatura ambiente, calibrado em laboratório pertencente à rede metrológica e acreditado para aquele serviço de calibração, pode ser empregado como **padrão metrológico** em uma medição de temperatura ou na calibração de outros instrumentos que meçam a mesma grandeza. Já a **norma** ABNT NBR ISO/IEC 17025 (2017) estabelece os requisitos para a competência de laboratórios de ensaios e calibração e é com base nesses requisitos que os laboratórios são avaliados pelo órgão competente (aqui no Brasil, a Coordenação Geral de Acreditação, CGCRE, pertencente ao INMETRO).

Nesses exemplos, ficam patentes, ao mesmo tempo, a distinção (padrão versus norma) e a mútua dependência entre eles (os padrões metrológicos são calibrados por laboratórios que seguem as normas e essas, em geral, preconizam o emprego de padrões metrológicos). Embora as normas sejam elaboradas para diferentes áreas, como administração, produção industrial e comércio, é no “domínio da ciência onde a genuína natureza das normas é mais aparente, dado que são tanto pré-requisitos para a prática científica, quanto resultados da expertise científica” (HUBER; SCHLAUDT, 2015, p. 3). Pode-se dizer que as atividades de medição e de comparação de dados científicos são disciplinadas por normas científicas. Essas são reconhecidas como “instrumentos para a estabilização e/ou validação”, uma vez que são “normas estabelecidas e reconhecidas de uma prática científica específica” (HUBER, 2015, p. 207).

Os cientistas necessitam das normas e de outros documentos de caráter orientativo ou normativo (manuais de práticas, relatórios, guias de procedimentos etc.) em suas rotinas e “sabem exatamente quais consultar” para cada propósito. As normas dão “a direção, organizam a prática científica”: elas “impactam” os resultados da produção científica (HUBER, 2015, p. 208). A normatização e a conseqüente harmonização das atividades relacionadas às medições ressaltam o **caráter institucional** dessas atividades. O trabalho do

cientista ou do grupo de pesquisas é mais bem recebido pela comunidade científica se estiver conforme às normas elaboradas por certas instituições (tais como ISO, IEC, DIN, ASTM e ABNT) e recomendadas por outras instituições (tais como BIPM, IAEA e WHO). Além disso, a conformidade às normas também referenda as boas práticas da instituição a qual o cientista ou o grupo de pesquisas pertence.

O aspecto de construção social das medições, presente na padronização das medições, também é abordado pelo filósofo da ciência Martin Kusch, no primeiro ensaio do volume *Standardization*. Kusch reporta o estudo de van Fraassen sobre o problema da coordenação (que discutimos na subseção 1.2.3) para mostrar como as intuições do filósofo austríaco Ludwig Wittgenstein (1889-1951), sobre a relação entre linguagem e padronização, podem ser úteis ao que ele chama de “sociologia do conhecimento metrológico” (KUSCH, 2015, p. 22; 24). Toda a obra de Wittgenstein está impregnada de reflexões que abordam os problemas da medição e sua padronização. O parágrafo 50 das *Investigações filosóficas* (2009), por exemplo, no qual afirma que, do padrão do metro guardado em Paris, “não se pode dizer que tem 1 metro de comprimento, nem que não tem 1 metro de comprimento”⁴⁹ (WITTGENSTEIN, 2009, §50, p. 29^e), já foi objeto de muita discussão filosófica.

Porém, o que nos parece relevante no âmbito da tese refere-se exatamente à posição peculiar dos padrões como regras sociais a serem seguidas. Segundo Kusch, a reflexão de Wittgenstein sobre unidades de medição e seus análogos (regras de gramática, provas e certezas) pode “nos ajudar a entender porque a descontextualização ou mistificação de estruturas é difícil de evitar” (KUSCH, 2015, p. 23). Para exemplificar os insights que Wittgenstein nos oferece sobre esse problema, Kusch cita em seu ensaio dois aforismos da reunião de escritos denominada *Nachlass* (Caderno de notas publicadas em 2000) que reproduzimos abaixo:

A regra enquanto regra está separada, permanece como se estivesse sozinha em sua glória; entretanto o que dá sua importância são os fatos da experiência diária.

⁴⁹ A estranheza da afirmação de Wittgenstein se deve ao fato de que o padrão do metro é algo que, com mais certeza e de forma mais enfática, poderíamos dizer que, nas condições ambientais adequadas, possui um metro de comprimento! A afirmação, entretanto, ressalta o papel do padrão como regra do jogo, que, assim, se encontra fora da alçada da própria regra. O padrão não é medido pela regra-padrão pois seu papel é fornecer a regra. Por isso, não se pode dizer que ele tem um metro – não se pode medi-lo contra si mesmo! – pois é ele que “diz”, de todas as outras coisas, quantos metros medem. A situação paradigmática dos protótipos instituídos como padrões das unidades fundamentais já não persiste no atual SI gerido pelo BIPM. O protótipo padrão da unidade de comprimento metro, que foi guardado no BIPM em 1889, foi substituído em 1960 pela definição do metro baseada em fenômeno quântico e, em 1983, “se tornou a primeira unidade do SI a ser definida pelo valor numérico fixo de uma constante fundamental: a velocidade da luz” (<https://www.bipm.org/metrology/length/>; acessado em junho de 2019).

O que eu tenho que fazer é algo como descrever a função de um rei; – ao fazer isso, eu não devo cair no erro de explicar a dignidade real pela utilidade do rei, mas eu não devo deixar nem sua utilidade, nem sua dignidade, de fora da descrição (WITTGENSTEIN, 2000, p.12 apud KUSCH, 2015, p. 23-4).

Kusch explica que “regras, padrões ou estruturas tem autoridade precisamente porque, e na medida que, têm dignidade” (KUSCH, 2015, p. 24). A autoridade e a dignidade das regras e das unidades de medição emanam da chancela que recebem tanto da comunidade científica de especialistas em metrologia, quanto dos estados nacionais e das instituições metrológicas, além da utilidade que sobressai de seus usos cotidianos. A utilidade não explica a dignidade das unidades de medição, mas utilidade e dignidade operam de forma indissociável através do emprego diário do sistema pelos cidadãos comuns e pela comunidade científica. Atualmente, as instituições metrológicas, coordenadas pelo BIPM, ocupam lugar de destaque no provimento de confiança nas medições. Elas fornecem dignidade aos padrões e às metodologias de medição empregados na prática (e, portanto, úteis aos seus fins), mas dependem dos estados nacionais e da comunidade científica para terem autoridade para tanto.

Os trabalhos de filosofia da medição mais recentes que trouxemos para a discussão nesta seção abordam questões que vão desde os papéis exercidos pelos modelos até as questões sociais e institucionais que moldam a rede metrológica internacional. Muitos outros trabalhos relevantes da filosofia da medição serão discutidos ao longo da tese. O conceito de incerteza de medição está no centro da maioria das questões abordadas pela filosofia da medição contemporânea. A incerteza funciona como uma espécie de junta flexível que proporciona a ligação dos diversos braços do sistema, tanto do ponto de vista da rede metrológica, quanto do ponto de vista da articulação conceitual.

1.5 Comentários finais do primeiro capítulo

As abordagens teóricas e filosóficas da medição que discutimos ao longo do primeiro capítulo formam um quadro multifacetado que acreditamos ser útil para enfrentar o tema central da tese. Diferentes aspectos das medições foram destacados, mas fizemos questão de colocar mais ênfase nas questões relacionadas ao aspecto **empírico-experimental** e na **impossibilidade** de obter resultados com **exatidão absoluta**. Ambos os aspectos estão intimamente relacionados com o tema central da tese, a incerteza de medição. Mas foram enfatizados também porque estão relacionados com a **prática** da medição. Conforme

observamos na Introdução, a prática constitui um dos pontos de partida dessa tese e uma de suas balizas.

Apontam na mesma direção da impossibilidade da exatidão absoluta as afirmações de Bachelard sobre a “**atmosfera de imprecisão**” que se agrega à realidade da grandeza e sobre “os **elementos de incerteza**” presentes a cada momento e a cada esforço da ciência, bem como afirmações semelhantes de Bridgman. Do mesmo modo, a observação de Kuhn sobre o que se considera uma “**concordância razoável**” entre resultados teóricos e experimentais se deve ao reconhecimento da impossibilidade de coincidências digito-a-digito. Embora não o tenha dito explicitamente, o ensaio de Kuhn de 1961 mostra a importância dos critérios para avaliar a concordância entre resultados de medições. Veremos, no segundo capítulo, como o problema da estimativa da qualidade da medição foi percebido pela comunidade científica como um problema candente nas décadas de 1960 e 1970. O tratamento desse problema levou à adoção do conceito de incerteza de medição pelas instituições metrológicas e pela comunidade científica em geral nos anos 1980.

As soluções propostas por van Fraassen, Chang e Eran Tal para o problema da coordenação das grandezas também sublinham o papel da prática da medição. Essas soluções têm em comum transformar o **círculo vicioso**, que tende a se estabelecer entre o conhecimento de uma grandeza e sua medição (círculo no qual ficam presas as propostas de caráter fundacional), em um **círculo virtuoso**, no qual a superação das dificuldades se dá de forma gradativa baseada no intercâmbio entre teoria e prática (por exemplo, através das iterações epistêmicas de Chang). A **história** dos processos de quantificação das grandezas físicas testemunha que as propostas teóricas e experimentais são férteis quando caminham juntas, passo a passo. Os êxitos atualmente alcançados pelas medições de grandezas não devem apagar a história dos grandes esforços realizados para chegar a resultados com altas exatidões. Não devem apagar também os fracassos que muitas vezes fornecem as bases para propostas mais bem-sucedidas. Os autores que têm investigado a história das medições (como, por exemplo, Chang e Gooday) vêm nos possibilitando visualizar como o conhecimento quantitativo foi construído pela prática em algumas áreas.

A solução oferecida por Eran Tal para o problema da coordenação se propõe a resolver, concomitantemente, os problemas da individuação da grandeza e da exatidão do procedimento de medição. É a exatidão epistêmica que fornece o critério para reconhecer a concordância nas **comparações** entre os resultados de medição da mesma grandeza por diferentes atores e por diferentes métodos. São os muitos exercícios de comparação que possibilitam a coordenação entre os procedimentos de medição e os valores das grandezas. No

contexto da solução proposta por Tal, a exatidão, qualificada como epistêmica, tem como conceito correlato a incerteza de medição.

A ênfase no aspecto empírico-experimental que mencionamos acima não subtrai a importância do aspecto **teórico** envolvido na medição. A modelagem teórica do procedimento de medição permite tanto o cálculo do valor da grandeza quanto a estimativa da incerteza. Por isso, a proposta de Eran Tal, assim como muitos outros trabalhos recentes da filosofia da medição, tem os **modelos** teórico e estatístico como base. Em se tratando de medições científicas, **não tem sentido falar da prática experimental sem envolver as teorias** que preveem a relação entre as variáveis envolvidas. Da mesma forma que Chang, em sua revisão do operacionalismo, inclui as atividades de “papel e lápis” entre as “operações” que ditam os significados das grandezas, também a **prática** da medição científica envolve os aspectos **teórico e experimental**.

Essa implicação dos aspectos teórico e experimental é reconhecida em muitos trabalhos da filosofia da medição contemporânea que discutimos nesse capítulo e que serão referidos ou aprofundados nos capítulos posteriores. A recorrente menção ao papel dos **modelos** testemunha em favor da implicação **teoria-experimento**. Para além desses aspectos, também os aspectos **informacional, institucional, coletivo e normativo** das medições vêm sendo apontados e destacados nos trabalhos recentes. Se, para o intérprete do trabalho metrológico, se coloca o desafio de estar atento às **especificidades** dessa prática, para o metrologista, por seu turno, o desafio consiste em melhorar o sistema de medição com as informações científicas e tecnológicas disponíveis. Em nosso enfoque, buscamos estar atentos a essas especificidades porque entendemos que elas iluminam a complexidade que subjaz ao processo de medição, mas, ao mesmo tempo, buscamos não restringir a investigação da tese ao tratamento que os problemas recebem no âmbito da metrologia.

Muitas das **perspectivas** teóricas e filosóficas das medições tratadas aqui no primeiro capítulo não são excludentes entre si: as diferenças entre elas são, eminentemente, diferenças no foco em determinados elementos do processo. Realismo, MTs, operacionalismo e convencionalismo apresentam contribuições importantes para compreendermos as diversas dimensões das medições. No entanto, como observamos na subseção 1.3.5, em relação a questões específicas, como a do **realismo** metafísico sobre as grandezas físicas, certas perspectivas se posicionam em oposição a outras. Essa é uma questão, praticamente incontornável, que reaparecerá em algumas partes da tese, especialmente no terceiro capítulo, quando discutimos o conceito de valor verdadeiro de uma grandeza. Entretanto, nos parece que uma das virtudes da filosofia da medição contemporânea reside, justamente, em não ficar

preso a essa infundável polêmica. Nos trabalhos contemporâneos, em geral, **a questão da disputa entre realismo e antirrealismo é abordada sem que o foco dos trabalhos seja direcionado para ela.** É o que também buscamos fazer em nosso trabalho.

Ao buscar fornecer uma interpretação “estrutural” da medição, Mari e colegas apresentam as tradicionais abordagens da medição ingênuo-realista, operacionalista e representacionalista (MTs) como interpretações estereotípicas que seu trabalho pretende superar (MARI *et al.*, 2017, p. 47-8). Os autores levam em conta os pontos de vista das abordagens tradicionais, mas pretendem discriminar as etapas da medição, como apresentamos na subseção 1.4.3, abrindo as caixas-pretas dos elementos envolvidos nos processos de medição (MSs, padronização, sistema metrológico e o conhecimento de fundo [*background knowledge*]) (MARI *et al.*, 2017, p. 48). Eran Tal, na tese de doutorado sobre a epistemologia da medição baseada em modelo, assinala que sua abordagem não é crítica nem endossa o realismo metafísico a respeito das grandezas, ela “permanece agnóstica” em relação à metafísica e se restringe ao aspecto epistêmico da medição (TAL, 2012, p. 20-1).

O realismo ativo proposto por Hasok Chang, que comentamos na seção 1.3.3, une as bases empiristas do operacionalismo de Bridgman com um realismo não metafísico que reconhece na convergência dos resultados uma manifestação resistente de algo real com que os cientistas lidam (CHANG, 2017, p. 32-3). Esses são exemplos do tratamento que a filosofia da medição contemporânea tem dispensado ao debate realismo versus antirrealismo em relação às grandezas submetidas à medição. Embora presente, a questão do compromisso metafísico realista é contornada de modo a produzir abordagens que avancem na compreensão epistemológica do processo de medição.

Como apontamos também na subseção 1.3.5, a disputa em torno do realismo das grandezas fica enfraquecida por posições majoritariamente moderadas e restritas à questão metafísica da (pré) existência das grandezas com seus valores verdadeiros. Nossa **inclinação** é por um **empirismo antirrealista** que compreende o processo de quantificação das grandezas como uma construção científica muito bem-sucedida. É uma posição **cética moderada** porque defende que a inferência metafísica para a correspondência com o real é questionável e desnecessária. Porém, e essa é uma observação importante, nossa posição reconhece o papel fundamental das **teorias** para o sucesso das medições. É uma posição próxima do realismo ativo defendido por Chang, o que exemplifica como as posições moderadas se aproximam⁵⁰.

⁵⁰ Além do realismo ativo de Chang, uma outra posição próxima à nossa é a defendida pelo filósofo da ciência australiano Peter Godfrey-Smith em *Theory and Reality* (2003) que une realismo, naturalismo e empirismo.

Outra observação importante é que ser cético quanto à inferência metafísica da realidade das grandezas **não** significa ser contra a presença de **qualquer metafísica** nas ciências. A inclinação em direção ao antirrealismo também não implica a adesão a outras posições além da questão metafísica. Por exemplo, não implica referendar a distinção entre observáveis e não observáveis. Ainda que o problema do realismo seja apenas uma questão acessória na tese, a discussão sobre essa disputa reaparece em alguns pontos desse trabalho, tal como na subseção 3.3.4 e em algumas seções de comentários conclusivos.

O desenvolvimento das técnicas que possibilitaram a estimativa da incerteza de medição se deu em paralelo com a aplicação cada vez mais abrangente da matemática nas formulações teóricas das ciências e nos procedimentos de medição. Abordamos questões relacionadas ao emprego da matemática nas medições no próximo capítulo.

2 O EMPREGO DA MATEMÁTICA NAS MEDIÇÕES

O engenheiro

O lápis, o esquadro, o papel;
o desenho, o projeto, o número;
o engenheiro pensa o mundo justo,
mundo que nenhum véu encobre.

João Cabral de Melo Neto

Os resultados de medições são expressos, majoritariamente, em valores correspondentes a escalas de intervalos ou de razões, para as quais as teorias e as técnicas da matemática são fundamentais. As medições também podem empregar as escalas nominal e ordinal⁵¹, nas quais a matemática exerce um papel secundário, mas essas são bem menos importantes no universo da metrologia. Para chegar a um resultado de medição, em geral, são necessárias operações aritméticas, geométricas, algébricas e estatísticas, sem falar das situações em que são exigidos cálculos mais refinados. Técnicas matemáticas são empregadas nas diversas fases da medição, desde a fase pré- até a fase pós-medição (cf. subseção 1.4.3). Merecem destaque as técnicas probabilísticas e estatísticas empregadas para estimar as incertezas do procedimento de medição.

Como dissemos na seção 1.1, o desenvolvimento da metrologia tem se dado no sentido de intensificar o emprego de conceitos científicos e tecnologias de ponta, ao mesmo tempo em que as instituições metrológicas fornecem bases mais confiáveis para as medições realizadas pelas diversas áreas das ciências. A afinidade com a pesquisa de ponta nas ciências físicas faz com que a matemática seja ainda mais vital para as medições.

Tratamos, neste capítulo, de temas relacionados à aplicação da matemática nas medições. São muitas as questões filosóficas que podem ser levantadas a respeito do emprego de ferramentas matemáticas. A filosofia da matemática, por si só, constitui um campo vasto de investigações. Por isso, os problemas trazidos para a discussão são os que entendemos como necessários para abordar o tema da incerteza de medição. Na primeira seção (2.1), vamos abordar algumas questões relacionadas ao emprego da matemática do ponto de vista conceitual e histórico. Uma vez que o principal modo com que a matemática é aplicada à medição é via modelagem, apresentamos exemplos de modelos empregados na área da

⁵¹ Na seção 1.3.2 mostramos os tipos de escalas empregadas na medição, conforme tabela 1.1 construída a partir do trabalho de STEVENS, 1946, p. 678.

metrologia das radiações ionizantes. Uma outra importante maneira que a matemática participa da medição é através da estimativa de erros e incertezas que lançam mão da teoria das probabilidades e de ferramentas estatísticas. Em função disso, na segunda seção (2.2), vamos buscar fazer a distinção entre os conceitos de probabilidade e de estatística e traçar um painel histórico da emergência da teoria das probabilidades e das técnicas estatísticas. Na última seção (2.3), vamos abordar mais especificamente o desenvolvimento das técnicas estatísticas e dos conceitos a elas associados para estimar erros e incertezas de procedimentos de medição.

2.1 Questões históricas e conceituais

Os temas que tratamos nesta seção são os seguintes: os conceitos de quantificação e matematização, sua relação e seus desenvolvimentos históricos (2.1.1); a dinâmica entre as tradições teórico-matemática e experimental nas ciências físicas (2.1.2); e a adequação da matemática em sua aplicação nas teorias e nas quantificações (2.1.3). Ao discutir essas questões, buscaremos evidenciar como a incerteza de medição está implicada. Conforme vimos na seção 1.4, medições de grandezas físicas requerem o emprego de modelos matemáticos e estatísticos. Especialmente as medições indiretas, nas quais as indicações do instrumento de medição precisam ser “processadas” para fornecerem o valor do mensurando, exigem a aplicação de operações matemáticas baseadas no modelo teórico para a obtenção do resultado. Portanto, a matemática encontra-se irremediavelmente envolvida nos processos de medição. Além do mais, o estreitamento da relação entre a metrologia e as demais ciências vem tornando as medições mais dependentes da matemática.

2.1.1 Quantificação e matematização

A definição de **grandeza** do VIM3 (citada na seção 1.1), explicita que essa é uma “propriedade [...] que pode ser expressa quantitativamente sob a forma dum número e duma referência” (INMETRO, 2012b; def. 1.1). Para que certa propriedade possa funcionar como uma grandeza é preciso mostrar que ela pode ser **quantificada**, ou seja, que podemos atribuir a ela valores, de modo coerente, segundo uma escala. Esses valores são obtidos por comparação com um padrão da mesma grandeza que, por sua vez, deve estar rastreado às unidades básicas do SI. De modo imediato, podemos dizer que medir é quantificar.

As grandezas comprimento, massa e tempo foram submetidas à medição desde a antiguidade e a padronização dessas possibilitou também a medição de grandezas derivadas, como densidade e velocidade. Desde a revolução científica do século XVII, muitas outras propriedades de fenômenos foram identificadas como passíveis de medição. Podemos chamar de “**quantificação**” o processo de **identificação** de novas grandezas, ou seja, de novas propriedades que podem ser submetidas à medição, e a consequente **prática de medição** das novas grandezas. Conforme antecipamos no penúltimo parágrafo da subseção 1.2.3.3, a quantificação exige, basicamente, a definição cuidadosa das grandezas postuladas por alguma teoria, de suas unidades correspondentes, o estabelecimento de padrões e de escalas de medição e a proposição de métodos a serem empregados nas medições. Usamos, então, o conceito de quantificação no sentido **imediate de medição**, mas também no sentido do **desenvolvimento** das condições teóricas e experimentais para realizar **medições**, em geral, a partir de uma teoria matematizada. O processo histórico de quantificação, iniciado nos primórdios da história humana, se acentuou a partir do iluminismo francês e praticamente se universalizou entre as ciências no século XX. Também vimos no primeiro capítulo (seções 1.2 e 1.4) que a quantificação exige a superação do **problema da coordenação**, o que torna o processo muitas vezes complexo, exigindo a participação de inúmeros atores.

2.1.1.1 Koyré e a matematização da natureza

Paralelamente ao processo de quantificação das grandezas, **mas a ele vinculado**, se dá a “**matematização da natureza**”, que se refere ao estabelecimento de leis ou relações matemáticas entre as propriedades dos fenômenos da natureza. A lei galileana da queda dos corpos e as leis da dinâmica de Newton constituem os exemplos mais notórios de matematização. A tese da matematização se refere à “transformação de conceitos e métodos científicos, especialmente aqueles concernentes à natureza da matéria, do espaço e do tempo, através da introdução de técnicas e ideias matemáticas (ou geométricas)” (GORHAM; HILL; SLOWIK, 2016, p. 1). O conceito de matematização da natureza foi cunhado de forma independente pelo matemático e historiador da ciência holandês Eduard Jan Dijksterhuis (1892-1965), pelo filósofo estadunidense Edwin A. Burtt (1892-1989) e pelo filósofo da ciência francês de origem russa Alexandre Koyré (1892-1964). Para os três pensadores, a matematização da natureza está estritamente relacionada à revolução científica do século XVII (COHEN, 2016; GORHAM et al., 2016). Entretanto, a distinção entre quantificação e

matematização, bem como o próprio conceito de matemática são problemáticos, conforme discutimos a seguir.

Em diversos ensaios (p. ex.: KOYRÉ, 1953; 1980; 1982; 1991), Koyré buscou mostrar que o salto epistemológico proporcionado pelas “novas ciências” no século XVII, ou seja, pela Revolução Científica capitaneada por Galileu, Descartes e Newton, se deveu, principalmente, à **aplicação da matemática** na investigação dos fenômenos da natureza. Na sua concepção, o caráter experimental daquelas ciências, muitas vezes destacado por historiadores de inclinação empirista e positivista, teria desempenhado um papel secundário no trabalho dos filósofos naturais modernos. Os experimentos foram aprimorados na medida em que as próprias teorias forneciam conhecimentos para a melhoria das condições experimentais. Para Koyré, o que proporcionou o progresso da dinâmica no século XVII foi o pressuposto de que **a linguagem adequada para interpretar os fenômenos da natureza é a matemática** e de que o real deve ser matematizado para que se possa extrair a teoria científica adequada para a compreensão dos fenômenos. A matematização do real constituiria uma ultrapassagem da física aristotélica pela aplicação da matemática ao mundo sublunar que, embora imperfeito, pode ser descrito pela linguagem matemática que subjaz à imperfeição das aparências.

Ao examinar as “origens da ciência moderna”, Koyré nega a tese do historiador das ciências Alistair Crombie (1915-1996) de que as raízes da ciência moderna podem ser encontradas na proposta do método experimental feita ainda na Idade Média por Robert Grosseteste e Roger Bacon (KOYRÉ, 1982). Para Koyré, a realização de experimentos sistemáticos, mas meramente qualitativos, teria sido insuficiente para promover a rápida proliferação de teorias e de melhores condições experimentais. O que aconteceu de notável no século XVII foi a associação entre prática experimental e a matemática, que teria possibilitado, de forma inédita, a resolução de “problemas físicos através de teorias matemáticas, das quais as mais surpreendentes são as da dinâmica moderna” (KOYRÉ, 1982, p. 59).

As propostas metodológicas de experimentação medievais não teriam prosperado porque eram apenas metodologias para procedimentos empíricos, não constituíam um “método” científico. O que distingue a revolução científica do século XVII seria exatamente o recurso teórico à aplicação da matemática no estudo dos fenômenos. A matematização da natureza teria não apenas propiciado o rápido progresso das ciências, mas também exigido o desenvolvimento de recursos tecnológicos para a verificação empírica das propostas teóricas. Os aprimoramentos tecnológicos mais notáveis teriam sido obtidos empregando-se os

princípios teóricos e matemáticos introduzidos, criando um círculo virtuoso que caracterizou a revolução. O método experimental introduzido por Galileu seria, então, baseado na matematização e teria a mensuração como princípio experimental mais importante:

Um método no qual a teoria matemática determina a própria estrutura da pesquisa experimental, ou, para retomar os próprios termos de Galileu, um método que utiliza a linguagem matemática (geométrica) para formular suas indagações à natureza e para interpretar as respostas que ela dá. Um método que, substituindo o mundo do mais ou menos conhecido empiricamente pelo Universo racional da precisão, adota a mensuração como princípio experimental mais importante e fundamental. É esse método que, baseado na matematização da natureza, foi concebido e desenvolvido, senão pelo próprio Galileu [...], pelo menos por seus discípulos e sucessores (KOYRÉ, 1982, p. 74).

O tipo de abordagem de Koyré, de influência platônica e husserliana, envolvendo o conceito de matematização, algumas vezes denominada de “grande narrativa” da revolução científica no século XVII, passou a ser problematizado nas últimas décadas do século XX e deixou de se tornar atrativa (ROUX, 2010, p. 321; nota 1, p. 319). As características essenciais dessa narrativa são que (i) a matematização pode ser usada como critério para distinguir as “novas ciências” do conhecimento qualitativo preconizado pela filosofia aristotélica, que (ii) a matematização se baseava na convicção metafísica de que o mundo foi criado com base no número e que (iii) a evolução das ciências pode ser apreendida através das descobertas individuais de algumas mentes geniais (ROUX, 2010, 319-20).

Essas características são problemáticas em face de perspectivas da história das ciências que apontam a importância de fatores políticos, sociais e culturais, bem como do problema relacionado ao forte realismo ontológico dos números, que discutimos adiante na subseção 2.1.3. Analisando as contribuições das “tradições” matemático-teórica e experimental para o desenvolvimento da física moderna, Thomas Kuhn concorda com Koyré que a atividade experimental pouco contribuiu para a transformação das “ciências clássicas” durante a revolução científica. Porém, Kuhn destaca também as diferenças histórico-geográficas para ambas as tradições, bem como a importância das técnicas experimentais para convergência dessas tradições nas ciências físicas no século XIX (KUHN, 2011, p. 70).

A historiografia publicada a partir dos anos 1980, da qual o trabalho de Shappin e Schaffer sobre Hobbes, Boyle e os experimentos no séc. XVII é um exemplo notável (SHAPPIN; SCHAFFER, 2011), contribuiu decisivamente para tornar o quadro que representa a revolução científica bem mais “borrado” e “a aparente simplicidade da fórmula histórica ‘Revolução Científica = matematização da natureza’” parecer insustentável (COHEN, 2016, p. 156). Alguns textos mais recentes têm levado em conta os problemas

acima mencionados para trabalharem com o conceito de matematização da natureza de forma contextualizada (ROUX, 2010; COHEN, 2016; GORHAM et al., 2016). Ou seja, a “grande narrativa sobre matematização da natureza tem que ser enriquecida com o denso espectro de várias práticas matemáticas” e as “idealidades” de Koyré têm que ser “substituídas por práticas reais”. Dessa maneira, é mais adequado falar de “formas de matematização” específicas e contextualizadas (ROUX, 2010, 327; 333).

2.1.1.2 Matematização, quantificação, técnica

Tendo essa limitação do conceito em mente, vale a pena voltar uma vez mais a Koyré. Conforme já mencionamos, para o historiador franco-russo, a aplicação de princípios teóricos em projetos de instrumentos experimentais, tornando-os mais precisos, constitui um dos sucessos da matematização no século XVII. O rápido desenvolvimento tecnológico que se seguiu à aplicação da matemática aos fenômenos do mundo sublunar (e não apenas aos movimentos dos astros) no século XVII é interpretado por Koyré como sendo fruto da aplicação das teorias científicas (que ele identifica com a *episteme* grega) à técnica (a *thecné* grega). A passagem da técnica rudimentar imprecisa para uma tecnologia de precisão baseada na ciência, ou seja, a passagem do “mundo do mais-ou-menos ao universo da precisão”, seria, principalmente, consequência do privilégio da teoria sobre a prática (KOYRÉ, 1991). Essa concepção é ilustrada por Koyré no ensaio “Um experimento de medição” no qual ele mostra como Huygens obteve sucesso na determinação da aceleração da gravidade por ter empregado o princípio teórico do pêndulo na construção de um relógio mais preciso (KOYRÉ, 1953⁵²). Se analisarmos a argumentação de Koyré do ponto de vista do desenvolvimento das medições, ela faz uma conexão pertinente entre teoria matematizada, prática e “precisão”. Só faz sentido falar de precisão ou de exatidão quando descrevemos os fenômenos em termos matemáticos e é com base nas teorias que podemos identificar as limitações dos procedimentos e estimar a qualidade da medição.

O quanto o desenvolvimento de instrumentos mais precisos e exatos se deve à teoria ou à prática é uma questão complexa que está além do escopo da tese. Aqui queremos destacar apenas que, segundo a metrologia e a filosofia da medição contemporânea, como

⁵² Como a tradução brasileira desse artigo de Koyré apresenta muitos problemas, trabalhamos com o texto original conforme publicado em inglês. Apenas para exemplificar os problemas da tradução, no texto, o autor faz uma distinção explícita entre “experiência” (*experience*) e “experimento” (*experiment*). Entretanto o tradutor, mesmo traduzindo corretamente a passagem em que Koyré explicita a distinção, traduz diversas vezes *experiment* por *experiência*, inclusive no título do artigo.

vimos na seção 1.4, a estimativa do valor da incerteza de medição se baseia justamente no modelo teórico e estatístico do procedimento de medição. E o levantamento das fontes de incerteza de um procedimento constitui uma forma de otimizar o procedimento com vistas a baixar a incerteza global, sendo, portanto, também um meio de fornecer indicações para o aprimoramento tecnológico dos instrumentos empregados na medição. Apesar dos pertinentes questionamentos que se possa fazer à tese que credita tal aprimoramento à ênfase na teoria e na matemática, por certo a melhoria na exatidão das medições depende fortemente de empregar princípios teóricos e matemáticos nos projetos dos instrumentos. Ao apontarmos a pertinência da argumentação de Koyré que relaciona o privilégio da teoria ao desenvolvimento tecnológico da experimentação, pretendemos enfatizar uma das virtudes do conceito de incerteza de medição relacionada à matematização, e não referendar seu juízo sobre a **primazia** da esfera teórica.

Por outro lado, acreditamos que o conceito de matematização da natureza (ou dos fenômenos, ou ainda, das teorias) pode ser útil para pensarmos o desenvolvimento das ciências da natureza de um modo geral, bem como a quantificação dos fenômenos. Nosso interesse, entretanto, não é resgatar o conceito de matematização como um componente importante para entender o florescimento das ciências no século XVII, mas para designar o emprego crescente da matemática nas ciências **desde aquele florescimento até os dias de hoje**. Isso porque, em função da aproximação da metrologia científica com as ciências de ponta, a tendência de matematização reflete-se na quantificação. No entanto, cabe ressaltar e ter em mente que, tendo em vista a diversidade de práticas que compõem o campo da matemática, só podemos falar de “diferentes tipos de matematização, cada um dos quais trazendo seus próprios benefícios” (ROUX, 2010, p. 325).

Mesmo considerando os processos como vinculados, podemos distinguir a “matematização das teorias” da “quantificação”. Em artigo em que analisa o que a matemática teria feito em prol da física, o historiador e sociólogo da ciência canadense Yves Gingras faz essa distinção explicitamente em uma nota que reproduzimos abaixo:

Eu distingo ‘quantificação’ de ‘matematização’. A primeira se refere à produção de números para medir fenômenos através da construção de uma métrica (um termômetro graduado, por exemplo), enquanto a segunda se refere a escrever formulações geométricas ou algébricas abstratas (como a lei da queda livre ou a lei da refração). A primeira pode existir sem a segunda e a última pode ser formulada antes da primeira (GINGRAS, 2001, Nota 10, p. 407-8).

Embora a distinção seja pertinente, os conceitos apresentam forte correlação. Por um lado, a matematização das teorias, na prática, demanda a medição das grandezas para testar as previsões das teorias. Por outro lado, a quantificação depende em grande parte da matematização, pois a matemática é empregada na modelagem do processo de medição.

Faz sentido dizer que a matematização, enquanto proposta teórica, pode existir sem a quantificação, mas teorias sem testes empíricos (que, em geral, se dão através de medições) são menos robustas. “A teoria permaneceria uma peça de matemática pura e não uma teoria empírica de fato, se seus termos não estivessem ligados a procedimentos de medição (VAN FRAASSEN, 2008, p. 115). Na matematização independente da quantificação, as variáveis envolvidas relacionam-se entre si de modo consistente em seu aspecto **formal**. Como veremos adiante, nesse caso, as variáveis são tratadas como grandezas abstratas, também chamadas de magnitudes (DE COURTENAY, 2015, p. 64). Também faz sentido dizer que a quantificação pode preceder a matematização se pensarmos nos tradicionais sistemas de medição de distâncias e de massas sem uma base teórica consolidada. Porém, a matematização ganha em robustez quando as relações formais podem ser empiricamente avaliadas (o que demanda medições) e a quantificação ganha em exatidão e consistência quando baseada em teorias científicas matematizadas. Tanto nas ciências de ponta quanto na metrologia, cada vez mais, matematização e quantificação estão estreitamente ligadas.

As grandezas básicas que mobilizaram as instituições metrológicas durante boa parte de suas histórias foram o comprimento e a massa, que não exigiam ferramentas matemáticas sofisticadas em seus processos de padronização e medição. É certo que a medição do meridiano que serviu de base para o metro no final do século XVIII lançou mão de técnicas geométricas e de agrimensura refinadas, mas esse foi apenas um esforço científico para lançar as bases do sistema métrico. Até meados do século XIX, os procedimentos de medição de uma forma geral, por mais engenhosos que tenham sido, empregavam apenas algumas noções de geometria e de aritmética.

Por isso, muitas vezes a quantificação é associada à aritmetização de corpos e fenômenos. Bachelard, por exemplo, qualifica como “pobre” a matemática que se adapta à medição. Conforme mencionamos na subseção 1.2.1, o filósofo francês afirma que medir e tornar as medições mais precisas são imperativos na física moderna, mas reduz a matemática empregada na medição à aritmética: “[A] medida aparece como a epistemologia fundamental, como a base da aritmetização da experiência” (BACHELARD, 2004, p. 56). Koyré, por sua vez, destaca a geometrização do espaço nos trabalhos de Galileu e Newton. Para falar dos diferentes tipos de matematização, em função dos diferentes recursos matemáticos

empregados, Sophie Roux exemplifica a aplicação da aritmética na quantificação entre os séculos XIV e XVII:

A aritmética, por ser uma prática com números, gera a primeira forma de matematização: então a “quantificação” consiste em capturar sob a forma numérica certos aspectos das coisas materiais. Essa captura requer não só medições, aparatos concretos e uma preocupação com precisão e dados padronizados, mas também técnicas gráficas para apresentar resultados numéricos e técnicas intelectuais de aproximação e de extração da média. Obviamente, a quantificação pode estar somente periféricamente relacionada com a busca desinteressada de leis na filosofia da natureza: os alegados benefícios da quantificação são algumas vezes práticos (ROUX, 2010, p. 325).

Nos dias de hoje, a quantificação apresenta claramente benefícios em duas frentes: nos empregos práticos da medição no comércio, na indústria e nas aplicações científicas socialmente úteis (como na medicina, na previsão do tempo etc.) e nos empregos em experimentos que avaliam teorias científicas propostas (a identificação do bóson de Higgs e das ondas gravitacionais são dois exemplos notórios). O atual estágio de complexidade científico e tecnológico é consequência da intensa aplicação da matemática nas ciências nos últimos séculos. Para ficarmos apenas com as ciências físicas, vamos recorrer ao texto de Kuhn sobre o processo histórico das tradições matemática e experimental nessas ciências, desde o início da modernidade até o século XX.

2.1.2 Duas tradições de pesquisa

No ensaio “Tradição matemática *versus* tradição experimental no desenvolvimento das ciências físicas”⁵³, publicado originalmente em 1976, Kuhn identifica duas “tradições” de pesquisa nas ciências físicas na época da revolução científica do século XVII. Por um lado, havia as ciências consideradas matemáticas desde a antiguidade, como a astronomia, a óptica e a estática, que já apresentavam diferentes níveis de matematização, às quais a dinâmica veio a se juntar. Kuhn as denomina “ciências físicas clássicas”, ou, simplesmente, “ciências clássicas”. Por outro lado, oriundas de profissões e práticas medievais, emergiram áreas de pesquisa eminentemente experimentais sobre fenômenos relacionados à eletricidade, ao magnetismo, à pneumática, ao calor e às transformações da matéria. Como a experimentação nessas áreas foi muito influenciada pelas teses indutivistas de Francis Bacon (1561-1626), Kuhn as denomina “ciências baconianas”.

⁵³ Trabalhamos aqui com a tradução para o português publicada na edição brasileira de 2011 do volume de ensaios *A tensão essencial* (KUHN, 2011, pp. 55-88).

Devido ao enfoque matemático e teórico e a “novos modos de pensar velhos fenômenos”, as “ciências clássicas”, tiveram um desenvolvimento privilegiado nos séculos XVII e XVIII que pouco teria se beneficiado de “descobertas experimentais não antecipadas” pelas teorias (KUHN, 2011, p. 70). Porém, as atividades das ciências baconianas ajudaram a desenvolver instrumentos e metodologias de relatos experimentais que foram aos poucos incorporados aos procedimentos científicos de todas as ciências. Esses instrumentos e metodologias teriam facilitado a rápida introdução de métodos quantitativos nas ciências baconianas no século XIX (KUHN, 2011, p. 68; 74).

Em sua análise, Kuhn trata os campos das ciências clássicas e baconianas como relativamente independentes até fins do século XVIII, mas aponta que houve uma integração dessas tradições para dar origem às ciências físicas modernas, nas quais a separação entre aquelas tradições é, de certo modo, estranha. Essa mudança na física teria se dado por três fatores: devido (i) à transformação que ocorreu em todas as profissões eruditas ao longo do século XIX, (ii) à alteração na percepção da identidade da matemática que passou a ser dividida entre pura e aplicada e (iii) à rápida matematização das ciências baconianas no primeiro quarto do século XIX. O desenvolvimento interno, na forma de pesquisas qualitativas realizadas nos séculos anteriores, teria propiciado a matematização das ciências baconianas e a consequente redução de barreiras entre as duas “tradições” (KUHN, 2011, p. 83-5).

Uma crítica ao artigo de Kuhn é que sua “reabilitação das ciências baconianas repousa numa separação bem definida” (*clear-cut*) entre as tradições matemática e experimental, bem como numa “alta valorização do reino abstrato das ideias puras em detrimento do mundo concreto de práticas alegadamente confusas” (ROUX, 2010, p. 329). De todo modo, sua abordagem deixa ver também a importância de práticas experimentais, independentes de teorias matematizadas, para desenvolver técnicas que possibilitem a rápida introdução de métodos quantitativos. No artigo sobre a função da medição na física moderna, que discutimos na subseção 1.2.2.1, Kuhn identifica na intensa atividade de matematização e de medição das ciências baconianas, “exemplificada pelo trabalho de Fourier, Clausius, Kelvin e Maxwell”, o “aspecto de uma segunda revolução científica não menos decisiva do que a do século XVII” (KUHN, 2011, p. 233-4).

Uma questão interessante da matematização das ciências, para o qual as ciências baconianas tiveram forte contribuição, diz respeito à dupla interpretação que as equações da física admitiam antes de alcançarem o atual sentido unificado. Segundo a física e filósofa francesa da ciência, Nadine de Courtenay, o uso corrente que fazemos das equações na física,

que nos parece muito familiar e intuitivo, é bem recente. No século XIX, as equações ainda eram tratadas como simples proporcionalidades e admitiam uma dupla interpretação:

[A] matematização das ciências baconianas no século dezanove levou, primeiro, a uma interpretação das equações da física em termos de *equações de medidas* e, em segundo lugar, a uma interpretação em termos de *equações de grandezas*. Ambos os esquemas de matematização dependiam fortemente de unidades, apesar de eles repousarem em entendimentos bem diferentes da natureza e do papel destas últimas [das unidades] (DE COURTENAY, 2015, p. 54; grifo da autora).

A padronização das unidades, segundo de Courtenay teria sido importante não somente para as medições, mas também para a maneira como representamos as “relações físicas matematicamente e, então, tem relevância no problema da aplicabilidade da matemática à física” (DE COURTENAY, 2015, p. 54). O conceito de grandeza envolve dois sentidos que devem ser distinguidos cuidadosamente: de **grandeza concreta**, sujeita à medição experimental, e de **grandeza abstrata**, empregada nos modelos matemáticos. Ao tratar da mesma distinção, Bertrand Russell propôs reter o termo ‘grandeza’ ou ‘quantidade’ (*quantity*) para denotar as grandezas concretas e chamar de ‘magnitudes’ (*magnitudes*) as grandezas abstratas. A unificação desses aspectos foi possível devido “à construção de um sistema *coerente* de unidades que assegurou que as equações têm *exatamente a mesma expressão sob ambas as interpretações*” (DE COURTENAY, 2015, p. 64; grifo da autora).

A atuação das instituições metrológicas facilitou a comunicação entre os cientistas e a construção social da objetividade como resultado da interação entre diferentes atores da comunidade científica. Essa construção envolve o reconhecimento de que medições experimentais implicam em incerteza nos valores das grandezas que, desse modo, têm de ser associadas às magnitudes teóricas. “A esse respeito, o par magnitude-incerteza aparece como a única maneira de explicar a eficácia *prática* da matemática na física” (DE COURTENAY, 2015, p. 67-8; grifo da autora). Para o enfoque desta tese, “a eficácia prática da matemática” ganha relevo em função de sua aplicação na matematização e na quantificação dos fenômenos, bem como na estimativa dos erros/incertezas das medições. Assim, a matemática envolvida na quantificação promove o elo entre teoria e prática, serve de liga para o par magnitude-incerteza.

A convergência das tradições matemática e experimental em áreas “profissionalizadas” das ciências físicas, que se apresentam com alto grau de matematização e de exatidão experimental, levou à necessidade de padronização e institucionalização da metrologia. Tal processo conheceu um crescimento exponencial desde o século XIX e

contribuições intercambiadas entre os conceitos metrológicos e as áreas específicas das ciências. A extensão da matematização para as ciências físicas de um modo geral demandou a aplicação de diversas ferramentas matemáticas, de modo que não seria fidedigno restringir esse processo a uma pobre aritmetização ou geometrização do real. Quando projetamos esse movimento até os dias atuais, testemunhamos forte inserção de matemáticas avançadas em todos os campos da metrologia.

Retomando a reflexão de Mari que discutimos na seção 1.3, de que a medição constitui um tipo de avaliação intersubjetiva (que se propõe a fazer parte de uma rede de informações) e objetiva (que se refere especificamente a uma grandeza), a matemática desempenha papéis significativos em ambos os requisitos que caracterizam o processo de medição. São as operações matemáticas que proporcionam a obtenção dos valores da grandeza e das incertezas. Assim obtidos e qualificados pelas incertezas estimadas, os resultados de medições podem ser integrados à rede metrológica e comparados com resultados de outras medições.

O instituto nacional de metrologia dos Estados Unidos da América, NIST (*National Institute for Standards and Technology*), exibe essa ligação na forte presença de pesquisas e ensino das ferramentas matemáticas e na existência de uma divisão interna voltada para o tema, a *Mathematical and Computational Sciences Division*. Em um artigo em que discutem algumas das importantes contribuições da matemática para os programas de medição do instituto nos últimos 60 anos, pesquisadores do NIST descrevem da seguinte maneira a relação entre matemática e metrologia:

A matemática desempenha um importante papel na ciência da metrologia. Modelos matemáticos são necessários para entender como projetar sistemas de medição efetivos e para analisar os resultados que eles produzem. Técnicas matemáticas são usadas para desenvolver e analisar modelos idealizados de fenômenos físicos a serem medidos e algoritmos matemáticos são necessários para produzir soluções práticas em computadores modernos. Finalmente, técnicas matemáticas e estatísticas são necessárias para transformar os dados resultantes em informações úteis (BOISVERT *et al.*, 2001, p. 293).

Como fica claro, ferramentas matemáticas são empregadas nas diversas fases das medições. Em função do tema desta tese, queremos frisar o papel dessas ferramentas em diversas etapas da **modelagem** de procedimentos de medição, modelagens essas que são fundamentais para a estimativa da incerteza de medição. Na subseção seguinte, indicamos como a medição da grandeza da área das radiações ionizantes, dose absorvida na água (D_w) é modelada nos diferentes métodos empregados para sua realização primária.

A intensa e extensa matematização das medições implica em um **paradoxo** no que concerne à incerteza. Como sustentou Koyré⁵⁴, a matematização foi responsável pela passagem “do mundo do mais-ou-menos ao universo da precisão” (KOYRE, 1991). São justamente as técnicas que possibilitam **medições com melhor exatidão**, dentre elas as técnicas matemáticas, **que proporcionam o “aparecimento” da incerteza de medição**⁵⁵. Se uma medição é feita sem o uso de instrumentos que alcancem boa exatidão, a presença da incerteza muitas vezes sequer é aventada. Um exemplo dessa situação é quando usamos, no cotidiano, um instrumento de medição com baixa resolução: esse instrumento não será capaz de distinguir pequenas variações no valor da grandeza e por isso vai apresentar sempre o mesmo resultado (grosseiro, é claro). Obviamente, a maior fonte de incerteza numa medição desse tipo é a limitação em termos de sensibilidade ou de resolução do instrumento, mas dificilmente a questão da incerteza será colocada em medições aproximadas. No mundo do mais-ou-menos não há que se preocupar com incertezas pois a exatidão não está em questão. Quando refinamos todo o processo de medição é que a incerteza aparece com mais clareza. Adiantando questões que vamos tratar mais à frente, quanto mais nos aprofundamos na medição de uma grandeza, mais a incerteza se impõe como inevitável.

Um outro aspecto em que a matemática funciona do mesmo modo paradoxal é em relação à necessidade de **aproximação** dos valores. A matematização dos modelos de medição possibilita medições com boas exatidões, mas implica em limitações em face da necessidade do uso limitado de casas decimais em números irracionais. Embora seja uma fonte muito baixa de incerteza, ela representa uma fonte inevitável. Na subseção 3.2.3, quando discutirmos as fontes de incerteza relacionadas no GUM, vamos retornar a esse problema. A seguir, exemplificamos o emprego de relações matemáticas na medição primária de uma grandeza da área das radiações ionizantes.

2.1.3 Modelagens para medir D_w

Com o intuito de ilustrar o processo de modelagem matemática de procedimentos de medição, apresentamos, de forma **simplificada**, as equações empregadas na realização primária da principal grandeza da área das radiações ionizantes, a dose absorvida na água

⁵⁴ Mesmo considerando as ressalvas à abordagem de Koyré feitas acima, acreditamos que podemos tomar a relação entre matematização dos fenômenos da natureza e **tendência** a medições com melhores exatidões como precedente.

⁵⁵ “Aparecimento” no sentido que a incerteza passa a ser identificada e quantificada.

(D_w). Os três métodos que, até o momento, já foram empregados com esse objetivo foram apresentados na subseção 1.1.2.5, quais sejam, os métodos por calorimetria, por ionometria e por dosimetria química Fricke. Conforme antecipamos também na referida subseção, nosso foco recai sobre a medição primária de D_w com feixes de ^{60}Co . Porém, o modelo apresentado aqui pode diferir em alguns termos da prática em uso nos laboratórios primários. No que concerne ao método químico, vamos recorrer a pesquisas para emprego em outros feixes.

Na **calorimetria**, a modelagem se dá como na equação abaixo, adaptada do trabalho de Krauss e colaboradores (2012) para o emprego de um calorímetro de água:

$$D_w = \frac{\Delta T \cdot c_p}{(1 - \delta)} \cdot k_t \quad (2.1)$$

Na qual ΔT é o aumento de temperatura a ser medido, c_p é o calor específico da água, δ é o defeito térmico ou de calor da água e k_t é o produto de todos os fatores de correção introduzidos. A relativa simplicidade da equação acima oculta uma série de dificuldades que fazem com que a implantação dessa técnica requeira consideráveis investimentos em recursos físicos e humanos. A primeira dificuldade refere-se à construção do arranjo experimental que exige conhecimentos de calorimetria e de eletrônica. O aumento de temperatura, da ordem de micro kelvin, exige termistores⁵⁶ de alta sensibilidade e um sistema eletrônico para a leitura do sinal. O recipiente onde o aumento de temperatura é medido (o núcleo do calorímetro) precisa ser termicamente isolado e ter a temperatura em seu entorno controlada com alta exatidão. Além disso, a equação (2.1) vale para uma situação teórica ideal, da qual a situação real pode se desviar por diversas razões. Os desvios conhecidos podem ser (parcialmente) corrigidos por fatores calculados, em geral, pelo método de Monte Carlo.

Para a determinação de D_w por **ionometria**, nos baseamos no trabalho de Boutillon e Perroche (1993). Abaixo, mostramos uma adaptação da modelagem matemática para a realização primária de D_w , com o emprego de uma câmara de ionização (com paredes de grafite) de volume conhecido:

$$D_w = (Q/m) \cdot (W/e) \cdot \bar{s}_{c,a} \cdot [(\bar{\mu}_{en}/\rho)_w / (\bar{\mu}_{en}/\rho)_c] \cdot \psi_{w,c} \cdot (1 + \epsilon)_{w,c} \cdot k_t \quad (2.2)$$

Na qual (Q/m) é a razão entre a carga elétrica coletada (medida) e a massa de ar na cavidade da câmara de ionização (obtida pelo conhecimento do volume da câmara e da densidade do

⁵⁶ Termistores são semicondutores sensíveis à temperatura.

ar), (W/e) é a energia despendida na formação de um par de íons no ar, $s_{c,a}$ é a razão dos poderes de frenamento nos meios grafite (carbono) e ar, o termo entre colchetes é a razão dos coeficientes mássicos de absorção de energia da água e do grafite, $\psi_{w,c}$ é a razão da fluência de energia dos fótons na água e no grafite, $(I+\varepsilon)_{w,c}$ é a razão da dose absorvida para o kerma⁵⁷ e k_t é o produto de todas as correções introduzidas.

Aqui, a situação se inverte em relação à calorimetria: temos uma equação mais complexa, mas que exige um arranjo experimental mais simples. É preciso medir com alta exatidão a carga coletada e as condições ambientais do ar dentro da câmara para obter sua massa, uma vez que o volume da câmara é previamente conhecido. Com exceção de k_t , os demais termos da equação são constantes para uma mesma energia e um mesmo meio e são tabelados. Do mesmo modo que na calorimetria, k_t corrige o modelo para as condições reais do experimento que se afastam das condições teóricas. O fator limitante dessa técnica é o emprego de várias constantes que introduzem incertezas no processo.

Embora a dosimetria Fricke não esteja sendo correntemente empregada para a medição primária de D_w para feixes de ^{60}Co , podemos trabalhar com a modelagem já empregada de modo secundário para esses feixes (KLASSEN *et al.*, 1999). Trata-se, basicamente, da mesma modelagem que vem sendo proposta para medições em outros feixes, como por exemplo para fontes de ^{192}Ir de alta taxa de dose (HDR), usadas em braquiterapia (adaptada de EL GAMAL *et al.*, 2015; SALATA *et al.*, 2018):

$$D_w = \frac{\Delta OD}{\varepsilon \cdot G(\text{Fe}^{+3}) \cdot \rho \cdot l} \cdot k_{pos} \cdot k_t \quad (2.3)$$

Na qual ΔOD (ou ΔA) é a variação da densidade óptica (ou da absorbância) medida em um espectrofotômetro, ε é o coeficiente de absorção molar do Fe^{+3} para luz de 304 nm, previamente determinado, $G(\text{Fe}^{+3})$ é o rendimento químico da produção de íons Fe^{+3} para a energia do feixe empregado, ρ é a massa específica da solução, l é o comprimento que a luz

⁵⁷ A grandeza kerma (K) é a energia **transferida** ao meio, no volume de interesse, por unidade de massa. K é numericamente igual à dose absorvida (D) para baixas energias (abaixo de 1,0 MeV) e é expresso na mesma unidade (o gray, Gy), mas é empregado apenas para feixes de partículas não carregadas (fótons e nêutrons). Seu nome é um acrônimo de *kinetic energy released per unit of mass* (energia cinética liberada por unidade de massa). Enquanto D leva em conta apenas a energia depositada pela radiação no volume de interesse, K leva em conta toda a energia do feixe transferida ao meio na forma de energia cinética de elétrons e pósitrons gerados no volume de interesse. Parte das partículas carregadas formada pode dar origem a radiação que escapa do volume de interesse e não conta para D (pois não é efetivamente depositada no volume), mas conta para K, pois teve origem na transferência de energia do feixe para partículas carregadas (OKUNO; YOSHIMURA, 2010, 192).

atravessa da solução (comprimento da cubeta), k_{pos} é o fator que corrige a distância real da fonte de radiação para a distância de referência e k_t é o produto de todas as correções introduzidas. A dosimetria Fricke é razoavelmente simples e barata, não exige altos investimentos em termos de instrumentação. Seu maior desafio está na precisão de repetibilidade e de reprodutibilidade, uma vez que a oxidação de íons ferrosos em férricos pode se dar por ação de contaminantes em todas as fases do processo. Com os devidos cuidados, a técnica tem apresentado bons resultados (MANTUANO *et al.*, 2018; SALATA *et al.*, 2018).

Como comentamos no primeiro capítulo (subseção 1.1.2.5), a disseminação da grandeza D_w é comumente feita pela calibração de CIs construídas para essa finalidade. No processo de calibração pelo método da substituição⁵⁸, é fornecido para a câmara do usuário um coeficiente de calibração (N_w^{user}) [em Gy/unidade da escala de leitura]. Se essa calibração é feita com uma câmara de referência secundária (que foi calibrada frente a um padrão primário), N_w^{user} é calculado pela relação:

$$N_w^{user} = \frac{M_{ref}}{M_{user}} \cdot N_w^{ref} \quad 2.4$$

Na qual M_{ref} e M_{user} são os valores medidos na unidade da escala de leitura (em geral, em unidades de corrente ou carga elétrica), respectivamente, com as câmaras de ionização de referência e do usuário e N_w^{ref} é o coeficiente de calibração [em Gy/ unidade da escala de leitura] da câmara de ionização de referência. Diferentemente da CI empregada na realização primária da grandeza por ionometria, não é preciso ter um conhecimento com alta exatidão do volume da câmara a ser calibrada. Isso porque o coeficiente de calibração reúne todas as características da “resposta” da câmara. Para o usuário obter o valor de D_w com sua câmara, basta multiplicar o valor da indicação do seu instrumento [em unidade da escala de leitura] pelo coeficiente de calibração.

Além de serem empregadas no cálculo do valor da grandeza, essas equações são empregadas como ponto de partida para o levantamento de incertezas. No terceiro capítulo enfocamos esse emprego da relação funcional na estimativa da incerteza. Convém observar,

⁵⁸ No método da substituição, a CI do usuário é posicionada no arranjo experimental e são obtidos valores de indicações para determinar M_{user} . Em seguida, a CI do usuário é substituída pela CI de referência no arranjo e valores de indicações são obtidos para determinar M_{ref} . Os valores medidos de M_{user} e M_{ref} são determinados aplicando-se todas as correções às respectivas indicações e obtendo-se as médias.

no entanto, que as equações empregadas para calcular o valor da grandeza de saída da medição podem não exaurir todos os fatores que afetam o resultado. Por exemplo, em todos os três métodos acima descritos, a distância em que se encontra o ponto de referência de medição da fonte de radiação afeta o resultado, embora não apareça na equação. Algumas vezes, artifícios matemáticos são empregados para que certas variáveis apareçam no modelo de modo a facilitar a estimativa da incerteza.

Acreditamos que os exemplos são eloquentes quanto à importância da matematização incorporada nos modelos (relações funcionais), quanto à diversidade de fenômenos envolvidos nas metodologias e quanto à necessidade de correções das modelagens teóricas em função das características físicas do arranjo experimental. Os modelos aqui apresentados serão úteis também na discussão sobre expressão da incerteza no terceiro capítulo (subseção 3.2.2).

2.1.4 A efetividade da matemática

A presença da incerteza expressa a “distância” entre as esferas teórica (matemática) e experimental. Desde os filósofos pitagóricos, passando por Platão, depois por Galileu, até chegar à filosofia da matemática contemporânea, a questão da “adequação” entre as esferas da matemática e do mundo físico, bem como a questão da “efetividade” da matemática em sua aplicação nas teorias das ciências físicas, são temas instigantes que suscitam discussão. O processo de medição é justamente a instância em que formalizações matemáticas, embutidas nos modelos teóricos e nas escalas de medição, são empregadas para quantificar as propriedades de fenômenos, corpos ou substâncias. Constitui, então, a instância em que a adequação e/ou a efetividade da matemática se manifesta e pode ser avaliada na forma de incerteza. Nesse sentido, a incerteza de medição é uma espécie de medida da adequação entre as matemáticas e o mundo físico ou da efetividade daquelas para descrever este último.

Toda a discussão da tese, que se baseia no reconhecimento da presença inevitável da incerteza no processo de medição, já pressupõe que as referidas adequação e efetividade não são perfeitas. Compreender a relação entre a matemática e o mundo físico significa discutir a base **ontológica** da realidade. O rumo para o qual dirigimos esta tese é o da discussão **epistemológica** implicada na adoção do conceito de incerteza de medição. Por isso, indicaremos a seguir, apenas brevemente, como a questão da efetividade da matemática vem sendo tratada.

Vamos focar nossa abordagem em discussões mais recentes, uma vez que a matematização das teorias científicas no século XX conheceu um aprofundamento e um detalhamento acentuados que fornecem elementos importantes para a reflexão. O princípio da incerteza de Heisenberg e o comportamento estatístico das entidades quânticas pareciam enfraquecer a tese da adequação perfeita entre matemática e realidade. Porém, a alta exatidão alcançada por medições de grandezas no âmbito dos fenômenos quânticos, que envolvem tratamentos matemáticos sofisticados, ao invés de enfraquecer a referida tese, trouxe novas perspectivas.

Em artigo muito influente, publicado em 1960, o físico húngaro naturalizado estadunidense, Eugene Wigner (1902-1995), prêmio Nobel da física em 1963 por sua contribuição à mecânica quântica, expressou seu “espanto” com a **efetividade** da matemática nas ciências da natureza. Wigner argumentou que o emprego da matemática na física é tão efetivo, produz resultados tão precisos, que podemos qualificar essa efetividade como “**não razoável**” (*unreasonable*). Em várias passagens do artigo, o físico se referiu a essa efetividade como algo misterioso, algo que podemos constatar empiricamente, mas que está além do nosso alcance compreender (WIGNER, 1960).

Para mostrar como o êxito da aplicação de recursos matemáticos na física é de fato surpreendente, Wigner apresenta três exemplos para os quais menciona a exatidão alcançada em experimentos baseados nas teorias. O primeiro exemplo refere-se à lei da atração gravitacional de Newton, que veio a se mostrar “exata em menos de dez milésimos por cento” (WIGNER, 1960, p. 231). O segundo exemplo refere-se à aplicação da mecânica matricial de Heisenberg para o cálculo dos níveis de energia dos elétrons no átomo de hélio, que veio a concordar com os valores experimentais dentro de uma exatidão de “uma parte em dez milhões” em medições realizadas por pesquisadores do NBS, atual NIST⁵⁹ (WIGNER, 1960, p. 232). O terceiro exemplo é o da eletrodinâmica quântica, que Wigner descreve da seguinte maneira:

O último exemplo é o da eletrodinâmica quântica ou teoria do desvio de Lamb. Enquanto a teoria da gravitação de Newton ainda tinha conexões óbvias com a experiência, a experiência entra na mecânica matricial somente na forma refinada ou sublimada das prescrições de Heisenberg. A teoria quântica do desvio de Lamb, na forma com que foi concebida por Bethe e estabelecida por Schwinger, é uma teoria puramente matemática e a única contribuição direta do experimento foi mostrar a existência de um efeito mensurável. A concordância com o cálculo é melhor que uma parte em mil (WIGNER, 1960, 232).

⁵⁹ À época o laboratório nacional de metrologia dos Estados Unidos da América ainda tinha o antigo nome de *National Bureau of Standards* (NBS). O nome foi mudado para NIST somente em 1988.

A reprodução acima do texto de Wigner visa apontar como ele apresenta os três exemplos num crescendo de abstração. O aspecto “miraculoso” da efetividade da matemática para a física, segundo o cientista, advém do fato de que certas ferramentas da matemática são desenvolvidas separadamente da prática das ciências e, mais tarde, vêm a ser utilizadas com assombroso sucesso em prever resultados experimentais. Se, para o autor do artigo, a matemática é de tal modo efetiva em suas aplicações na física que chega a provocar espanto ou evocar mistérios, sugere que para ele há uma adequação quase perfeita dessa ferramenta para descrever a natureza e que esta última deve trazer em si mesma as qualidades quantitativas que os físicos vêm descobrindo.

A fortuna crítica do artigo de Wigner é imensa, indicando o quanto a questão é atraente. Na discussão sobre o artigo, a argumentação se dá, em geral, em favor de duas posições. Há autores que sustentam que a irrazoabilidade pode ser superada se aceitamos um realismo pitagórico⁶⁰ no qual a realidade está metafisicamente assentada no número, o que explicaria a efetividade matemática para representar e prever os fenômenos da natureza (HARVEY, 2016, p. 3662-3). Com argumentação semelhante, outros autores defendem que a matemática é indispensável para a explicação do fenômeno físico, advogando uma “visão realista” e um “platonismo matemático”⁶¹ (BAKER, 2011, p. 266). Dos pontos de vista desses autores, não há mistério na efetividade da matemática, pois encontra explicação na própria constituição da natureza adequada para a quantificação.

Por outro lado, há autores que sustentam que a efetividade pode ser explicada em razão da construção de conceitos matemáticos a partir de necessidades das ciências, ou seja, **que os contextos históricos nos quais os conceitos matemáticos foram produzidos já apontam para suas futuras aplicações nas ciências físicas** (LÜTZEN, 2011; FERREIRÓS, 2017) e que, além disso, a efetividade da matemática nas ciências da natureza é limitada (GRATTAN-GUINNESS, 2008). Esses últimos autores chamam atenção para a tendência formalista de conceber a matemática que vigorou na primeira metade do século XX e que

⁶⁰ A escola pitagórica da Grécia antiga, cuja origem remonta ao século VI aC., é conhecida por propor a identificação entre a natureza e o número. Para essa escola, “as propriedades aritméticas das coisas [...] constituem o seu ser propriamente dito, e o ser de todas as coisas é o número” (ROQUE, 2012, p. 104).

⁶¹ O realismo matemático de Platão é diferente do pitagórico. Embora Platão tenha sido influenciado pelos pitagóricos, em sua doutrina, a matemática pertence ao mundo inteligível (das formas ou das ideias) e não ao mundo sensível. Enquanto o mundo inteligível é caracterizado pela perfeição das formas geométricas, o mundo sensível é constituído por cópias imperfeitas das formas geométricas (ROQUE, 2012, p. 147-9). No platonismo, o mundo das formas existe objetivamente independente da mente humana. Nesse sentido, é possível falar de um realismo matemático platônico que explicaria a efetividade da matemática para representar os fenômenos do mundo sensível.

teria influenciado o pensamento de Wigner. No formalismo estrito, os símbolos só possuem os conteúdos atribuídos “no cálculo pelo seu comportamento com respeito a certas regras de combinação, sendo o único requerimento a consistência do sistema” (FERREIRÓS, 2017). Essa concepção de matemática pode impedir que se reconheça que “[M]uitas das grandes abstrações introduzidas na matemática desde meados do século XIX têm fortes raízes” em “matemáticas fisicamente motivadas” desenvolvidas anteriormente (FERREIRÓS, 2017).

O filósofo da ciência estadunidense Patrick Suppes, que, conforme mencionamos na seção 1.3.2, foi um dos principais sistematizadores da Teoria Representacional das Medições (RTM) na segunda metade do século XX, sustenta que a análise de Wigner sobre a efetividade da matemática negligencia “quaisquer conceitos ou teorias psicológicos relevantes para pensar sistematicamente sobre o mundo”. Segundo Suppes, a doutrina da “forma” em Aristóteles é central para compreendermos a “percepção e o pensamento”, e fornece a ideia chave que está por trás tanto “dos primeiros desenvolvimentos da representação geométrica”, quanto no pensamento sobre a “mecânica quântica e astrofísica” (SUPPES, 2011, p. 252). Em termos modernos, a noção chave seria a do “isomorfismo”⁶² entre “percepção e os objetos ou processos do mundo”, bem como entre “uma imagem mental e uma estrutura ‘abstrata’” (SUPPES, 2011, p. 252-3). E Suppes faz questão de frisar a importância dessa noção para as realizações da matemática e da física contemporâneas: “[T]ais isomorfismos são, de fato, tão importantes, ou talvez até mais importantes, para a matemática pura moderna como são para a física teórica” (SUPPES, 2011, p. 252-3). Ou seja, Suppes remete a questão da efetividade para as bases psicológicas e lógicas da relação que estabelecemos entre matemática e mundo físico, sendo essas, conforme a RTM, também as bases da medição. Enquanto as bases lógicas das medições podem ser apreendidas pela noção de isomorfismo, as bases psicológicas e neurais dos processos cognitivos apenas começaram a ser exploradas.

O físico teórico britânico Paul Dirac (1902-84), que também deu contribuições importantes para a mecânica quântica, expressou pontos de vista semelhantes aos de Wigner a respeito da relação entre matemática e a descrição física da natureza⁶³. Segundo Dirac, em artigo publicado em 1939, proveniente de palestra ministrada no mesmo ano, o razoável sucesso obtido por físicos que empregam o “método do raciocínio matemático” para inferir resultados de experimentos que não haviam sido realizados deve ser atribuído a “alguma

⁶² Segundo Félix Pinheiro, o isomorfismo é um caso especial de homomorfismo em que há correspondência biunívoca entre as classes enfocadas (PINHEIRO, 2021, p. 83, nota 91).

⁶³ As relações entre os dois foram além de concepções semelhantes do papel exercido pela matemática na física. Dirac se casou em 1937 com Margit Wigner, irmã de Eugene.

qualidade matemática na Natureza” (DIRAC, 1939, p. 122; grifo do autor). Ou seja, Dirac propõe um papel ontológico para a matemática, semelhante àquele atribuído pelos pitagóricos. Para Dirac, dizer apenas que a matemática é uma “ferramenta útil” na descrição dos fenômenos é muito trivial: “[A] conexão entre a matemática e a descrição do universo é **bem mais profunda** do que isso e pode-se apreciá-la apenas pelo exame de vários fatos que a compõem” (DIRAC, 1939, 122; grifo nosso). No mesmo artigo, o físico inglês apresenta algumas dessas conexões, procurando mostrar o emprego de técnicas da matemática cada vez mais sofisticadas. Nesse sentido, traça uma instigante metáfora:

A matemática pura e a física estão se tornando ainda mais proximamente conectadas, apesar de seus métodos permanecerem diferentes. Pode-se descrever a situação dizendo que o matemático joga um jogo no qual ele próprio inventa as regras, enquanto o físico joga um jogo no qual as regras são fornecidas pela Natureza, mas, conforme o tempo passa, torna-se cada vez mais evidente que as regras que o matemático acha interessantes são as mesmas que a Natureza escolheu (DIRAC, 1939, p. 124).

Ao longo do artigo, Dirac enfatiza o critério da “beleza matemática” como o mais adequado para o método do raciocínio matemático e aborda as surpreendentes aplicações da matemática na física, mas também suas limitações. Especula, mesmo, sobre a possibilidade de previsibilidade completa da evolução temporal dos fenômenos, semelhante à do “demônio” de Laplace, que vamos discutir na próxima seção. E chega a imaginar um futuro no qual as ideias pitagóricas de um universo descrito por números possa se tornar realidade: “[H]á ainda a possibilidade de que o antigo sonho de filósofos de conectar toda a Natureza com as propriedades dos números inteiros será algum dia realizada” (DIRAC, 1939, p. 129). Os argumentos de Dirac podem ser discutidos na mesma chave conceitual que os de Wigner, conforme apontamos acima, com os mesmos alinhamentos conceituais e as mesmas respostas críticas. Sem dúvida, a abordagem de Dirac traz a marca do físico teórico e pode ser questionada, sem prejuízo do valor de seus argumentos, do ponto de vista experimental.

Para aprofundarmos a discussão sobre os artigos de Wigner e de Dirac teríamos que enfrentar questões metafísicas e da filosofia da matemática que estão fora do projeto de escopo da tese. Frisemos apenas que, por mais efetiva que seja a aplicação da matemática, **sempre há incerteza envolvida em determinações quantitativas experimentais**. Por menores que sejam as incertezas (como Wigner aponta no caso da mecânica quântica, de uma parte em dez milhões), elas exercem um papel fundamental que vamos discutir ao longo da tese. Para usar uma linguagem popular, Wigner e Dirac apontaram que o copo está quase cheio, cabe-nos ressaltar que o vazio que resta do copo é tão importante quanto a parte

preenchida. Sem dúvida, a direção que assumimos nesse trabalho se afina muito mais com interpretações que levam em conta o contexto histórico, que atribui a (limitada) efetividade da matemática ao modo como seus conceitos foram desenvolvidos. Tendo em vista o envolvimento das probabilidades, seja no processo de atribuição de valores às grandezas, seja na estimativa da incerteza desse processo, vamos focar nas próximas seções a emergência da teoria das probabilidades e a ferramentas estatísticas empregadas para estimar as incertezas experimentais.

2.2 Probabilidade e estatística

As metodologias para estimar a incerteza baseiam-se em conceitos e formulações matemáticas da teoria das probabilidades. Desde os primeiros empregos da “curva dos erros” para calcular os “erros de medição”, no século XVIII, a teoria já surgia como a principal estratégia para enfrentar o problema da variabilidade dos resultados de medições. Muitas vezes, a própria teoria das probabilidades é definida como uma forma de realizar inferências em situações de incerteza, ou seja, probabilidade e incerteza seriam, de antemão, conceitos interrelacionados. O estatístico inglês Dennis Lindley, por exemplo, afirma que as “questões estatísticas dizem respeito à incerteza” e que essa “só pode ser medida pela probabilidade” (LINDLEY, 2000, p. 293). Muitas publicações sobre probabilidade e estatística exibem já no título ou no subtítulo a estreita ligação com a incerteza⁶⁴. Mas temos que distinguir aqui entre os empregos dessas disciplinas em **situações de incerteza** e seus empregos para estimar a **incerteza de medição**: algumas vezes a referência à incerteza não está relacionada à medição de grandezas. Por outro lado, a estreita relação entre probabilidade e incerteza constitui uma das marcas do processo de medição.

Probabilidade e estatística são termos algumas vezes usados indiscriminadamente como se fossem sinônimos. Entretanto, a **estatística** está claramente relacionada à análise de **dados** obtidos empiricamente, enquanto a probabilidade está relacionada ao cálculo das chances de um evento ocorrer. Pode-se dizer que a estatística “é a ciência que trata da coleta, organização, análise e interpretação dos dados para a tomada de decisões” (LARSON; FABER, 2015, p. 3). Ou, ainda, que a estatística “investiga e desenvolve métodos específicos para avaliar hipóteses à luz de fatos empíricos” ou, simplesmente, que é “a disciplina

⁶⁴ Por exemplo, os seguintes volumes: *Understanding Uncertainty* (LINDLEY, 2006); *Probability & Statistics – The Science of Uncertainty* (TABAK, 2004); *The History of Statistics – The measurement of uncertainty before 1900* (STIGLER, 1986).

matemática e conceitual que enfoca a relação entre dados e hipóteses” (ROMEIJN, 2017, p. 3). De modo sucinto podemos dizer que a estatística desenvolve técnicas para **análise de dados** e, baseada nessa análise, oferece um tipo especial de inferência: a **inferência estatística**. O historiador da estatística estadunidense Stephen Stigler apresenta uma definição que relaciona diretamente essa disciplina com a incerteza: “[A] estatística moderna fornece a tecnologia quantitativa para a ciência empírica; ela é a lógica e a metodologia para a **medição da incerteza** e para um exame das consequências da incerteza no planejamento e na interpretação da experimentação e da observação” (STIGLER, 1986, p. 1; grifo nosso). No caso do livro de Stigler, sua abordagem, de fato, privilegia a estimativa de incerteza em medições, embora não se restrinja a essa.

Para realizar a análise dos dados disponíveis e propor hipóteses que os relacionem ao conjunto dos dados possíveis, em geral a estatística lança mão de conceitos e formulações matemáticas da **teoria da probabilidade**. É possível fazer análises estatísticas sem empregar essa teoria, mas tais análises são menos comuns e informativas. Dizer o que é a probabilidade em si é um pouco mais complexo: sua definição e seu significado são um tanto elusivos. Boa parte da dificuldade reside no fato de que há várias interpretações da probabilidade. **Matematicamente**, a probabilidade de um evento E ocorrer [escreve-se $p(E)$] é a razão entre o número de casos em que o evento E ocorre [$n(E)$] e o número de todos os casos possíveis [n], ou seja, $p(E) = n(E)/n$. Talvez essa expressão matemática simples seja a melhor forma de definir o que é a probabilidade. Define-se a **teoria da probabilidade** como “o ramo da matemática que estuda as **chances de ocorrência de eventos aleatórios** para prever o comportamento de sistemas definidos” (THE AMERICAN HERITAGE⁶⁵; grifo nosso). Com o intuito de distinguir os termos, falamos de **teoria** da probabilidade (que investiga as chances de ocorrência de eventos) e de **ferramentas** ou **métodos** estatísticos (que em geral empregam a teoria da probabilidade para a análise de dados). A escolha do método estatístico depende dos dados disponíveis e do objetivo da análise. Embora os termos probabilidade e estatística guardem essa distinção, dada a mútua implicação entre eles, é comum que ambos sejam usados para falar do ramo da matemática que estuda as chances de ocorrência de eventos.

Grosso modo, interpreta-se a probabilidade como (i) uma afirmação de que o evento ocorre numa determinada **frequência** ou tem a **propensão** de ocorrer (referindo-se, assim, ao **fenômeno físico** da ocorrência do evento) ou como (ii) uma afirmação de que acreditamos ou esperamos que o evento ocorra com aquela frequência (referindo-se ao nosso **grau de crença**

⁶⁵ *The American Heritage Dictionary of the English Language*, web site: <https://www.ahdictionary.com/> (acessado em março de 2021).

ou de **confiança** ou, ainda, referindo-se ao nosso **conhecimento**) (ROMEIJN, 2017, p. 7)⁶⁶. Mas também pode-se distinguir as interpretações da probabilidade relacionando-as às perspectivas objetiva e subjetiva, sendo que, muitas vezes, associa-se a interpretação física com a **objetiva**, de um lado, e a interpretação epistêmica com a **subjetiva**, de outro. Na verdade, o quadro das interpretações da probabilidade é bem mais complexo. Por exemplo, pode-se distinguir pelo menos as interpretações clássica, lógica, subjetivista, frequentista e das propensões (HOME; WHITACKER, 1992, p. 233-41; HÁJEK, 2019, p. 11). Entretanto, para o objetivo da abordagem desta tese, vamos trabalhar apenas com a distinção entre as duas interpretações básicas inicialmente referidas entre probabilidade física (ou de frequências) e epistêmica.

O desenvolvimento da teoria da probabilidade e da estatística tem sido profundamente marcado por diferentes formas de conceber seus significados e de tratar as formulações matemáticas. Grosso modo, duas escolas, movidas por **forte rivalidade**, coexistem e produzem conteúdos consistentes: a abordagem clássica ou frequentista⁶⁷ e a abordagem bayesiana. Embora a primeira seja comumente associada à interpretação física e objetiva da probabilidade e a segunda à interpretação epistêmica e subjetiva, essas associações não são sempre corretas. Há, por exemplo, interpretações tanto subjetivas como objetivas da abordagem bayesiana.

É interessante ressaltar, entretanto, que a divisão entre as dimensões **objetiva** e **subjetiva** marcam a história dos estudos sobre as probabilidades de modo duradouro. A natureza “essencialmente dual” da probabilidade pode ser observada pelas dificuldades encontradas por filósofos para desenvolver interpretações totalmente objetiva ou totalmente subjetiva. Uma dimensão “não pode ser reduzida à outra” e “uma análise coerente de qualquer tipo de probabilidade envolve considerações subjetivas e objetivas” (SUÁREZ, 2020, p. 33). Vamos, a seguir, compor um painel histórico com os principais desenvolvimentos da teoria das probabilidades e dos métodos estatísticos que contribuíram para as metodologias que hoje dispomos para a estimativa de incertezas de medição.

2.2.1 Painel histórico

⁶⁶ No verbete, que emprega os conceitos da teoria da probabilidade axiomatizada, as interpretações se referem às funções de probabilidade (ROMEIJN, 2017).

⁶⁷ Algumas vezes também se fala em estatística convencional (LIRA; WÖGER, 2006).

Tendo em vista o papel que a teoria da probabilidade e a estatística desempenham na metrologia e, especialmente, na estimativa de erros e incertezas de medição, acreditamos ser conveniente tratar aqui do processo histórico que proporcionou a emergência dessas disciplinas. Entretanto, devido aos muitos personagens, conceitos e abordagens envolvidos nessa história, nos limitamos a traçar um **painel histórico**, dando destaque apenas às realizações mais importantes para o desenvolvimento conceitual e matemático e aos aspectos diretamente relacionados ao tema da tese. Por isso, a literatura na qual nos baseamos nesta subseção é, quase que exclusivamente, **secundária**, de autores que investigaram e interpretaram a história ocidental da probabilidade e da estatística. Dentre esses autores, alguns fornecem um quadro histórico menos detalhado muito útil para nosso enfoque, como John Tabak (2004), outros são mais técnicos do ponto de vista matemático, como Stephen Stigler (1986), e outros, ainda, com enfoque histórico aliado à interpretação filosófica como as obras de Hacking (2006 [1975]; 1990) e o volume *The Empire of Chance* (GIGERENZER *et al.*, 1989).

Figura 12 – Imagens de jogos na antiguidade



Legenda: A: Jogo de tabuleiro, denominado jogo dos 20 quadrados, da cidade de Ur, Mesopotâmia, ca. 2500 aC. B: *Astragali* em diferentes posições. C: *Knucklebone player* (Jogadora de *astragalus*), escultura romana, sec. I dC.

Fontes: A: *British Museum*; B: Site da internet sobre probabilidade e análise de dados⁶⁸; C: *British Museum*.

A teoria das probabilidades é uma tentativa de matematizar eventos que ocorrem de forma aleatória. Jogos que envolvem sorteios constituem a mais antiga relação do homem com a aleatoriedade. Jogos de tabuleiro foram comuns já nas culturas antigas da

⁶⁸ <https://gillenwatersblog.wordpress.com/2017/11/13/throwin-bones-astragali-ancient-games-and-probability/> (acessado em março de 2021).

Mesopotâmia. O “jogo dos vinte quadrados”, de ca. 2500 aC, encontrado na cidade de Ur, pertencente ao acervo do *British Museum*, é um exemplo dessa ocorrência (figura 12 A). Para tirar a sorte nesse e em outros jogos foi usado durante muitos séculos na antiguidade o *astragalus*, osso da pata de mamíferos que podia cair em quatro posições diferentes (figura 12 B e C). Os *astragali* constituem o mais antigo randomizador (dispositivo para tirar a sorte) conhecido, mas ainda na antiguidade foram também construídos dados. Além do emprego em jogos, *astragali*, dados, sorteios e outros agentes randomizadores também eram usados para a tomada de decisão e muitas vezes associados à prática religiosa ou à vontade divina.

Embora desde a antiguidade as conjecturas e evidências prováveis tenham sido, ao menos de modo marginal, problematizadas (FRANKLIN, 2015), foram os jogos de azar, instância em que a aleatoriedade é vivenciada de modo mais explícito, que serviram de apelo ao estudo sistemático e matemático das probabilidades na modernidade. Diferentemente da álgebra e da geometria que se desenvolveram cumulativamente desde a antiguidade, a teoria das probabilidades só foi enfocada a partir de meados do século XVII. Após a publicação dos primeiros trabalhos sobre o assunto, a teoria desenvolveu-se rapidamente em algumas décadas. Como as ferramentas matemáticas necessárias para criar a teoria eram bem conhecidas e não eram muito sofisticadas, muitos estudiosos da história da probabilidade buscam explicar por que a teoria só foi desenvolvida na modernidade. Uma das hipóteses levantadas é que os randomizadores antigos como os *astragali* e os primeiros dados eram imperfeitos, irregulares, impedindo que se observassem sequências aleatórias. Outra hipótese é que o uso desses randomizadores estava estreitamente vinculado a práticas mágicas e religiosas de consulta aos deuses, sendo os resultados dos sorteios uma expressão da vontade divina (DAVID, 1955, p. 6-7). Como veremos mais adiante, o filósofo da ciência Ian Hacking forneceu uma hipótese mais sofisticada e sutil para o desenvolvimento tardio da teoria, bem como para o aparecimento quase simultâneo de vários tratamentos do tema a partir de meados do século XVII.

2.2.1.1 Os primeiros cálculos

O ressurgimento do ceticismo filosófico no ambiente intelectual europeu do início da modernidade, no qual “todas as fontes de certeza, religiosa e filosófica, estiveram simultaneamente sob ataque” (GIGERENZER *et al.*, 1989, p. 5), certamente contribuiu para que os filósofos naturais e os matemáticos pudessem trabalhar em uma teoria que não lidava com certezas, mas apenas com o **provável**. Em especial, o ceticismo mitigado ou construtivo

de Pierre Gassendi (1592-1655) e Marin Mersenne (1588-1648) foi responsável por criticar o ideal aristotélico de certezas obtidas somente por demonstração e preparar o terreno para um conhecimento baseado em “signos prováveis” (POPKIN, 2000, p. 211-41; HACKING, 2006, p. 46-7). O **ceticismo construtivo** teria, assim, contribuído para modificar o sentido original da palavra probabilidade, relacionada a uma opinião cuja verdade era garantida pela autoridade, para um sentido que se refere ao grau de certeza proporcionado pelas evidências:

Os proponentes da razoabilidade não falavam de certeza, mas de certezas, variando do mais alto grau de certeza ‘matemática’ obtida pela demonstração, passando pela certeza ‘física’ da evidência sensorial, até a certeza ‘moral’ baseada no testemunho e na conjectura. [...] No contexto dessas discussões, o próprio significado da palavra “probabilidade” mudou de seu sentido medieval de qualquer opinião garantida por autoridade para um grau de assentimento proporcionado pela evidência em mão [...]. Essas probabilidades eram concebidas qualitativamente e deviam muito à linguagem e à prática da evidência legal [...]. Entretanto, matemáticos como Gottfried Wilhelm Leibniz e Jakob Bernoulli tomaram [*seized upon*] a nova “análise de riscos” (*analysis of hazards*) como um meio de quantificar esses graus de certeza e, fazendo isso, converteram os três pontos ordenados em um contínuo, variando da descrença total ou dúvida até a maior certeza (GIGERENZER *et al.*, p. 7).

No ambiente intelectual que possibilitava pensar em termos de graus de certeza, e não mais almejar somente certezas absolutas, vários tratamentos matemáticos para quantificar a probabilidade foram publicados a partir da segunda metade do século XVII, sendo que, a princípio, buscaram resolver problemas relacionados aos jogos de azar. O matemático italiano Girolamo Cardano (1501-76) foi o primeiro a escrever sobre as probabilidades em lançamento de dados no texto *De Ludo Aleae* (Sobre os jogos de azar), escrito em cerca de 1550, mas publicado apenas em 1663. Cardano aplicou raciocínios matemáticos a fenômenos aleatórios, o que foi praticamente uma novidade. Em seu trabalho já aparece a ideia de um dado “justo”, essencial para o raciocínio probabilístico, mas, por outro lado, ele sustentou que a sorte pessoal teria influência nos resultados obtidos por um jogador (TABAK, 2004, p. 15-21). Galileu Galilei (1565-1642) também refletiu sobre chances em lançamentos de dados. Em um breve artigo (“*Sopra le Scoperte de i Dadi*”), ele atacou o problema, também abordado por Cardano, sobre as chances de resultados de sucessivos lançamentos de três dados. Por que, apesar de haver o mesmo número de “partições” para o resultado dos três dados somarem 9 ou 10, na prática, a probabilidade da soma resultar em 9 é maior do que a de resultar em 10? (DAVID, 1955, p. 12). Porém, enquanto a soma dos três dados pode totalizar 9 em 25 combinações, a soma de 10 aparece em 27 combinações. Isso significa que o resultado 9 possui probabilidade de 25/216, enquanto o resultado 10 possui probabilidade de 27/216. Essa

pequena diferença foi corretamente apontada por Galileu, entretanto ele próprio não atribuiu muita importância aos seus cálculos probabilísticos (TABAK, 2004, p. 14).

O primeiro estudo influente sobre probabilidades apareceu na correspondência entre os franceses Pierre Fermat (1601-65) e Blaise Pascal (1623-62), ocorrida em 1654. O problema por eles enfrentado foi o da divisão das apostas realizadas entre dois jogadores quando é necessário interromper o jogo com um dos jogadores em vantagem⁶⁹. “Em suas cartas, Pascal e Fermat resolveram múltiplas versões desse tipo de problema em jogos de azar” (TABAK, 2004, p. 17). Eles descobriram que podiam “prever propriedades de padrões aleatórios que emergiriam se o dado fosse lançado muitas vezes” (TABAK, 2004, p. 19). Tornada pública, a correspondência causou forte impressão entre os matemáticos. Como consequência do seu impacto, o matemático holandês Christian Huygens (1629-95) publicou em 1657 o tratado *De Ratiotiniis in Ludo Alea* (Sobre o raciocínio em jogos de azar), no qual apresenta uma maneira sistemática de resolver os problemas discutidos pelos matemáticos franceses e resolveu por conta própria problemas de outras situações semelhantes em jogos (DAVID, 1955, p. 13). “O livro de Huygens sobre jogos de azar é o primeiro livro-texto de probabilidade impresso” (HACKING, 2006, p. 61).

Jakob (ou Jacques, ou James) Bernoulli, matemático suíço de uma família que gerou vários matemáticos de primeira grandeza, forneceu a mais decisiva inovação conceitual da história inicial da probabilidade. *Ars Conjectandi* (A arte de conjecturar) foi escrito nos anos 1690, mas só foi publicado postumamente por seu sobrinho Nicolas, em 1713 (HACKING, 2006, p. 143). Na obra, Bernoulli prova o que é conhecido como a “**lei fraca dos grandes números**”. Essa pode ser enunciada da seguinte forma: em ensaios (ou testes – resultados empíricos de certo sistema aleatório) independentes, a razão (s_n) entre o número de ensaios em que determinado sucesso (s) ocorre e o número total de ensaios (n) se aproxima da probabilidade de sucesso (p) conforme aumenta o número de ensaios (TABAK, 2004, p. 34; HACKING, 2006, p. 154).

Além disso, Bernoulli mostrou como calcular n para obter um valor de erro ($\varepsilon = |p - s_n|$) com determinada probabilidade. Por exemplo, se p é $3/5$, então é possível obter um erro menor que $1/50$ com um número de testes (n) superior a 25550 (HACKING, 2006, p. 154). Com esse desenvolvimento matemático, Bernoulli pode ser identificado como o primeiro a

⁶⁹ Vale destacar a obra da matemática e estatística inglesa Florence Nightingale David (1909-93) que, além acompanhar detalhadamente a história da gênese destas disciplinas, traz, na forma de apêndices, documentos históricos interessantes, como a mencionada correspondência entre Fermat e Pascal e o artigo acima mencionado de Galileu (DAVID, 1962).

“**quantificar a incerteza**” e, além disso, o primeiro a fornecer um intervalo de confiança para a estimativa da probabilidade (STIGLER, 1986, p. 66; 69). Porém, o cálculo de Bernoulli resultou em um número de testes altíssimo, que parece ter desestimulado o matemático suíço de publicar sua obra. A teoria das probabilidades viria a fornecer resultados bem melhores com base em suposições e aproximações propostas por matemáticos que levaram adiante as ideias de Bernoulli.

Um outro problema que Jakob Bernoulli identificou, mas não conseguiu resolver, refere-se ao que veio a ser chamado de problema da **probabilidade inversa**. Em muitas situações, não sabemos a probabilidade de sucesso de um evento, mas podemos realizar ensaios para obter a razão s_n . Então, é de grande utilidade determinar a probabilidade p para o valor de s_n obtido (TABAK, 2004, p. 37). Esse problema, como veremos à frente, veio a ser equacionado por Bayes e Laplace, sobre os quais comentamos mais adiante. Nos próximos dois parágrafos, vamos discutir as condições conceituais que proporcionaram a emergência da teoria das probabilidades.

Em *The Emergence of Probability* ([1975] 2006), Hacking abordou o surgimento do conceito de probabilidade no século XVII empregando uma análise baseada no método “arqueológico” proposto por Michel Foucault (1926-84) em *As palavras e as coisas* [1966] (1999). Na arqueologia foucaultina, busca-se as condições históricas de possibilidade para a emergência de saberes. Hacking investigou as condições para a gestação e o aparecimento do conceito moderno de probabilidade. Para ele, a característica histórica mais impressionante desse surgimento é que ocorre num curto período. Entre a correspondência de Fermat e Pascal (1564) e a escrita de *Ars Conjecturandi* por Bernoulli, na década final do século XVII, ou seja, em menos de cinco décadas, não só o conceito de probabilidade havia sido bem estabelecido, como as bases matemáticas da teoria haviam sido lançadas.

Segundo Hacking, algo estava ausente no ambiente filosófico da Europa até meados do século XVII para que o conceito pudesse tomar seu sentido moderno. Até então, probabilidade “significava principalmente a aprovabilidade⁷⁰ de uma opinião” (HACKING, 2006, p. 23), uma opinião provável, que merece aprovação, vinculada, portanto, à opinião de um sujeito digno de confiança. Faltava ao conceito um **sentido objetivo**, que teria sido associado ao termo através da ideia de “evidência interna” oriunda das “ciências baixas” (alquimia, geologia, astrologia e, principalmente, medicina) (HACKING, 2006, p. 35-9). “Um novo tipo de testemunho foi aceito: o testemunho da natureza que, como qualquer autoridade,

⁷⁰ Optamos aqui pelo neologismo “aprovabilidade” na tradução de “*approvability*” no original em inglês.

tinha que ser lido. [...] O signo-como-evidência indica com probabilidade [...]” (HACKING, 2006, p. 44). Esse novo sentido objetivo da probabilidade teria sido difundido por Gassendi e seu ceticismo mitigado, conforme mencionamos acima.

O conceito moderno de probabilidade, ainda segundo Hacking, assemelha-se a *Janus*, deus de duas faces da mitologia romana: uma face **subjéitiva**, como **graus de crença**, e outra **objetiva**, como **frequência de eventos**. Quando o conceito emerge na obra dos autores do século XVII, já traz consigo a dupla face que persiste até hoje. De fato, mesmo análises mais recentes, reconhecem a dualidade do conceito de probabilidade que, desde sua origem na modernidade, “incorpora as dimensões objetiva e subjéitiva” (p. ex. SUÁREZ, 2020, p. 33). Daí a dificuldade dos filósofos em propor concepções da probabilidade que não incorporem ambas as dimensões.

A sofisticada interpretação da emergência da probabilidade de Hacking foi objeto de críticas que apontaram o surgimento de ideias sobre probabilidade bem antes do século XVII (p. ex.: GARBER; ZAMBELL, 1979). Porém, na introdução da edição de 2006, o filósofo canadense sustenta que os importantes textos mencionados por Garber e Zambell constituem “um corpo de práticas que não implicaram em nossa moderna rede de ideias de probabilidade” (HACKING, 2006, “Introduction”). Para os propósitos da tese, o livro de Hacking nos leva a destacar dois pontos que devem ser considerados. Primeiramente, fica claro que a história da matemática, em especial da probabilidade e da estatística, desenvolve-se por rupturas e continuidades. Como Hacking pondera no prefácio da edição de 2006, é preciso enfatizar que juntamente com transições abruptas de pensamento sempre há continuidades.

Em segundo lugar, análises históricas de conceitos científicos são problemáticas no sentido em que as questões geográficas e particulares desempenham papéis que tornam o quadro complexo, sempre passível de problematização. No caso da probabilidade, cujo significado permite diferentes interpretações, o caráter problemático tende a se acentuar. De todo modo, para os nossos propósitos, o trabalho de Hacking enfatiza a emergência das probabilidades no mesmo momento (século XVII) em que as ciências “clássicas” estão em processo de intensa matematização. Nos séculos seguintes, as técnicas oriundas da teoria das probabilidades foram usadas nas medições que visavam checar experimentalmente os resultados teórico-matemáticos. Em especial as ciências baconianas, também elas oriundas das baixas ciências mencionadas por Hacking, passaram, no século XIX, por ampla matematização e medição e desempenharam papéis fundamentais no desenvolvimento da metrologia.

2.2.1.2 Teorema central do limite e teoria dos erros

Um passo importante para a teoria da probabilidade foi dado pelo matemático francês, que ainda jovem emigrou para a Inglaterra, Abraham de Moivre (1667-1754), em sua obra *The doctrine of chances*, publicada originalmente em 1718 (mas significativamente aumentada nas edições subsequentes de 1738 e de 1756). A partir de problemas relacionados a jogos, o autor mostra que, conforme o número de testes independentes aleatórios aumenta, a distribuição da frequência dos resultados se aproxima da **curva com formato de sino**, hoje conhecida como “curva normal” ou “gaussiana” (STIGLER, 1986, p. 71; 76). A aproximação obtida por de Moivre para a distribuição de frequências de resultados é largamente aplicada em estatística de uma forma geral e na estimativa de incerteza de medição em particular.

O sucesso das obras dos pioneiros na teoria das probabilidades fez com que “muitos dos mais importantes matemáticos europeus reconhecessem a probabilidade como uma disciplina matemática vital que oferecia *insights* em uma variedade de problemas teóricos e práticos” (TABAK, 2004, p. 44). O foco em jogos de azar, entretanto, emprestava à teoria uma aura pouco nobre, era preciso passar o foco para áreas mais respeitadas. Muitos dos grandes matemáticos franceses dos séculos XVIII e XIX colaboraram tanto para o desenvolvimento da teoria, quanto para empregá-la nas ciências.

O personagem emblemático desse movimento foi Pierre-Simon Laplace (1749-1827). Sua obra *Théorie Analytique des Probabilités* (1812) foi o texto mais influente sobre o assunto durante a época clássica e seu *Ensaio filosófico sobre as probabilidades* ([1814] 2010) foi uma tentativa de divulgar os “princípios” centrais da teoria para leitores não iniciados na matemática. Os dois principais êxitos de Laplace na teoria dos erros, valendo-se é claro dos desenvolvimentos anteriores de outros matemáticos e físicos como Thomas Simpson, Thomas Bayes, Lagrange, Euler e Gauss, foi a generalização do “teorema central do limite”, demonstrado por de Moivre, e o “método dos mínimos quadrados” (STIGLER, 1986, p. 136; 157).

O **teorema central do limite** (central aqui significa fundamental) afirma que a distribuição de frequências de eventos aleatórios (podemos pensar em valores obtidos em repetidas medições de um mensurando) pode ser aproximada à **curva normal** ou **gaussiana** (TABAK, 2004, p. 69). Essa é uma aproximação muito útil em função das propriedades da

gaussiana para estimar o “nível de confiança” associado ao número de “desvios-padrão”⁷¹. Talvez pelo nome que a curva recebeu (“normal”), ou talvez pela facilidade que as propriedades matemáticas bem conhecidas dessa curva proporciona, é comum tratar os dados relativos aos fenômenos como se devessem ser a priori distribuídos segundo a gaussiana.

Entretanto, em muitos casos, os dados não seguem a distribuição normal e tratá-los como se fossem “normalmente” distribuídos pode resultar em graves equívocos. No livro de divulgação científica *As leis do acaso*, o matemático inglês Robert Motthews alerta para os perigos de se empregar a curva normal de forma inapropriada. Os títulos de dois capítulos do livro, por si só, são eloquentes nesse sentido: “A assombrosa curva para tudo” e “Os perigos de pensar que tudo é normal” (MOTTHEWS, 2017, p. 208-28). Retornamos, mais à frente, ao problema da suposição de que os dados são normalmente distribuídos (subseção 2.3.2).

O **método dos mínimos quadrados** permite que conjuntos diferentes de observações possam ser combinados numa curva que minimiza os erros (sua soma quadrática) de cada conjunto e representa os dados obtidos de forma mais fidedigna (STIGLER, 1986, p. 55-61). Para os contemporâneos de Laplace, o principal emprego do método era para combinar as observações de um astro em várias posições de sua trajetória aparente no céu. Atualmente, o método é largamente empregado em muitos problemas científicos, por exemplo, é empregado para “ajustar” os resultados de diferentes medições de constantes fundamentais da natureza realizadas por diferentes laboratórios⁷².

O trabalho de Laplace que teve maior impacto na estimativa da incerteza de medição foi o desenvolvimento da “teoria dos erros”, que se deu baseado em seus trabalhos anteriores, mas também nas publicações de grandes matemáticos da época como Carl Friedrich Gauss (1777-1855) e Adrien-Marie Legendre (1752-1833). “Ela se tornou particularmente importante na astronomia, mas gradualmente se disseminou para todas as disciplinas observacionais e experimentais” (GIGERENZER *et al.*, 1989, p. 167). Para estimar o melhor resultado de uma medição e a proximidade entre o resultado experimental e o “valor verdadeiro” da grandeza é necessário “conhecer a lei da distribuição de erros”. Laplace investigou longamente sobre o tipo de curva mais adequada para a distribuição dos erros de uma observação ou medição (STIGLER, 1986, p. 120-2; 144-8). Quando as causas dos erros são equiprováveis e independentes, a distribuição dos erros segue a curva normal (gaussiana),

⁷¹ Estes conceitos serão discutidos mais adiante no texto, na subseção 2.3.2.2.

⁷² O grupo-tarefa CODATA em Constantes Fundamentais do BIPM é responsável pelo programa que calcula os melhores valores para as constantes através de ajuste realizado pelo método dos mínimos quadrados, a partir da multiplicidade de dados que recolhe dos laboratórios participantes (<https://www.bipm.org/extra/codata-tgfc/>; acessado em fevereiro de 2021).

que por isso ficou conhecida nos séculos XVIII e XIX como “**curva dos erros**”. Ainda hoje, usa-se como recurso para estimar a incerteza estatística (Tipo A) a aproximação da distribuição dos valores obtidos em medições repetidas como uma distribuição normal (INMETRO, 2012a, p. 10-16; 70-3).

Antes do surgimento dos fundamentos estatísticos da teoria dos erros, para um conjunto de medições discordantes da posição de um astro, os astrônomos “tiravam a média aritmética após descartar as observações consideradas suspeitas” (STIGLER, 1986, p. 88). Esse procedimento era realizado sem que houvesse uma teoria matemática que desse suporte ao uso da média e ao descarte de dados, ou que fornecesse uma estimativa do erro presente no valor médio. Laplace argumentou que os fenômenos da natureza estão sujeitos a grande número de causas que não se pode conhecer. Para minimizar a influência dessas causas estranhas, deve-se aumentar o número de observações: “[Q]uanto mais numerosas são as observações, menos elas se desviam entre si e mais os resultados se aproximam da verdade”. Obviamente, para se aproximar da “verdade” é necessário empregar os instrumentos corretos, os melhores métodos e realizar as observações com todo o cuidado possível. Laplace antecipou também a ideia de que era necessário estimar a probabilidade de que os erros estivessem compreendidos entre certos limites “pois sem isso se tem apenas um conhecimento imperfeito do grau de exatidão obtido” (LAPLACE, 2010, p. 105).

A teoria dos erros, refinada com o método dos mínimos quadrados, foi fundamental para manter “o cálculo de probabilidade vivo como um campo de pesquisa” nos séculos XIX e XX, provando-se capaz de ser estendida e generalizada (SCHNEIDER, 1987, p. 206). As formulações matemáticas publicadas por Laplace e outros cientistas, no início do século XIX, foram prontamente desenvolvidas como ferramentas matemáticas para serem usadas com o objetivo de determinar os resultados de medições e estimar seus erros aleatórios.

Ainda no século XIX, alguns trabalhos foram publicados com o objetivo de examinar as bases matemáticas da teoria dos erros e de viabilizar sua aplicação em medições astronômicas. Um exemplo de trabalho desse tipo é o volume *On the Algebraical and Numerical Theory of Errors of Observations and the Combination of Observations* ([1861] 1875), do matemático e astrônomo inglês George Biddell Airy (1801-92). No livro, Airy deduz algumas das grandezas que podem representar o erro de medição como o “erro da média” e o “erro provável da média”, discute a aplicação do método dos mínimos quadrados para “conjuntos de observações” e aborda o problema dos “erros constantes” (sistemáticos) (AIRY, 1875, p. 17-21; 26; 102). Entretanto, foi no século XX que a teoria recebeu contribuições que possibilitaram o seu emprego em medições nas diversas disciplinas

científicas que passaram pelo processo de quantificação. A teoria mostrou-se também, após modificações, “de importância central para a estatística que emergiu dentro do quadro da biometria inglesa” (SCHNEIDER, 1987, p. 206).

2.2.1.3 Probabilidade e o determinismo clássico

A abordagem que Laplace e outros matemáticos e filósofos naturais fizeram da teoria da probabilidade no século XVIII, baseada no “determinismo clássico universal”, interpreta seu emprego como resultante do conhecimento limitado que se tinha das leis da natureza e da totalidade das causas envolvidas nos fenômenos enfocados (GIGERENZER *et al.*, 1989, p. 11-3; TABAK, 2004, p. 64-6). A fonte da aleatoriedade, que permitia a aplicação da probabilidade, não se encontrava nos **objetos** do conhecimento (na natureza), mas no limite provisório enfrentado pelo **conhecimento**: tratava-se, portanto, de uma interpretação **epistêmica** da probabilidade. A prosperidade do programa de pesquisa da física clássica, estabelecido a partir das leis de Newton, exerceu uma forte impressão e um grande fascínio nos homens de ciência na época clássica, acentuando a visão de mundo determinista. Laplace captou com precisão o espírito da época ao descrever o conhecimento que uma inteligência sobre-humana, designada posteriormente de “demônio de Laplace”, poderia ter sobre o universo:

Devemos considerar o estado presente do Universo como o efeito de seu estado anterior e como a causa do que vai se seguir. Uma inteligência que, em um dado instante, conhecesse todas as forças que animam a natureza e a situação respectiva dos seres que a compõem, e, além disso, fosse suficientemente ampla para submeter todos esses dados à análise, compreenderia na mesma fórmula os movimentos dos maiores corpos do Universo e aqueles do mais leve átomo; nada lhe seria incerto, e o futuro bem como o passado estariam presentes a seus olhos. O espírito humano, na perfeição que soube dar à astronomia, oferece um frágil esboço dessa inteligência. [...] Todos esses esforços na busca da verdade tendem a aproximar incessantemente o espírito humano dessa inteligência que acabamos de conceber, mas da qual ele permanecerá sempre infinitamente distante (LAPLACE, 2010).

Para o espírito da época clássica, esse “ser” onisciente serve de modelo para a inteligência humana, ele representa o ideal clássico de conhecimento amplo e pormenorizado da natureza a que o homem aspira, mas que não pode atingir. Se, por um lado, a inteligência limitada do ser humano veda-lhe o conhecimento total, por outro lado o conhecimento humano pode se aproximar **indefinidamente** desse ideal. O obstáculo ao conhecimento pleno está nos limites da inteligência humana, não no objeto do conhecimento. Todos os fenômenos da natureza operam de forma determinada em decorrência de princípios causais definidos e

conhecíveis, embora muitos ainda não sejam conhecidos. Nessa concepção determinista do mundo, seria paradoxal o intenso desenvolvimento da teoria da probabilidade não fosse o quadro interpretativo em que se desenrolou: a probabilidade foi, nesse contexto, tomada como medida da incerteza do conhecimento humano. Incerteza essa que deriva de seu limitado conhecimento das leis da natureza e dos recursos tecnológicos para observar, medir e investigar os fenômenos.

Entretanto, como a própria citação descreve, a inteligência capaz de apreender todas as variáveis de um estado do sistema e todas as leis que regem tal sistema só pode ser uma inteligência **sobre-humana**. Assim, embora através da figura do “demônio”, Laplace afirme a existência de cadeias causais reais, ou seja, defenda um determinismo universal, ele não afirma que a inteligência humana é capaz de conhecer plenamente essas cadeias e de determinar o estado das variáveis envolvidas.

No quadro de otimismo geral da época clássica, frente às realizações teóricas obtidas pelo programa newtoniano e ao desenvolvimento das técnicas de observação celeste, a ênfase recaiu na superação progressiva dos limites do conhecimento e na diminuição ilimitada das incertezas. A concepção clássica pressupõe que as grandezas medidas são reais e estáveis, que possuem um “valor verdadeiro” a ser estabelecido pelas medições. O propósito da teoria dos erros era “ajudar a atribuir o valor verdadeiro da magnitude em questão, que era a única coisa que importava para a teoria física” (GIGERENZER *et al.*, 1989, p. 168). Laplace, por exemplo, argumentou no *Ensaio filosófico sobre probabilidade* que a média representa o menor erro na estimativa do valor da grandeza e que “o cálculo faz ver que, no caso de um número infinito de observações, ele [o valor médio] coincidirá com a verdade” (LAPLACE, 2010, p. 113). No terceiro capítulo, discutimos de forma mais aprofundada o problema do valor verdadeiro.

2.2.1.4 O teorema de Bayes

A importante questão da “probabilidade inversa”, apontada por Jakob Bernoulli, foi enfrentada e resolvida por Laplace de forma independente da solução dada pelo reverendo inglês Thomas Bayes (1701-61) (STIGLER, 1986, p. 100-5). O trabalho de Thomas Bayes que o tornou famoso e deu início a uma nova abordagem da probabilidade, “*An Essay towards Solving a Problem in the Doctrine of Chances*”, foi publicado apenas postumamente em 1764. Ao examinar os trabalhos matemáticos deixados por Bayes, o também reverendo e amigo Richard Price (1723-91) reconheceu o valor do ensaio, publicou-o e buscou divulgá-lo. Em

1774, Laplace publicou um artigo em que apresentava uma versão “mais elaborada do problema da inferência” (FIENBERG, 2006, p. 4), isto é, uma solução para o problema da probabilidade inversa. Apesar do esforço de Price, as ideias de Bayes só tiveram repercussão mais ampla muito tempo depois da publicação do seu trabalho (TABAK, 2007, p. 47-9).

O ensaio de Bayes é frequentemente relacionado com o chamado “teorema de Bayes”, que introduz a ideia de probabilidade condicional. Na verdade, o ensaio não contém uma descrição genérica do teorema, mas a resolução de um problema específico empregando a relação matemática que o teorema propõe (FIENBERG, 2006, p. 3). Em resumo, o teorema estabelece como calcular a probabilidade da ocorrência de um evento A na condição de que outro evento B ocorra. Em geral, trata-se o evento A como uma hipótese cuja validade deseje-se avaliar na presença de ocorrência do evento B . O teorema de Bayes estabelece que a probabilidade de ocorrência do evento A na condição de que B ocorra (ou, simplesmente, a probabilidade de A dado B) é igual à probabilidade de B dado A , multiplicada pela probabilidade de ocorrência de A , dividida pela probabilidade de ocorrência de B .

O teorema de Bayes antecipou o tratamento de problemas estatísticos que foram enfrentados durante o século XX para avaliar a probabilidade de hipóteses tendo em vista os dados obtidos em experimentos científicos. Para empregar o teorema é preciso atribuir valores de probabilidade a priori, ou seja, valores de probabilidade que não se baseiam em dados observacionais. A inferência feita a partir do teorema depende do julgamento (ou da crença) a respeito de desses valores, sendo, por isso, dita subjetiva. Essa dependência de “suposições adicionais” (TABAK, 2007. p. 49) fez com que o teorema fosse objeto de críticas de matemáticos. Dessa forma, as virtudes do teorema foram, durante muito tempo, ofuscadas pelas abordagens tradicionais.

Somente na década de 1930, com os trabalhos de Harold Jeffreys (1891-1989) e Bruno de Finetti (1906-85), a abordagem subjetiva de Bayes foi retomada e revalorizada. Depois dos estudos sobre esses trabalhos que ocorreram nas universidades estadunidenses nas décadas de 1940 e 1950, passou-se a usar o adjetivo “bayesiano” para abordagens que desenvolviam as premissas presentes no teorema de Bayes (FIENBERG, 2006, p. 18). Entretanto, o emprego prático da estatística bayesiana dependia de ferramentas computacionais que só passaram a estar disponíveis de forma mais ampla nas últimas décadas do século XX. Na seção 2.3., voltamos a falar da estatística bayesiana no contexto de sua aplicação para estimativa de incerteza de medição.

2.2.1.5 Parâmetros estatísticos

O sucesso da aplicação da curva dos erros na observação astronômica levou à ideia de aplicá-la a outros domínios, como o do conhecimento sobre as sociedades humanas. Essa transposição foi realizada pelo matemático belga Adolphe Quetélet (1796-1874). Tendo estudado com os grandes matemáticos e astrônomos franceses, Quetélet teve a ideia de aplicar a teoria das probabilidades aos dados sociais. “A estabilidade dos agregados estatísticos, e assim dos valores médios, era o fundamento da ciência da **física social** que Quetélet anunciou em 1831. Seu conceito chave era *l’homme moyen*, o homem médio” (GIGERENZER *et al.*, 1989, p. 41). O trabalho de Quetélet foi fundamental para estabelecimento da estatística como disciplina: o primeiro Congresso Internacional de Estatística, realizado em Bruxelas em 1853, foi liderado por Quetélet.

Nas últimas décadas do século XIX e nas primeiras do século XX houve um largo desenvolvimento de métodos estatísticos. Para tal desenvolvimento contribuíram vários pesquisadores notáveis como, por exemplo, Francis Galton (1822-1911), Karl Pearson (1857-1936), Willian Gosset (1876-1937) e Robert Aymer Fisher (1890-1962). Apesar de ter sido influenciado por Quetélet, Galton apontou a importância da variabilidade na estatística e fundou um laboratório de pesquisas biométricas para estudar comportamento da variabilidade na genética. Estudando os dados obtidos em biologia no laboratório de Galton, Pearson identificou a prevalência de outros tipos de distribuição que não a normal. Ele propôs que os dados obtidos pelas ciências fossem caracterizados por “uma dispersão aleatória, cujas probabilidades são descritas por uma função matemática, a função de distribuição” (SALSBURG, 2009, p. 29). Person chamou a atenção para uma família de **funções de distribuição** que chamou de assimétricas (*skew distributions*) e sustentou que essas podem ser caracterizadas por quatro **parâmetros**: a média (valor central da distribuição), o desvio-padrão (o quanto as medidas se dispersam em torno da média), a simetria (o grau em que as medidas se acumulam em apenas um lado da média) e a curtose (o quanto as medições raras se afastam da média) (SALSBURG, 2009, p. 29).

Galton e Pearson fundaram uma revista científica, em atividade até hoje⁷³, que teve grande impacto no desenvolvimento da estatística, a *Biometrika*. Foi nessa revista, que Gosset publicou, em 1908, com o pseudônimo de “*The Student*”, o texto intitulado “*The probable error of the mean*”, no qual tratava do problema de **pequenas amostras** (baixo número de

⁷³ <https://academic.oup.com/biomet>.

medições repetidas) e que deu origem às **distribuições-*t*** (STUDENT, 1908). Essas distribuições podem ser relacionadas com a curva normal levando-se em conta o número de graus de liberdade, recurso que é empregado pelo GUM, conforme mostramos no terceiro capítulo (subseção 3.1.3.1). Fisher foi o “principal arquiteto da nova teoria do design e análise experimental” que ele denominou de “análise de variância” (GIGERENZER *et al.*, 1989, p. 73) e muitas vezes é considerado o pai da estatística moderna (TABAK, 2007, 144). Seus trabalhos resultaram nos **testes de significância**, largamente empregados hoje na pesquisa científica, que busca quantificar resultados de experimentos randomizados (GIGERENZER *et al.*, 1989, p. 73).

A teoria das probabilidades serviu de base tanto para teoria dos erros observacionais (aplicada à estimativa de erros de medições), quanto para ferramentas empregadas na análise estatística de dados. Entretanto, é útil identificar certa distinção entre a teoria dos erros e a estatística. Stigler discute essa distinção apontada na obra do filósofo, cientista e economista irlandês Francis Isidro Edgeworth (1845-1926). Esse argumenta que embora observações e estatísticas sejam quantidades agrupadas em torno da média, elas diferem uma vez que a média “de observações é real” e a “da estatística é fictícia”. Isso porque a média das observações é “a causa” a partir da qual emanam “erros divergentes”, enquanto a média estatística (de diferentes objetos) é apenas “uma descrição” que representa um conjunto de dados. Assim, medições de **uma** grandeza geram erros em relação à média obtida, que podem ser estimados, enquanto os dados aos quais a estatística se aplica se referem a **vários** indivíduos, mas que podem ser representados por uma média (além de outros parâmetros). A citação de Edgeworth no texto de Stigler é concluída nas seguintes sentenças:

Em resumo, observações são diferentes cópias de um original; estatísticas são diferentes originais fornecendo um ‘retrato genérico’. Diferentes medições de um mesmo homem são observações; mas medições de diferentes homens, agrupadas em torno do *l’homme moyen*, são *prima facie* ao menos estatísticas (EDGEWORTH, 1885, p. 139-40 *apud* STIGLER, 1986, p. 309).

Essa é, sem dúvida, uma distinção útil, embora sutil. De certa forma, em alguns aspectos, não há fronteira entre **teoria dos erros** e **estatística**: os parâmetros da distribuição de erros de uma medição são obtidos por análise estatística. Trata-se de uma distinção útil em algumas situações. Por exemplo, podemos medir diversas vezes o comprimento de uma única peça para obter a média dessas medições que representará a grandeza comprimento do mesmo exemplar de peça. Mas também podemos medir o comprimento de muitos exemplares do mesmo tipo de peça e obter um comprimento médio estatístico da peça que fornece apenas um

“retrato genérico” daquele lote de peças. Em geral, quando falamos da medição de uma grandeza estamos nos referindo à suposição de que a medição é realizada na propriedade de um **mesmo objeto**.

Durante o século XX, muitos outros pesquisadores contribuíram para o refinamento da teoria da probabilidade e da estatística. Nos anos 1930, por exemplo, o matemático russo Andrei Kolmogorov (1903- 1987) forneceu as bases axiomáticas da teoria. Como consequência das novas técnicas, do embasamento teórico e do sucesso em aplicações práticas, a teoria da probabilidade e as **ferramentas estatísticas** penetraram em novas áreas. Pode-se dizer que a “estatística, como hoje entendemos o termo, foi reconhecida como um campo separado somente no século vinte” (STIGLER, 1986, p. 1). A expansão dessa disciplina nos territórios das ciências muito se deve ao desenvolvimento de “ferramentas multipropósito”. A versatilidade dos métodos estatísticos permite que sejam desenvolvidos para um domínio do conhecimento e depois sejam adaptados para a aplicação em outros domínios. Em função disso, os estatísticos podem se especializar apenas no funcionamento das ferramentas, não nas disciplinas em que são empregadas, tornam-se “experts em tudo e em nada” (GIGERENZER *et al.*, 1989, p. 274).

Nas ciências físicas, a teoria da probabilidade e as ferramentas estatísticas encontraram diversas aplicações, que podemos tratar como novas etapas do processo de matematização da natureza. Inicialmente, como mencionamos anteriormente, houve a aplicação da teoria da probabilidade para determinação do erro aleatório nas observações. Ainda no século XIX, a estatística foi aplicada a fenômenos que envolviam grande número de constituintes, como a teoria cinética dos gases e à termodinâmica. Nos anos finais do século XIX e nas primeiras décadas do século XX, a estatística foi aplicada ao decaimento radioativo e à mecânica quântica.

2.3 Estimativa de erros e incertezas

Nessa seção, vamos dirigir o foco para o desenvolvimento das metodologias para estimar incertezas de medição. Paralelamente, problematizamos também a introdução de conceitos e ferramentas estatísticos nas atividades metrológicas. Como veremos, tal introdução não se deu sem que fosse questionada e até mesmo, a princípio, rechaçada pelos especialistas da área. As metodologias serão discutidas da maneira como foram tratadas antes da publicação do GUM em 1993. A metodologia do guia propriamente dito, que repousa largamente sobre os conceitos e ferramentas aqui abordados, é discutida no terceiro capítulo.

Se na seção anterior (2.2.) recorreremos majoritariamente à literatura secundária, nesta seção, a tendência se inverte: aqui recorreremos, principalmente, a artigos científicos e publicações das instituições metrológicas.

Na subseção 2.3.1., discutimos os conceitos de erro aleatório e sistemático para poder avançar na discussão das metodologias. Em seguida, abordamos a introdução de métodos estatísticos na metrologia na primeira metade do século XX e o cálculo de erros aleatórios pela tradição **frequentista** da teoria dos erros (subseção 2.3.2.). A estimativa de erros sistemáticos dentro da mesma tradição e elementos da estatística bayesiana são problematizados nas subseções 2.3.3.

2.3.1 Os conceitos de erro aleatório e sistemático

Depois da publicação do GUM (1993), passou-se a denominar os componentes que contribuem para a incerteza de uma medição de incertezas Tipo A e Tipo B. Ainda se fala, em algumas situações, de erros e dos componentes de erro aleatório e sistemático. Sobretudo, a divisão entre esses dois tipos de erro é esclarecedora do ponto de vista conceitual. Em função de sua importância, permanecem como conceitos relevantes no vocabulário metrológico. Discutir as metodologias para estimar os erros aleatório e sistemático é importante também, no contexto dessa tese, para compreendermos as metodologias incorporadas no GUM. Antes de tudo, vamos buscar esclarecer a distinção entre os dois tipos de erro, que tem origem em dois tipos de efeitos.

Contribuem para o erro de medição efeitos aleatórios e efeitos sistemáticos, que implicam, respectivamente, em erros aleatórios e erros sistemáticos. Os **efeitos aleatórios** se manifestam sob a forma de **variabilidade** dos valores obtidos em uma medição em condições de repetibilidade, ou seja, em medições repetidas num curto intervalo de tempo com o mesmo sistema de medição, os mesmos operadores e o mesmo procedimento de medição. O VIM3 define **erro aleatório** como “[C]omponente do erro de medição que, em medições repetidas, varia de maneira imprevisível” (INMETRO, 2012b, 2.19). A **análise estatística** da variabilidade permite a estimativa **objetiva** do erro aleatório de uma medição, através de parâmetros da distribuição de valores obtidos, tal como o desvio-padrão experimental. O que caracteriza o erro aleatório é a **dispersão** dos valores obtidos em relação à média aritmética; essa funciona como referência para o cálculo dos desvios. A teoria dos erros tradicional enfoca, então, quase que exclusivamente, esse tipo de erro.

Já os **efeitos sistemáticos** se manifestam sob a forma de **desvios** ou **tendências** (*bias*) em relação ao “valor verdadeiro”. Esses desvios são produzidos sempre da mesma maneira conforme as medições são repetidas em situação de repetibilidade. Para o VIM3 o **erro sistemático** é o “[C]omponente do erro de medição que, em medições repetidas, permanece constante ou varia de maneira previsível” (INMETRO, 2012b, 2.17). Quando possuímos informações quantitativas sobre alguns dos erros sistemáticos, isto é, quando conhecemos suas tendências, usamos essas informações para **corrigir** as indicações do sistema de medição (por exemplo, ao empregar o resultado da calibração de um instrumento). Deve-se ressaltar, no entanto, que as tendências dos instrumentos também foram obtidas por meios empíricos, estão sujeitas a erros que tem de ser levados em conta.

Quando os erros sistemáticos não podem ser corrigidos (pois não possuímos informações quantitativas sobre as tendências causadas por esses efeitos), devem ser estimados. A estimativa, em geral, é realizada supondo os limites de **erro** que o efeito pode produzir. São necessárias informações sobre os instrumentos empregados e um bom conhecimento do procedimento para realizar as estimativas de erros sistemáticos. Dessa forma, reconhece-se que a avaliação de erros sistemáticos é, em larga medida, **subjativa**.

De Courtenay e Grégis apresentam os conceitos de erros aleatórios e de erros sistemáticos como oriundos de **dois tipos de variabilidade diferentes**. A dispersão de valores obtida em medições realizadas em condições de repetibilidade é devida aos erros aleatórios, enquanto a variabilidade exibida em condições de **reprodutibilidade** é devida aos erros sistemáticos (DE COURTENAY; GRÉGIS, 2017, p. 22). Quando laboratórios diferentes buscam medir a mesma grandeza, a variabilidade entre os valores por eles obtidos fornece uma indicação dos erros sistemáticos presentes nos processos de medição desses laboratórios. Entretanto, enquanto os erros aleatórios podem, a princípio, ser associados à precisão em condições de repetibilidade, os erros sistemáticos dificilmente podem ser associados à precisão em condições de reprodutibilidade, pois são muitas as condições que podem ser variadas e que contribuem para o erro sistemático total. Uma outra dificuldade é que, muitas vezes, não é possível obter uma boa estimativa dos erros sistemáticos devido à presença incontornável dos erros aleatórios.

Conforme apontam as definições do VIM3 acima reproduzidas, erros aleatórios e sistemáticos contribuem para o **erro de medição** (conceito já apresentado anteriormente na seção 1.1.2.2). Entretanto, como veremos mais adiante, os erros aleatórios e sistemáticos (esses últimos quando não são previamente determinados) são mais bem caracterizados como fontes de incertezas. O tratamento que a teoria dos erros dispensa para esses erros é

consistente com a interpretação desses como componentes da incerteza de medição, ou seja, como margem de dúvida acima e abaixo do valor obtido para o mensurando. Na sequência, discutimos o desenvolvimento, a partir da teoria dos erros, das técnicas para estimar os erros aleatórios. Depois disso, enfocamos os problemas relacionados aos erros sistemáticos e ao tratamento que a estatística bayesiana dá à estimativa dos erros.

2.3.2 Estatística frequentista e erros aleatórios

Entre os anos 1930 e os anos 1980, muitos trabalhos de refinamento matemático e conceitual da teoria frequentista dos erros foram publicados (p. ex.: BIRGE, 1932; DEMING; BIRGE, 1934; EISENHART, 1963 e 1968; KU, 1968; WAGNER, 1979). Nessa época, os trabalhos mais significativos foram realizados por pesquisadores ligados aos laboratórios nacionais de metrologia ou ao BIPM. O foco da teoria dos erros, desde sua origem no século XVIII, recai sobre os erros aleatórios. Porém, com veremos na subseção 2.3.3., alguns trabalhos da segunda metade do século XX, buscam dar um tratamento probabilístico para a quantificação dos erros sistemáticos. Por ora, nessa subseção, vamos discutir a introdução das ferramentas estatísticas na metrologia e as bases conceitual e matemática da teoria dos erros para o cálculo de erros aleatórios.

2.3.2.1 Introdução da estatística na metrologia

O emprego da teoria **estatística** dos erros para estimar os erros de medições não foi aceito sem restrições pelos especialistas em medição. Um dos motivos para a resistência à teoria deveu-se à sua aplicação restrita aos erros aleatórios. A estimativa desses erros constitui apenas uma parte da exatidão de uma medição, talvez a mais fácil de ser obtida. Para estimar os erros sistemáticos é preciso ter acesso a informações sobre o sistema de medição obtidas por outros meios que não a análise estatística de uma série de medições. Em função dessa limitação, a teoria dos erros nem sempre mereceu atenção dos pesquisadores. Os matemáticos e especialistas em medição Deming e Birge comentam, da seguinte forma, a relação dos pesquisadores com a teoria dos erros, no início dos anos 1930:

A pesquisa em teoria dos erros é com frequência considerada fútil pela razão de que os erros sistemáticos suspeitos e não suspeitos podem ser tão grandes que venham a eclipsar qualquer erro acidental provável de ocorrer. É verdade que o tratamento estatístico dos dados obtidos de um único experimento realizado em condições controladas nunca pode revelar os erros sistemáticos daquele experimento. É

somente comparando os resultados de vários observadores que é possível formar uma ideia de se todos os observadores estavam realmente medindo a mesma coisa ou se, ao contrário, os erros sistemáticos presentes em um experimento eram diferentes daqueles presentes nos outros (DEMING; BIRGE, 1932, p. 122).

As comparações entre medições realizadas por diferentes observadores só são possíveis se os dados de todos os participantes estiverem sob controle estatístico e forem tratados estatisticamente de forma correta, pois é preciso avaliar a extensão dos erros aleatórios para avaliar os erros sistemáticos. Logo após ao trecho acima citado, os pesquisadores argumentam em favor do seu trabalho com a teoria: “[P]or esta razão [a necessidade de estimar os erros aleatórios], um conhecimento prático da teoria dos erros é indispensável para a interpretação dos dados experimentais (DEMING; BIRGE, 1932, p. 122). Àquela altura, a necessidade de tratamento estatístico das medições estava longe de ser unânime entre os especialistas. A simples afirmação que Deming e Birge fizeram no início do artigo, de que, nas medições, os problemas “são essencialmente estatísticos e devem ser tratados como tal” (DEMING; BIRGE, 1932, p. 122), gerou uma forte reação do físico e filósofo britânico Norman Campbell. Pouco tempo depois, o cientista inglês publicou um artigo em que argumentou que, se Deming e Birge estavam certos, então ele e os outros especialistas em medição estavam errados. Para ele e os especialistas justificarem seus métodos era preciso contestar o emprego de técnicas estatísticas em medições:

Se quisermos nos justificar, devemos atacar a teoria estatística dos erros muito mais fundamentalmente do que até então; devemos parar de objetar a determinados métodos estatísticos e suposições e negar corajosamente desde o início a declaração fundamental de Deming e Birge. Devemos negar que o ajuste das observações seja um problema estatístico (CAMPBELL, 1935, p. 800).

Campbell usou uma anedota “frívola” para esclarecer sua posição. Se um jogador de golfe visse algumas pessoas batendo em uma bolinha rústica com o que pareciam ser antigas varas de golfe, poderia pensar que eles estavam tentando jogar golfe como se fazia no século XVIII. Ele, então, se aproximaria do grupo e explicaria longamente às pessoas as vantagens das bolas e das varas recentemente aprimoradas que, sem dúvida, melhoraram a maneira de jogar golfe. As pessoas, vendo que o jogador estava enganado, teriam que dizer logo a ele que elas não estavam jogando golfe, mas hóquei, e que, por isso, as técnicas modernas que ele estava tentando ensinar eram irrelevantes para o jogo que de fato estavam jogando: “eles devem apontar que seu jogo, embora apresente certas semelhanças superficiais com o golfe, é tão fundamentalmente diferente que suas instruções não são erradas, mas irrelevantes” (CAMPBELL, 1935, p. 800). Ou seja, Campbell buscou mostrar que a teoria das

probabilidades e as técnicas estatísticas nela baseadas não estavam erradas, mas não se aplicavam às medições. Ele argumentou que não se podia provar que os dados obtidos em medições fossem do mesmo tipo daqueles nos quais a estatística se fundamenta.

A ideia de que os erros aleatórios podem ser reduzidos aumentando o número de medições, segundo Campbell, seria contestada por qualquer pesquisador experimental que se recusaria “a aumentar as observações além de certo ponto, porque ele sabe que com isso estaria aumentando enormemente a probabilidade de introdução de novas correções desconhecidas” (CAMPBELL, 1935, p. 808). O julgamento do pesquisador com experiência no procedimento de medição em causa seria mais valioso do que uma receita estatística para tratar os dados coletados.

Não vamos nos alongar acompanhando o embate entre as posições de Campbell e dos estatísticos. Na verdade, a controvérsia em torno da estatística é apenas uma das muitas no universo de controvérsias que envolvem as metodologias para estimar erros de medição. Sabemos que a teoria das probabilidades triunfou no tratamento dos dados de medição e que hoje ocupa uma posição de destaque na metrologia. Porém, precisamos fazer algumas ressalvas para apontar pontos nos quais o físico inglês parecia ter razão.

Como vamos ver mais à frente, na questão do tratamento dos erros sistemáticos, a importância da experiência e do discernimento do metrologista persiste tanto na obtenção do resultado da medição, quanto na avaliação da incerteza. As metodologias estatísticas objetivas não substituíram completamente a avaliação subjetiva dos metrologistas. Uma vez que “a eliminação completa do elemento subjetivo não é sempre possível, a responsabilidade de uma importante e, muitas vezes, mais difícil parte da avaliação é deslocada dos ombros do estatístico para os ombros da especialista” (EISENHART, 1963, p. 163). Além disso, o tratamento estatístico dos dados de medição pressupõe algumas **condições** cuja verificação pode não ser realizada. Ao apontar os motivos da resistência às técnicas estatísticas, a história pode ser útil para enfatizar as condições que precisam ser observadas para a adoção de modelos estatísticos. Além disso, esses motivos também podem chamar atenção para os riscos que as “**receitas**” (sejam elas de qualquer tipo) podem introduzir no cotidiano das medições.

Tendo em vista a ampla inserção, que presenciamos nas décadas mais recentes, da estatística em quase todas as áreas das ciências e, em especial, nas medições, é surpreendente constatar que, pelo menos até os anos 1960, as ferramentas dessa disciplina tenham sido vistas com reserva por físicos e por químicos. E, até mesmo, que poucas delas fossem realmente usadas na prática. O estatístico W. J Youden, colaborador do NBS, que deu valiosas contribuições em técnicas para a comparação de medições, fez observações semelhantes

àquelas que Demain e Birge. Em artigo publicado em 1961, Youlden abre o artigo afirmando que “os físicos faziam pouco uso de técnicas estatísticas” e que havia uma boa razão para o “papel secundário exercido pela avaliação estatística” na determinação das constantes fundamentais (YOULDEN, 1961, p. 32). O motivo era o mesmo anteriormente apontado, ou seja, a limitação da teoria dos erros ao cálculo do erro aleatório. Segundo o matemático, em função da acomodação de ambas as partes, “durante décadas, houve muito pouco contato entre a física experimental e a estatística” e “ambas as partes” teriam perdido “por desistir tão facilmente” (YOULDEN, 1961, p. 32). É justamente a limitação ao cálculo de erros sistemáticos que Youlden busca superar no artigo, mas, por enquanto, vamos focar nos erros aleatórios.

Um dos motivos para a resistência à aplicação imediata da teoria estatística aos dados obtidos nas medições diz respeito às condições que os dados precisam satisfazer para que possam ser tratados pela teoria. Na segunda metade do século XX, essas condições ou **suposições** foram discutidas em alguns trabalhos. Quais são as suposições feitas para o tratamento estatístico e quais as suas implicações?

Em primeiro lugar, as medidas experimentalmente obtidas devem ser **independentes** entre si, isto é, os valores obtidos devem ter a característica de **variáveis aleatórias**. Se uma medida influenciar no valor das medidas subsequentes, então o conjunto de valores obtido não pode ser tomado como independentes ou aleatórios. Nesse caso, de fato, a teoria estatística dos erros não pode ser aplicada, ao menos não sem um tratamento prévio dos dados. Gosset (“The Student”) alertou para essa condição: “[O]s experimentos devem ser capazes de serem considerados uma amostra aleatória da população para a qual as conclusões serão aplicadas”. Negligenciar essa regra, pode fazer com que os valores obtidos pela estatística sejam considerados “mentiras malditas” (STUDENT, 1926, p. 711 apud EISENHART, 1963, p. 182).

Outra condição é que os dados apresentem **estabilidade estatística**. Na verdade, a estabilidade é um requisito fundamental para que certa operação experimental possa ser, de fato, considerada uma medição. É o que, no controle de qualidade industrial, é chamado de “estado de controle estatístico” (EISENHART, 1963, p. 162). Se a obtenção experimental de valores referentes a um mensurando não está sob controle estatístico, é necessário depurar o processo até atingir alguma estabilidade.

Por fim, é comum supor que a distribuição dos valores obtidos na medição pode ser aproximada à **curva normal**. O código de prática do laboratório nacional inglês de metrologia (*National Physical Laboratory* - NPL), editado em 1980, alertava para o fato de que não há

razão para que as observações experimentais sigam exatamente a distribuição normal e enfatizava que “deve ser reconhecido que essa é uma suposição que pode não ser sempre justificável” (CAMPION, BURNS, WILLIAMS, 1980, p. 11; 5 apud HON, 1989, p. 476).

O físico e filósofo da ciência alemão-estadunidense Henry Margenau escreveu que, a despeito da experiência apresentar muitas distribuições assimétricas (*skew*), o cientista em geral prefere usar a distribuição normal: “Ele usa a curva normal tanto como uma generalização indutiva da experiência, quanto como um critério de confiabilidade da experiência” (MARGENAU, 1950, p. 114). A observação de Margenau é citada pelos filósofos da ciência Marcel Boumans e Giora Hon, na “Introdução” do volume sobre erro e incerteza na prática científica, para apontar que a suposição de “normalidade” das distribuições faz parte de um “círculo vicioso” (BOUMANS; HON, 2014, p. 6). Essa suposição é especialmente problemática quando a amostra (número de medições repetidas) é pequena. Porém, como veremos adiante, há recursos matemáticos que podem ajudar a contornar as distorções oriundas dessa suposição para uma pequena amostra de medidas.

As ferramentas estatísticas mostram-se extremamente úteis para a metrologia, principalmente em face da massificação dos trabalhos que envolvem as medições. Com certeza, os trabalhos que explicitaram as condições para aplicação dessas ferramentas foram fundamentais para sua incorporação à rotina metrológica. Hoje, é inconcebível manter a estrutura que dá suporte à confiança que se deposita nas medições sem o aparato matemático-estatístico empregado. Justamente em função da massificação dos trabalhos e dos dados que circulam pelos canais científicos, o olhar crítico para as ferramentas em uso e para as receitas de simples aplicação continuam fundamentais.

2.3.2.2 Erros aleatórios

Uma vez que os dados possam ser supostos como independentes entre si (aleatórios), estatisticamente estáveis e normalmente distribuídos, como são estimados os erros aleatórios⁷⁴ de um procedimento de medição com base na teoria dos erros? Essas suposições permitem aproximar a distribuição de dados de **modelos estatísticos** bem conhecidos. A curva da distribuição normal ou gaussiana é caracterizada por dois parâmetros teóricos úteis: o **desvio-**

⁷⁴ Falamos em “erros”, no plural, porque, muitas vezes, um procedimento de medição envolve mais de uma variável cujo erro aleatório é estimado com base nos dados obtidos.

padrão (σ), que mede a dispersão dos dados ou a precisão⁷⁵ e a **esperança** (μ) que é o valor central da distribuição.

Na prática, σ é estimado pelo **desvio-padrão experimental** (s) dos valores obtidos em n medições **independentes**, enquanto μ é estimado pela **média aritmética** (\bar{y}) dos valores. O desvio-padrão experimental (s) de uma distribuição de n medições é igual à raiz quadrada do somatório das diferenças entre cada medida (x_i) e a média aritmética das medidas (\bar{x}), dividido pelo número de medidas menos um. Matematicamente:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_1^n (x_i - \bar{x})^2}{(n - 1)}} \quad (2.5)$$

A precisão de um procedimento de medição em termos de desvio padrão era chamada de “erro padrão”, mas também era usual representar a precisão pelo “erro provável” que, numa distribuição normal, equivale $0,68 \cdot \sigma$ (correspondente a apenas 50 % de chance de que o erro provável expresse o “real” erro aleatório da medição). Uma das peças centrais da teoria é, para cada variável envolvida no processo, fazer a aproximação do desvio padrão experimental (s) de uma única observação ao desvio-padrão (σ) da distribuição teórica. Outro parâmetro importante é o desvio-padrão experimental da média (\bar{s}) que corresponde à razão entre o desvio-padrão experimental (conforme equação 2.5) e a raiz quadrada do número de medições realizadas. Matematicamente:

$$\bar{s} = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (2.6)$$

Esse último, (\bar{s}), é considerado a melhor estimativa do erro na média aritmética das medições. Como antecipamos na subseção 1.1.2.2, no atual vocabulário de metrologia, essas medidas da dispersão dos valores obtidos em um conjunto de medições realizadas em condições de repetibilidade são denominadas de “precisão de medição” (INMETRO, 2012b, p. 21).

No que concerne ao cálculo dos erros aleatórios em uma medição, a evolução, na segunda metade do século XX, foi muito mais nas bases conceituais da teoria do que nas

⁷⁵ Segundo alguns autores, o termo mais apropriado seria *imprecisão* (p. ex.: EISENHART, 1963, p. 162), mas como a tradição e as instituições metrológicas mantiveram o termo *precisão*, vamos mantê-lo também em nosso texto.

formulações matemáticas. Uma vez que o cálculo desses parâmetros e os problemas relacionados às suposições necessárias para empregá-los corresponde, basicamente, ao que foi adotado em parte da metodologia do GUM, vamos nos referir diretamente a essa publicação mais recente. Uma mudança notável é que o GUM trata os erros aleatórios como **incertezas** devido à **repetibilidade** nas medições das variáveis, o que discutiremos detalhadamente mais à frente. Por hora, vamos recorrer aqui a um exemplo do GUM que esclarece visualmente a relação entre os valores obtidos na medição e a curva normal do modelo correspondente, à qual a distribuição real é, muitas vezes, aproximada.

Na figura 13, vê-se a representação gráfica da curva normal teórica (a), ou seja, do modelo estatístico, usada como **aproximação** dos valores obtidos num processo experimental de medição do mensurando temperatura (t), valores esses representados na forma de um histograma (b). Os parâmetros obtidos também estão marcados nos gráficos. Em a) temos a esperança μ_t e o intervalo $\mu \pm \sigma$ (\pm desvio-padrão) da curva normal. Em b) temos a média \bar{t} e os intervalos $\bar{t} \pm s(t_k)$ (\pm desvio-padrão experimental) e $\bar{t} \pm s(\bar{t})$ (\pm desvio-padrão experimental da média).

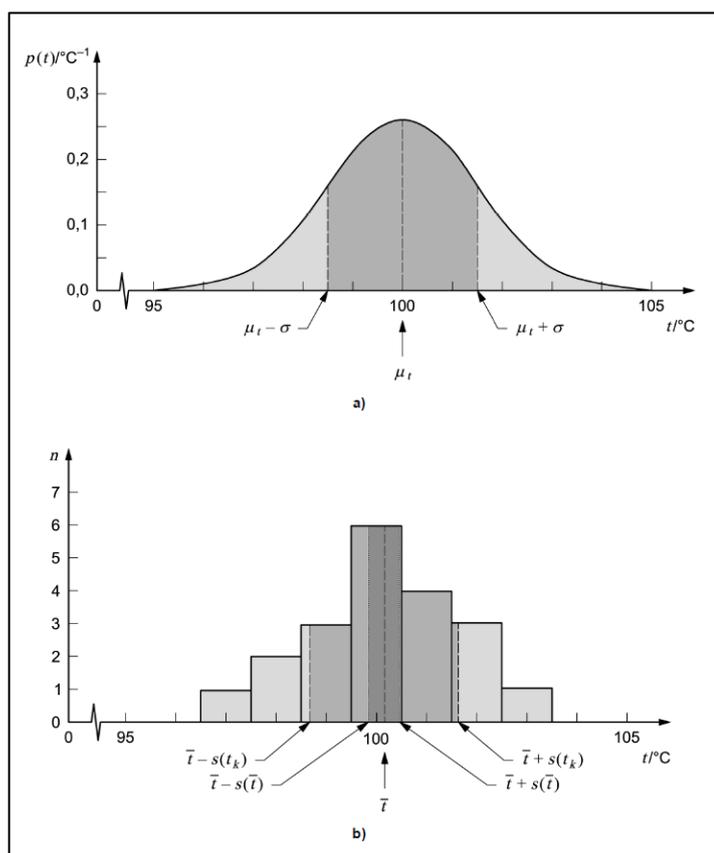
A área sob a gaussiana representa a quantidade de valores obtidos, sendo que a área delimitada pelo intervalo entre a média aritmética \pm um desvio padrão contém 68,3 % das medidas. Por isso, é possível afirmar que a probabilidade de que os valores contidos naquele intervalo representem os valores obtidos é de 68,3 %. A probabilidade de que um intervalo represente os valores medidos é denominada **nível de confiança** (*confidence level*)⁷⁶ (p em %), enquanto o intervalo a que certo nível de confiança se refere é denominado **intervalo de confiança**. Caso queiramos expressar o erro aleatório com um nível de confiança diferente, temos que multiplicar o desvio padrão por um fator k (p) conhecido e tabelado. Por exemplo, em distribuições normais ou com alto número de medições (n), para um nível de confiança de 95,45 %, o fator k é igual a 2, ou seja, o intervalo de confiança é de $\mu \pm 2\sigma$ (WAGNER, 1979, p. 85). Na verdade, no caso de nível de confiança de 68,3 %, estava implícito um fator $k = 1$.

Se, para a distribuição normal, vale a relação que apontamos acima, para experimentos de medição com baixos números de medidas obtidas é preciso encontrar um fator multiplicador (t_p) que altera o fator k em função do número de **graus de liberdade** da medição ($v = n - 1$) (WAGNER, 1979, p. 85; KACKER; SOMMER; KESSEL, 2007, p. 515). Os valores de t_p (v) das **distribuições-t** de *Student* encontram-se em tabelas que o relacionam

⁷⁶ Aqui estamos supondo cálculos baseados em modelos estatísticos. Para as aproximações recomendadas no GUM, outros conceitos são empregados, como discutimos no terceiro capítulo.

à fração p da distribuição (INMETRO, 2012, p. 68). No terceiro capítulo (subseção 3.1.3.1), mostramos como o fator k é obtido na prática atual da medição de acordo com as recomendações do GUM.

Figura 13 – Representação gráfica da avaliação de erro aleatório para 20 medidas de temperatura (t)



Legenda: Modelo estatístico com suposição de uma distribuição normal na parte superior e histograma dos valores obtidos nas medições na parte de baixo.

Fonte: GUM (INMETRO, 2012a, p. 16).

Se medição de uma grandeza envolver a medição de mais de uma variável e se essas variáveis não são correlacionadas, então o erro aleatório total é a raiz quadrada da soma quadrática dos desvios-padrão obtidos nas medições das variáveis. Essa forma de somar os erros, isto é, de combiná-los, é conhecida como “propagação de erros” (SANTORO *et al.*, 2005 p. 62). Com exceção de sistemas mais complexos de medição, nos quais as metodologias de estimativa dos erros aleatórios demandam formulações matemáticas mais sofisticadas, foram esses os conceitos e as fórmulas desenvolvidos pela abordagem frequentista para estimar os erros aleatórios e que serviram de base para a metodologia do GUM.

Os conceitos estatísticos da teoria frequentista para a estimativa de erros aleatórios, herdeiros da teoria dos erros que começou a ser desenvolvida no século XVIII, são bem conhecidos e estabelecidos. Seus reconhecidos problemas residem muito mais nas condições ou suposições necessárias para sua aplicação. Além disso, a teoria encontra dificuldades para tratar os efeitos sistemáticos, de modo que sofre críticas por não poder ser integralmente adotada para a estimativa do erro (ou da incerteza) geral de um procedimento de medição. No terceiro capítulo, discutimos como esses conceitos e fórmulas foram incorporados na metodologia do GUM. Outra questão envolvida no emprego da teoria, e que também discutimos no terceiro capítulo, é a do “valor verdadeiro” do mensurando. Vamos agora falar sobre os elementos que constituíam a fragilidade da teoria dos erros, os efeitos sistemáticos.

2.3.3 Erros sistemáticos e estatística bayesiana

Erros sistemáticos não podem ser estimados diretamente pela estatística frequentista, pois não apresentam uma distribuição (uma frequência) de erros. Ainda assim, foram oferecidas algumas soluções para esse problema no próprio âmbito da teoria dos erros que veremos na subseção 2.3.3.1. Já na estatística bayesiana, que lida com distribuições a priori (ou seja, distribuições que não são baseadas na frequência de eventos), os conceitos são adequados para estimar os erros sistemáticos. A dificuldade, nessa abordagem, reside na necessidade de recursos computacionais. Tratamos de forma resumida as bases dessa abordagem na subseção 2.3.3.2.

2.3.3.1 Erros sistemáticos na teoria dos erros

Tendo em vista a limitação, acima mencionada, da teoria dos erros em relação ao tratamento dos efeitos sistemáticos, vamos discutir aqui como esse problema foi enfrentado antes da publicação do GUM. Essa discussão permite compreender problemas persistentes ainda hoje com a metodologia do guia. Conforme vimos na afirmação de Deming e Birge de 1932, que reproduzimos na subseção 2.3.2.1., a avaliação dos efeitos sistemáticos não podia ser feita pela análise estatística dos valores medidos de uma variável. Essa avaliação é mais difícil e subjetiva, e podia ser interpretada como fator que invalidava a abordagem estatística. Isso porque os erros sistemáticos são frequentemente muito maiores que os erros aleatórios, o que fazia a abordagem estatística parecer inútil.

O pesquisador do NBS, Churchill Eisenhart (1913-1994), que escreveu importantes trabalhos nos anos 1960 sobre exatidão e erros de medição, publicou, em 1953, uma coletânea de excertos da obra de um outro importante físico do NBS, N. Ernest Dorsey. No artigo-coletânea, o conceito de erro sistemático é abordado da seguinte forma:

[...] o termo “erro sistemático” é usado para cobrir todos os erros que não podem ser vistos como fortuitos, como participantes da natureza do acaso. Eles são característicos do sistema envolvido no trabalho; eles podem surgir de erros na teoria⁷⁷ ou nos padrões, de imperfeições nos instrumentos ou no observador, de falsas suposições etc. Para eles a teoria estatística dos erros não se aplica. Eles são frequentemente chamados de “erros constantes” e comumente eles são constantes através de um dado conjunto de determinações, mas essa constância pode não ocorrer (DORSEY; EISENHART, 1953, p.104).

Esse trecho, que, em parte, Eisenhart também reproduziu em um importante artigo seu publicado em 1962, fornece uma ideia geral das fontes de efeitos sistemáticos que redundam em erros. Uma importante fonte de erro sistemático numa medição é a tendência (*bias*) do instrumento empregado. Se a tendência do instrumento é bem conhecida, por exemplo, através de sua calibração, pode-se **corrigir** as indicações fornecidas, porém ainda restará o erro (que hoje chamamos de incerteza) inerente ao processo de calibração. Outras fontes de erro em geral estão presentes, as quais serão avaliadas de maneiras diferentes. Por exemplo, a resolução limitada de instrumentos empregados na medição e o conhecimento incompleto dos valores e da interferência no resultado da medição das **grandezas de influência**⁷⁸ (variáveis ambientais como temperatura, pressão e umidade).

Tão difícil quanto identificar as possíveis fontes de erros sistemáticos é estimar quantitativamente a contribuição desses. Enquanto a média aritmética funciona como referência para a quantificação do erro aleatório, no caso do erro sistemático a referência é o valor verdadeiro, que é desconhecido e desconhecível. Sem a referência do valor verdadeiro, a tarefa de avaliar o erro aleatório torna-se desafiadora. Essa parece ter sido uma tarefa intensamente investigada nos anos 1960 e 1970. Diversos artigos e publicações técnicas dos laboratórios nacionais procuraram equacionar o problema da estimativa dos erros sistemáticos

⁷⁷ A origem de erros sistemáticos na própria teoria que embasa a medição de determinada grandeza não é muito comum de ser mencionada na literatura metrológica. No quarto capítulo, abordamos essa questão quando empreendemos um esboço de genealogia das fontes de incerteza (subseção 4.2.3.).

⁷⁸ Conforme GUM, definição B 2.10 (INMETRO, 2012a, p. 34). No VIM3, o conceito de grandeza de influência está restrito a medições diretas e se aplica apenas a uma grandeza que “não afeta a grandeza efetivamente medida, mas afeta a relação entre a **indicação** e o **resultado de medição**” (INMETRO, 2012b, 2.52).

de medição (EISENHART, 1963 e 1969; KU, 1968; MÜLLER, 1979; WAGNER, 1979; EISENHART; COLLÉ, 1980).

Para as fontes de erro sistemático que possuíam um valor de erro global associado (ou de incerteza), como é o caso das constantes fundamentais, esse valor podia ser tomado diretamente como erro sistemático da referida fonte. Assim, em modelos de medição que envolvem constantes fundamentais, os erros (ou as incertezas) associados às constantes eram simplesmente computados como os valores de seus erros sistemáticos. Para as outras fontes, o problema era bem mais complicado. Em virtude da falta de informações, o princípio básico da quantificação de um efeito sistemático (que não possui uma incerteza global associada) baseia-se nos **limites máximo e mínimo de erro** que o efeito pode causar no procedimento de medição. Tais limites exigem discernimento para serem atribuídos e tal atribuição, em geral, “envolve um elemento de julgamento” (EISENHART, 1963, p. 183). O operador ou pesquisador responsável pelo processo de medição deve se perguntar quais os limites que o efeito em questão pode alcançar. Assim, o conhecimento do procedimento de medição é fundamental nessa estimativa, o que empresta à avaliação dos erros sistemáticos um caráter **subjetivo**.

Na já mencionada “Introdução” do volume de ensaios *Error and Uncertainty*, Boumans e Hon especulam que talvez a classificação entre erros aleatórios e sistemáticos seja atrativa para os cientistas experimentais devido à “clara distinção” entre os erros no que se refere à “inevitabilidade” e à “culpabilidade”:

Tipicamente, é reivindicado que o experimentador habilidoso (*skilled*) pode eliminar todos os erros sistemáticos e ao completar essa tarefa o experimentador descobre [...] que há ainda uma margem de erro que requer futura consideração. Essa margem de erro, afirma-se, é devida a erros aleatórios. Assim o experimentador é culpado quando ele ou ela comete, por assim dizer, erros sistemáticos. O experimentador pode ser culpado por falhar em eliminar erros sistemáticos ou se responsabilizar por eles, mas ele ou ela não pode ser culpado da ocorrência de erros aleatórios; os últimos são inevitáveis e o experimentador não é responsável por suas ocorrências (BOUMANS; HON, 2014, p. 7).

Um exemplo de erro sistemático que a experiência e a habilidade do metrologista pode reduzir é aquele devido à resolução adotada na medição em instrumentos analógicos. O menor intervalo da escala pode ser dividido de diversas maneiras. O metrologista habilidoso pode adotar como resolução a quinta parte do menor intervalo, obtendo um erro sistemático devido à resolução pequeno, enquanto um metrologista menos ousado adotaria apenas a metade do menor intervalo ou o intervalo inteiro, obtendo um erro sistemático devido à resolução maior. Atualmente, há a tendência de substituir as escalas com indicações analógicas dos

instrumentos por indicações digitais e estas últimas não proporcionam qualquer vantagem ao experimentador habilidoso no que se refere à resolução.

Em geral, a eliminação dos erros sistemáticos depende muito dos recursos disponíveis para o cientista e do objetivo da medição. Como comentamos na seção 1.4.3, Luca Mari e colaboradores enfatizam que a medição é “um processo feito com um propósito” (MARI *et al.*, 2017, p. 51), o que significa que o investimento deve ser pensado em função do objetivo da medição. Instrumentos com uma classe de exatidão superior podem fornecer não somente erros sistemáticos mais baixos, mas também erros aleatórios menores. Na verdade, nenhum dos dois tipos de erro podem, de fato, ser eliminados, mas ambos podem ser reduzidos. Na metrologia atual, entende-se que a culpa por uma medição de baixa qualidade, em geral, deve ser atribuída à falta de recursos ou à racionalização dos investimentos em função do objetivo da medição.

Na verdade, no caso dessas avaliações, a subjetividade é mais coletiva que individual: é sempre preferível que a avaliação de incertezas seja realizada pela equipe do laboratório ou que, pelo menos, a avaliação realizada por um profissional seja revisada por outros. Muitas vezes, a avaliação dos erros sistemáticos era vista como tarefa do especialista no procedimento de medição, isentando a necessidade de tratamento estatístico: “[N]a extensão em que a completa eliminação do elemento subjetivo não é sempre possível, a responsabilidade por uma importante, e às vezes mais difícil, parte da avaliação é deslocada dos ombros do estatístico para os ombros do expert na matéria” (EISENHART, 1963, p. 163).

Identificar as fontes de efeitos sistemáticos, buscar reduzir os erros oriundos dessas fontes e quantificar aqueles que permanecem são tarefas minuciosas e complexas. “O trabalho envolvido na sua detecção, diagnose e erradicação frequentemente excedem em muito aquele de falar das medidas finais e é desencorajador para o observador experiente, bem como para os iniciantes” (EISENHART, 1963, p. 170). Por certo, o fato de haver, hoje, no sistema metrológico internacional um guia (GUM) que recomenda métodos razoavelmente simples para estimar as fontes de erro, torna o problema bem menos complexo.

Estabelecidos os limites de erro que uma variável pode sofrer, como calcular o erro sistemático dessa variável? Deve-se tomar o intervalo total como valor do erro? A maioria dos pesquisadores concordavam que, dessa forma, os erros seriam superestimados e uma de suas preocupações era a de estimar de modo “realístico” os erros. Além do mais, o erro máximo obtido dos limites “é mais um conceito matemático que estatístico” (MÜLLER, 1979, p. 245), o que traz problemas para combiná-lo com o erro aleatório. Uma vez que o erro aleatório, como vimos acima, é estimado em termos de desvios padrão, a alternativa mais atraente para

os erros sistemáticos seria tratar os limites de modo que fornecessem também valores em termos de **desvios-padrão**.

Uma objeção de natureza “um tanto filosófica” é se podemos considerar um erro sistemático como tendo “um segundo momento [variância ou desvio-padrão], pois isso implica, pelo menos implicitamente, que existe uma distribuição de probabilidade correspondente” (MÜLLER, 1979, p. 245). Ou seja, é preciso atribuir uma distribuição de probabilidade para o erro sistemático em questão de forma a priori e subjetiva, pois não se baseia numa distribuição de valores obtidos⁷⁹. No contexto de busca por metodologias comuns para estimar os erros de medição no final dos anos 1970, o pesquisador do BIPM, Jörg W. Müller, argumentou sobre a possibilidade dessa atribuição:

Afinal de contas, probabilidades “subjetiva” e “objetiva” são governadas em todos os seus pontos essenciais pelas mesmas regras básicas. O fato de que nós frequentemente não possamos evitar algum grau de arbitrariedade ou julgamento subjetivo não é um argumento válido para abandonar o raciocínio estatístico, mas sim um desafio de incorporá-los do melhor modo possível (MÜLLER, 1979, p. 246).

A argumentação de Müller modula a ideia de Eisenhart de que a avaliação dos erros sistemáticos dispensaria o conhecimento estatístico. No mesmo artigo, Müller examinou a possibilidade de se adotar distribuições retangulares (também chamadas de uniformes), mas conclui que tal adoção conteria “mais armadilhas do que méritos” e deveria ser evitada (MÜLLER, 245, p. 246). No entanto, o pesquisador não propõe uma regra para essa atribuição, deixando para o metrologista experiente obter o valor do desvio-padrão (MÜLLER, 245, p. 246). Outra opção, que fato acabou prevalecendo no GUM, era a de atribuir uma distribuição de probabilidade a priori cujo formato seria decidido caso a caso.

Depois de identificados e quantificados, os erros sistemáticos podem ser combinados para fornecer um valor representativo global desse tipo de erro. O problema era como combinar as diversas fontes de erro sistemático quantificadas. Alguns pesquisadores sustentaram a simples adição dos erros sistemáticos, outros a adição quadrática e ainda outros apontaram um método misto dependendo do valor do erro (EISENHART, 1963, p. 184-5; WAGNER, 1979, p. 86; EISENHART; COLLÉ, 1980, p. 31).

⁷⁹ Essa é exatamente a vantagem da abordagem bayesiana, como veremos na próxima subseção, pois distribuições a priori fazem parte do arcabouço conceitual dessa teoria, na qual são sempre necessárias.

Em resposta a um questionário enviado aos laboratórios nacionais de metrologia⁸⁰, o laboratório inglês (*National Physical Laboratory – NPL*) relacionou 5 métodos comumente empregados para combinar os erros sistemáticos: (i) somá-los “linearmente”; (ii) somá-los “quadraticamente”; (iii) somar linearmente os maiores erros e depois adicioná-los quadraticamente aos menores; (iv) escolher algum método “plausível” entre a soma linear e a quadrática; e (v) “usar uma fórmula matemática, supondo uma distribuição de probabilidade do erro sistemático, para calcular um valor destinado a ser comparável com uma flutuação estatística como a do erro padrão da média” (BIPM, 1980b, Apêndice V, p. 6). A ideia de estimar os erros sistemáticos como desvios-padrão de distribuições a priori sugere que, dessa forma, eles poderiam não apenas ser combinados entre si, mas que poderiam também ser combinados com os erros aleatórios.

Essa possibilidade nos leva a mais um problema: os erros aleatórios e sistemáticos deveriam ser combinados para fornecerem um valor único de incerteza da medição, ou eles deveriam ser expressos separadamente no resultado da medição? Se deveriam ser combinados, como seria matematicamente realizada a combinação? Essa questão foi intensamente discutida nos fóruns que prepararam o formalismo adotado pelo GUM. Vamos abordá-la no terceiro capítulo quando comentarmos a situação de algumas questões antes do guia (subseção 3.1.1.2). Pelo que vimos na atual subseção, várias propostas foram fornecidas no âmbito da teoria frequentista para estimar os erros aleatórios. Embora existentes, as soluções oferecidas exigiam levar a teoria para além de suas bases conceituais.

2.3.3.2 A abordagem bayesiana

Embora a estatística bayesiana tenha sido desenvolvida também sob a interpretação objetiva da probabilidade, ela é principalmente reconhecida sob a interpretação subjetiva. Para um de seus pesquisadores e entusiastas, o estatístico inglês Dennis Lindley, as probabilidades medem a **incerteza** que temos, do ponto de vista subjetivo, em relação à ocorrência dos eventos. Isso se dá quando a incerteza pode ser expressa como “**graus de crença**”. Lindley argumenta em favor da adequação do termo “crença” (*belief*) para falar de probabilidades da seguinte forma:

⁸⁰ Discutimos algumas questões do relatório que resultou da consulta do grupo de trabalho aos laboratórios nacionais sobre expressão de incerteza (BIPM, 1980b) no terceiro capítulo. Aqui usamos apenas parte de uma das respostas do NPL para indicar como o problema da combinação de erros sistemáticos foi tratado antes da recomendação do método que foi incorporado no GUM pelo BIPM.

Crença é uma palavra útil porque ela enfatiza que a incerteza de que nós estamos falando é uma relação entre você, de um lado, e um evento, de outro. A crença não reside inteiramente em você porque se refere ao mundo externo a você. A crença não é uma propriedade do mundo porque seu grau de crença pode ser razoavelmente diferente do meu. A crença expressa a relação entre você e o mundo, em particular, entre você e um evento nesse mundo. A palavra que será usada para medir a força de sua crença é probabilidade, então nós falamos sobre sua probabilidade de que um evento seja verdadeiro, ou, mais sucintamente, sua probabilidade para o evento (LINDLEY, 2006, p. 12).

Mesmo que outras interpretações da estatística bayesiana não sigam pelo mesmo caminho, a posição de Lindley nos dá uma ideia de porque essa abordagem fornece um tratamento mais adequado em relação à sua estrutura conceitual dos efeitos sistemáticos. É importante observar, entretanto, que a incerteza a que Lindley se refere diz respeito ao conhecimento dos agentes em situações que exigem tomada de decisão, não deve ser associada imediatamente à incerteza de medição.

Como dissemos na subseção 2.2.1.4, o desenvolvimento da estatística propriamente bayesiana ocorreu apenas a partir dos anos 1930. Durante as décadas de 1950 e 1960, quando o rótulo “bayesiano” passou a ser escolhido pelos próprios defensores da abordagem, o trabalho foi dominado por estatísticos estadunidenses e ingleses e foi esse trabalho que levou ao “florescimento” da abordagem nas três décadas seguintes (FIENBERG, 2006, p. 27). Em algumas situações o formalismo matemático frequentista e bayesiano se tornam idênticos, mas os pontos de partida, as ênfases e os conceitos são diferentes. Mesmo conceitos que possuem funções semelhantes nas duas abordagens, recebem denominações e formulações diversas.

A variável em foco em uma distribuição de probabilidade, que na abordagem frequentista chamamos de variável aleatória (ou randômica), na concepção bayesiana constitui uma “entidade com a qual pode ser associada uma *função de densidade de probabilidade baseada em informação* (ipdf)” (LIRA; WÖGER, 2006, p. S254; grifo dos autores). Da mesma forma que a análise frequentista é capaz de estabelecer a probabilidade da variável aleatória cair em um intervalo da distribuição, na estatística bayesiana, um intervalo de valores na ipdf fornece o “grau de crença” ou a “probabilidade bayesiana” de que o real valor da grandeza caia dentro dos limites estabelecidos pelo intervalo. Tal intervalo pode ser chamado intervalo de “cobertura” [*coverage*] ou “credível” [*credible*] para distingui-lo do intervalo de “confiança” da estatística frequentista (LIRA; WÖGER, 2006, p. S254).

O teorema de Bayes que descrevemos na subseção 2.2.1.4⁸¹ pode ser formalmente escrito da seguinte forma:

$$p(A|B) = \frac{p(B|A)}{p(B)} p(A) \quad (2.7)$$

Se tomarmos todas as probabilidades envolvidas na fórmula como funções de distribuições de probabilidade baseada em informação, como veio a ser compreendido no espírito da estatística bayesiana, podemos reinterpretar o teorema da seguinte forma:

- $\Pr(A)$ ⁸² é uma distribuição (a *distribuição anterior* [*prior*]) representando o ‘estado do conhecimento’ (ou grau de crença) sobre o parâmetro A antes que as medições de B sejam feitas [.]
- $\Pr(B|A)$, chamada de *função de verossimilhança* [*likelihood*], indica a probabilidade de obter resultados da medição de B com dado valor do parâmetro A , e
- $\Pr(A|B)$ é a *distribuição posterior* representando o estado do conhecimento sobre o parâmetro A depois que novas informações foram adquiridas das medições (WILLINK; WHITE, 2012, p. 6).

A $p(B)$, que consta no denominador do teorema, é vista somente como um fator de normalização, fazendo com que a probabilidade posterior seja proporcional à função de verossimilhança vezes a probabilidade anterior (WILLINK; WHITE, 2012, p. 6). A reinterpretação acima citada indica como o teorema pode ser empregado em medições, mas os cálculos baseados nesse formalismo demandam extensiva computação. Por isso, a metodologia só se tornou viável com a introdução do método de Monte Carlo nos anos 1980 (FIENBERG, 2006, p. 27) e com a disponibilização tecnológica de computadores com alta capacidade de processamento.

O fato mais relevante é que a aplicação do teorema depende de informações probabilísticas prévias (distribuições de probabilidade a priori). Essas suposições necessárias para o cálculo da probabilidade condicional constituem o principal motivo de controvérsias acerca da metodologia bayesiana, uma vez que os critérios para adotá-las, em geral, são **subjetivos** e passíveis de questionamentos (ROMEIJN, 2017, p 43).

⁸¹ Reproduzindo aqui a descrição do teorema de Bayes: a probabilidade de A dado B é igual à probabilidade de B dado A , multiplicada pela probabilidade de ocorrência de A , dividida pela probabilidade de ocorrência de B .

⁸² Willink e White (2012) empregam uma notação ligeiramente diferente daquela empregada por Lindley (2006) e Lira e Wöger (2006): ao invés de $p(X)$, empregam $\Pr(X)$ para denotar a probabilidade de ocorrência de X .

Nesse ponto, a argumentação contra e a favor da estatística bayesiana é fortemente enviesada de acordo com a escola a que os especialistas aderem. Conforme comentamos na seção 2.2., a rivalidade entre as escolas frequentista e bayesiana é muito pronunciada. Frequentistas tendem a problematizar o caráter subjetivo das distribuições a priori. Quando examinam as propostas de distribuições a priori **objetivas**, questionam o “sentido” de se obter distribuições posteriores a partir de uma análise em que “as probabilidades retêm sua interpretação de graus de crença” (WILLINK; WHITE, 2012, p. 7).

Já os bayesianos insistem que, em algumas situações, é mesmo “impossível evitar algum grau de subjetividade” e essa pode até mesmo ser “desejável”. Além disso, defendem o emprego de distribuições a priori objetivas “não informativas” e argumentam em favor da evolução da distribuição conforme o andamento do processo (LIRA; WÖGER, 2006, p. S255). Defendem também que a aplicação da estatística bayesiana à metrologia, onde algumas vezes os dados são escassos, é conveniente, diferentemente de outras áreas (pesquisa de opinião, saúde pública etc.) que dispõem de amostras com muitos dados. Sublinham que “muitas vezes somente um ou dois pontos de dados sobre o mensurando estará disponível ou mesmo, como nos efeitos sistemáticos, nenhum dado de medição [estará disponível]” (LIRA; WÖGER, 2006, p. S258).

A estatística bayesiana pode ser associada à abordagem **epistêmica** das probabilidades (cf. GRÉGIS, 2016, p. 105). Sugere-se também que o “florescimento” dessa estatística nas últimas décadas do século XX teria proporcionado uma “virada epistêmica” na metrologia e, por consequência, influenciado na elaboração dos documentos GUM e VIM (COURTENAY; GRÉGIS, 2017, p. 25-6; GRÉGIS, 2014?). Por certo, suas bases conceituais são mais apropriadas para a avaliação de efeitos sistemáticos e podem ter contribuído para a solução híbrida adotada pelo GUM básico. Contudo, a abordagem bayesiana foi plenamente incorporada apenas no Suplemento 1 do GUM, publicado em 2008. Nessa tese, vamos nos concentrar na metodologia do GUM básico, fazendo com que a estatística bayesiana figure aqui apenas como um importante coadjuvante, mas não como protagonista. No terceiro capítulo, mostramos, em linhas gerais, como essa abordagem foi adotada no Suplemento 1 do GUM para efeito de contraste com a metodologia básica do guia que constitui nosso principal foco de estudo.

2.4 Comentários finais do segundo capítulo

Uma das tendências mais claras nas medições científicas é o intercâmbio com as pesquisas de ponta nas ciências físicas. Por consequência, as medições cada vez mais repousam sobre as teorias matematizadas dessas ciências, o que implica na intensificação do emprego das matemáticas nas medições. Essa tendência aponta para o reconhecimento do papel das **teorias**, isto é, do aspecto de dependência da teoria ou da **carga teórica** a que as medições estão sujeitas. No primeiro capítulo, já havíamos assinalado que a filosofia da medição contemporânea aponta essa dependência. No quarto capítulo, voltamos a essa questão à luz da filosofia do experimento que busca refutar a dependência teórica dos experimentos físicos, mas a corrobora no caso específico da atividade experimental da medição (subseção 4.2.1).

Quantificar uma grandeza significa medi-la. Já a quantificação pode significar tanto o processo de medição, quanto o processo histórico de identificação de grandezas passíveis de medição e do estabelecimento dos meios para que possamos medi-la. Esses meios são, basicamente, a padronização das unidades, a elaboração de escalas e o desenvolvimento de instrumentos para realizar a medição. O processo histórico de **quantificação** se deu e segue se dando entrelaçado com a **matematização** das teorias físicas. Outra dimensão presente que se desenvolve em paralelo é a do desenvolvimento **tecnológico** para a construção dos instrumentos de medição e para a melhoria da exatidão que esses podem alcançar. A matematização das teorias repercute, principalmente, nos modelos matemáticos de medição. Com vistas a ilustrar a diversidade de modelos, correspondentes a diferentes métodos, apresentamos três expressões matemáticas para a medição da mesma grandeza da área das radiações ionizantes (D_w).

Do mesmo modo como no primeiro capítulo nos posicionamos contra a necessidade do compromisso metafísico que a adesão ao realismo requer, na questão da efetividade da matemática para representar os fenômenos físicos, **não** concordamos com as ideias de uma adequação perfeita das matemáticas ou de um mundo, em si mesmo, portador de qualidades numéricas. A nosso ver, a incerteza de medição funciona, exatamente, como uma estimativa da (in)adequação das teorias matematizadas. Na investigação das fontes gerais de incerteza que realizamos no quarto capítulo (subseção 4.2.3), seguimos as pistas deixadas pelas incertezas para explicitar, em algumas instâncias, os rastros da inadequação entre os sistemas empíricos e as teorias.

A matematização que avança através da modelização das grandezas, se estende também para a estimativa dos erros e incertezas de medição. Nesse terreno menos firme, a matematização se dá pelo emprego da teoria das probabilidades e das ferramentas estatísticas.

A teoria das probabilidades busca quantificar fenômenos tipicamente aleatórios, ao contrário daqueles fenômenos de aspecto causal sobre os quais as ciências começaram a ser edificadas. A teoria das probabilidades (moderna) apresenta uma história singular em relação a outros ramos da matemática. Emergiu tardiamente em meados do século XVII sob a dupla face da **objetividade** (frequência dos eventos) e da **subjetividade** (graus de crença), em poucas décadas estabeleceu seus principais fundamentos matemáticos e em mais algumas décadas, com a teoria dos erros, tornou possível quantificar o erro aleatório presente nas observações científicas.

A divisão entre as duas abordagens na estatística contemporânea, que privilegiam as dimensões objetiva e subjetiva das probabilidades, nos fornece uma imagem cindida e instigante desse ramo da matemática. Ambas as abordagens são úteis na estimativa da incerteza de medição, embora tenha sido a abordagem frequentista da teoria dos erros convencional que forneceu os principais conceitos para a metodologia básica do GUM. Por outro lado, a abordagem bayesiana forneceu insights para a metodologia de estimativa dos efeitos sistemáticos (incerteza Tipo B) do GUM e foi inteiramente aplicada na metodologia do Suplemento 1 do guia. Dessa forma, a estatística nos fornece uma imagem também cindida da estimativa da incerteza de medição entre a objetividade do elemento aleatório e a necessidade do elemento subjetivo.

Em função da influência da teoria dos erros, os termos “erro de medição”, “erro aleatório” e “erro sistemático” se tornaram recorrentes na literatura científica sobre medição. Mesmo depois da adoção do conceito de incerteza e do reconhecimento de que os efeitos aleatórios e sistemáticos são mais bem apreendidos como **componentes de incerteza**, a referência a **erros** ainda é bastante comum. Uma vez que, tradicionalmente, pela teoria estatística dos erros, o erro de medição se confundia com o erro aleatório, o termo “erro”, sem qualificativos, é ambíguo e passível de confusão. Para a determinação do erro de medição, além da obtenção do erro aleatório, é preciso também conhecer o erro sistemático da medição. Esse último, só pode ser conhecido tomando-se um valor padrão como referência para a grandeza. Dessa forma, o erro de medição só deve ser expresso em relação à um valor padrão confiável. A estimativa de incertezas contorna muitos desses problemas e por isso foi o conceito escolhido para expressar a qualidade da medição. Mas sua adoção oficial através da publicação do GUM se valeu de toda discussão conceitual e de todo desenvolvimento formal que tratamos neste capítulo.

Tendo visto, neste capítulo, os conceitos e as ferramentas matemáticas que foram desenvolvidos antes da publicação do GUM, no terceiro capítulo vamos ver como esses foram

discutidos e adaptados para compor a metodologia do guia. Alguns problemas já identificados durante o século XX revelaram-se persistentes e foram enfocados também na elaboração do GUM e em sua fortuna crítica. No quarto capítulo, procuramos ir além do modo como são tratados os problemas no âmbito metrológico em busca de aspectos epistemológicos das incertezas.

3 ADOÇÃO DO CONCEITO DE INCERTEZA DE MEDIÇÃO

Se quisermos que tudo continue como está, é preciso que tudo mude.

O Leopardo, *Giuseppe Tomasi di Lampedusa*

Como o conceito de incerteza de medição foi adotado no âmbito da metrologia? Qual o significado de sua adoção e como se relaciona com os demais conceitos que fundamentam as medições? Quais as características da metodologia básica do GUM? Qual o significado das mudanças conceituais introduzidas pelo guia? Buscamos, no terceiro capítulo, enfrentar as questões acima e discutir os problemas filosóficos nelas implicados. Nosso objetivo é mostrar de que maneira o conceito de incerteza de medição, em função da posição **central** que ocupa dentro da estrutura conceitual da metrologia, está relacionado com os principais temas da **filosofia da medição**. Trabalhamos aqui com documentos e artigos científicos e filosóficos sobre as questões a serem discutidas. Nesse contexto, o GUM constitui o documento de maior relevância, tanto do ponto de vista de seu conteúdo, quanto do ponto de vista do seu significado e de sua fortuna crítica.

A situação dos debates que ocorrem na atualidade sobre incerteza, erro e temas correlatos é fortemente dependente dos caminhos que a metrologia tomou no século XX. Por isso, na primeira seção (3.1) desse capítulo, vamos dar prosseguimento ao enfoque histórico e conceitual centrado na questão dos erros e incertezas de medição que realizamos na seção 2.3. Avaliamos que a apresentação desses desenvolvimentos, para além do interesse próprio que podem despertar, é útil para compreendermos os problemas relacionados ao conceito de incerteza de medição.

A publicação do **GUM** (1993) representa um dos marcos mais relevantes na história da metrologia. A partir de sua publicação e disseminação, o documento passou a ser a principal referência para estimativa e expressão da incerteza de medição. Apesar da reconhecida importância, o guia tem sido objeto de muita discussão. Vários dos seus conceitos e de aspectos de sua metodologia vêm sendo questionados. Na seção 3.2, vamos apresentar as principais características do guia e seus pontos mais polêmicos. Em seguida (seção 3.3), vamos discutir o significado da mudança de abordagem de erro para incerteza proposto pelo GUM. Essa discussão passa pela problematização de alguns conceitos (como valor verdadeiro e incerteza definicional) e leva às questões da qualidade da medição e das perspectivas filosóficas influentes na metrologia.

3.1 Antecedentes do GUM

Entendemos que as propostas conceituais do GUM são mais bem compreendidas sob o pano de fundo do tratamento que alguns temas receberam antes de sua publicação. Primeiramente, discutimos o modo como alguns conceitos-chave para o GUM foram tratados antes da publicação do guia, principalmente o conceito de valor verdadeiro de uma grandeza e o problema da definição do mensurando. Em seguida, tratamos do problema da combinação de erros aleatórios e sistemáticos, do modo como foi enfrentado antes da publicação do GUM. Por fim, acompanhamos as iniciativas que redundaram na elaboração e publicação do guia.

3.1.1 Valor verdadeiro e definição do mensurando

O conceito de valor verdadeiro (**VV**) de uma grandeza é tão recorrente quanto controverso na metrologia. Por trazer no próprio termo a ideia de que seu valor corresponde à “verdade”, é muitas vezes apontado como problemático, sendo que alguns sugerem outros termos para designá-lo. Por outro lado, muitos especialistas em medição sustentam que o conceito é fundamental para a área. Algumas considerações que foram feitas sobre o VV antes da publicação do guia serão úteis para a discussão de seu status atual.

Do ponto de vista histórico, é possível identificar em algumas obras os sinais de uma mudança gradual na concepção de medição em relação ao conceito de VV. A compreensão “clássica” da medição, prevalente nos séculos XVIII e XIX, estava mais próxima da perspectiva realista. Conforme mostramos na seção 2.2.1.2, Laplace sustentou que “o cálculo [das probabilidades] faz ver que, no caso de um **número infinito** de observações, ele [o valor médio] coincidirá com a **verdade**” (LAPLACE, 2010, p. 113; grifo nosso). Para os cientistas e filósofos da época clássica, as grandezas físicas possuíam um VV intrínseco que poderia ser aproximado com a melhoria das condições experimentais e com o aumento do número de observações. Entretanto, a bem da verdade, é preciso recusar uma imagem caricatural dos cientistas e filósofos “clássicos” como realistas ingênuos.

Sustentar que a média de um número **infinito** de observações (medições) coincide com a verdade é bem diferente de dizer que **é possível** alcançar a verdade. Para os filósofos e cientistas que sustentaram a identidade entre natureza e número, o valor verdadeiro certamente representava metafisicamente as propriedades submetidas à medição. Entretanto, para muitos outros, o conceito funcionava mais como uma **meta** a ser buscada. De fato, há

certo realismo embutido no próprio conceito de valor “verdadeiro”, mas não necessariamente um realismo tão ingênuo a ponto de sustentar a possibilidade de chegar ao valor verdadeiro. A observação que fizemos em 2.2.1.2 acerca do determinismo laplaciano vale também para o conceito de VV em Laplace. A inteligência que seria capaz de determinar o passado e o futuro a partir do conhecimento de **todas** as leis e de **todas** as condições presentes, o famoso “demônio de Laplace”, só pode ser uma inteligência **sobre-humana**. Ou seja, do ponto de vista do conhecimento humano, a previsibilidade absoluta é uma meta impossível de ser alcançada, da mesma forma que o VV só seria conhecido com um número **infinito** de observações.

O que há de mais problemático na afirmação de Laplace, que citamos no parágrafo anterior, é **desconsiderar os efeitos sistemáticos**. Se fosse possível obter a média de um número infinito de medições, eliminaríamos os erros aleatórios, mas nada poderíamos saber sobre os erros sistemáticos⁸³. Esses últimos só podem ser avaliados empregando-se outras condições de medição que incluam, ao menos, outros sistemas de medição ou diferentes procedimentos de medição. Constituem, de fato, uma séria limitação da teoria dos erros e sua abordagem exige a admissão de fatores subjetivos no tratamento matemático.

Os continuadores de Laplace no século XIX, como Todhunter (1865) e Airy (1875), mantêm o entendimento do cientista-filósofo francês tratando as grandezas físicas como propriedades que possuem um VV intrínseco que poderia ser determinado em condições ideais. Muitos trabalhos da primeira metade do século XX que desenvolveram formulações estatísticas para medições de grandezas físicas não abordaram a questão da realidade metafísica ao VV (p. ex. STUDENT, 1908; BIRGE, 1932). Uma exceção é o trabalho de Deming e Birge de 1934 que reafirma a existência e possibilidade de determinação do VV (DEMING; BIRGE, 1934).

Alguns anos mais tarde, ainda na mesma década, um outro texto de Deming, agora em parceria com Rossini, não discute a existência do VV, mas afirma que, em todo caso, **não é possível conhecer o seu valor**. Além disso, esse trabalho emprega em seu próprio título o termo **incerteza**, o que, até então, não era usual (ROSSINI; DEMING, 1939). No âmbito do artigo, o conceito de incerteza está relacionado à faixa de valores “dentro da qual se espera que caiam, com razoável certeza, **as futuras determinações** de uma dada grandeza”

⁸³ Além disso, se fizermos um número muito grande de medições ao longo do tempo, provavelmente não mediremos a mesma grandeza, devido à dependência temporal das propriedades. Abordamos o problema da estabilidade temporal das grandezas na subseção 4.3.3.2. Devo a observação contida nesta nota ao comentário feito pelo Prof. Américo Bernardes durante a defesa da tese, a quem agradeço.

(ROSSINI; DEMING, 1939, p. 440; grifo nosso). Como veremos mais à frente, essa forma de compreender a incerteza de medição, sem fazer menção ao VV, é menos realista e, ainda hoje, pouco comum de ser sustentada.

No âmbito da metrologia, na segunda metade do século XX, par e passo com a disseminação gradativa do conceito de incerteza em substituição ao conceito **ambíguo** de erro⁸⁴, reconhecia-se textualmente a impossibilidade de conhecer o VV das grandezas físicas. Conforme mencionamos no segundo capítulo (subseção 2.3.3.1), Eisenhart selecionou textos de seu colega de NBS, N. Ernest Dorsey, e os publicou em um artigo em 1953. Dorsey denomina o valor real da grandeza de “*quaesitum*”, palavra de origem latina que significa “aquilo que se busca”, “o objetivo”, “a finalidade”⁸⁵. Segundo Dorsey, “nenhuma investigação pode estabelecer um valor único para o *quaesitum*, mas apenas uma faixa de valores centrados num único valor” (DORSEY; EISENHART, 1953, p. 51). Dorsey esclarece que a teoria dos erros sustenta que a média das medições de uma grandeza “se aproxima de um valor definido conforme o número de medições é indefinidamente aumentado” e que, na teoria, essa “média limite é frequentemente chamada de valor ‘verdadeiro’” (DORSEY; EISENHART, 1953, p. 49). Mas o metrologista alerta que a média estável obtida na medição de uma grandeza “não tem nenhuma relação necessária com o verdadeiro *quaesitum*, com o real valor da grandeza que o observador deseja medir”. Por isso, Dorsey prefere chamá-la de “média limite”, ao invés de VV (DORSEY; EISENHART, 1953, p. 49). A **média limite** pode não coincidir com o *quaesitum* devido aos erros sistemáticos que são característicos do sistema de medição empregado.

As considerações de Dorsey chamam atenção para a confusão que pode advir do fato de a teoria dos erros chamar a média limite de VV. Elas antecipam uma posição que, como vamos mostrar, reaparece em vários pesquisadores: a de denominar o valor “real” da grandeza de “**valor alvo**”. Embora tenha sustentado que não é possível determinar um valor único para a grandeza que se pretende medir e que não é possível conhecer o valor do *quaesitum*, Dorsey não coloca em dúvida a existência desse valor. De fato, afirma que o “*quaesitum* pode cair em qualquer lugar dentro da faixa” de incerteza (DORSEY; EISENHART, 1953, p. 51), o que indica sua crença na real existência desse valor.

Eisenhart, em um influente artigo de 1963, trabalha com o conceito de VV em virtude desse estar vinculado aos importantes conceitos de erro e de exatidão de medição. Porém

⁸⁴ Abordamos essa ambiguidade nos comentários finais do segundo capítulo (seção 2.4).

⁸⁵ Conforme o dicionário Merriam-Webster disponível on-line em <https://www.merriam-webster.com/dictionary/quaesitum> (acessado em novembro de 2021).

ressalta que “valor alvo” (*target value*) seria um termo mais adequado do que VV. O metrologista mostra que **o VV é dependente da definição da grandeza** e essa, por sua vez, é fornecida em função do objetivo da medição. Daí o termo **valor alvo** ser mais apropriado, pois está ligado à finalidade da medição, “sem qualquer implicação que ele [o valor alvo] seja algum tipo de constante permanente e pré-existente que transcenda o uso que possamos ter para ele” (EISENHART, 1963, p. 171).

Através de exemplos nos campos da metrologia dimensional e de massa, Eisenhart apresenta, em detalhes, as dificuldades na definição dos mensurandos, indicando como a necessidade de especificação minuciosa cresce indefinidamente conforme aumenta a exatidão requerida (EISENHART, 1963, p. 170-1). O autor salienta também que o VV de uma magnitude de uma grandeza “é ordinariamente desconhecido e desconhecível” (EISENHART, 1963, p. 162) e que é “definido pela concordância entre experts sobre um *método exemplar* para a medição de sua magnitude” (EISENHART, 1963, p. 170; grifo do autor). Dessa forma, fica patente o caráter **convencional** que Eisenhart atribui ao VV. Fica claro também que, desde meados do século XX, os metrologistas apontavam a necessidade de um conceito como o de “valor alvo”, mas que sua defesa não implicava em compromissos realistas de cunho metafísico.

A discussão sobre o conceito de VV e da definição do mensurando antes da publicação do GUM representa apenas o começo de uma polêmica que ainda não terminou. Na seção 3.1.5, retomamos essa discussão no quadro conceitual estabelecido após a publicação do guia. O tratamento que esses conceitos tiveram bem antes da elaboração do GUM indica que muitas das perspectivas adotadas pelo guia são tributárias de estudos e debates que aconteceram durante o século XX.

3.1.2 Combinação dos erros aleatório e sistemático

Vimos pelas discussões das últimas seções do segundo capítulo que, no final da década de 1970, o problema dos erros de medição já havia sido intensamente trabalhado e formulações matemáticas para a estimativa de erros aleatórios e sistemáticos haviam sido desenvolvidas. Também vimos que havia, por um lado, uma grande necessidade e um grande interesse pela harmonização das práticas, mas, por outro lado, muita divergência entre os cientistas, entre os estatísticos e entre os metrologistas. As principais divergências diziam respeito ao modo como o erro sistemático deveria ser estimado e se os erros aleatório e sistemático deviam ser combinados ou não. Obviamente, os partidários da combinação dos

dois tipos de erro também tinham que entrar em um acordo sobre como a combinação seria feita.

A seguir, mostramos alguns dos argumentos que foram levantados sobre a questão da combinação dos tipos de incerteza para fornecer um esboço da situação no final da década de 1970. O agudo desenvolvimento da abordagem bayesiana das probabilidades também oferecia alternativas à tradicional estatística frequentista de estimativa dos erros, mas a essa época a estatística bayesiana encontrava menos ressonância nos meios da metrologia.

Em artigos publicados nas décadas de 1960 e 1970 (EISENHART 1963 e 1968; KU, 1968), depois reunidos em um único volume (*NBS Special Publication 300*, KU (Ed.), 1969), metrologistas e estatísticos do NBS sustentaram repetidas vezes que, uma vez determinados o erro aleatório total e o erro sistemático total de uma medição, esses deveriam ser expressos **separadamente**. O artigo de Eisenhart, publicado na revista *Science* em 1968, é o mais influente, pois é, ao mesmo tempo, abrangente e conciso. Nele, o pesquisador propõe quatro formas diferentes de expressar os erros em função de seus tamanhos: (i) erro sistemático e imprecisão desprezáveis⁸⁶ (ou insignificantes); (ii) erro sistemático não desprezável e imprecisão desprezável; (iii) nem o erro sistemático, nem a imprecisão, desprezáveis; e (iv) erro sistemático desprezável e imprecisão não desprezável (EISENHART, 1968, p. 1202-4). No artigo, Eisenhart apresenta recomendações sobre a expressão das incertezas de medição, que depois foram reafirmadas por Ku (1968).

Merece destaque a ênfase dos pesquisadores na necessidade de o metrologista fornecer um conjunto de informações indispensáveis para a boa prática. Nesse intuito, é que Eisenhart e Ku sustentaram que os valores de erros deveriam ser relatados separadamente, no caso de ambos serem não desprezáveis. Ou seja, esses valores **não deveriam ser combinados** para fornecer um valor único de incerteza. Isso porque entendiam que o relato de um único valor podia acarretar perda de informação. Especialmente o artigo de Ku, que descreve o trabalho de calibração como “uma sequência de operações que resulta na coleta, armazenamento e transmissão de informações”, insiste em que a “excessiva simplificação” na declaração da incerteza pode resultar em “desperdício de esforço e de recursos” (KU, 1968, 73).

Entretanto, as discussões que aconteceram a nível internacional, no final dos anos 1970 e início da década de 1980, levaram o BIPM a adotar a chamada “abordagem do PTB” que propunha métodos para a combinação dos erros. As bases da metodologia que veio a ser adotada pelo GUM foram propostas no artigo de Wagner (1979). Não vamos discutir aqui em

⁸⁶ Em metrologia, usa-se preferencialmente, o adjetivo “desprezável” ao invés daquele comumente empregado “desprezível”.

detalhes o referido artigo porque na próxima subseção vamos descrever o método do GUM que possui muitos pontos em comum. A ideia básica era tratar todas as fontes de erro como **formalmente** aleatórias e quantificáveis em termos de **desvios-padrão**. Desse modo, todas as componentes podiam ser quadraticamente somadas de acordo com a consagrada “propagação” da teoria estatística dos erros (WAGNER, 1979, p. 87-8).

Como a combinação dos erros para fornecer um valor de global de incerteza acabou por se tornar a tendência dominante no cenário internacional, os pesquisadores do NBS que haviam defendido que os erros aleatório e sistemático não deviam ser combinados sentiram a necessidade de atualizar sua posição. Foi com essa intenção que, em 1980, Eisenhart e Collé publicaram um *postscript* aos artigos reunidos na edição especial nº 300 do NBS (KU, 1969).

No documento, os autores reafirmam que os conteúdos dos artigos permanecem válidos, mas podem ser complementados com alguns comentários. A complementação se dá pelo reconhecimento de que, em algumas situações, a estimativa de um valor único de incerteza pode ser útil. Os autores revisam as diversas maneiras de combinar os erros, inclusive aquela da “abordagem do PTB” contida no artigo de Wagner. Porém, frisam ao longo do *postscript* e, principalmente, ao final, que a expressão do valor único de incerteza pode significar uma simplificação excessiva. Por isso, segundo Eisenhart e Collé, o metrologista deve ter como objetivo fornecer a maior quantidade de informação possível sobre a incerteza relatada de uma medição. Em letras maiúsculas, em negrito, eles expressam os princípios para maximizar as informações pertinentes: “**SEJA EXPLÍCITO**”, “**FORNEÇA DETALHES**” e “**NÃO SIMPLIFIQUE EM EXCESSO**” (EISENHART; COLLÉ, 1980).

Nosso objetivo ao reportar as controvérsias em torno do tratamento matemático e conceitual dos erros de medição não é o de apontar, do ponto de vista da metrologia contemporânea, as virtudes e os equívocos das propostas. Nosso objetivo é duplo. Por um lado, consiste em identificar os conceitos que estavam “em jogo” quando o BIPM buscou harmonizar a estimativa e a expressão da incerteza. Acreditamos que esse quadro diz algo sobre a **centralidade** e as **implicações** do conceito de incerteza de medição na estrutura conceitual da metrologia. Por outro lado, visamos regatar algumas preocupações que pautaram as discussões na segunda metade do século XX e que, agora, são ainda mais pertinentes. Afinal de contas, o sucesso da harmonização depende também de que a expressão da incerteza cumpra sua finalidade **informacional**. Nesse sentido, a expressão do valor único de incerteza (que combina as contribuições dos erros aleatório e sistemático) pode, sim, implicar perda de informação. Em muitas situações, a planilha ou balanço de incertezas

(*uncertainty budget*) fornece as informações mais importantes, mas, quando a planilha não é divulgada, pode-se incorrer em simplificação excessiva. No entanto, a expressão de um valor único de incerteza também comporta aspectos positivos relevantes, apontados na seção 3.1.3.

3.1.3 Origem do GUM

Mais importante que as divergências sobre as metodologias para estimar erros de medição na comunidade científica, era o interesse, dessa mesma comunidade, em estabelecer conceitos e práticas que facilitassem as atividades relacionadas à medição e à comunicação entre seus pares. A falta de harmonização e de normatização sobre nomenclatura, conceitos e metodologias para estimar os erros de medição fez com que fosse comum, durante o século XX, a publicação de trabalhos que buscavam rever, sistematizar e assentar as bases conceituais e matemáticas para estimar erros e incertezas. A revisão bibliográfica comentada de publicações sobre o tema da **exatidão**, que mencionamos na seção 2.3.1.2, realizada entre 1973 e 1983 pela IUPAC, identificou mais de 150 textos sobre o assunto (CALI; MARSH, 1983). No contexto do artigo de revisão, a exatidão está relacionada aos erros e incertezas de medição. Essa publicação é um testemunho da variedade de abordagens e da necessidade de estabelecer consensos sobre a questão da exatidão.

Assim, na segunda metade do século XX, havia grande anseio na comunidade científica pela **harmonização da metodologia de estimativa da incerteza da medição** e pela **harmonização da expressão do resultado da medição**. Esse anseio se devia também a diferenças no emprego de termos e conceitos metrológicos. Um dos problemas era a confusão entre os conceitos de **erro** e de **incerteza**. Numa carta endereçada ao jornal científico editado pelo BIPM, *Metrologia*, em 1973, pesquisadores do laboratório inglês NPL chamavam atenção para a confusão entre os conceitos da seguinte forma:

Na literatura científica a palavra *erro* é frequentemente usada em dois sentidos bem diferentes: é algumas vezes usada para denotar o desvio de um resultado do valor verdadeiro ou padrão, enquanto outras vezes é usado para denotar a incerteza em um resultado (BURNS; CAMPION; WILLIAMS, 1973, p. 101).

Para evitar confusões, os pesquisadores sugeriram que o termo “erro” fosse empregado somente para expressar o valor do **desvio** de um resultado em relação a um valor verdadeiro ou padrão do mensurando. Isso significa que o termo “erro” não deveria ser usado para denotar a estimativa da **dispersão** de valores obtidos em medições repetidas do mesmo

mensurando, como vinha sendo tradicionalmente feito pela teoria dos erros. Para a estimativa dos efeitos aleatórios e sistemáticos (que não podem ser corrigidos), os signatários da carta sugeriram denominá-los, respectivamente, de **incerteza aleatória** e **incerteza sistemática**.

Mas a preocupação dos pesquisadores não se restringiu à terminologia, eles também sublinharam a existência de, pelo menos, duas maneiras de tratar a incerteza aleatória de um resultado de medição quando esse é empregado em medições subsequentes. A incerteza aleatória do primeiro resultado podia ser tomada como sistemática ou ser combinada com a incerteza aleatória da medição subsequente (BURNS; CAMPION; WILLIAMS, 1973, p. 101-2). Ou seja, a preocupação dos metrologistas do NPL, em consonância com a comunidade metrológica da segunda metade do século XX, era com a harmonização dos conceitos e das práticas. A falta de regras comuns comprometia muitas das atividades metrológicas, principalmente uma das mais importantes: a comparação entre resultados de medição por diferentes laboratórios. As iniciativas que acompanhamos a seguir visaram suprir essas deficiências.

3.1.3.1 O grupo trabalho do BIPM

O relatório anual de 1977 do CIPM registra o recebimento pela direção do BIPM de uma carta enviada pelo então diretor do NBS, Ernest Ambler, chamando atenção para o “problema complexo [...] das incertezas e do modo como se deve exprimir os resultados das medições” (CIPM, 1977, p. 15). Reconhecendo a dificuldade que essa questão comportava, “que ainda não havia sido resolvida em nenhum país”, e sua importância, o relatório da CIPM assinala que, seguindo a sugestão de Ambler, o BIPM havia criado um grupo de trabalho para estudar o problema “muito vasto” dos erros de medição (CIPM, 1977, p. 15-6). É interessante destacar que, na carta que enviou ao BIPM, Ambler sublinhava que as resoluções do grupo deveriam ser pensadas de modo a favorecer o consenso internacional e “evitar tanto quanto possível as **discussões filosóficas** sobre a teoria estatística” (AMBLER, 1977 apud GRÉGIS, 2016, p. 321; grifo nosso). Se, por um lado, é compreensível a preocupação com a possibilidade de haver longas discussões improdutivas no grupo de trabalho, por outro lado, a menção a “discussões filosóficas” expressa certo pré-conceito com debates conceituais que muitas vezes são imprescindíveis. O fato de se referir especificamente a discussões sobre a teoria estatística indica que Ambler estava preocupado com a acirrada disputa entre frequentistas e bayesianos que poderia impedir consensos.

O relatório da CIPM do ano seguinte assinala que o grupo de estudos havia elaborado e enviado aos grandes laboratórios de metrologia “um questionário sobre a avaliação e a expressão das incertezas de medição” que suscitou “grande interesse”. E também que “[A]s opiniões tornam-se muito divergentes quando se busca caracterizar a incerteza global por um único número (CIPM, 1978, p. 10). O questionário continha oito questões sobre a metodologia de estimativa e expressão de incertezas de medição e breves esclarecimentos sobre os conceitos envolvidos em cada questão.

Baseado nas respostas enviadas pelos grandes laboratórios, o grupo de trabalho publicou, em 1980, um relatório que serviu de base para o esforço conjunto por diretrizes comuns da avaliação e expressão de incertezas de medição (BIPM, 1980). Muitas das questões que foram debatidas nas décadas seguintes encontram-se formuladas no relatório, seja pelo próprio grupo de trabalho, seja nas respostas de quatro laboratórios nacionais anexadas ao documento. A questão da terminologia foi levantada novamente pelos pesquisadores do NPL na resposta que enviaram ao grupo de trabalho. Nas considerações preliminares acerca da distinção entre erros e incertezas, o laboratório inglês argumentou que, quando conceitos científicos são nomeados por palavras existentes na língua, é desejável que seus sentidos na ciência não difiram muito dos sentidos comuns daquelas palavras. O documento prossegue, da seguinte forma, distinguindo os sentidos de “erro” e de “incerteza”:

Assim, em seu uso normal no inglês a palavra “erro” [*error*] é mais ou menos sinônimo de “engano, incorreção, diferença, desacordo, discrepância” [*mistake, wrong, difference, disagreement, discrepancy*]; enquanto a palavra “incerteza” [*uncertainty*] é mais ou menos sinônimo de “dúvida, vagueza, indeterminação, ignorância, conhecimento imperfeito” [*doubt, vagueness, indeterminacy, ignorance, imperfect knowledge*]. Na simples teoria experimental, portanto, o erro de uma medição é a diferença entre o valor medido e o valor verdadeiro da grandeza que está sendo medida. A incerteza é a dúvida que é expressa sobre a exatidão [*accuracy*] de uma medição, i. e., a faixa dentro da qual pensa-se que o valor verdadeiro repouse (BIPM, 1980, Apêndice V).

Como as raízes dos procedimentos de estimativa da **dispersão** de valores obtidos em medições remontam à teoria dos erros clássica, o termo “erro” se estabeleceu no linguajar científico, como observamos na seção 2.4. Até hoje, os termos “erro” e “incerteza” são usados como sinônimos em muitas publicações, mas a inadequação do termo “erro” já havia sido reconhecida por Airy no século XIX (AIRY, [1875] 1975, p. 4).

Em sua resposta ao questionário do BIPM, o laboratório inglês não se limitou a apontar questões terminológicas. Na sequência da citação acima, os pesquisadores do NPL ressaltam que, uma vez que o valor verdadeiro de uma grandeza é **desconhecido** ou **desconhecível** (e, por isso, o erro de medição também o é), a “discussão sobre erros é,

portanto, usualmente improdutiva” (BIPM, 1980, Apêndice V). Além disso, prossegue o documento, na maioria das vezes em que se discute sobre “erros”, o que de fato está em causa são **incertezas**. As observações do NPL apontam que a necessidade não era apenas de alteração nos termos, mas que exigia também uma **mudança conceitual**: enquanto o conceito de erro remete, de forma problemática, ao VV, o conceito de incerteza fornece um parâmetro associado à qualidade da medição e aos conhecimentos empregados naquele processo.

Reconhecendo a dificuldade de categorização dos diferentes tipos de incerteza envolvidos, ainda na resposta ao questionário, o laboratório inglês sugere que as fontes de incerteza deveriam ser categorizadas nos tipos (a), estimadas por métodos estatísticos a partir de valores obtidos em medições repetidas, e (b), estimadas por métodos não estatísticos. Essa categorização visava substituir a tradicional divisão entre erros aleatórios e sistemáticos, bem como aquela proposta pelo próprio NPL em 1973 entre incertezas aleatórias e sistemáticas (BIPM, 1980, Apêndice V). A categorização em incertezas tipo A e tipo B veio a ser recomendada pelo BIPM, depois adotada pelo GUM e hoje largamente assimilada e empregada pela comunidade metrológica.

Numa espécie de justificativa em face da preocupação expressa por Ambler com “discussões filosóficas” (na mencionada carta ao BIPM), o laboratório inglês ressaltou também que a discussão que embasava sua proposta podia parecer “**altamente filosófica**”, mas não era. O objetivo da discussão era “fornecer fundações práticas firmes sobre as quais uma superestrutura de regras e recomendações pudesse ser construída”. Para o NPL, era inevitável que o grupo de estudos sobre incerteza tivesse antes que gastar algum tempo para entrar em acordo sobre os conceitos básicos (BIPM, 1980, Apêndice V). É bastante compreensível que os cientistas envolvidos na laboriosa construção de consenso em torno de um tema sujeito a muitas perspectivas divergentes estivessem preocupados com longas discussões improdutivas – qualquer indivíduo que tenha passado por infortúnio semelhante há de concordar com essa preocupação. Porém, não deixa de ser curiosa a prevenção contra discussões filosóficas, isto é, conceituais, em um terreno que carecia sobretudo de bases conceituais bem estabelecidas. Como veremos mais adiante, a falta de rigor conceitual pode ser apontada como um dos fatores que fragiliza a estrutura conceitual da metrologia.

No corpo do relatório, o grupo de estudo do BIPM buscou sumarizar as respostas recebidas dos laboratórios. O já conhecido dissenso em relação a muitas das questões relativas ao tema das incertezas ficou ainda mais claro frente à disparidade das respostas recebidas. Na conclusão, o grupo se esforçou para expressar um otimismo baseado na impressão de que os laboratórios estariam “esperando por propostas sensatas [*sound*]” e que isso favoreceria algum

acordo que fosse “aceitável para uma larga maioria” (BIPM, 1980, p. 13). A conclusão do relatório finda com as seguintes considerações:

Ninguém espera que a tarefa de alinhar posições divergentes seja uma matéria fácil e rápida. Ao contrário, somos confrontados com um processo difícil e possivelmente longo, mas a perspectiva de chegar finalmente a algo que seja mais claro, mais útil e de acordo geral faz a tentativa valer a pena e ser desafiante (BIPM, 1980, p. 13).

Sem dúvida, como a própria conclusão do relatório também ressaltou, somente o fato de reunir as respostas de quase todos os laboratórios nacionais já constituía um notável avanço alcançado pelo grupo de estudo. O passo seguinte foi mais rápido do que se poderia esperar frente às conclusões do relatório. Ainda no mesmo ano, baseado nas respostas dadas ao questionário, o grupo de trabalho elaborou uma recomendação internacional que foi submetida à CIPM do ano seguinte (1981) e aprovada.

A “**Recomendação INC-1 (1980)**”, como foi nomeada, continha cinco breves recomendações, que resumidamente, propunham: (1) a categorização das fontes de incerteza segundo o método matemático empregado para estimá-las (Tipo A – obtidas por métodos estatísticos e Tipo B – avaliadas por outros meios); (2) os componentes do Tipo A devem ser avaliados em termos de suas variâncias; (3) os componentes do Tipo B também podem ser considerados, por aproximação, como variâncias (cujas existências devem ser supostas); (4) a incerteza combinada pode ser obtida pelo método usual de combinação de variâncias; e (5) se “for necessário multiplicar a incerteza combinada por um fator para obter uma incerteza global, o valor do fator multiplicador deve ser sempre declarado” (GIACOMO⁸⁷, 1981).

Seja pela novidade das recomendações propostas, seja pela falta de detalhamento dessas, o documento do BIPM conheceu pouca adesão nos anos seguintes. Mas sua publicação foi importante para forjar as bases de um documento mais detalhado e mais influente. O relatório da CIPM de 1984 sublinhou a necessidade de publicar um documento que fornecesse detalhes da metodologia e que confirmasse as recomendações em vigor (CIPM, 1984, p. 24-5). O passo seguinte foi formar um novo grupo de trabalho para redigir um guia para estimativa e expressão da incerteza de medição.

3.1.3.2 A elaboração do GUM

⁸⁷ O artigo citado se refere à publicação original em inglês. Primeiramente, a “Recomendação INC-1 (1980)” foi publicada em francês no relatório anual da CIPM de 1981. Uma reprodução do texto da recomendação pode ser encontrada nas edições do GUM (INMETRO, 2012a, p. x).

A responsabilidade pela redação de um documento detalhado baseado na “Recomendação INC-1 (1980)” foi repassada pelo BIPM à *International Standardization Organization (ISO)* que “poderia melhor refletir as necessidades oriundas dos amplos interesses da indústria e do comércio” (INMETRO, 2012a, p. viii). Essa justificativa deixa claro que o problema da expressão de incertezas não era apenas científico, mas que envolvia as esferas práticas da indústria e do comércio. Por outro lado, os objetivos estabelecidos para a redação do documento mencionavam a melhoria na informação que se passa com a expressão da incerteza e o propósito de “fornecer as bases para a comparação internacional de resultados de medição” (INMETRO, 2012a, p. viii).

A tarefa foi desenvolvida, no âmbito da ISO, pelo grupo de trabalho (ISO/TAG4/WG3) criado para a mencionada finalidade. O grupo reunia representantes de diversas organizações⁸⁸ e de laboratórios nacionais de metrologia, mas o processo de redação do documento não progrediu muito durante os anos 1980. Somente no início dos anos 1990, com a submissão por seus membros de rascunhos do documento é que o trabalho avançou até a definição do texto final. Em paralelo ao trabalho do ISO/TAG4/WG3, pesquisadores do NIST elaboraram uma nota técnica com as diretrizes para avaliar e expressar a incerteza dos resultados de medição, publicada em janeiro de 1993 (TAYLOR; KUYATT, 1994 [1993]). Esse documento, ao mesmo tempo que se beneficiou das discussões travadas no grupo ISO/TAG4/WG3, serviu de base para a rascunho do GUM. Ainda no mesmo ano da publicação do documento do NIST, o GUM foi aprovado e publicado pela ISO, tendo sido ligeiramente revisado e republicado em 1995⁸⁹.

Para chegar ao “consenso” a respeito da estrutura conceitual do guia, os cientistas envolvidos na discussão tiveram que superar algumas divergências, dentre elas a questão de expressar a incerteza por **valor único**, que já havia aparecido na recomendação do grupo de trabalho de 1980 (GRÉGIS, 2016, p. 329-31). Como vimos na seção 3.1.1., nas décadas de 1960 a 1980, vários estatísticos do NBS, como Eisenhart e Ku, haviam defendido a necessidade de manter separados os valores de incerteza obtidos para os efeitos aleatórios e sistemáticos. A manutenção da recomendação publicada em 1980 pela expressão do valor único de incerteza foi defendida também por metrologistas do laboratório nacional de

⁸⁸ A maioria das quais veio a compor o JCGM, cuja composição apresentamos na nota 4 da subseção 1.1.2.1.

⁸⁹ O processo de elaboração do GUM foi discutido por Fabien Grégis no capítulo 12 de sua tese de doutorado defendida em 2016. Além dos documentos públicos oficiais consultados, Grégis se beneficiou de depoimentos de cientistas envolvidos na produção coletiva do GUM, como Barry Taylor, Wolfgang Wöger, Charles Ehrlich e Walter Bich (GRÉGIS, 2016, p. 319-33).

metrologia estadunidense (a partir de 1988, denominado NIST), como Ernest Ambler e Barry Taylor (GRÉGIS, 2016, p. 331).

Segundo Grégis, os relatos da época indicam que a busca por consenso foi enviesada, evitando-se opiniões contraditórias. A proposta original da Recomendação INC-1 foi defendida contra as posições mais conservadoras, **nem sempre da forma mais democrática**, de modo a encurtar o caminho para a publicação do guia. Com isso, o trabalho de reflexão conceitual foi precipitado, deixando problemas que até hoje despertam controvérsias (GRÉGIS, 2016, p. 330-2).

O processo de preparação do GUM deixa claro dois pontos que continuam reverberando em polêmicas que persistem acerca do método do GUM. O primeiro deles diz respeito, grosso modo, ao conflito entre as perspectivas dos conceitos estatísticos e das necessidades da metrologia. O segundo se refere à preocupação com discussões “filosóficas” que pudessem dificultar o alcance de um consenso, expressa já na carta de Ambler que deu origem ao grupo de trabalho. Como estas duas questões perpassam o problema da estimativa e expressão de incertezas de medição de uma forma geral, serão discutidas mais adiante. A seguir vamos analisar as bases da metodologia para estimativa e expressão da incerteza de medição proposta pelo guia.

3.2 A metodologia do GUM

A elaboração do GUM se deu no contexto da colaboração internacional entre metrologistas influenciados pelos trabalhos publicados nos anos 1960 a 1980. Nessa época, conforme mostramos na seção 3.1.3, embora o conceito de erro de medição ainda fosse empregado de forma ambígua, já havia certo consenso de que o termo “incerteza” era mais adequado e que o conceito de faixa de incerteza devia ser proeminente. Na presente seção, expomos as recomendações da metodologia básica do GUM e comentamos também, de forma abreviada, as características do Suplemento 1 (3.2.1). Em seguida, discutimos aspectos relacionados à expressão da incerteza de medição e apontamos que a recomendação do guia de expressar a incerteza na forma de um único valor ressalta o papel articulador que o conceito desempenha na rede metrológica (3.2.2).

3.2.1 Metodologia básica do GUM

Todas as cinco breves recomendações publicadas em 1980 pelo grupo de trabalho em expressão de incertezas do BIPM foram integralmente preservadas no texto do GUM. Distinguir as incertezas em tipo A e tipo B com base no método matemático usado para estimá-las, seguindo a sugestão do NPL, foi uma inovação importante e assimilada sem muitas resistências. Em primeiro lugar, com o emprego dessa tipologia foi superada a ambiguidade do emprego do termo “erro”. Pode-se até falar informalmente em contribuições de erros a serem estimados, mas o termo correto é o de **incerteza**. Em segundo lugar, resolvia-se o problema de um componente de incerteza aleatória passar a ser tratado como incerteza sistemática em medições posteriores. É certo que referir-se a incertezas aleatórias e sistemáticas tinha o apelo de especificar o comportamento das componentes de incerteza. Porém, os pesquisadores do laboratório inglês já haviam apontado a questão da possibilidade da mudança do tipo de incertezas em medições subsequentes e a resposta do NBS ao questionário do BIPM também tocou na questão (BURNS; CAMPION; WILLIAMS, 1973, p. 101-2; BIPM, 1980, Apêndice II). Nomear as incertezas como Tipo A e Tipo B conferiu certa neutralidade aos componentes de incerteza, permitindo que fossem categorizados apenas no processo de medição em curso. Acima de tudo, a simplicidade da tipologia facilitou a harmonização do tratamento das fontes de incerteza.

Boa parte dos fundamentos matemáticos da metodologia do GUM já foram discutidos no segundo capítulo, então, aqui, vamos comentar as recomendações do guia procurando destacar os conceitos mais importantes. O objetivo não é reproduzir didaticamente o guia, mas apenas apresentar os conceitos relacionados à metodologia “**básica**” para que a discussão sobre os motivos e os significados de sua adoção possam ser discutidos nas seções seguintes. O que chamamos de metodologia básica do GUM é aquela exposta **no guia propriamente dito**, em contraposição ao método do Suplemento 1 que emprega a abordagem bayesiana da teoria das probabilidades.

A primeira tarefa em qualquer medição é **definir** da melhor forma possível o mensurando. Entretanto, não é possível defini-lo perfeitamente, pois a perfeição exigiria uma definição infinita. Assim, sempre haverá um componente de incerteza devido à incompletude da definição do mensurando, que o GUM chama de “incerteza intrínseca” e o VIM3 de “**incerteza definicional**”⁹⁰. Trata-se então da menor incerteza que uma medição pode ter. Por outro lado, o guia estabelece como condição para aplicação da metodologia que a “grandeza

⁹⁰ Segundo o VIM, a incerteza definicional é o “componente da incerteza de medição que resulta da quantidade finita de detalhes na definição de um mensurando” (INMETRO, 2012b, 2.27).

física seja bem definida” de modo que possamos tratar o valor do mensurando como “essencialmente único” (INMETRO, 2012a, 1.2). Discutiremos os importantes problemas relativos à incerteza definicional na seção 3.1.5. Embora não substitua a definição, o modelo da medição fornece uma ideia dela pois expressa quais grandezas afetam o valor do mensurando.

Em algumas situações, a medição do mensurando exige a determinação de valores de outras grandezas. Para o GUM, a relação entre o mensurando e as grandezas envolvidas em sua medição é mais bem caracterizada como uma **relação funcional** do tipo:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad 3.1$$

Onde Y é o mensurando (grandeza de saída) e X_1 a X_n são as outras grandezas, chamadas de grandezas de entrada que podem ser variáveis ou constantes. Estabelecer essa relação significa **modelar a medição**. Muitas vezes a relação funcional pode ser escrita através de uma equação simples, mas em algumas situações a função pode requerer relações mais complexas (INMETRO, 2012a, 4.1). Como dissemos acima, ao apresentar o modelo da medição (relação funcional), o cientista está informando quais grandezas influenciam no valor da grandeza, mas algumas condições que aparecem na definição podem não aparecer no modelo.

A relação funcional, por si só, fornece uma ideia muito útil para o levantamento das incertezas presentes no processo. Em princípio, cada grandeza envolvida na relação funcional implica em uma ou mais fontes (ou componentes⁹¹) de incerteza para a medição do mensurando. Com pode haver grandezas que influenciam na medição que não aparecem explicitamente no modelo de medição, algumas vezes, é elaborado um modelo alternativo para orientar o cálculo de incertezas. Esse inclui, artificialmente, grandezas que influenciam no resultado, mas que não aparecem na equação de cálculo da grandeza de saída⁹². Cada

⁹¹ O termo “fonte de incerteza” possui um significado relacionado à origem de incerteza, enquanto o termo “componente de incerteza” tem uma conotação mais neutra, se refere às incertezas consideradas na avaliação. Em algumas situações, o emprego de um ou de outro termo não implica em diferença significativa, mas, em outras situações, um termo pode ser mais adequado que outro e, nessas passagens, empregamos a referida distinção em favor do esclarecimento conceitual.

⁹² Podemos citar um exemplo, da área das radiações ionizantes, de grandeza que afeta o valor da grandeza de saída sem aparecer no modelo funcional. Por qualquer um dos três métodos para determinação de D_w , cujos modelos são dados na subseção 2.1.3.3 (eq. 2.1, 2.2 e 2.3), a dose é definida e, portanto, medida a uma distância de referência da fonte de radiação (em geral, 1 m). Para que a inexatidão na distância em que a dose é medida seja considerada como componente de incerteza no valor da dose, pode-se reescrever o modelo incluindo-se a dependência da distância. Também é possível incluir o componente (no exemplo, a distância) na estimativa de incerteza sem, necessariamente, incluí-la no modelo.

componente de incerteza relativa à grandeza de entrada X_i , que contribui para a incerteza global na medição da grandeza Y , é simbolizado por $u(x_i)$.

Em relação ao cálculo das incertezas Tipo A, o formalismo estatístico é a mesmo descrito na subseção 2.3.2.2 para os erros aleatórios. Como a metodologia básica do GUM adota a abordagem frequentista da teoria das probabilidades, a determinação do desvio-padrão da média é realizada pela fórmula consagrada pela teoria dos erros (equações 2.5 e 2.6). Em algumas passagens, o guia prefere se referir à **variância**, cujo valor é o quadrado do desvio-padrão⁹³. Uma vez que a componente é calculada como um desvio-padrão, é denominada **incerteza-padrão**.

Já a metodologia para a estimar as incertezas Tipo B requer o emprego de distribuições de probabilidades **a priori** (INMETRO, 2012a, 4.1.6), supostas a partir de dados obtidos antes das medições. Nesse caso, a incerteza-padrão é “avaliada por julgamento científico baseado em todas as informações disponíveis sobre a possível variabilidade” (INMETRO, 2012a, 4.3.1) da grandeza de entrada em questão. Essas informações podem incluir:

- dados de medições prévias;
- experiência com ou conhecimento geral do comportamento e das propriedades de materiais e instrumentos relevantes;
- especificações do fabricante;
- dados fornecidos em certificados de calibração e outros certificados;
- incertezas atribuídas a dados de referência extraídos de manuais (INMETRO, 2012a, 4.3.1).

Se o conhecimento disponível para um componente for apenas os limites de variação, o metrologista pode supor que aquela fonte de incerteza segue uma distribuição de probabilidade **retangular**, ou seja, está uniformemente distribuída entre os limites conhecidos. Para cada tipo de distribuição de probabilidade suposta há um formalismo matemático para a estimativa do valor da incerteza-padrão. O guia apresenta o formalismo para as distribuições retangular e triangular que são as mais frequentemente empregadas.

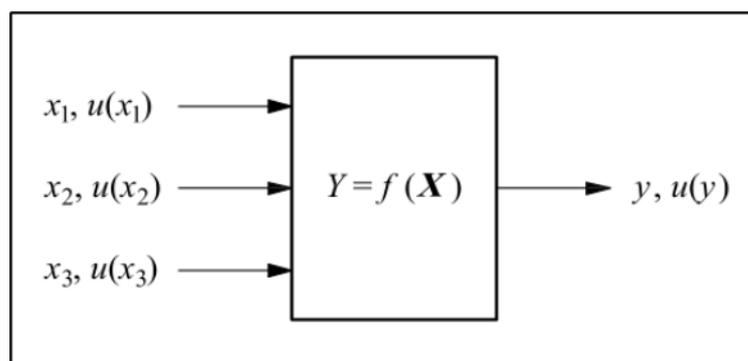
O fato de os cálculos dos diferentes tipos de incerteza empregarem abordagens de teorias das probabilidades diferentes (Tipo A – frequentista e Tipo B – distribuições a priori) constitui uma das fragilidades da metodologia básica do GUM. Segundo especialistas em estatística aplicada à metrologia, o guia “resolve essa questão declarando que as estimativas estatísticas (Tipo A) determinadas por estatística frequentista são vistas como parâmetros de

⁹³ Mais precisamente, o desvio-padrão é que é definido em função da variância, como a raiz quadrada positiva do seu valor (INMETRO, 2012a, 3.3.5).

distribuições de probabilidade referentes ao **estado do conhecimento**” (KACKER; SOMMER; KESSEL, 2007, p. 519; grifo nosso), fazendo referência ao exposto no item 4.1.6 do guia⁹⁴. Sendo as incertezas Tipo B, necessariamente, estimadas por probabilidades referentes ao **estado de conhecimento** do metrologista, o GUM teria resolvido, de modo um tanto artificial, o problema da combinação das incertezas oriundas de diferentes métodos. Como veremos adiante, outros especialistas, entretanto, seguem apontando inconsistências na metodologia básica.

A metodologia do guia para combinar as diversas componentes de incerteza, detalhes técnicos à parte, é a mesma sugerida por Siegfried Wagner (WAGNER, 1979) e às vezes denominada, nos anos 1980, “abordagem do PTB” (EISENHART; COLLÉ, 1980). Grosso modo, no caso de componentes de incerteza não correlacionadas, a combinação se dá pela soma quadrática das incertezas-padrão. A raiz quadrada dessa soma constitui a **incerteza-padrão combinada** [$u_c(y)$] que representa a incerteza de medição expressa em termos de um desvio-padrão. Na teoria dos erros convencional (frequentista), a soma quadrática dos erros é denominada de propagação dos erros; por isso, o GUM chama de propagação de incertezas essa forma de obter $u_c(y)$, algumas vezes simbolizada simplesmente por $u(y)$. Na figura 14, está representada esquematicamente a obtenção da incerteza-padrão combinada para o valor obtido da grandeza de saída (y) a partir das incertezas-padrão de três grandezas de entrada (x_i).

Figura 14 – Ilustração da lei de propagação de incertezas para $N=3$ grandezas de entrada independentes



Nota: A partir das incertezas-padrão das grandezas de entrada (x_i), obtém-se a incerteza-padrão da grandeza de saída (y).

Fonte: INMETRO, 2020, Figura 3.

⁹⁴ Textualmente: “Deve-se reconhecer que em ambos os casos [estimativas de incerteza do Tipo A e do Tipo B] as distribuições são modelos utilizados para representar o estágio de nosso conhecimento” (INMETRO, 2012a).

Uma vez que a cada componente de incerteza é atribuída uma distribuição de probabilidade, a combinação dos componentes envolve a combinação das distribuições, num processo denominado **convolução**. Se todas as distribuições combinadas forem do tipo normal, a resultante também será uma distribuição normal. Uma propriedade útil desse processo é que mesmo que as distribuições dos componentes não sejam normais, a distribuição da incerteza-padrão combinada pode, em geral, ser aproximada por uma distribuição normal. Essa propriedade se deve ao Teorema Central do Limite (INMETRO, 2012a, G2).

Embora $u_c(y)$ possa ser usada para expressar a incerteza de um resultado de medição, em algumas situações, pode ser necessário fornecer um valor de incerteza “que defina um intervalo [...] com o qual se espera abranger uma extensa fração da distribuição de valores que poderiam ser razoavelmente atribuídos ao mensurando” (INMETRO, 2012a, 6.1.2). Essa necessidade é suprida com o conceito de **incerteza expandida**, U , que é obtida pela multiplicação de $u_c(y)$ por um fator de abrangência, k . Portanto: $U = k \cdot u_c(y)$. Assim, pode-se expressar o resultado da medição do mensurando (Y) como uma faixa ampliada de valores em torno do valor do mensurando (y) desta forma: $Y = y \pm U$. O guia afirma que a expressão da incerteza expandida é necessária em “aplicações comerciais, industriais e regulamentadoras, e quando a saúde e a segurança estão em questão” (INMETRO, 2012a, 6.1.2). Entretanto, a incerteza expandida é muitas vezes empregada em metrologia, inclusive em comparações de alto nível promovidas pelo BIPM.

A escolha do fator k depende da probabilidade (p), associada à confiança com a qual se deseja expressar o resultado da medição. Nessa questão, o guia teve de enfrentar outro desafio conceitual relacionado à teoria da probabilidade. Os conceitos estatísticos de intervalo de confiança e de nível de confiança, conforme apresentamos na seção 2.3.2.2, estão relacionados à obtenção de uma distribuição de probabilidade por meios estatísticos, ou seja, às incertezas Tipo A. Como $u_c(y)$ é também composta por incertezas Tipo B, aqueles conceitos não podem ser aplicados diretamente. Para superar esse problema, são recomendados conceitos semelhantes elaborados especialmente para a metodologia básica do GUM. Ao invés de nível de confiança (*confidence level*), fala-se de **nível da confiança** (*level of confidence*) associado a um intervalo definido por $y \pm k \cdot u_c(y) = y \pm U$.

Mais especificamente, U é interpretado como definindo um intervalo em torno do resultado de medição que abrange uma extensa fração p da distribuição de probabilidade caracterizada por aquele resultado e sua incerteza-padrão combinada, sendo p a *probabilidade de abrangência* ou *nível da confiança* do intervalo (INMETRO, 2012a, 6.2.6; grifo do próprio guia).

O Anexo G do GUM descreve uma metodologia para determinar aproximadamente o fator de abrangência a partir do número de graus efetivos de liberdade (v_{eff}) fornecidos pelos dados obtidos para as grandezas de entrada (INMETRO, 2012a, G.4). A referida metodologia lança mão da relação entre a fração p de probabilidade, os graus de liberdade e as distribuições- t desenvolvidas por Gosset, mencionadas nas subseções 2.2.1.5. e 2.3.2.2. Para situações em que se possa considerar a incerteza-padrão combinada como tendo uma distribuição normal, pode-se adotar $k = 2$ para um nível da confiança de aproximadamente 95 % ou $k = 3$ para um nível da confiança de aproximadamente 99 % (INMETRO, 2012a, 6.3.3; G.6.6).

Para o estatístico do NIST Raghu Kacker, embora a metodologia baseada na abordagem frequentista seja consistente, a conexão entre graus de liberdade e nível da confiança proposta no Anexo G é inconsistente. “*O GUM essencial é o GUM excluindo o Anexo G e todas as discussões ligando-o com o restante do GUM*” (KACKER, 2018, p. 527; grifos do autor). Essa é apenas uma das muitas polêmicas acerca da aplicação da teoria das probabilidades no guia, polêmicas que vamos discutir mais à frente. Também tratamos do artigo citado de Kacker na seção 3.1.5. pois ele aborda o problema do conceito de VV que está intimamente relacionado com a mudança de abordagem promovida pelo GUM.

Para não alargar demasiadamente o foco dessa tese, restringimos seu escopo ao GUM propriamente dito, deixando de lado os suplementos do guia⁹⁵. Entretanto, tendo em vista que as controvérsias suscitadas pelo guia, em sua maioria, giram em torno de conceitos estatísticos, vale a pena comentar em algumas linhas a metodologia alternativa proposta pelo **Suplemento 1**.

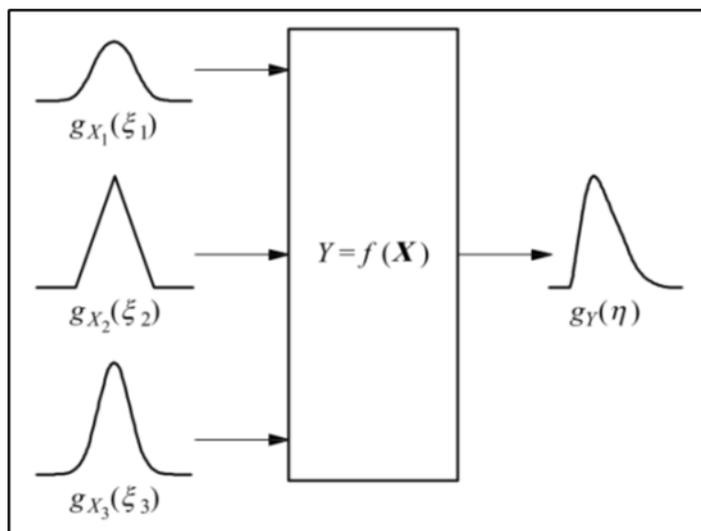
Quando o modelo de medição não é linear ou quando a distribuição de probabilidade da grandeza de saída se afasta da distribuição gaussiana ou de uma distribuição- t , o método básico do GUM pode resultar em valores de incerteza-padrão não confiáveis ou em intervalos de abrangência irrealistas (INMETRO, 2020, p. 6). Para disponibilizar um método que evitasse esses problemas, o JCGM lançou em 2008 o primeiro suplemento ao GUM básico, com uma metodologia totalmente fundamentada na estatística bayesiana. Os cálculos da

⁹⁵ Os suplementos e documentos adicionais ao guia já publicados, com suas codificações e títulos originais, são: JCGM 101:2008 *Supplement 1 – Propagation of distributions using a Monte Carlo method*; JCGM 102:2011 *Supplement 2 – Extension to any number of output quantity*; JCGM:2009; JCGM 104:2009 *An introduction to the “GUM” and related documents*; JCGM 106:2012 *Evaluation of measurement data – The role of measurement uncertainty in conformity assessment*; JCGM GUM-6:2020 *Guide to the expression to the uncertainty in measurement – Part 6: Developing and using measurement models*. Quando citamos em nosso texto o Suplemento 1, fazemos referência à edição brasileira da tradução para português: INMETRO, 2020.

propagação das distribuições de probabilidade atribuídas às grandezas de entrada têm que ser realizados por meio de computação numérica, empregando o método de Monte Carlo (MMC).

As três etapas principais no método do Suplemento 1 são a **formulação**, a **propagação** e a **obtenção dos resultados** a partir da distribuição calculada. Na formulação, a partir da definição do mensurando, desenvolve-se o modelo de medição [$Y = f(X)$] e atribui-se uma função de densidade de probabilidade (**PDF**⁹⁶) para cada grandeza de entrada (X_i). As PDFs atribuídas às grandezas de entrada podem ser gaussianas, retangulares ou outras mais apropriadas. Propaga-se, então, as PDFs das grandezas de entrada (X_i), utilizando-se o MMC, para calcular a PDF da grandeza de saída (Y). Dessa última, pode-se obter a esperança y que serve como estimativa de Y , o desvio-padrão que é a incerteza-padrão [$u(y)$] e o intervalo de abrangência de Y com uma probabilidade especificada (INMETRO, 2020, p. 20). A figura 15 ilustra o processo de propagação das distribuições das grandezas de entrada para calcular pelo MMC a distribuição da grandeza de saída, da qual são obtidos a estimativa do valor da grandeza, o desvio-padrão e o intervalo de abrangência.

Figura 15 – Ilustração da propagação de distribuições para $N=3$ grandezas de entrada independentes, cujas PDFs são propagadas para a obtenção da PDF relacionada à grandeza de saída.



Fonte: INMETRO, 2020, Figura 2.

⁹⁶ Na versão brasileira, o acrônimo para função de densidade de probabilidade foi “traduzido” para FDP (INMETRO, 2020, p. 6). Optamos por manter aqui o acrônimo consagrado vindo do inglês, PDF.

Nas situações em que o modelo de medição é linear e a convolução fornece uma distribuição próxima da gaussiana, a metodologia do Suplemento 1 fornecerá resultados muito próximos do obtido com a metodologia básica do GUM. A vantagem da metodologia do Suplemento 1 é que todos os conceitos envolvidos são bem estabelecidos dentro da estatística bayesiana, enquanto o método básico do GUM aplica adaptações conceituais de diferentes abordagens das probabilidades. Além disso, o suplemento possibilita obter resultados mais realísticos em situações que o método básico pode acarretar estimativas não realísticas. Por outro lado, a implementação do método do Suplemento 1 requer recursos computacionais extras. Além disso, o método é criticado, inclusive do ponto de vista filosófico, por especialistas em estatística que preferem a abordagem convencional frequentista:

As consequências de uma mudança para uma abordagem puramente bayesiana não são triviais. As consequências filosóficas incluem: o mensurando não ser mais representado na análise de incertezas por um valor verdadeiro único; incertezas representarem o ‘estado de conhecimento’ do experimentador mais do que o comportamento real de instrumentos de medição e objetos; a declaração de incerteza ser muito mais subjetiva e variável (WILLINK; WHITE, 2012, p. 17).

A abordagem bayesiana envolve uma grande mudança de perspectiva que reforça de muitas maneiras o ponto de vista que surge dos debates em torno da revisão em curso do VIM e do GUM. Enquanto o Suplemento se apoia somente na estatística bayesiana, o GUM básico, embora hoje seja largamente empregado, possui problemas relacionados a sua fundamentação estatística híbrida. Tendo comentado em linhas gerais o método básico do GUM e resumidamente o método do Suplemento 1, vamos discutir nas seções seguintes questões relacionadas às inovações conceituais introduzidas pelo guia.

3.2.2 Expressão da incerteza e seu papel “articulador”

De posse dos dados obtidos pelo método recomendado pelo guia, **como expressar o resultado da medição?** O guia enfatiza aquilo que os pesquisadores do NBS haviam dito nos anos 1960 a 1980: que deve ser fornecido **o maior número de informações sobre o processo de medição**. O fornecimento de informações possibilita que o resultado seja apropriadamente qualificado e adequadamente empregado no futuro. Por certo, “quando se sobe na hierarquia de medição, mais detalhes são requeridos sobre como um resultado de medição e sua incerteza foram obtidos” (INMETRO, 2012a, 7.1). Nesses casos, a forma mais completa de

expressar o resultado é através da **planilha de incertezas**. Mas, em qualquer nível da hierarquia, algumas informações básicas são importantes.

Se a expressão da incerteza é feita em termos de $u_c(y)$, deve-se informar como o mensurando foi definido, sua estimativa (isto é, o valor do mensurando) e a estimativa de $u_c(y)$, com as respectivas unidades. Ao invés de expressar a incerteza na mesma unidade do valor do mensurando, é possível expressá-la em termos relativos (INMETRO, 2012a, 7.2.1-2). Se a expressão da incerteza for feita em termos de U , além da definição e do valor estimado para o mensurando, devem ser fornecidos, pelo menos, o valor de k e o nível **da** confiança associado (INMETRO, 2012a, 7.2.3).

Tabela 2 – Planilha ou tabela de incertezas para a determinação primária de D_w pelo método da dosimetria Fricke para fontes de fonte de ^{192}Ir

Grandeza ⁹⁷	$u(x_i)$ Tipo A (%)	$u(x_i)$ Tipo B (%)
ΔOD (ou ΔA)	0,33	0,28
$G(\text{Fe}^{+3})$		0,62
ρ		0,01
ε		0,01
L		0,02
k_{pos}		0,15
f_t	0,05	0,20
D_w	$u_c = 0,80 \%$	

Nota: As fontes de ^{192}Ir de taxa de dose são empregadas em braquiterapia. A distância na distância padrão para a dosimetria dessas fontes é de 1,0 cm.

Fonte: Adaptado de EL GAMAL *et al.*, 2015.

Como exemplo de expressão de incerteza numa atividade de pesquisa, adaptamos na Tabela 2 os resultados⁹⁸ publicados por El Gamal e colegas (2015), do laboratório nacional de metrologia do Canadá (NRC), para a determinação de D_w com o método de dosimetria Fricke para fontes de irídio (isótopo 192)⁹⁹. Além dos componentes de incerteza para as grandezas envolvidas, encontra-se também na tabela a incerteza-padrão combinada (u_c). O valor da

⁹⁷ As grandezas relacionadas na tabela são mesmas que aparecem na equação 2.3.

⁹⁸ Os resultados aqui apresentados se referem ao melhor valor de incerteza Tipo A obtido em três séries de medições realizadas pelo laboratório.

⁹⁹ As fontes de ^{192}Ir de alta taxa de dose são empregadas em tratamentos de câncer por braquiterapia (irradiações próximas à região do corpo do paciente a ser tratada).

grandeza $G(Fe^{+3})$ para a energia do ^{192}Ir e sua incerteza-padrão associada foram determinados em pesquisas anteriores (MCEWEN *et al.*, 2014).

Na Tabela 3, mostramos outro exemplo de expressão de incerteza, desta feita na calibração de CIs a partir de CI padrão de referência secundário. Trata-se da planilha de incertezas para a calibração de CI na grandeza D_w em feixes de ^{60}Co pelo laboratório da Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA). O modelo matemático da calibração é aquele representado na equação (2.4). Na planilha, aparecem as incertezas para cada uma das grandezas de entrada e outros fatores que influenciam na medição, mas que não aparecem na equação (2.4), como as correções para temperatura e pressão e o posicionamento das câmaras. O resultado final foi expresso em termos de incerteza expandida (U), com fator de abrangência $k=2$, para um nível da confiança de aproximadamente 95 %.

Tabela 3 – Estimativa de incerteza na calibração de câmaras de ionização da grandeza dose absorvida na água, em feixes de ^{60}Co

Uncertainty component	Uncertainty (%)	
	Type A	Type B
Step 1: Reference standard		
Calibration from BIPM/PSDL*		0.20
Long term stability of the secondary standard		0.23
Spectral difference PSDL/IAEA		0.00
Current measurement - Ref. Std.	0.05	0.10
Temperature and pressure correction - Ref. Std.		0.05
<i>Relative combined standard uncertainty in Step 1</i>	<i>0.05</i>	<i>0.32</i>
Step 2: Instrument to be calibrated		
Current measurement - User Chamber	0.06	0.20
Temperature and pressure correction - User Chamber		0.05
Difference in radial non-uniformity of the beam		0.00
Chamber positioning		0.06
<i>Relative combined standard uncertainty in Step 2</i>	<i>0.06</i>	<i>0.21</i>
<i>Relative combined standard uncertainty (Steps 1 + 2)</i>	<i>0.08</i>	<i>0.39</i>
<i>Standard combined uncertainty (k = 1)</i>		<i>0.40</i>
Relative expanded uncertainty (k = 2)	0.8	

*This uncertainty was decreased due changes related to ICRU 90 [3] implementation and the value is lower than stated in the IAEA CMCs is the KCDB. The uncertainty value of 1.0% will still be used in the certificates until the CMCs have been updated.

Legenda: A tabela apresenta os componentes de incerteza com os respectivos valores em termos relativos (percentagens) para as incertezas de Tipo A e B, a soma quadrática para cada tipo, a incerteza-padrão combinada e a incerteza expandida para um nível da confiança de aproximadamente 95 %.

Fonte: Apêndice do certificado de calibração emitido pela IAEA, documento *DOLP.011: Appendix 3A*, de 28/08/2020.

Na verdade, as planilhas de incertezas que costumam ser publicadas em artigos científicos são simplificadas, mostram apenas as contribuições de cada grandeza para as incertezas-padrão Tipo A e Tipo B. As planilhas nas quais os laboratórios fazem o cálculo de incertezas de uma medição contém todas as fontes consideradas, além da metodologia de cálculo de cada fonte (distribuição de probabilidade adotada, valores considerados, graus de liberdade etc.). São bem mais complexas do que as tabelas publicadas nos artigos. Assim, por exemplo, uma incerteza Tipo B para a influência de uma grandeza de entrada pode conter as fontes relacionadas com resolução do instrumento, a incerteza de sua calibração, a estabilidade do instrumento a longo prazo etc. Todas essas fontes, se consideradas no cálculo, são “propagadas” (somadas quadraticamente e depois extraída a raiz quadrada da soma) para fornecer o componente Tipo B de uma grandeza de entrada.

Um aspecto importante da expressão do resultado de medição reside no número de algarismos significativos com os quais a incerteza deve ser apresentada. Em função de todas as aproximações, suposições e distribuições de probabilidade empregadas, o valor de incerteza obtido é apenas uma estimativa, não pode ser tomado como um valor com alto grau de exatidão. Por isso, o guia recomenda que a incerteza seja expressa com um ou, no máximo, dois algarismos significativos¹⁰⁰. Esse cuidado em não expressar um valor com algarismos significativos que, de fato, não possuem significado algum, foi apontado por Bachelard como uma característica distintiva da mentalidade científica (BACHELARD, 2004, p. 79), conforme mencionamos na seção 1.2.1. Embora o comentário de Bachelard tenha se referido ao valor da grandeza e não à incerteza, a mesma preocupação com a apresentação de algarismos sem significado físico se aplica no caso da expressão da incerteza.

Algumas vezes, os resultados de medições em pesquisas científicas fora do campo da metrologia são apresentados de forma mais simples e a incerteza não aparece de modo explícito. Nesses casos, o número de algarismos significativos presentes no valor publicado indica até onde o cientista entende que vai a exatidão do resultado. Também é comum expressar entre parênteses após os últimos algarismos significativos a incerteza estimada para aqueles algarismos. Do ponto de vista do GUM, essa última forma de apresentar a incerteza é recomendada para a expressão da incerteza-padrão. O guia fornece o seguinte exemplo de resultado da medição de um padrão da massa: “ $m_s = 100,021\ 47(35)$ g, onde o número entre parênteses é o valor numérico de u_c (incerteza

¹⁰⁰ Isso vale para a expressão final da incerteza em termos de incerteza-padrão combinada ou de incerteza expandida.

padrão combinada) referido aos últimos dígitos correspondentes do resultado mencionado” (INMETRO, 2012a, 7.2.2).

O guia apresenta uma metodologia para obter um valor **único** de incerteza associado ao resultado da medição, mas alerta que se deve tomar cuidado para não omitir informações imprescindíveis para a utilização posterior do resultado. Apesar de todos os problemas apontados em críticas ao GUM, seu maior mérito foi o de disponibilizar uma metodologia que pudesse ser usada **em comum** pela comunidade científica de uma forma geral e, em especial, pela comunidade metrológica. Pode-se dizer que os pontos frágeis do guia se devem justamente ao esforço realizado para a sua publicação, deixando de lado questões sensíveis e polêmicas. Mas, para além da harmonização promovida pelo GUM, os próprios documentos oficiais da metrologia atribuem à publicação do guia um papel de **renovação conceitual**. O guia teria promovido a substituição da abordagem baseada no erro de medição pela abordagem baseada na incerteza. Discutimos o significado dessa mudança na seção seguinte.

Ao harmonizar o emprego do conceito de incerteza e fornecer uma metodologia para a estimativa do valor único de incerteza para um processo de medição, o guia possibilitou que a rede metrológica ganhasse em **inteligibilidade**. Pode-se, agora, pensar a rede metrológica como uma grande malha cujos nós são medições e/ou calibrações. A partir da publicação e da disseminação do conteúdo do GUM, a incerteza de medição passou a ser a principal forma de expressar a **qualidade** da medição.

Por isso, é com base na incerteza de medição que caracterizamos a estrutura hierárquica do sistema metrológico, conforme já havíamos comentado no primeiro capítulo (subseção 1.1.2.3). Um instrumento de medição é calibrado frente a um padrão de nível superior e incorpora a incerteza do padrão, mas também incorpora as demais incertezas avaliadas no processo de calibração, ficando, necessariamente, com uma incerteza superior à do padrão. No exemplo da calibração de câmaras de ionização pela IAEA, reproduzido na Tabela 3.2, essa incorporação pode ser apreciada. Na planilha de incerteza da Tabela 3.2, aparece o componente devido à calibração do padrão secundário do IAEA por um laboratório primário (PSDL) (0,20 %), além de todas as demais fontes de incerteza identificadas e estimadas no processo de calibração, resultando numa incerteza-padrão bem mais alta (0,4 %).

Desse modo, forma-se a **cadeia de rastreabilidade** que se estende verticalmente, dentro da qual é possível estabelecer a relação de qualquer resultado de medição ou de qualquer dispositivo calibrado à medição primária da mesma grandeza. A rede também se estende desde a realização primária de uma grandeza derivada até a realização das unidades

de base, sempre apresentando incertezas menores ao subirmos na hierarquia metrológica e incertezas maiores ao descermos. O que queremos sublinhar aqui é a **conexão vertical** entre os elementos da rede metrológica internacional proporcionada pela incerteza de medição.

Já as conexões horizontais da rede metrológica se dão pela **comparação** entre padrões do mesmo nível. As comparações não podem visar a coincidência dígito-a-dígito dos resultados de medição, elas têm que se basear em um critério predeterminado que estipule a margem de “concordância razoável”. Novamente, é a incerteza de medição que fornece esse critério, de modo que a **conexão horizontal** entre os elementos da rede é, também, por ela proporcionada.

Foi a partir dessa reflexão que propusemos, em capítulo de livro publicado recentemente, a ideia de que a incerteza de medição desempenha um papel “**articulador**” na rede metrológica internacional (DAVID, 2021). A incerteza de medição de uma grandeza faz a articulação, ou seja, a ligação articulada entre os resultados de medição da **mesma grandeza**, dentro da rede metrológica nos sentidos vertical (rastreadibilidade) e horizontal (comparabilidade). Além disso, a rede possui uma infinidade de ramificações que ligam as medições de grandezas que são **interdependentes**. Todas as grandezas derivadas dependem das sete grandezas de base, padronizadas pelas sete unidades de base. No referido capítulo de livro, descrevemos o papel articulador que a incerteza desempenha nos seguintes termos:

O que “amarra” e dá coerência à rede metrológica é sua própria estrutura: seus nós, seus pontos de conexão¹⁰¹. Se estes nós não fossem, de alguma forma, flexíveis, dificilmente a estrutura poderia perseverar. Vamos supor que, numa rede constituída por medições absolutamente exatas, o aprimoramento de uma metodologia de medição fornecesse um valor diferente daquele consagrado para uma constante fundamental. Toda a estrutura poderia ser abalada, pois a alteração de um valor implicaria a alteração de muitos outros. Ao invés de conferir estabilidade, a rigidez tornaria a rede frágil. Para usar uma analogia com a engenharia, as incertezas de medição funcionam como juntas de dilatação entre os braços da rede: elas permitem a flexibilidade necessária para manter a estrutura coesa. Porém, nenhuma analogia deste tipo poderia representar fielmente a estrutura da rede que é bem mais complexa do que a imagem que dela possamos fazer (DAVID, 2021, p. 218).

¹⁰¹ A ideia do papel articulador é complementar à imagem apresenta por Eran Tal em sua tese para falar da função dos padrões na rede metrológica internacional: “A importância da função normativa dos padrões metrológicos é revelada a partir de uma perspectiva global da calibração, quando se vê a rede de comparações entre procedimentos [*inter-procedural*] como um todo. Aqui os padrões metrológicos formam a **espinha dorsal** que mantém a rede unida, fornecendo uma referência estável para corrigir erros sistemáticos. [...] Ao legislar como um conceito abstrato de grandeza deve ser realizado, os modelos de padrões metrológicos servem como uma espécie de “**cola semântica**” que une partes distantes da rede” (TAL, 2012, p. 172; grifos nossos). Se os padrões formam a espinha dorsal e os modelos unem os elementos através da coerência e da consistência, as incertezas (derivadas dos modelos) fornecem a flexibilidade necessária para a que a rede subsista. Abordamos também a relação entre os modelos e o papel articulador da incerteza em DAVID, 2021, p. 214.

Embora a expressão da incerteza como um valor único possa, em algumas situações, acarretar perda de informação sobre o procedimento de medição, ela tem a vantagem de simplificar e ser mais prática de entender e de usar. Adicionalmente, o valor único deixa ver com mais clareza o papel articulador do conceito no seio da rede metrológica internacional. Voltamos a comentar a ideia do papel articulador da incerteza de medição mais adiante, no contexto da discussão sobre a perspectiva epistemológica que as incertezas podem proporcionar. Na seção seguinte, analisamos alguns conceitos envolvidos na mudança de abordagem que a publicação do guia teria proporcionado.

3.3 Mudança de abordagem e suas implicações

Na Introdução, o GUM aponta que o “conceito de incerteza como um atributo quantificável é relativamente novo na história da medição, embora erro e análise de erro tenham sido, há muito, uma parte da prática da ciência da medição ou metrologia” (INMETRO, 2012b, p. ix). As exposições que fizemos nas seções precedentes buscaram mostrar como o conceito de erro foi empregado, bem como suas limitações. A adoção do conceito de incerteza de medição colaborou para **esclarecer** a distinção em relação ao conceito de erro e realizou a transição para uma perspectiva, dita **operacional**, que privilegia grandezas **conhecíveis**. Essa transição, denominada de mudança da abordagem de erro para a abordagem de incerteza se dá com a publicação do GUM. Na 3ª edição do VIM (2007), que buscou harmonizar o vocabulário metrológico com a estrutura conceitual do GUM, a diferença entre as duas abordagens é colocada da seguinte forma:

O objetivo da medição na Abordagem de Erro é determinar uma estimativa do valor verdadeiro que esteja tão próxima quanto possível deste valor verdadeiro único. [...] O objetivo da medição na Abordagem de Incerteza não é determinar um valor verdadeiro tão melhor quanto possível. Preferencialmente, supõe-se que a informação oriunda da medição permite apenas atribuir ao mensurando um intervalo de valores razoáveis, com base na suposição de que a medição tenha sido efetuada corretamente (INMETRO, 2012b, p. x-xi).

Embora a abordagem de incerteza tenha lançado mão do conhecimento acumulado na estimativa dos erros envolvidos no processo de medição, seu objetivo é diferente daquele consagrado pela tradição da abordagem de erro. No anexo D, o GUM esclarece que:

[...] a incerteza de um resultado de uma medição não é necessariamente uma indicação de o quanto o resultado da medição está próximo do valor do mensurando; ela é simplesmente uma estimativa de o quanto se está próximo do melhor valor consistente com o conhecimento atualmente disponível (INMETRO, 2012a, D.5.1).

Além de se basear numa perspectiva operacional, na qual as grandezas conhecíveis são enfocadas em detrimento daquelas não conhecíveis, a abordagem do GUM privilegia o **conhecimento disponível** empregado na medição. Por isso, muitas vezes a abordagem do guia é qualificada como uma **virada epistêmica** (*epistemic turn*).

Apesar de descrita de modo simples no GUM e no VIM3, a dita mudança da abordagem de erro para a abordagem de incerteza promovida pelo guia comporta ambiguidades e enseja diferentes interpretações. Nesta seção (subseções 3.1.4.1 e 3.1.4.2), vamos examinar os conceitos envolvidos nessa mudança para tentar compreender seu significado, sua extensão e suas implicações. Sem dúvida, o valor verdadeiro (VV) de uma grandeza (do qual o valor do erro de medição depende) é o principal conceito envolvido na mudança, mas os significados de outros conceitos também foram afetados. Na última subseção, são abordadas questões relacionadas à adequação do valor estimado de incerteza para representar a qualidade da medição e as perspectivas filosóficas que são articuladas nos debates envolvendo a incerteza.

3.3.1 De erro para incerteza: abordagem operacional

Para começarmos a avaliar a alteração da estrutura conceitual da metrologia implantada com a publicação do GUM, vamos examinar a mudança na definição de alguns termos metrológicos no VIM. A primeira edição do vocabulário (VIM1, 1984) surgiu antes da publicação do guia (1993), enquanto a edição de 2007 (VIM3) expressa definições harmonizadas com a concepção do GUM. Nesse exame, vamos nos valer de comparações de definições feitas por Luca Mari ao analisar o status da metrologia em função do ponto de vista das edições do VIM (MARI, 2015). A mudança de abordagem pode ser identificada na alteração da definição do conceito de VV de uma grandeza da primeira para a terceira edição do vocabulário:

[VIM1] Valor verdadeiro (de uma grandeza): o valor que caracteriza uma grandeza perfeitamente definida, nas condições nas quais existe quando essa grandeza é considerada. (ISO, 1984 apud MARI, 2015, p. 75)

[VIM3] Valor verdadeiro duma grandeza: valor duma grandeza consistente com a definição da grandeza. (INMETRO, 2012b, 2.11)

Na definição do VIM1, destaca-se o artigo definido “o” antes de “valor” que indica a possibilidade da existência de apenas **um** valor consistente com a definição. Já a definição do VIM3 não se refere a um único valor, reconhecendo, implicitamente, a possibilidade de mais de um valor consistente com a definição do mensurando. No VIM3, a nota 1 relativa ao conceito de VV esclarece **a diferença entre as abordagens** de erro e de incerteza:

Na Abordagem de **Erro** para descrever as medições, o valor verdadeiro duma grandeza é considerado **único** e, na prática, impossível de ser conhecido. A Abordagem de **Incerteza** consiste no reconhecimento de que, devido à quantidade intrinsecamente incompleta de detalhes na definição duma grandeza, **não existe um valor verdadeiro único**, mas sim um conjunto de valores verdadeiros consistentes com a definição. Entretanto, este conjunto de valores é, em princípio e na prática, impossível de ser conhecido (INMETRO, 2012b, 2.11, NOTA 1; grifo nosso).

Pelo exposto na nota acima reproduzida, fica claro que, segundo a nova abordagem, a limitação na definição do mensurando implica em uma faixa de valores verdadeiros e que essa faixa não pode ser exatamente conhecida. A limitação na definição do mensurando implica em limitação na modelagem do procedimento de medição, mas os documentos do JCGM falam apenas na incompletude da definição. Deve-se ressaltar, entretanto, que na nota 2 à definição 2.11, o VIM3 acrescenta que “[N]o caso particular duma constante fundamental, considera-se que a grandeza tenha um valor verdadeiro único” (INMETRO, 2012b).

A mudança da abordagem também pode ser identificada em outras definições básicas do vocabulário metrológico, por exemplo, nas noções basilares de medição, de resultado de medição e de incerteza de medição. Para o VIM1, a “medição” é um conjunto de operações que visam determinar “o valor de uma grandeza” (ISO, 1984 apud MARI, 2015, p. 74), enquanto o VIM3 define o conceito como “processo de obtenção experimental **dum ou mais** valores que podem ser, razoavelmente, atribuídos a uma grandeza” (INMETRO, 2012b, 2.1). E o “resultado de medição”, que foi definido no VIM1 como “o valor de um mensurando obtido por medição” (ISO, 1984 apud MARI, 2015, p. 79), passou a ser definido no VIM3 como “[C]**onjunto** de valores atribuídos a um mensurando, juntamente com toda outra informação pertinente disponível” (INMETRO, 2012b, 2.9). Todos os grifos nas definições acima são nossos, com o objetivo de enfatizar a mudança na concepção da medição como processo de obtenção **de um valor** para a concepção como processo de obtenção de **uma faixa de valores**.

Vale ressaltar que a abordagem de erro **não é incompatível** com a expressão do resultado da medição com a incerteza estimada. A mudança de abordagem reside mais no

deslocamento do conceito de erro da posição **central** que ocupava na estrutura conceitual da metrologia, colocando em seu lugar o conceito de incerteza.

O significado da mudança fica ainda mais explícito nas definições mesmas de **incerteza de medição** registradas nas edições primeira e terceira do VIM. Enquanto no VIM1, a incerteza caracteriza a “faixa de valores dentro da qual o valor verdadeiro do mensurando cai”, no VIM3, a incerteza apenas “caracteriza a dispersão de valores da grandeza atribuídos ao mensurando”. Dessa forma, a abordagem de incerteza **evita a menção ao conceito de VV e amplia o foco** para toda a faixa de valores circunscritos pela margem de incerteza. A definição de incerteza de medição do VIM3 (similar à do GUM) pode ser interpretada de duas maneiras diferentes: como faixa de valores em que, com uma dada probabilidade, o VV repousa (p. ex. EHRLICH, 2014, p. S147) ou, simplesmente, como faixa que caracteriza a dispersão de valores obtidos na medição (p. ex. KACKER, 2018, p. 529). Na primeira interpretação, a mudança é menos pronunciada e o conceito de VV preserva sua importância. Como veremos no desenvolvimento das discussões, essa interpretação pode vir a prevalecer em futuras revisões dos documentos da JCGM.

Vemos, então, que a abordagem de **erro** supõe:

- (i) que o mensurando possui um VV consistente com sua definição;
- (ii) que a medição visa determinar um valor que seja mais próximo possível ao VV único; e
- (iii) que o resultado da medição caracteriza uma faixa de valores dentro da qual o VV deve cair.

Já a abordagem de **incerteza** reconhece:

- (i) que mais de um VV podem ser consistentes com a definição do mensurando;
- (ii) que a medição visa obter um conjunto de valores que possam ser atribuídos ao mensurando; e
- (iii) que o resultado da medição caracteriza o conjunto de valores que podem ser razoavelmente atribuídos ao mensurando.

Merece igualmente destaque a mudança do verbo com o qual a operação de medição é caracterizada: de “**determinar**” um valor (VIM1) para “**atribuir**” valores (VIM3). Entretanto, como veremos mais adiante, essa clara distinção entre as abordagens é **problemática** e é questionada por alguns intérpretes da evolução dos conceitos metrológicos. Veremos também que muitos desses intérpretes sugerem a recuperação dos conceitos de VV e de erro de medição.

No artigo de 2003, “*Epistemology of measurement*”, que discutimos no primeiro capítulo (1.4.1.), Mari interpreta a referida mudança de abordagem como uma importante transição no modo como a medição é compreendida. A abordagem de erro é coerente com a compreensão **realista** da medição que tem no conceito de VV seu fundamento ontológico e na teoria dos erros um método objetivo de estimar o erro aleatório da medição (MARI, 2003, p. 21). A transição para a abordagem de incerteza corresponderia a uma compreensão **relativista, operacional e pragmática** da medição em que o critério de **adequação** substitui o critério da **correspondência à verdade**. A nova concepção é relativista porque dependente do contexto, operacional porque baseada em valores conhecíveis e pragmática porque dirigida pelo objetivo da medição e dependente das informações disponíveis. “O deslocamento *de erro para incerteza* é muito mais que puramente terminológico: ao contrário, ele é paradigmático de uma modificação na epistemologia da medição” (MARI, 2003, p. 24; grifo do autor).

A nova abordagem toma o **conhecimento** empregado no processo de medição e obtido no resultado da medição como dependente de uma série de fatores, daí a implicação **epistemológica** do deslocamento promovido pela nova abordagem. Por certo, o resultado da medição refere-se ao mensurando, à propriedade que se pretende medir (sua visada ontológica), mas **não é independente** das condições em que foi alcançado, ou seja, de suas condições epistemológicas. A abordagem de incerteza reconhece **explicitamente** no resultado da medição tal dependência epistemológica. Frente ao problema de determinar o erro de medição que depende do valor desconhecido de um ente metafísico (o VV), a metrologia deslocou o foco para a “atribuição” de valores ao mensurando e para a estimativa das incertezas envolvidas nesse processo de atribuição. Ao fazer esse deslocamento, abriu, alargou o foco da medição, que se concentrava em **um** valor, para **uma faixa** de valores.

Ademais, a estimativa de incertezas introduz elementos subjetivos na avaliação dos dados obtidos e previamente disponíveis, o que contribui para acentuar o caráter epistemológico do processo. Em texto mais recente, ao analisar a transição dos conceitos metrológicos “do ponto de vista do VIM”, Mari descreve a mudança nos seguintes termos:

Assim, o que era considerada uma atividade puramente experimental agora é entendido como um processo pragmático baseado no conhecimento, no qual os modelos desempenham um papel primordial. Essa é plausivelmente a principal novidade na última edição do VIM: uma virada epistêmica aceitando que mesmo a medição não pode comunicar ‘dados puros’ (MARI, 2015, p. 79).

Enquanto o aspecto epistêmico envolvido na nova abordagem é indiscutível, o real significado e a extensão da mudança introduzida por ela estão sujeitos a diferentes

interpretações. No capítulo de livro intitulado “*Modelling Measurement: Error and Uncertainty*” (2014), mencionado na seção 1.4.2., os pesquisadores Luca Mari e Alessandro Giordani, identificam, “num hipotético espectro das opções teóricas” sobre o conhecimento quantitativo, duas perspectivas “extremas”, quais sejam, a “**realista**” e a “**instrumentalista**” (MARI; GIORDANI, 2014, p. 80). “No contexto da ciência da medição, o conceito de *valor verdadeiro da grandeza* é um elemento inevitável na primeira perspectiva, como testemunhado por seu papel fundamental na teoria clássica dos erros, e um elemento sem significado na segunda”. Na perspectiva instrumentalista, o conceito de VV passa a não ter significado porque “conhecer valores verdadeiros é impossível *na prática e em princípio*” (MARI; GIORDANI, 2014, p. 81; grifos dos autores). Segundo Mari e Giordani, as perspectivas realista e instrumentalista podem ser associadas, respectivamente, às abordagens de erro e de incerteza: a ideia de que a medição deve buscar obter um resultado que se aproxime ao máximo do VV único é típica da abordagem de erro, enquanto, na abordagem de incerteza, busca-se como resultado “um intervalo de valores que possa justificadamente ser atribuído ao mensurando” (MARI; GIORDANI, 2014, p. 82).

A perspectiva instrumentalista possui características do operacionalismo e do convencionalismo na filosofia da medição, conforme comentamos na seção 1.3.4. Embora reconheçamos que a caracterização de perspectivas teóricas extremas possa ser útil para a compreensão do espectro de concepções sobre a medição, a associação da abordagem de incerteza com uma perspectiva instrumentalista extrema é problemática. Entendemos que, sim, a abordagem de incerteza adotada pelo GUM e pelo VIM3 se aproxima de uma perspectiva mais instrumentalista em relação à tradicional abordagem de erro. Entretanto, a abordagem dos documentos da JCGM não pode, de fato, ser classificada como instrumentalista ou operacionalista, pois muitos aspectos da perspectiva realista tradicional permanecem na atual estrutura conceitual da metrologia.

Como vimos nas seções anteriores, a adoção do conceito de incerteza realizou um importante **esclarecimento conceitual** e **ajuste terminológico**. Esse parece ser o legado mais expressivo da publicação do GUM. Entendemos que a abordagem operacional privilegia grandezas conhecíveis, sem implicar a eliminação de termos teóricos empregados em muitas fases da medição. Apesar de as principais características da mudança de abordagem, acima expostas, serem consensuais entre cientistas e filósofos, a interpretação de outros aspectos dessa mudança é, pelo contrário, objeto de dissensos. No centro da mudança de abordagem ou da virada epistêmica estão questões relacionadas aos conceitos de VV e de incerteza definicional. Vamos voltar nossa atenção, na seção seguinte, para o tratamento que esses

conceitos recebem nos documentos da JCGM e para as interpretações realizadas por especialistas em medição desses conceitos. Acreditamos que o enfoque pode colaborar para dimensionar a mudança trazida para a metrologia por esses documentos, bem como pode lançar luz sobre os papéis exercidos pela incerteza de medição.

3.3.2 Os conceitos de VV e de incerteza definicional

Mesmo que a publicação do GUM seja comumente reconhecida como o evento que promoveu a mudança de abordagem de erro para abordagem de incerteza, essa mudança **não foi profunda, nem seu sentido foi consensual**. Inclusive em relação ao status do conceito de VV de uma grandeza é questionável a extensão dessa mudança. Em algumas passagens, o próprio guia e o VIM3 são ambíguos sobre o significado da mudança, em especial no que concerne aos conceitos de incerteza de medição e de VV. Além disso, todos os conceitos centrais para abordagem de erro, como VV e o próprio conceito de erro de medição, permanecem definidos e são utilizados em algumas passagens do guia e do vocabulário. Vamos, nos próximos parágrafos, expor as questões sujeitas a ambiguidades, para, em seguida, investigar como a mudança de abordagem repercute na filosofia da medição e nas publicações de alguns metrologistas.

Como já mencionamos, o conceito de **incerteza de medição** é definido no GUM e no VIM3 com base em uma abordagem operacional, isto é, que leva em conta as **grandezas conhecíveis**. No GUM, a incerteza de medição é definida como “parâmetro, associado ao resultado de uma medição, que caracteriza a dispersão dos valores que podem ser razoavelmente atribuídos ao mensurando” (INMETRO, 2012a, 2.2.3), sem referência, portanto, aos conceitos de VV e de erro. Mas o guia alerta que essa definição não é incompatível com outras definições tradicionais que se referem às grandezas desconhecíveis erro de medição e VV de uma grandeza, tais como:

- uma medida do possível erro no valor estimado do mensurando, tal como proporcionado pelo resultado de uma medição;
- uma estimativa caracterizando a faixa de valores na qual o valor verdadeiro de um mensurando se encontra (VIM: 1984, definição 3.09) (INMETRO, 2012a, 2.2.4).

Isso significa que, embora a definição operacional tenha possibilitado falar do resultado de medição sem fazer referência ao conceito de VV, ainda é possível interpretar o resultado como uma avaliação do erro (diferença entre o valor medido e o VV) ou da própria

“localização” do VV. De fato, como veremos adiante, algumas interpretações do GUM apontam que o conceito de VV permanece fundamental na abordagem do guia, enquanto outras sustentam que o conceito perde sua relevância na abordagem de incerteza. As interpretações divergentes envolvem também o conceito de incerteza definicional. Na nota explicativa número 3 da definição de VV de uma grandeza, o VIM3 indica a possibilidade de tomar a incerteza definicional como desprezável e, nesse caso, considerar a grandeza como tendo VV único:

Quando a incerteza definicional, associada ao mensurando, é considerada desprezável em comparação com as outras componentes da incerteza de medição, pode-se considerar que o mensurando possui um valor verdadeiro “essencialmente único”. Esta é a abordagem adotada pelo GUM e documentos associados, onde a palavra “verdadeiro” é considerada redundante (INMETRO, 2012b, 2.11).

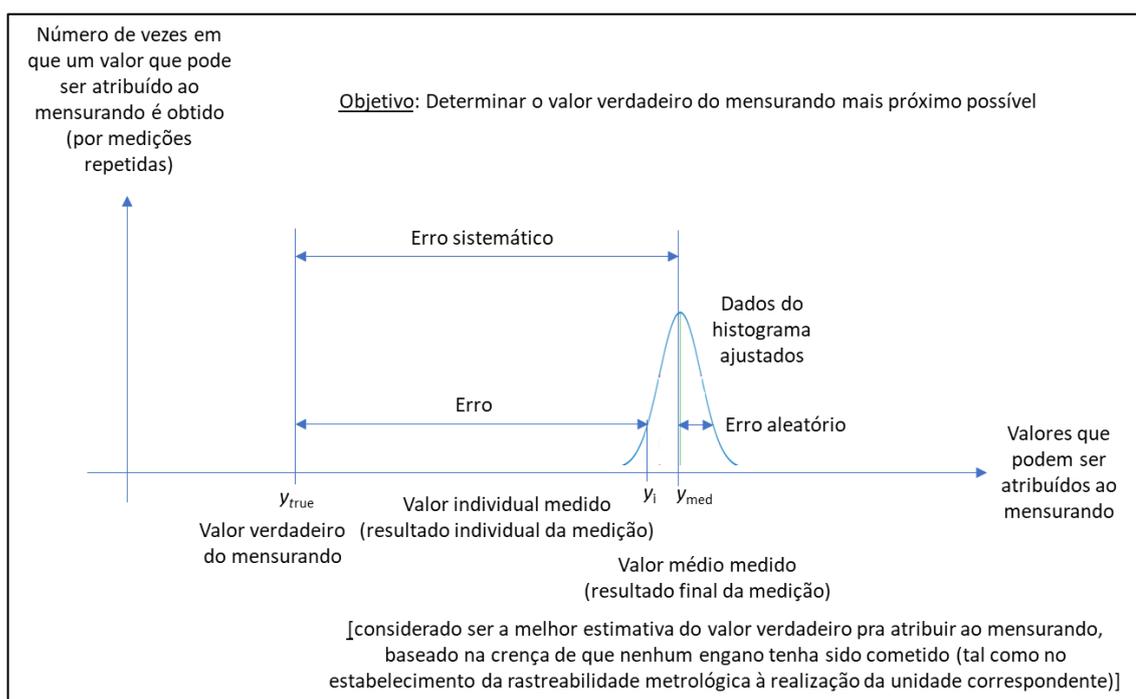
Ou seja, a **ampliação** da perspectiva da grandeza que se pretende medir de **um valor para um conjunto de valores** parece ser **restrita**. A ampliação se configura menos restrita apenas quando a incerteza definicional não for desprezável. Porém, o próprio guia afirma que sua metodologia só se aplica a um mensurando bem definido, “que pode ser caracterizado por um valor **essencialmente único**” (INMETRO, 2012a, 1.2; grifo nosso). Se a grandeza não puder ser caracterizada por um valor essencialmente único, a metodologia estatística empregada pelo GUM carece de consistência.

Então, temos uma mudança de abordagem que se propõe a flexibilizar a noção de VV único, justamente por reconhecer o problema da definição incompleta do mensurando, mas que se aplica apenas a mensurandos que possam ser caracterizados por um valor **essencialmente único**. **Para os documentos do JCGM, “ser caracterizado por um valor essencialmente único” é diferente de supor que a grandeza tenha, de fato, um VV único.** Embora pareça sutil, a diferença conceitual é importante. Por um lado, para que a estimativa da incerteza seja realizada com as ferramentas estatísticas apropriadas, é preciso que se considere o mensurando **bem definido**, sendo caracterizado por um valor essencialmente único. Por outro lado, a prática metrológica aponta que o melhor que se pode obter para um mensurando é um **conjunto de valores**. Além do mais, os documentos da JCGM têm buscado estabelecer uma estrutura conceitual consistente baseada em grandezas **conhecíveis**. Em função dessa ambiguidade, vários problemas vêm sendo apontados pelos especialistas em metrologia.

3.3.2.1 Mudança e permanência

Metrologistas, estatísticos e filósofos da ciência vêm discutindo os problemas presentes na estrutura conceitual da metrologia relacionados à dita mudança de abordagem. Para os metrologistas Ehrlich, Dybkaer e Wöger, embora a abordagem de erro apresente algumas dificuldades, tais como a estimativa dos erros sistemáticos envolvidos, do VV e do erro de medição, os conceitos empregados ainda são usados: “[E]ssa é uma das principais razões pelas quais foi decidido manter muitos dos termos e conceitos da abordagem clássica no corpo do VIM3 e não os relegar a um Anexo” (EHRlich; DYBKAER; WÖGER, 2007, p. 207). Os metrologistas fizeram essas observações em artigo baseado no *draft* do VIM3, ainda antes da publicação oficial da terceira edição do vocabulário.

Figura 16 – Representação gráfica dos conceitos envolvidos na abordagem de erro



Fonte: Adaptado de EHRlich; DYBKAER; WÖGER, 2007, p. 204 (figura 4).

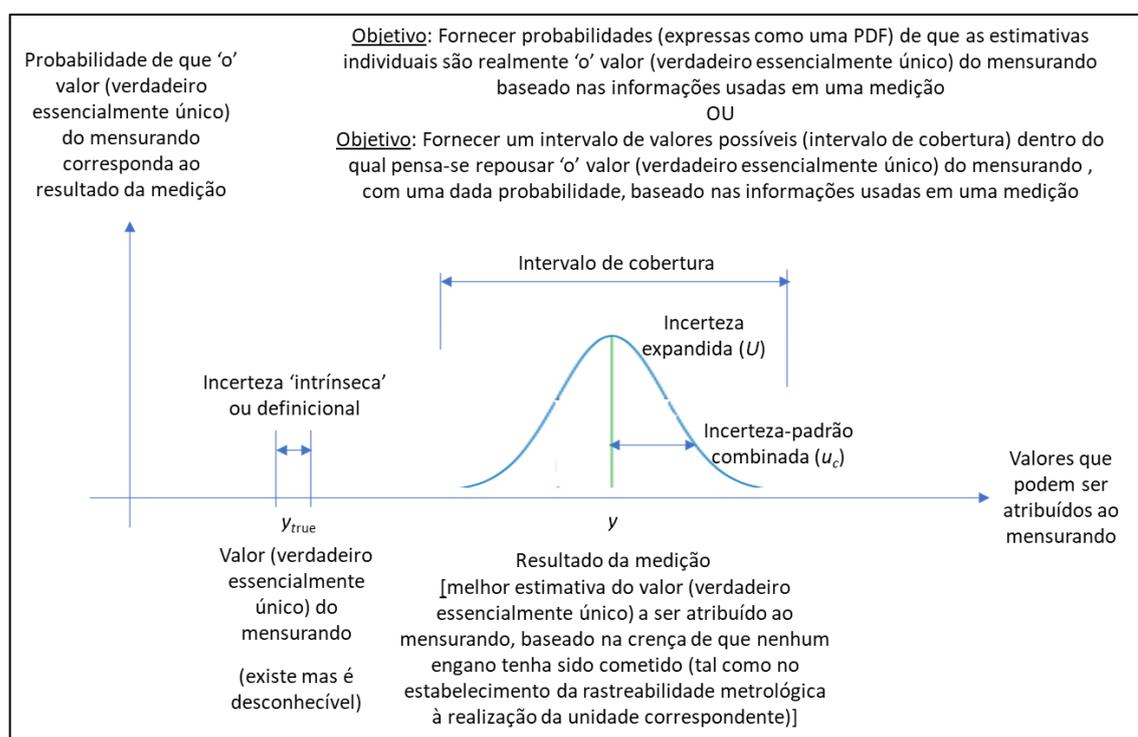
Para explicar a mudança de abordagem, os autores apresentam uma série de representações gráficas. Na figura 16, reproduzimos uma adaptação da representação gráfica que os autores propõem para a abordagem de erro. Nessa representação, destacam-se as indicações dos valores do erro de uma medição, do erro aleatório e do erro sistemático. Ela é útil, principalmente, em contraste com a representação da abordagem de incerteza (figura 17).

Ela deixa ver a dificuldade relacionada aos valores desconhecíveis, interligados, do erro sistemático, do erro de medição e do VV da grandeza.

Em relação à questão do VV, inicialmente, os autores reafirmam os problemas concernentes ao conceito: “se o valor verdadeiro, ou o conjunto de valores verdadeiros, não é conhecido em princípio, então emerge a questão de saber se o conceito de valor verdadeiro é necessário, útil ou mesmo danoso!” (EHRlich; DYBKAER; WÖLER, 2007, p. 209). Porém, em seguida, sustentam que o GUM não “desencoraja ou ignora” o conceito de VV, mas apenas evita o emprego do modificador “verdadeiro” por considerá-lo redundante. Acrescentam, ainda, que o VV é necessário na abordagem do guia “para descrever o objetivo da medição” e para “formular o modelo de medição” (EHRlich; DYBKAER; WÖGER, 2007, p. 211; grifos dos autores).

Na figura 17, adaptamos a representação gráfica que os autores fornecem para a abordagem de **incerteza** de acordo com o GUM. Nota-se, na representação, a permanência do conceito de VV na descrição do resultado da medição e do objetivo da medição. Nota-se também a representação da incerteza definicional como um intervalo estreito para possibilitar que o valor (verdadeiro) do mensurando possa ser tomado como um valor “essencialmente único”.

Figura 17 – Representação gráfica dos conceitos envolvidos na abordagem de incerteza



Fonte: Adaptado de EHRlich; DYBKAER; WÖGER, 2007, p. 211 (figura 13).

Em contraste com a representação da abordagem de erro, que envolve grandezas desconhecíveis, são destacadas na representação da figura 17 os valores de incerteza combinada e expandida que são estimáveis. A partir desse contraste, inclusive do ponto de vista do contraste visual entre as duas representações, a mudança de abordagem introduzida pelo GUM parece ser notável. Entretanto, a depender de se o conceito de VV desempenha um papel de protagonista ou de mero coadjuvante, a mudança terá sido, respectivamente, expressiva ou discreta. O que está em jogo é exatamente se esse conceito deve fundamentar os conceitos de medição, de resultado da medição e de incerteza de medição, ou se estes últimos não devem ser fundamentados ou fazer referência ao VV.

A partir de uma análise dos conceitos apresentados no guia, os autores sustentam:

O objetivo da medição na abordagem do GUM, então, se torna estabelecer uma função de densidade de probabilidade [PDF], usualmente no formato de uma gaussiana (normal) [...], que pode ser usada para calcular probabilidades de que vários valores obtidos pela medição realmente correspondem ao valor (verdadeiro) ‘essencialmente único’ do mensurando (EHRlich; DYBKAER; WÖGER, 2007, p. 210; grifo dos autores).

Uma redação alternativa seria substituir a menção à PDF pelo “intervalo” de abrangência dos valores. Os autores ressaltam que o GUM não apresenta o objetivo da medição nesses termos, mas que essa formulação pode ser “inferida através da sua [do GUM] descrição da incerteza padrão [u_c] (p. ex., GUM 6.1.2)” (EHRlich; DYBKAER; WÖGER, 2007, p. 210). O item do GUM mencionado pelos autores faz referência à possibilidade de, em geral, expressar a incerteza de medição como u_c , complementando que, em algumas situações, pode ser necessário fornecer um intervalo de incerteza “com o qual se espera abranger uma extensa fração da distribuição de valores que poderiam ser razoavelmente atribuídos ao mensurando” (INMETRO, 2012a, 6.1.2). O parágrafo do guia ao qual os autores remetem apenas comenta a alternativa de expressar o resultado da medição com a incerteza expandida. Na verdade, em sintonia com a definição de incerteza de medição do guia e do VIM, o item reforça a concepção de que o intervalo de incerteza compreende os valores que podem ser razoavelmente atribuídos ao mensurando, sem fazer menção ao VV.

Ressalte-se que, conforme os próprios autores lembram, a menção ao VV não é a única maneira de conceber o objetivo da medição. Se a medição for pensada como uma operação que, lançando mão do conhecimento disponível, busca a **compatibilidade** entre medições, o conceito de VV torna-se desnecessário. É, por exemplo, como recomenda a

International Electrotechnical Commission (IEC) na norma IEC 60359¹⁰² que trabalha com o conceito de “compatibilidade metrológica de resultados de medição”, ao invés de fazer qualquer menção a valores verdadeiros (cf. EHRLICH; DYBKAER; WÖGER, 2007, p. 213). A interpretação de Ehrlich, Dybkaer e Wöger empresta à “mudança de abordagem” um caráter mais de permanência e ajuste terminológico do que propriamente de mudança. Vejamos a perspectiva de outros especialistas.

3.3.2.2 Grégis e o VV como conceito operacional

O filósofo da ciência francês Fabien Grégis é um dos que discutiram questões relacionadas à mudança de abordagem promovida pelo GUM, como os conceitos de VV e de incerteza definicional, de forma mais extensa e detalhada. As questões foram discutidas por Grégis em um capítulo de livro (2015), em dois artigos (2019a e 2019b,) e em sua tese de doutorado (2016). Além disso, tratou dos mesmos temas em um artigo publicado em 2017, escrito em parceria com a também filósofa francesa Nadine de Courtenay (COURTENAY; GRÉGIS, 2017). Sua tese versa sobre o “valor” da incerteza de medição; “valor” entendido em dois sentidos: valor numérico da incerteza (estimada com o uso de ferramentas das teorias da probabilidade) e valor epistemológico do conceito. Assim, sua pesquisa aborda muitos dos problemas que enfrentamos nessa tese. O tratamento que o autor dá para as questões do VV e da incerteza definicional, dentre outros, contribuem para esclarecer aspectos relacionados à mencionada mudança de abordagem.

Grégis situa a perda de proeminência do VV no contexto da “virada epistêmica” pela qual o campo metrológico passou na segunda metade do século XX. Essa virada corresponde a uma mudança de foco do próprio objeto medido para questões **práticas** relacionadas com a **aplicação** do resultado da medição. “Ao mesmo tempo, a ‘verdade’ considerada como um objetivo ilusório é substituída pela mais concreta e acessível *adequação* com uma dada meta” (GRÉGIS, 2015, p. 83, grifo do autor). O desenvolvimento da estatística bayesiana, que passou a fazer frente à interpretação frequentista das probabilidades no referido período, é apontada como importante componente dessa “virada” (GRÉGIS, 2015, p. 84). Entretanto, no desenvolvimento de sua análise sobre a dita “mudança de abordagem”, o autor também conclui que a mudança não é tão expressiva:

¹⁰² IEC 30359:2001 – *Electrical and electronic measurement equipment – Expression of performance.*

Claro, a ideia de que a metrologia passou por uma virada epistêmica permanece bastante válida; entretanto, as consequências exatas dessa virada para o próprio conceito de valor verdadeiro são menos óbvias. Em particular, a abordagem contemporânea não induz nenhuma transformação perceptível no formalismo frente ao valor verdadeiro de uma grandeza – no máximo, sugere uma revisão da terminologia e da interpretação do conceito (GRÉGIS, 2016, p. 175).

O filósofo distingue dois níveis na discussão sobre o conceito de VV: a questão **metafísica** (que se refere à ligação do conceito com a ‘verdade’ na medição) e a questão **operacional** (que se refere à necessidade de um parâmetro, ao menos similar ao VV, nas operações de medição). O autor argumenta que “o ponto de vista epistêmico não dispensa de fato o valor verdadeiro no nível operacional, mas meramente tenta dissimulá-lo” (GRÉGIS, 2015, p. 85). Sustenta que o emprego do conceito de VV permanece necessário na prática da medição devido aos **modelos estatísticos** adotados. Tanto a teoria da probabilidade frequentista, quanto a bayesiana, trabalham com um valor “**ideal**”, regulador, como referência. Uma vez que aparece nas próprias equações das teorias, “o conceito de ‘valor verdadeiro’ permanece sendo usado na metrologia atual mesmo se ele desaparece da própria *expressão* do resultado” (GRÉGIS, 2015, p. 85, grifo do autor).

De fato, os documentos (GUM e VIM3) evitam fazer referência a grandezas desconhecíveis na definição de alguns termos. Porém, as próprias grandezas desconhecíveis como erro e VV e os parâmetros teóricos das distribuições de probabilidade continuam a ser definidos nos documentos. Em nosso entendimento, os documentos reconhecem a importância de grandezas e modelos ideais e não desestimulam seus empregos como ferramentas teóricas. A prevalência de grandezas conhecíveis sobre desconhecíveis na abordagem operacional se concentra na expressão de resultados que circulam na rede metrológica.

A recomendação do GUM e do VIM3 de que o conceito de VV deve ser evitado é contestada por Grégis com o argumento de que as teorias das probabilidades empregadas para estimar a incerteza de medição **fazem uso** do conceito. Pode-se, então, segundo o raciocínio de Grégis, interpretar o emprego do conceito de VV como meramente instrumental, como o valor que se busca determinar na medição, sem relacioná-lo com a ideia de verdade. Nesse sentido, o conceito poderia ser nomeado com um termo mais neutro, como “valor alvo”, “valor teórico” ou, mesmo, “valor-verdadeiro”, com o hífen indicando a ausência de relação qualificativa entre as palavras (GRÉGIS, 2016, p. 176-8). Se tomado nessa concepção neutra em relação à verdade, o VV seria consistente com seu emprego teórico e com a precaução

metafísica que embasa a abordagem operacional. Porém, o ponto de vista argumentativo de Grégis é do realismo aproximativo que propõe um papel menos neutro para o VV.

A crítica ao VV, conforme mencionamos anteriormente, além de se basear na impossibilidade de **conhecimento** desse valor, baseia-se também na impossibilidade em sustentar que o mensurando possui **apenas um** VV consistente com sua definição. Para tratar desse problema, Grégis lembra que a incerteza definicional diminui quando a **modelização** do mensurando é mais refinada, sendo que os graus de refinamento da definição do mensurando e da modelização dependem do objetivo da medição. Uma forma de expressar tal objetivo é estabelecer a “incerteza-alvo”¹⁰³, isto é, o valor máximo de incerteza de medição admissível, tendo em vista o emprego que se pretende fazer do resultado da medição. Uma definição mais complexa do mensurando possibilita uma incerteza definicional menor, mas exige um modelo de medição mais complexo. Se a definição e o modelo implicarem uma incerteza definicional muito menor que as demais fontes de incerteza, então não precisamos nos preocupar com a incerteza definicional e podemos estimar a incerteza de medição segundo a metodologia do GUM, ou seja, considerando que o mensurando possui VV essencialmente único. Se, por outro lado, definição e modelo implicarem uma incerteza definicional da mesma ordem de grandeza da incerteza-alvo, então é preciso melhorar a definição e o modelo para que a medição possa atender aos seus objetivos (GRÉGIS, 2016, p. 227-231).

A reflexão descrita no parágrafo acima leva Grégis a sustentar que a incerteza definicional possui uma natureza “epistemológica” diferente dos demais componentes de incerteza e não deve ser estimada para ser combinada com as demais fontes, mas apenas para ser **comparada** com a incerteza-alvo. Enquanto as demais fontes de incerteza têm origem na “de-idealização” do mensurando (conforme proposto por Eran Tal), pois correspondem a correções introduzidas no modelo, a incerteza definicional, seguindo um caminho inverso, corresponde a correções não introduzidas na definição e, por consequência, no modelo (GRÉGIS, 2016, p. 227).

O que acontece se refinarmos cada vez mais a definição do mensurando? Para responder a essa indagação, Grégis propõe a distinção entre **grandezas fenomenológicas** e **fundamentais**. Para que as grandezas físicas sejam qualificadas como “mensuráveis” é preciso tratá-las no contexto de um modelo fenomenológico que, a partir das leis fundamentais, incorpora simplificações e aproximações (GRÉGIS, 2016, p. 215-6; GRÉGIS, 2015, p. 88-91). As grandezas fenomenológicas são aquelas que **não possuem VV único**, mas

¹⁰³ Trata-se de um conceito do VIM, definido como “Incerteza de medição especificada como um limite superior e escolhida de acordo com o uso pretendido dos resultados de medição” (INMETRO, 2012B, 2.34).

que possuem incerteza definicional suficientemente pequena para se considerar que tenham **VV essencialmente único**, nos termos do GUM. Já as grandezas fundamentais, como as constantes fundamentais, conforme observa o VIM3 (INMETRO, 2012b, 2.11, nota 2), podem ser consideradas como possuindo um único VV.

No contexto da indagação sobre o refinamento da definição do mensurando, Grégis argumenta que quando a definição da grandeza leva em conta toda **subestrutura conhecida** dos fenômenos envolvidos, estamos lidando com grandezas fundamentais. Assim, o nível de detalhamento da definição do mensurando determina se está em causa uma grandeza fenomenológica (para a qual os detalhes da subestrutura inerente ao objeto não precisam ser incorporados ao modelo) ou uma grandeza fundamental (para a qual todo o detalhamento possível do objeto, inclusive de sua subestrutura, será levado em conta) (GRÉGIS, 2016, p. 218-9). Uma vez que o conhecimento da subestrutura evolui ao longo do tempo, a distinção entre os tipos de grandeza também não é fixa: “o status das grandezas não é congelado de uma vez por todas (*frozen once and for all*)” (GRÉGIS, 2015, p. 90), mas depende do nosso conhecimento **atual** de sua subestrutura. Como o encaminhamento da discussão sobre VV e incerteza definicional em termos da subestrutura envolvida remete à questão metafísica-ontológica, vamos dar seguimento a essa perspectiva somente no capítulo seguinte da tese.

Acreditamos que a reflexão realizada por Grégis em sua tese e nos demais textos mencionados contribui para elucidar alguns aspectos das questões envolvidas. Sua posição em defesa do emprego do conceito de VV está em linha com a perspectiva do “realismo científico” que ele defende. Trata-se de um realismo que opera com a noção de “verdade aproximada” (GRÉGIS, 2016, p. 232). Como contraponto às argumentações de Grégis e de Ehrlich, Dybkaer e Wöger, que valorizam o papel desempenhado pelo VV na abordagem de incerteza, encontra-se a posição do especialista em estatística do NIST, Raghu Kacker.

Kacker distingue os valores de grandezas **teóricos** (valores conceituais que se supõe existir, mas que são desconhecíveis mesmo em princípio) e **atribuídos** (valores obtidos por medição). Apesar de ser um elemento da teoria das probabilidades, “o valor verdadeiro teórico não desempenha papel operacional na metrologia” (KACKER, 2018a, p. 527). Para o matemático, o fato de a metodologia do guia requerer que a grandeza possua “um valor **essencialmente único**” significa apenas que a grandeza tem que ser suficientemente bem definida para que possa ser “adequadamente representada por um valor único medido com a incerteza padrão associada, não significa que é requerido que o mensurando **tenha** um único valor verdadeiro” (KACKER, 2018a, p. 528; grifo nosso). A contribuição notável do guia foi propor uma “visão operacional da incerteza de medição”, desconectada do conceito de erro

(KACKER, 2018a, p. 531). Em sua interpretação, **o guia possibilita que pensemos na medição não como determinação do VV**, mas como atribuição de valores que caracterizam o mensurando. Por esse ponto de vista, a incerteza de medição “representa a dispersão de valores (medidos) que podem ser razoavelmente atribuídos ao mensurando” (KACKER, 2018a, p. 531), “não se refere ao conceito teórico de valor verdadeiro” (KACKER, 2018b). Note-se que a definição de incerteza sustentada por Kacker é semelhante às do GUM e do VIM3.

Sem dúvida, é pertinente defender o legado operacional do GUM que coloca ênfase na consistência e compatibilidade dos resultados, sem requerer compromissos metafísicos. Mas a defesa de Kacker do esvaziamento do conceito teórico de VV, pelo que identificamos na pesquisa, é **minoritária**. Em nossa compreensão, a atual estrutura conceitual da metrologia permite interpretar o conceito de incerteza de medição, pelo menos, de **duas** maneiras. Tomando as definições do GUM e do VIM3 “ao pé da letra” e a posição de Kacker, o intervalo de valores definido pelo resultado da medição \pm a incerteza expressa a faixa de valores que **representa o resultado** da medição, os valores que podem ser atribuídos ao mensurando. Tomando a posição de Ehrlich, Dybkaer e Wöger, o intervalo de valores definido pelo resultado da medição \pm a incerteza expressa a faixa de valores **dentro da qual pensa-se repousar o VV** essencialmente único.

3.3.2.3 Conceitos ideais e pragmáticos

A tendência geral dos estatísticos, cientistas e filósofos que discutem a mudança de abordagem de erro para incerteza realizada pelo guia é, entretanto, a de **criticar o esvaziamento** do significado do conceito de VV, na linha da argumentação de Grégis. Tal esvaziamento, oriundo de uma abordagem operacional, deixaria lacunas na estrutura conceitual da metrologia. Em artigos relativamente recentes, os líderes dos dois grupos de trabalho do JCGM, para o GUM (WG1), Walter Bich, e para o VIM (WG2), Charles Ehrlich, também metrologista do NIST, indicam que seguem essa tendência (BICH, 2008; EHRLICH, 2014).

Baseado nas discussões do JCGM-WG2, Ehrlich acredita que o VIM deveria ser revisado de modo a esclarecer a **importância** do conceito de VV. O metrologista do NIST sugeriu inclusive que a incerteza de medição poderia vir a ser definida, na próxima revisão do vocabulário (VIM4), como “parâmetro (ou parâmetros) que caracterizam quão bem acredita-se ser conhecido o valor verdadeiro (essencialmente único) do mensurando” (EHRLICH,

2014, p. S150). Entretanto, a versão do *draft* do VIM4, disponível no site do BIPM, apresenta uma definição que é essencialmente a mesma dos atuais GUM e VIM3 (JCGM, 2021, 3.1). Na introdução, o *draft* afirma que foi escolhida uma “**posição abrangente**” para o VIM4, na qual as definições operacionais e valores de referência são preferidos, mas, ao mesmo tempo, são adicionadas notas para esclarecer quando os valores de referência podem ser valores verdadeiros. A posição abrangente adotada no *draft* visa, justamente, fornecer **flexibilidade para as diferentes perspectivas** sobre a necessidade e utilidade do ‘valor verdadeiro’ JCGM, 2021, p. 4).

Outro conceito que o *draft* do VIM4 busca tornar operacional é o de **veracidade** de medição (*measurement trueness*). No VIM3, a veracidade é definida como o “[G]rau de concordância entre a média dum número infinito de valores medidos repetidos e um valor de referência” (INMETRO, 2012b, 2.14). Supondo que a média infinita representa o valor da grandeza sem o erro aleatório (como sustentava Laplace e seus continuadores), a veracidade expressa a falta de concordância devida somente ao erro sistemático, ou seja, é o inverso do erro sistemático (quanto maior a veracidade, menor o erro sistemático). O guia alerta que a veracidade não é uma grandeza, que não deve ser representada numericamente. A referência à **média infinita** empresta ao conceito certa idealidade que o inabilita para ser empregado na prática, de modo conceitualmente coerente.

Pelo *draft* do VIM4, o conceito passará a ser o “grau de concordância entre a média de valores medidos obtidos por medições repetidas e um valor de referência” (JCGM, 2021, 3.16). Dessa forma, o conceito passará a envolver apenas grandeza conhecíveis. A nota 1 do *draft* esclarece que, embora o termo “grau de concordância” tenha no vocabulário um significado que não é quantitativo, a veracidade poderá, algumas vezes, “ser considerada uma grandeza que pode ser avaliada” (JCGM, 2021, 3.16, Nota 1).

Observa-se que há diferentes entendimentos, interpretações e posicionamentos no âmbito da metrologia em relação à mudança de abordagem. A intenção, por parte dos responsáveis pelos documentos metrológicos, de deixar a estrutura conceitual flexível faz com que permaneça a **ambiguidade** em relação a vários conceitos centrais. Queremos destacar a ambiguidade em relação ao objetivo da medição, ao significado da incerteza e ao status do VV de uma grandeza. Os documentos elaborados pelas instituições metrológicas tentam se equilibrar entre o **otimismo realista**, que advém de medições com valores coincidentes (dentro de baixíssimas faixas de incerteza), e a **precaução anti-metafísica**, que reconhece a fragilidade dos fundamentos das ciências físicas para supor uma identidade ou uma correspondência com o real.

Queremos ressaltar também a maneira, a nosso ver, ainda **idealizada** com que os documentos tratam alguns conceitos relacionados à incerteza de medição. Os documentos reconhecem que as grandezas, com exceção das constantes fundamentais, não possuem VV único, mas um conjunto de valores consistentes com a definição do mensurando, necessariamente incompleta. Sustentam que a incerteza definicional é a incerteza mínima de uma grandeza, responsável pela inevitabilidade da exatidão absoluta. Então, os documentos parecem supor que, se o mensurando pudesse ser completamente definido, a grandeza teria um VV único.

Porém, o que nos garante a existência desse valor se o único meio de o conhecer é através da medição e essa, em virtude do seu caráter empírico-experimental, não pode ser realizada sem erros? Aspectos relacionados a **limitações empíricas** são evitados na estrutura conceitual da metrologia, dando margem a interpretações idealizadas de certos conceitos. Entendemos que “a existência inegável de um erro que não pode, por natureza, ser totalmente eliminado e que obriga a nos contentarmos com aproximações” (BACHELARD, 2004, p. 16) é, de fato, uma objeção ao idealismo da exatidão absoluta. Mas sustentamos que a inevitabilidade do erro é também uma objeção à existência e à unicidade do VV. Mesmo que os documentos institucionais da metrologia reconheçam a impossibilidade da exatidão, bem como reconhecem a dificuldade em afirmar a existência e a unicidade do VV, esse reconhecimento é creditado, quase que unicamente, à impossibilidade de uma definição completa do mensurando.

A idealização que atribui à incerteza definicional a impossibilidade de sustentar que a grandeza possui um único VV é respaldada pela presença bem-sucedida de **conceitos ideais** nas ciências, de um modo geral. Os modelos, essenciais para as medições, possuem aspectos idealizados, embora também comportem correções para suposições ideais, de-idealizações. Os modelos estatísticos trabalham com parâmetros ideais tais como a esperança (μ) e o desvio-padrão (σ). Esses parâmetros só podem ser aproximados por grandezas conhecíveis, como a média (\bar{y}) e o desvio-padrão experimental (s). O VV é apenas mais um conceito ideal considerado como uma ferramenta necessária dentro da estrutura conceitual.

Curiosamente, há interpretações opostas à nossa de que o conceito de incerteza definicional representa certa idealização das grandezas. Bich atribui o conceito a “um eco do operacionalismo de Bridgman” e, apesar de reconhecer no conceito alguns “méritos”, atribui a ele “uma dificuldade não só para o esquema conceitual da avaliação de incerteza”, mas também para a prática da medição (BICH, 2012, p. 2154). Talvez a referência ao operacionalismo seja devida à questão do significado das grandezas que, para Bridgman, era

dado pelas operações realizadas para medi-las. Entretanto, o conceito de incerteza definicional não está relacionado com definições operacionais, que apontem para os procedimentos de medição, mas para a definição teórica da grandeza (para sua necessária incompletude). Essa definição pode e deve conter as **condições** em que a grandeza será medida, mas não necessariamente deverá conter referências ao método ou ao procedimento (operacionais) de medição.

Faz sentido, no entanto, atribuir à incerteza definicional a “crise” que se instalou acerca do conceito de VV. O fato de se admitir que a grandeza não possui um VV único sedimenta o caminho para apontar o conceito como desnecessário. Bich interpreta a evolução dos conceitos relacionados à incerteza de medição como tendo passado por um período em que houve um “mal-entendido generalizado”. Segundo o metrologista, à época em que ele aprendeu a visão bayesiana da probabilidade aplicada às medições, o VV foi submetido a “severas críticas” e a abordagem fundamentada no VV e no erro foi questionada como sendo “baseada em grandezas desconhecíveis”. Isso o levou a pensar que o conceito de VV é “incompatível com o de uma grandeza aleatória”.

Ainda segundo Bich, sua educação clássica, “que incluía filosofia”, o levou a se deixar fascinar pela discussão sobre incerteza definicional e conceitos correlatos (BICH, 2012, p. 2156). Quando se dedicou aos cálculos e se deu conta de que as grandezas teóricas podiam ser identificadas nas equações, o metrologista italiano teria superado os problemas colocados pela educação clássica. Olhando para si como um personagem nessa história, Bich narra do seguinte modo sua mudança de posição:

Entretanto, quando passou da filosofia aos cálculos, erros e valores (verdadeiros) de grandezas podiam ainda ser facilmente identificados nas fórmulas, apesar do novo quadro pretender evitar seus usos. Levou algum tempo e muita discussão antes que ele [o próprio Bich] pudesse entender que valor verdadeiro e grandeza aleatória não são incompatíveis (BICH, 2012, p. 2156).

A interpretação de Bich do conceito de incerteza definicional e do mal-entendido pelo qual alguns conceitos passaram reforça a ideia de que a mudança de abordagem promovida pelo GUM tem sido percebida pelos metrologistas como uma mudança discreta. Sobretudo, esses metrologistas têm manifestado que o relativo ostracismo a que os conceitos de erro e VV foram relegados deve ser revisto.

Não nos parece, entretanto, que a presença de termos teóricos nas fórmulas matemáticas constitua razão suficiente para rever as bases da mudança de abordagem. As grandezas operacionais não têm sido priorizadas porque as grandezas teóricas, ideais, são

dispensáveis, mas para fornecer fundações pragmáticas a ciências pragmáticas. Além disso, se pensados, de fato, do ponto de vista filosófico-metafísico, esses conceitos ideais são insistentemente problemáticos. Essa parece ter sido, até aqui, a posição dos documentos da JCGM: se os conceitos são problemáticos e dispensáveis na comunicação de resultados, então podem ser evitados, mas isso não significa que devam ser banidos das teorias. Os documentos buscam tratar os resultados como valores experimentais e, por isso, dissociá-los das grandezas teóricas. O artigo de Bich parece corroborar o que comentamos acima, que a lida com conceitos teóricos ideais leva os cientistas a tratá-los como reais ou, para todos os efeitos, praticamente reais.

Embora, de fato, tenha havido uma mudança de abordagem, constatamos que a mudança não é muito significativa no que concerne aos princípios básicos da medição. O privilégio dado a grandezas conhecíveis que caracteriza a nova abordagem como operacional nos parece coerente com a prática metrológica e positiva no sentido de reconhecer o aspecto experimental do resultado da medição.

Pode-se dizer que o conceito de incerteza ganhou protagonismo com a publicação do GUM, mas é questionável se os conceitos de VV e de erro, a longo prazo, serão cada vez menos importantes na cena metrológica ou se voltarão ao centro do palco sob aplausos. Pelo que vimos, há muitos especialistas que defendem esse retorno. Além dos argumentos em favor do VV e de erro que reportamos até este ponto, há também a questão de saber se a incerteza é a melhor maneira de expressar a qualidade da medição. Tratamos desse tema na próxima subseção.

Como já enfatizamos anteriormente, a harmonização das metodologias empregadas para estimar e expressar a incerteza de medição é um dos grandes êxitos que a comunidade metrológica alcançou com a publicação do guia. O fato de haver críticas ao documento e ajustes a serem feitos não chega a ofuscar o êxito. Mas podemos apontar também como resultados exitosos da publicação do GUM duas consequências aparentemente paradoxais. Em primeiro lugar, o **esclarecimento conceitual** que o guia proporcionou, principalmente no que se refere aos conceitos de erro e de incerteza. Em segundo lugar, o fato de suscitar discussões acerca de conceitos fundamentais relacionados à medição. Ou seja, o **caráter problemático**, porque não dizer, filosófico, da estrutura conceitual metrológica ganhou relevo com a adoção institucional do conceito de incerteza de medição. Dentre as discussões suscitadas, encontra-se aquela eminentemente filosófica a respeito do realismo das grandezas físicas. Retornamos, mais uma vez, a essa discussão na subseção 3.3.4.

3.3.3 Índice da qualidade da medição

Enfatizamos em algumas passagens que a incerteza de medição representa um índice da qualidade de uma medição: quanto menor a incerteza, melhor a medição. O GUM e outros documentos também enfatizam em alguns pontos essa relação (p. ex.: INMETRO, 2012a, 0.1). Conhecer a qualidade da medição é fundamental para se avaliar a **confiança** que se pode depositar no resultado da medição e, em função disso, avaliar também como o resultado pode ser empregado. Diferentemente de conhecimentos qualitativos que se apoiam em evidências discretas, os valores de grandezas contínuas têm que ser estimados quantitativamente. A incerteza de medição constitui uma estimativa desse tipo.

Entretanto, a avaliação da incerteza de medição depende da identificação e da quantificação dos efeitos que possam gerar **erros sistemáticos** e, como já apontamos, nem a identificação tem como ser exaustiva, nem a quantificação tem como ser exata. Por isso, a avaliação da incerteza é apenas uma **estimativa** e essa, de fato, pode não corresponder à efetiva qualidade da medição. Assim, pode-se questionar se a incerteza é o melhor índice dessa qualidade.

À primeira vista, a **exatidão** seria a principal candidata para representar a qualidade da medição. Como mostramos já no primeiro capítulo (subseção 1.1.2.2), a exatidão é definida como o grau de concordância entre o valor medido e um VV do mensurando. Ora, nada pode representar melhor a qualidade de uma medição do que a concordância com um VV. O obstáculo aqui é o status problemático do conceito de VV. Se um VV, como sustenta o VIM3, é apenas um valor “compatível com a definição da grandeza” (INMETRO, 2012b, 2.11), a exatidão não tem muito valor informativo para expressar a qualidade da medição. Talvez devido a dessa dificuldade, os documentos do JCGM ressaltam que a exatidão de medição não é uma grandeza e a ela não pode ser atribuído um valor numérico (INMETRO, 2012a, B.2.14, Nota 1 e INMETRO, 2012b, 2.13, Nota 1).

O VIM3 também esclarece que algumas vezes a exatidão de medição é entendida como “o grau de concordância entre valores medidos que são atribuídos ao mensurando” (INMETRO, 2012b, 2.13, Nota 3). Em face da advertência contida na Nota 1, entretanto, esse grau de concordância não deve ser quantificado. Apesar da atual limitação, fica claro que a exatidão é um conceito **amplo** relacionado à qualidade da medição.

Em relação ao caráter não quantitativo do conceito, é importante fazer duas observações. Na metrologia, emprega-se, para falar da qualidade de instrumentos de medição, o conceito de **classe de exatidão** que pode ser representado por um valor. Conforme definido

no VIM3¹⁰⁴, a classe de exatidão serve para atribuir qualidades metrológicas aos instrumentos, estabelecendo os limites de erro e/ou de incerteza que o instrumento é capaz de atingir. Embora a classe de exatidão seja um conceito diferente do de exatidão de medição, a existência e o uso do primeiro conceito indicam a necessidade de expressar aspectos da medição, de modo “quantitativo”, por meio da exatidão.

Nossa segunda observação é que no *draft* do futuro VIM4 a exatidão de medição passa a **poder**, em algumas situações, ser uma grandeza e ser representada por um número. Para tanto, a definição de exatidão terá que ser modificada: o termo “um valor verdadeiro” será substituído por “um valor de referência do mensurando”¹⁰⁵. O reconhecimento de que a exatidão possa ser, em algumas situações, quantificada corresponde à necessidade, acima referida, de expressar, de modo quantitativo, a qualidade da medição através da exatidão.

O futuro VIM4 esclarece em nota (Nota 2) que a exatidão costuma ser pensada como pertencente (i) a um procedimento de medição; (ii) a um instrumento ou sistema de medição; e (iii) a um único valor medido ou a um conjunto de valores medidos. Essa pluralidade de sentidos reforça a tendência a exprimir a qualidade da medição através do conceito de exatidão. A Nota 2 observa ainda que, embora a exatidão não seja o mesmo que incerteza de medição, algumas vezes a exatidão é **relatada** em termos de incerteza de medição e outras vezes a incerteza de medição é que é relatada em termos de exatidão. A tendência em relatar o valor de um em termos do valor de outro, mostra como ambos os conceitos são comumente associados à qualidade da medição.

Porém, alguns intérpretes do sistema argumentam que a distinção entre os conceitos de exatidão e de incerteza também deve ser enfatizada. Grégis, por exemplo, investiga a relação entre os conceitos em sua tese e discute a distinção. Embora reconheça que a incerteza de medição é um conceito “pivô” em muitas atividades metrológicas (como os ajustes das constantes fundamentais e a comparação de resultados de medição), Grégis argumenta que a incerteza não é o conceito preferido em algumas situações. Na indústria de precisão, considera-se que a incerteza “não é suficiente” e não captura a confiança que se tem nos dados. Mas Grégis sustenta que, desde os anos 1970, alguns metrologistas insistem na

¹⁰⁴ “Classe de exatidão: Classe de instrumentos de medição ou de sistemas de medição que satisfazem requisitos metrológicos estabelecidos, destinados a manter os erros de medição ou as incertezas de medição instrumentais dentro de limites especificados, sob condições de funcionamento especificadas. NOTA 1 Uma classe de exatidão é usualmente caracterizada por um número ou por um símbolo adotado por convenção” (INMETRO, 2012b, 4.25).

¹⁰⁵ “Exatidão de medição (*measurement accuracy*): grau de concordância entre um valor medido e um valor de referência do mensurando. NOTA 1 O termo “grau de concordância” é mantido nesse Vocabulário em seu uso tradicional. Entretanto, dependendo do contexto, a exatidão é algumas vezes considerada uma grandeza que pode ser avaliada” (JCGM, 2021, 3.15).

importância de distinguir entre “obter um resultado exato” e “obter uma baixa incerteza” (GRÉGIS, 2016, p. 314). Pela perspectiva desses metrologistas,

a incerteza de medição não é uma avaliação da confiabilidade dos resultados, mas representa o refinamento (*la finesse*) com que os cientistas podem vir a sondar a validade das estruturas teóricas sobre as quais são articulados os experimentos efetuados e testar a presença de erros de medição que eles poderiam então procurar explicar e corrigir. Ao fazer isso, os físicos reconhecem a diferença entre *incerteza* de medição e *exatidão* de medição [...] A relação entre incerteza e exatidão realmente depende do contexto em que o resultado é empregado (GRÉGIS, 2016, p. 315-6).

A insistência em um conceito que represente objetiva e exatamente a qualidade da medição, nos levaria de volta aos problemas metafísicos associados ao VV. Na verdade, o próprio conceito de exatidão depende do contexto. Aqui, temos empregado o termo para nos referirmos à qualidade da medição de modo genérico e não quantitativo. Eran Tal, por sua vez, identificou cinco diferentes noções de exatidão, que “não são coextensivas, nem excludentes”, mas “se sobrepõem parcialmente em suas extensões”. As noções de exatidão de medição identificadas por Tal são: (i) metafísica; (ii) epistêmica; (iii) operacional; (iv) comparativa; e (v) pragmática (TAL, 2012, p. 30-1).

A noção **metafísica** é próxima da definição do VIM3, com a diferença que o vocabulário não trata o conceito de VV como metafísico, mas apenas como **um** VV. A noção **epistêmica**, cujo conceito correlato é a incerteza de medição, se refere àquilo que o *draft* do VIM4 observa, que algumas vezes os conceitos de incerteza de medição e de exatidão se confundem. A noção **operacional** está mais próxima da definição que a exatidão deve receber no VIM4. Já a **comparativa**, como o próprio Tal observa, se refere ao uso que a nota 3 do VIM3 menciona. Porém, a nota do vocabulário faz menção à concordância entre **valores atribuídos ao mensurando**, enquanto Eran Tal enfatiza que seriam valores **obtidos por diferentes procedimentos ou condições** de medição. O filósofo israelense tem em mente a avaliação da **reprodutibilidade** das medições que constitui uma ferramenta metrológica importante no controle da qualidade das medições.

A noção **pragmática** se refere às situações em que a exatidão é empregada na verificação do atendimento a algum requisito específico e que usa uma das quatro noções anteriores para expressar esse atendimento. É, portanto, uma noção em que a exatidão é **para** algo. O emprego do termo com diferentes noções, mas sempre, de alguma forma, fazendo referência à qualidade da medição, mostra que a exatidão é frequentemente associada à expressão dessa qualidade. Mas, os documentos da JCGM afirmam que a incerteza de

medição constitui o principal índice de qualidade da medição, da mesma forma que afirmamos em algumas passagens da tese. Qual o melhor conceito para expressar esse índice?

Para falar da qualidade da medição de modo genérico, a exatidão pode ser a melhor opção. Mas do ponto de vista técnico e filosófico, a incerteza possui duas vantagens: é a melhor grandeza para **quantificar** a qualidade da medição e é também o conceito mais adequado por se referir à **dúvida** que permanece quanto ao valor medido. É a melhor forma de quantificar a qualidade porque se vale de **todo o conhecimento disponível** sobre o procedimento empregado na medição. Dessa forma, a incerteza de medição pode ser considerada “como um conceito englobante (*encompassing*) por meio do qual a qualidade do resultado da medição é expressa” (MARI; GIORDANI, 2014, p. 96). É o conceito mais adequado porque ao invés de sugerir uma avaliação absoluta da qualidade, permite a expressão da dúvida que inevitavelmente permanece.

Embora o processo de levantamento das incertezas dependa de julgamentos subjetivos, a análise das diversas fontes que afetam um procedimento de medição tende a fornecer um índice da qualidade **mais completo**. Quando contrastada com a exatidão, que depende de um valor de referência (cuja qualidade também tem que ser avaliada!), a incerteza parece representar melhor a qualidade da medição. É preciso considerar que, no sentido epistêmico da exatidão apontado por Eran Tal, reconhecido pela nota 3 do *draft* do VIM4, exatidão e incerteza de medição se confundem. Ainda mais importante é que, segundo o filósofo israelense, se satisfeitas algumas **condições**, as incertezas podem ser consideradas “medidas das *exatidões* dos padrões”, pois satisfazem todos os cinco sentidos identificados (TAL, 2012, p. 41-3). A reflexão foi feita tomando a padronização da unidade de tempo, mas entendemos que podem ser estendidas para medições científicas na metrologia de uma forma geral. Mas quais seriam essas condições?

Eran Tal chama de **condições de robustez (RC)** dois requisitos que devem ser atendidos para que as incertezas atribuídas a múltiplas realizações de uma unidade de medição sejam consideradas adequadas. As condições são: “(i) as discrepâncias entre realizações caem dentro das incertezas atribuídas” e “(ii) as incertezas atribuídas são obtidas de modelos apropriados de cada realização” (TAL, 2012, p. 41). Se as RC são atendidas, pode-se considerar que até mesmo a noção metafísica da exatidão é razoavelmente bem representada pelas incertezas estimadas. Isso porque as avaliações das incertezas buscam estimar os pontos em que “a realização de uma unidade fica aquém da definição”. É plausível, então, segundo Tal, considerar

as planilhas de incerteza de vários padrões primários checadas de modo cruzado como fornecendo boas estimativas de exatidão metafísica. No entanto, é importante notar que as condições (RC) e o método de estimativa de incerteza (*uncertainty budgeting*) não *pressupõem* nada sobre a verdade de nossas teorias atuais ou a realidade das grandezas. Ou seja, (RC) é compatível com uma noção realista não cética de exatidão sem exigir compromisso com sua metafísica subjacente (TAL, 2012, p. 43, grifo do autor).

Embora a incerteza possa ser tomada, em alguns contextos, como uma forma de quantificar a exatidão, há também, como apontou Grégis, demandas pela expressão da exatidão de forma independente da incerteza. Em função do emprego dos conceitos de modo diversificado na metrologia, ambos continuarão a ser usados para expressar a qualidade da medição. Entretanto, os documentos da JCGM e de outras instituições metrológicas concentram seus esforços em sedimentar o emprego do conceito de incerteza e em fornecer as orientações técnicas para que esse emprego possa ser realizado de forma consistente e coerente entre os laboratórios.

Como prova de confiança na incerteza como índice da qualidade da medição, os organismos internacionais BIPM e ILAC criaram o conceito de *Calibration and Measurement Capabilities* (CMC – Capacidade de Medição e Calibração) para expressar a proficiência dos laboratórios nas grandezas que medem e/ou calibram instrumentos e materiais de referência (ILAC, 2020). A CMC constitui a incerteza mais baixa que o laboratório é capaz de alcançar em medições ou calibrações nas grandezas com as quais trabalha. Esses valores orientam os profissionais que precisam dos serviços dos laboratórios a respeito da qualidade das medições. A incerteza que é, de fato, atribuída depende também do instrumento ou do material a ser medido ou calibrado, mas não pode ser menor que a respectiva CMC. Tendo em vista que CMCs mais baixas representam medições de melhor qualidade, os laboratórios buscam baixar suas CMCs, porém suas estimativas têm que ser reconhecidas como factíveis pelos órgãos responsáveis pela acreditação.

Como depende do tratamento dado pelo metrologista ou por sua equipe, não é impossível (nem muito improvável) que a incerteza de um procedimento de medição seja “mal” avaliada, isto é, seja subestimada ou superestimada. Mesmo antes da adoção institucional do conceito de incerteza, já eram reconhecidas pelos metrologistas a necessidade e a dificuldade de realizar avaliações “**realísticas**” da incerteza de medição (p. ex. EISENHART, 1963). Incertezas muito baixas podem levar o laboratório a ter desempenho ruim em comparações. Por isso, em avaliações de fontes de incerteza que dependem de julgamentos subjetivos, os laboratórios podem optar por estimativas “conservativas” que elevam o valor das incertezas. Essa opção, por outro lado, pode impedir a identificação de

fontes de incerteza não contabilizadas. Em pesquisas de ponta, a expressão de incertezas mais baixas possibilita que o laboratório “se exponha ao erro” e assim possa descobrir novas fontes de erros sistemáticos (GRÉGIS, 2016, p. 304). Além disso, incertezas muito altas fazem com que a concordância entre os resultados não seja muito significativa: qual o valor em apresentar concordância dentro de margens muito dilatadas? Do ponto de vista científico, a incerteza tem que ser **justa** para que o resultado da medição possa ser devidamente avaliado e empregado.

De todo modo, a avaliação de incertezas depende muito dos conhecimentos técnicos dos profissionais envolvidos, mas também do compromisso desses profissionais com a realização de um trabalho correto e justo (INMETRO, 2012a, 3.4; ver citação na subseção 3.2.1.1). Avaliações malfeitas podem comprometer a reputação do laboratório de diferentes maneiras. O fato de a estimativa de incerteza depender do enfoque adotado pelo laboratório não desqualifica o conceito como candidato a representar a qualidade da medição. Ao contrário, essa nos parece ser uma virtude do conceito por espelhar os valores envolvidos na produção do conhecimento científico.

Além disso, laboratórios proficientes na medição de determinada grandeza costumam apresentar **abordagens semelhantes** no tratamento das incertezas. Isso se dá, em primeiro lugar, porque os modelos de medição são muito parecidos. Em segundo lugar, dois fatores concorrem para que as abordagens e os resultados não sejam muito divergentes. As comparações entre os laboratórios são oportunidades para trocas de informação que possibilitam revisões nas metodologias empregadas. Os laboratórios comparam não apenas os resultados de medição, mas também as planilhas de incerteza. É comum também as instituições responsáveis por determinada área de conhecimento publicar documentos orientativos para a estimativa de incerteza na respectiva área. Esse é um meio de orientar os profissionais e de fornecer certa homogeneidade no tratamento das incertezas. Podemos citar, como exemplos, a IAEA que publica documentos desse tipo para a área da metrologia das radiações ionizantes (TECDOC-1585, IAEA, 2008) e a CITAC (*Cooperation on International Traceability in Analytical Chemistry*) juntamente com a EURACHEM (*Analytical Chemistry in Europe*) que fazem o mesmo para a área da metrologia química (EURACHEM / CITAC Guide CG 4, ELLISON; WILLIAMS, 2012).

Por estar relacionada com o **conhecimento disponível** e por remeter à **dúvida** que sempre permanece acerca do melhor valor do mensurando, a incerteza expressa de modo elucidativo a qualidade da medição. Por certo, em algumas situações, pode ser conveniente se referir à exatidão de medição, principalmente tendo em vista as modificações conceituais que

o VIM4 deve implantar. Por exemplo, para qualificar um sistema de medição, a classe de exatidão é, sem dúvida, útil. Mas tal reconhecimento não tira o protagonismo da incerteza. Essa veicula, a um só tempo, o nível de conhecimento do procedimento de medição em questão e a margem de dúvida que permanece.

3.3.4 Perspectivas filosóficas na metrologia

Os debates sobre a melhor forma de expressar a qualidade da medição, sobre o conceito de VV e sobre outros conceitos metrológicos são afetados por modos de compreender o funcionamento das ciências. Para além de possíveis entendimentos pessoais e pontuais acerca de alguns conceitos (que não podemos descartar), os posicionamentos dos metrologistas e demais cientistas são também moldados por perspectivas mais amplas acerca das ciências – perspectivas tradicionalmente discutidas pela filosofia das ciências. Deve-se ressaltar que a tendência geral na literatura técnico-científica da metrologia é a de defender apenas certas interpretações dos conceitos, sem apresentar posicionamentos em relação a perspectivas filosóficas. Mas, eventualmente, é possível identificar, em face dos posicionamentos, inclinações por determinadas concepções.

As controvérsias geradas pela mudança de abordagem para incerteza envolveram a questão do **realismo**, pois o privilégio dado pelo GUM a grandezas conhecíveis pode ser interpretado como precaução contra conceitos metafísicos que emprestaria ao guia certo aspecto antirrealista. Em particular, a perda de proeminência do conceito de VV sugere a ocorrência dessa precaução. Grégis interpretou o reconhecimento por parte da comunidade metrológica da impossibilidade de conhecer o VV que, de certa forma, distancia a concepção dessa comunidade do realismo científico, da seguinte forma:

Nós afirmaremos, então, que nos parece que podemos interpretar esse distanciamento como o reflexo da desconfiança que os cientistas mantêm em relação aos tipos de questionamentos que parecem ir além do quadro da atividade científica propriamente dita – em particular, do questionamento de ordem metafísica – embora os cientistas naturalmente tenham a tendência a conservar certo apego a um realismo científico moderado (GRÉGIS, 2016, p. 176).

A nosso ver, o pesquisador francês interpretou acertadamente a tendência ambígua da comunidade metrológica que oscila entre as preocupações em **não incorporar compromissos metafísicos** às suas atividades e em **garantir objetivos realistas** para elas, sem os quais, na perspectiva de alguns cientistas e filósofos, suas atividades perdem muito do valor. Mesmo

que a noção de realidade possa variar bastante entre os cientistas, há, por eles, “uma defesa explícita de que o real é necessário para a prática científica” (VIDEIRA, 2017 p. 158). Ou ainda: “[E]ssa é a característica fundamental da ciência: o cientista precisa acreditar na realidade” (VIDEIRA, 2017 p. 160). Nessas citações, o filósofo da ciência brasileiro Antonio Augusto Videira se refere aos físicos que participaram da criação da mecânica quântica nas primeiras décadas do século XX. Independentemente das diferenças certamente existentes na concepção de ciência daqueles cientistas para os da comunidade metrológica do final do século XX, esses últimos, em geral, mantêm inclinações realistas.

Entretanto, como fica claro na afirmação de Grégis acima reproduzida, o realismo também implica dificuldades metafísicas. Principalmente em uma área como a metrologia onde a prática experimental tem um peso elevado, os compromissos metafísicos tendem a ser evitados. Isso faz com que os conceitos sejam pensados em sua utilidade e em sua operacionalidade. Por ser uma ciência interdisciplinar, a metrologia tem que lidar com a diversidade de perspectivas de diferentes áreas. Essas reflexões nos dão uma ideia da complexidade presente nos debates metrológicos.

Como os conceitos de **VV** e de **incerteza de medição** podem ser compreendidos por diferentes perspectivas filosóficas adaptadas à metrologia? Destacamos quatro concepções. Duas delas são menos moderadas e poucas vezes defendidas por metrologistas e filósofos das medições: o realismo metafísico e o antirrealismo. As outras duas podem ser associadas a vezes presentes nas discussões sobre a mudança de abordagem: o realismo operacional e o pragmatismo operacional. A seguir descrevemos cada uma delas.

Realismo metafísico: para essa concepção, o **VV** de uma grandeza existe na propriedade enfocada antes mesmo da medição e é único, sendo a incerteza uma avaliação da proximidade entre o valor determinado pela medição e o **VV**. O objetivo da medição é determinar o **VV** e esse pode ser conhecido por aproximação. Embora essa concepção seja mais bem contemplada pela abordagem de erro, pode ser defendida também dentro da abordagem de incerteza.

Realismo operacional: o **VV** “essencialmente único” de uma grandeza pode ser considerado existente, mas não é possível conhecê-lo, e a incerteza representa a faixa de valores dentro da qual, com dada probabilidade, se acredita que o **VV** repouse. O objetivo da medição é determinar o valor mais próximo ao **VV**. Diferencia-se do realismo metafísico por não colocar ênfase na existência metafísica do **VV**. Busca melhorar a determinação das grandezas conhecíveis e diminuir as incertezas para, assim, se aproximar do **VV**

“essencialmente único”. Essa é, talvez, a perspectiva mais difundida no meio da metrologia e ali também a mais empregada para interpretar a abordagem do GUM.

Pragmatismo operacional: exime-se de compromissos com posições mais assertivas, o conceito de VV não é colocado em questão, pois não pode ser conhecido e não é necessário dentro da estrutura conceitual. A incerteza constitui a faixa de valores que, baseado no conhecimento disponível e com dada probabilidade, representa o resultado da medição. O objetivo da medição pode ser interpretado como a determinação da faixa de valores que melhor representa o mensurando, tendo em vista as informações e os recursos disponíveis. Possui afinidades com o antirrealismo, mas não considera necessário posicionar-se a respeito da realidade da grandeza sob medição. Essa é a perspectiva que rivaliza com o realismo operacional na interpretação da abordagem do GUM.

Antirrealismo: o VV de uma grandeza não existe a priori, o objetivo da medição é obter o valor mais adequado para representar o mensurando, tendo em vista as informações e os recursos disponíveis. Concebe a incerteza e o objetivo da medição da mesma forma que o pragmatismo operacional, mas os assimila ao contexto antirrealista. Essa concepção é defendida por alguns filósofos, mas não é, nos dias de hoje, muito comum de ser defendida pela comunidade metrológica.

Acreditamos que as quatro perspectivas, de alguma forma, exercem influência na redação dos documentos metrológicos, embora as menos moderadas apareçam apenas nos debates filosóficos e não nos documentos e comentários de metrologistas. Os principais documentos (VIM3, *draft* do VIM4 e GUM) afirmam adotar uma perspectiva **operacional** que contempla, em sua maior parte, pontos de vista oriundos das perspectivas do realismo operacional e do pragmatismo operacional. No cômputo geral, se é que podemos, de fato, aferi-lo, trata-se de uma concepção **pragmática e operacional, mas com posições realistas**.

Embora as adesões a determinados conceitos e definições revelem as **inclinações filosóficas em voga** da comunidade metrológica internacional, é improvável, e mesmo inadequado, que os fóruns metrológicos se tornem o **campo de disputa entre perspectivas filosóficas**. Além da importante aplicação nas ciências, a metrologia sempre leva em conta em sua visada os demais campos de aplicação das medições, como o comércio, a indústria e o desenvolvimento tecnológico. Se parte da comunidade científica, eventualmente, enfrenta o desafio de participar de discussões de fundo filosófico sobre as medições, as demais áreas demandam da metrologia apenas que ela **funcione a contento e ao menor custo**.

Avaliamos que os obstáculos colocados pela metrologia a certos compromissos metafísicos emanam da necessidade de propor recomendações que sejam **operacionais** e

pragmáticas. Esses obstáculos podem frustrar os “apegos ao realismo científico” de cientistas, mas também de filósofos. Parece-nos que alguns comentários em publicações técnicas e filosóficas sobre a estrutura conceitual da metrologia expressam frustrações desse tipo. As instituições metrológicas têm buscado adotar posições pragmáticas e, ao mesmo tempo, não limitar a estrutura conceitual a uma perspectiva única da medição. Frente a diversidade de abordagens oriundas das ciências que a metrologia busca cobrir e dos diferentes atores envolvidos, a coerência conceitual pode ser prejudicada para manter a flexibilidade. Isso não quer dizer, no entanto, que as instituições metrológicas não tenham zelo pelo rigor e pela coerência, o esforço para estabelecer uma estrutura conceitual coerente é evidente.

Do ponto de vista de nossa pesquisa, que dá ênfase ao aspecto empírico-experimental das medições, entendemos que a incerteza é a expressão do caráter inexato da quantificação das propriedades físicas. Como antecipamos no primeiro capítulo (subseção 1.5.), nossa perspectiva empirista está mais próxima de um **antirrealismo moderado e pragmático**, mas acreditamos que antirrealismo e realismo moderados se aproximam de tal modo que a discussão acerca dessas posições perde muito do seu vigor e do seu interesse. O foco nos problemas relacionados às medições constitui uma oportunidade para sobrepassar dicotomias e **seguir adiante** colocando as questões sob novas perspectivas. Ao desenvolver algumas dessas questões no próximo tópico, aprofundaremos aspectos do nosso ponto de vista.

O fato de concepções realistas e antirrealistas confrontarem-se, ao menos de modo implícito, na interpretação de significados de conceitos e de mudanças de abordagem reforça nosso ponto de vista da medição como *locus* privilegiado das relações entre teoria e experimento. Mesmo tendo suas especificidades, a medição constitui instância da atividade científica interpretada de acordo com perspectivas filosóficas que também são aplicadas às ciências de modo geral. Por outro lado, devido à amplitude de interesses que convergem na metrologia, que vão desde a ciência básica até à indústria e ao comércio, seus fóruns não constituem os âmbitos mais adequados para discussões desse tipo.

Ainda assim, os desafios colocados pelas medições e, especialmente, pela incerteza de medição para a construção de uma estrutura conceitual coerente fornecem elementos fundamentais para a filosofia da medição, em particular, e para a filosofia da ciência, em geral. Entendemos que, embora considerações práticas possam, por um lado, limitar o alcance filosófico das discussões, **os problemas colocados pela prática da medição** também servem, por outro lado, para **iluminar** aspectos que poderiam permanecer opacos por considerações excessivamente teóricas.

A discussão sobre a adoção do conceito de incerteza de medição pelos documentos da JCGM mostra como essa revisão conceitual mobilizou uma série de questões. Ao trazer o conceito de incerteza para o **centro** da estrutura conceitual, a metrologia deu visibilidade a questões de natureza ontológica e epistemológica relacionadas com as medições. Enfocamos algumas delas ao longo desse capítulo. No próximo, buscamos avançar na problematização para além do âmbito metrológico. Nosso objetivo, sobretudo, é apontar as implicações epistemológicas dessas questões.

3.4 Comentários finais do terceiro capítulo

Acompanhamos, nesse terceiro capítulo, as propostas de metodologias para estimar os erros de medição até a adoção do conceito de incerteza pelo BIPM. Muitas das questões que foram problematizadas em trabalhos publicados em meados do século XX já colocavam em debate questões que ainda hoje mobilizam os especialistas. No segundo capítulo, mostramos que houve resistência, na primeira metade século XX, à aplicação de conceitos estatísticos na metrologia. A situação atual em que a estatística é praticamente um ramo da metrologia é de um profundo contraste com a reação que ocorreu no passado. Para o bem ou para o mal, acreditamos que mais para o bem, a estatística se tornou fundamental para a ciência das medições. No bojo da incorporação das ferramentas estatísticas, as controvérsias filosóficas entre as abordagens frequentista e bayesiana instalaram-se também no âmbito da metrologia.

O anseio da comunidade científica por uma metodologia unificada para tratar a incerteza de medição começou a se concretizar com a publicação do *Report INC-1* (1980) e encontrou seu marco mais importante com a publicação do GUM (1993) pela ISO em colaboração com o BIPM. Nas últimas décadas do século XX, tanto as questões metrológicas quanto os conceitos matemáticos já tinham alcançado um bom nível de desenvolvimento para darem corpo ao guia. A principal conquista da metrologia com a publicação e disseminação do GUM foi oferecer um documento capaz de **unificar** e possibilitar a **harmonização** da metodologia para estimar e para expressar a incerteza de medição. Por certo, como reflexo de um processo de discussão precipitado, após a publicação do GUM, problemas foram apontados e muitas críticas direcionadas à metodologia do guia. Alguns dos problemas e das críticas foram discutidos ao longo desse terceiro capítulo. Mas os benefícios da existência do guia como instrumento **ordenador** e **canalizador** da discussão também foram destacados.

Em relação aos problemas apontados em algumas críticas recorrentes, cabe perguntar se o temor de “discussões filosóficas” que pudessem dificultar o consenso no processo de

elaboração do documento não contribuiu para a permanência desses problemas. Não temos como saber qual teria sido o resultado de um processo de elaboração do GUM mais aberto e mais disputado. Provavelmente, alguns problemas teriam sido sanados antes da publicação, mas o processo teria sido mais demorado. Entretanto, também há a hipótese de que o processo teria sido simplesmente interrompido sem a publicação do guia. Parece-nos que, em função da natureza **problemática dos conceitos metrológicos**, nenhum processo de confecção do documento, por mais aberto ao questionamento que fosse, teria produzido um guia isento de polêmicas.

A discussão envolvendo toda a estrutura conceitual da metrologia que se dá após a publicação do guia é testemunha da **posição central** que o conceito de incerteza de medição passou a ocupar. Ressaltar essa centralidade e indicar suas razões constituem dois dos objetivos dessa tese. Como indicamos, quando apontamos o papel articulador do conceito, é a incerteza que possibilita tanto a articulação vertical que assegura a rastreabilidade das medições, quanto a articulação horizontal que proporciona a comparabilidade das medições. Essa função chama atenção para a impossibilidade de a rede metrológica se estabelecer sem a margem de tolerância das medições.

A metodologia do GUM, com a obtenção de um valor **único** para a incerteza de um processo de medição, possibilitou a visualização do papel articulador desempenhado pela margem de incerteza. Mas a expressão do valor único de incerteza, como haviam alertado alguns metrologistas, pode ocasionar perda de informação. Para superar esse problema, o guia recomenda a declaração das informações necessárias para o emprego futuro do resultado da medição. A forma mais completa de expressar a incerteza é através da **planilha de incertezas** que contém todas as fontes de incerteza consideradas na medição com seus respectivos valores e, em alguns casos, com informações complementares.

A automatização dos cálculos de incerteza poderia ser apontada como outra consequência negativa da publicação do guia. A disponibilidade de uma metodologia recomendada em um guia chancelado por diversas organizações científicas pode levar à sua adoção de forma **irrefletida**. Mas, como veremos no próximo capítulo, o próprio guia alerta que nada substitui a reflexão crítica sobre o levantamento e o cálculo das incertezas. Espera-se também que a submissão dos resultados científicos à revisão por pares minimize os possíveis maus usos do documento.

Os cientistas são **mobilizados** pelas incertezas e os erros presentes em seus resultados. Esses são pontos que requerem atenção e investimento para serem minimizados, mas também requerem atenção e investimento para que sejam estimados de modo **realístico**. Margens de

incerteza não realísticas, excessivamente largas ou estreitas, podem trazer descrédito ao pesquisador ou ao grupo de pesquisas. Margens muito largas sugerem que o procedimento de medição apresenta deficiências ou que as incertezas foram mal avaliadas. Margens muito estreitas podem levar a problemas de resultados negativos em comparações e também podem levantar suspeitas de que o grupo de pesquisas pretende exibir uma qualidade de medição que de fato não pode alcançar. Ou seja, podem ser tomadas como a exibição de uma vaidade tola que acabará por gerar resultados negativos para o grupo. Alguns aspectos dessas questões serão retomados sob novas perspectivas no quarto capítulo.

Uma característica difundida relacionada ao GUM refere-se à **mudança de abordagem** de erro para a incerteza que a publicação do guia teria promovido. Dedicamos boa parte do capítulo para a discussão desse tema, apresentando o ponto de vista de alguns pesquisadores. No nosso ponto de vista, a mudança foi **discreta** e deixou, propositalmente, a possibilidade de **diferentes perspectivas**. Sublinhamos que a discussão em torno desse tema segue ativa e que as revisões em curso dos documentos da JCGM procuram esclarecer algumas questões, mas também manter a diversidade.

Pode-se tomar a mudança de abordagem como significativa se ela for pensada da perspectiva do **esvaziamento** de conceitos mais abstratos, ideais, em benefício de conceitos concernentes à esfera experimental. Nessa perspectiva, a substituição dos conceitos ideais (não conhecíveis) de VV e de erro de medição pelo conceito de incerteza de medição pode ser interpretada como um passo da metrologia no sentido de **substituir conceitos ideais por operacionais**. Ou seja, a mudança de abordagem faria parte de um processo de de-idealização, principalmente no que concerne à expressão de resultados (sejam resultados de medição, de calibração ou de controle da qualidade). Embora a avaliação da incerteza seja baseada nos **modelos** teórico e estatístico, deve-se considerar que o levantamento e o cálculo das fontes de incerteza se dão mediante a escrutinização do procedimento experimental.

Vários conceitos marcados por idealizações, como o de verdade e de exatidão absoluta, sempre estiveram presentes na ciência e na filosofia da ciência. O reconhecimento da inevitabilidade do erro e da incerteza têm o potencial de afastar essas idealizações em benefício de uma imagem mais **humana** das ciências. Entretanto, constata-se que os conceitos ideais continuam a ser atrativos e a ser valorizados por cientistas e filósofos. Muitas vezes tais conceitos são reputados como necessários para manter a coerência conceitual da metrologia. Os conceitos baseados em grandezas conhecíveis têm sido privilegiados simplesmente porque, em muitas situações, **funcionam melhor**. Enquanto os conceitos de erro e de VV são

ambíguos em alguns contextos, aqueles baseados em grandezas conhecíveis podem ser mais facilmente compreendidos.

Um aspecto notável que está envolvido na questão da mudança de abordagem, mas que também está envolvido em outras questões, é a **relação dialética** entre mudança e permanência na estrutura conceitual da metrologia. Uma estrutura criada para fornecer confiança nas medições não deve ser abalada em seus fundamentos a cada revisão conceitual. Porém, os conceitos dessa estrutura têm que refletir as perspectivas que os atores envolvidos têm deles e tais perspectivas são dinâmicas, seja porque os atores revisam suas concepções, seja porque mudam os atores com voz ativa no âmbito metrológico. Devido a essa dinâmica, o emprego de alguns conceitos passa por ciclos de esvaziamento e recuperação e as edições do VIM também afastam ou resgatam certos termos. A própria ideia da mudança de abordagem trazida pelo GUM, por sua vez, é passiva de entrar nessa dinâmica. Além disso, o uso dos conceitos na metrologia não segue literalmente o que o vocabulário prescreve, o que torna a evolução dos conceitos ainda menos linear.

Muitas vezes a interpretação dos conceitos é moldada por perspectivas filosóficas mais amplas que os comentadores trazem consigo. Destacamos quatro perspectivas gerais sobre o grau de realismo das grandezas físicas presentes nos debates sobre os conceitos metrológicos. Avaliamos que a abordagem empregada nos documentos metrológicos pode ser caracterizada como **pragmática** e **operacional**, com elementos **realistas** moderados. Nossa interpretação compartilha muitos aspectos das posições presentes nesses documentos, mas preserva uma **precaução cética** em relação à realidade das grandezas. Embora reconheçamos que a metafísica não possa ser de todo expurgada dos conceitos científicos, defendemos que a inferência metafísica da realidade das grandezas é questionável e desnecessária.

A relação entre a perspectiva realista e os conceitos metrológicos é condicionada pela prática. Sabemos que os cientistas concebem seus objetos de estudo pela perspectiva realista. Por que então esse realismo é evanescente na estrutura conceitual da metrologia? Simplesmente porque os conceitos metrológicos têm que ser úteis **na prática** e, como sustentamos acima, os conceitos operacionais, que colocam o realismo entre parênteses, funcionam melhor.

Por outro lado, no nível teórico, os conceitos ideais que fundamentam as disciplinas científicas são **essenciais**. Os cientistas que trabalham nesse nível empregam, sem problema, os conceitos puramente teóricos e abstratos. Mas quando se trata de resultados experimentais e de conceitos que visam inclusive empregos fora do âmbito verdadeiramente científico (como nas aplicações tecnológicas), os conceitos abstratos podem se constituir em

empecilhos. Na discussão sobre o conceito de VV, nos parece que o fato de conceitos ideais fazerem parte dos modelos estatísticos está sendo usado de forma inadequada para defender a pertinência do conceito.

No último capítulo da tese, vamos fazer uma discussão sobre incerteza de medição do ponto de vista de suas origens. Para isso, vamos recorrer a trabalhos da filosofia do experimento e da filosofia da medição procurando ir além das discussões travadas no âmbito metrológico.

4 EPISTEMOLOGIA DAS INCERTEZAS

...Naquele império, a Arte da Cartografia alcançou tal Perfeição que o mapa de uma única Província ocupava toda uma Cidade, e o mapa do império, toda uma Província. Com o tempo, esses Mapas Desmesurados não foram satisfatórios e os Colégios de Cartógrafos levantaram um Mapa do Império, que tinha o tamanho do Império e coincidia pontualmente com ele. [...]

“**Sobre o Rigor das Ciências**”, *Jorge Luís Borges*

Até o terceiro capítulo, tratamos as questões que envolvem a medição e a incerteza do ponto de vista histórico e crítico-filosófico dentro da metrologia. Vamos, a partir deste ponto da tese, buscar compreender a incerteza de medição **para além** da metrologia, mas **a partir dela**, levando em conta seriamente as contribuições da teoria e prática metrológicas. Da mesma forma como a filosofia da medição tem feito, não vamos perder de vista a metrologia, em nossa investigação. Na verdade, como indicamos na introdução, a metrologia é nosso ponto de partida e uma de nossas fontes mais valiosas, mas isso não significa que devamos nos restringir ao debate travado no contexto da metrologia. Para que a discussão não ficasse restrita ao âmbito metrológico, na seção 4.1, buscamos situar as medições no contexto dos **experimentos** e pensá-la em relação ao tratamento que os erros experimentais recebem na filosofia do experimento.

A modelagem é uma das fases destacadas como essenciais no projeto e na realização dos experimentos. Do mesmo modo, a filosofia da medição vem pondo em relevo o papel que os **modelos** desempenham no processo de medição. Na seção 4.2, buscamos compreender o que são e como são empregados os modelos nas ciências de uma forma geral e nas medições em particular. Os modelos são fundamentais para nosso trabalho não apenas devido à sua importância para as medições, mas também porque a modelagem constitui uma instância crucial na origem de erros e incertezas experimentais.

Do ponto de vista filosófico, podemos nos perguntar sobre os motivos da inevitabilidade das incertezas e dos erros experimentais. Fazemos, então, na subseção 4.2.3, um **esboço de investigação genealógica** da incerteza: buscamos identificar as instâncias **das quais emanam as incertezas** experimentais. Como apontamos acima, a modelagem é uma dessas instâncias. No jargão metrológico, “fonte de incerteza” é um elemento ou uma característica do procedimento de medição que contribui para a incerteza global da medição. Cada fonte de incerteza é investigada e estimada para fornecer um ou mais “componentes de

incerteza” segundo a metodologia adotada. Desse modo, na prática metrológica, cada fonte de incerteza possui uma especificidade própria. Na investigação genealógica, vamos buscar identificar as **origens gerais** das incertezas. Percorremos, então, um caminho **inverso** daquele realizado na avaliação realizada nos laboratórios: investigamos as instâncias mais gerais das fontes de incerteza. A busca pela origem das incertezas, que chamamos de **esboço de uma genealogia das incertezas**, nos leva, no fechamento do capítulo (seção 4.3), a apontar os diversos motivos pelos quais é possível falar em uma **epistemologia das incertezas**. Apesar da ênfase que colocamos na tese em questões epistemológicas, a discussão toca também em questões **ontológicas**.

4.1 Experimento, erro e incerteza

A ideia de que a “experimentação possui vida própria” forneceu o lema para várias obras em filosofia das ciências a partir das últimas décadas do século XX. Os estudos que buscaram, ou melhor, que buscam compreender a função e o funcionamento das práticas experimentais nas ciências ficaram conhecidos como **filosofia dos experimentos** (p. ex., FRANKLIN, 1986; GOODING, 1990; PICKERING, 1992; RADDER, 2003). A filosofia da medição produzida nas primeiras décadas do século em curso, como salientamos no primeiro capítulo dessa tese (subseção 1.2.2), se insere no contexto da valorização pela filosofia da ciência do trabalho experimental nas ciências. Acreditamos que alguns desses estudos, juntamente com nossas próprias reflexões, podem iluminar questões relacionadas à presente tese.

A realização de experimentos requer investimentos elevados em termos de **tempo, especialização e paciência**, para não falar em custos financeiros. Requer, então, habilidades específicas do pesquisador; talvez por isso seja comum dividir os cientistas em experimentais e teóricos (até porque, os empreendimentos teóricos, por seu turno, também requerem habilidades específicas). Fazer um experimento “funcionar”, por si só, é uma tarefa árdua, que dirá fazer o experimento funcionar para produzir resultados quantitativos adequados... Como mencionamos na subseção 1.2.2.2, Hacking comentou que as práticas realizadas nas escolas não fornecem, em geral, os resultados esperados justamente para que os alunos aprendam como é difícil alcançar bons resultados nos laboratórios (HACKING, 2012, p. 330).

Dentre as habilidades requeridas para o trabalho experimental está, inclusive, aquela relacionada ao artesanato e à engenharia. É comum o trabalho experimental exigir a confecção de projetos e montagens de arranjos experimentais nas quais o cientista tem de se

engajar. Todos os mínimos detalhes envolvidos nessas atividades constituem evidências para o próprio cientista de que ele deve obter um bom resultado experimental, mas **não** um resultado com **exatidão absoluta**. Nada é mais esclarecedor sobre a possibilidade dos erros e incertezas presentes em um experimento do que os **detalhes físicos** contidos no arranjo experimental. Esse é o motivo de muitas observações sobre a impossibilidade de exatidão nas medições físicas feitas por cientistas experimentais e filósofos atentos à prática científica. Por exemplo, das observações de Bachelard de que a grandeza física comporta uma “atmosfera de imprecisão” (BACHELARD, 2004, p. 75), de Peirce, conforme interpretação de Robert Crease, de que “jamais poderia haver precisão absoluta” (CREASE, 2013, p. 186) e de Bridgman de que há sempre uma “penumbra de incerteza” envolvendo qualquer medição (BRIDGMAN, 1958, p. 33).

Uma das características definidoras dos experimentos é a possibilidade, ou melhor, a **inevitabilidade**, de erro. Enquanto é possível propor uma teoria ou uma formulação matemática exata, não se espera de um experimento que forneça um resultado exato. As **limitações empíricas**, materializadas na inevitabilidade do erro e da incerteza, são a pedra no sapato da matematização **perfeita** da natureza e da quantificação **exata** das grandezas. Essa característica comum aos experimentos fornece elementos importantes para nossa pesquisa.

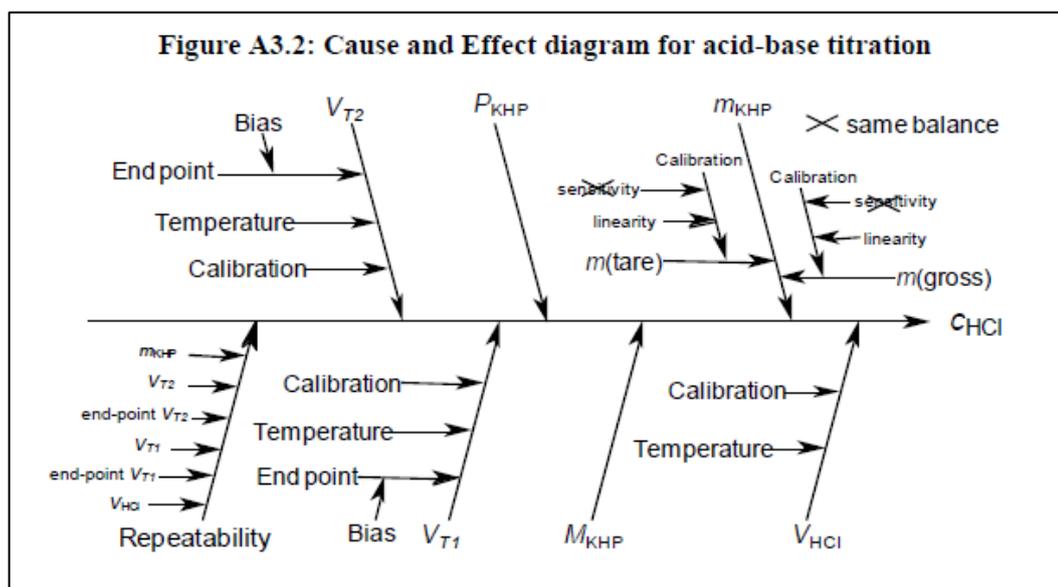
4.1.1 O erro experimental como fonte de incerteza

Boa parte do trabalho experimental é direcionado para identificar e minimizar os erros. Vimos que o vocabulário e a estrutura conceitual corrente da metrologia adotam a abordagem de incerteza e restringem o emprego do conceito de erro. Erros, em geral, são conhecidos e passíveis de correção. Mas, além de o VIM3 e o GUM manterem os conceitos de erro aleatório e sistemático, na rotina metrológica, é comum falar em erros que não podem ser corrigidos, ou seja, fala-se de erros como fontes de incerteza. Até porque, algumas fontes de incerteza tipo B são avaliadas estimando-se os limites de erro. Nessas situações, os metrologistas se perguntam o quanto “estão errando” ou qual o limite de erro que um instrumento pode apresentar. De modo que, mesmo sob a abordagem de incerteza, dependendo do contexto, não é impróprio falar em erros: eles estão na origem das incertezas. Há incerteza porque há a possibilidade de erro, e mesmo que os erros não possam ser plenamente conhecidos, é possível estimar as incertezas que os erros impõem à medição. Note-se que estamos falando de erros experimentais (*errors*), não de possíveis enganos (*mistakes*) cometidos nos procedimentos.

Mas é importante observar também que **os erros que afetam as medições** (fontes de incerteza) são conceitualmente diferentes do **erro de medição** que, conforme vimos no primeiro capítulo (1.1.2.2) e segundo o VIM3, é “a diferença entre o valor medido e um valor de referência” (def. 2.16). Um importante detalhe, que também já mencionamos anteriormente em algumas passagens (p. ex., na subseção 2.3.3 sobre erros sistemáticos), é que um erro de medição **conhecido** (aquele que fornece um valor para corrigir o resultado de uma medição) também comporta erro, ou seja, possui uma **incerteza** associada ao seu valor. Não é possível obter um valor de erro de medição isento de incerteza. Erros de medição, em geral, são obtidos por meio de comparação **empírica** do resultado da medição do mensurando com o resultado da medição de um padrão de referência.

Na prática metrológica, o levantamento de fontes de incertezas (também tratadas no dia a dia metrológico como fontes de erro) é realizado através de um processo metucioso de análise. Cada etapa do procedimento de medição passa por um escrutínio pormenorizado na busca por possíveis fontes de incerteza.

Figura 18 – Diagrama de Ishikawa, também chamado de diagrama de causa e efeito, empregado para a identificação de fontes de incerteza na titulação ácido-base de uma solução de ácido clorídrico



Fonte: ELLISON; WILLIAMS (EUROCHEM; CITAC), 2012, p. 54.

Um recurso comumente empregado na prática, embora não faça parte das recomendações do GUM, é o do **diagrama de Ishikawa**, também conhecido como diagrama de causa e efeito (ou, ainda, diagrama espinha de peixe). Esse tipo de diagrama foi concebido pelo engenheiro químico japonês Kaoru Ishikawa (1915-1989) para ser empregado no

controle da qualidade industrial, mas passou a ser adotado também na metrologia. Na figura 18, apresentamos um exemplo de diagrama desse tipo que aparece em um manual para avaliação de incertezas em análises químicas (ELLISON; WILLIAMS, 2012). O diagrama é referente à medição da concentração de uma solução de ácido clorídrico (c_{HCl}) por titulação ácido-base. A seta horizontal central representa a grandeza de saída (mensurando) e as setas que apontam para a seta central representam as possíveis fontes de incerteza referentes às grandezas de entrada e à repetibilidade dos valores obtidos na titulação. Ao adicionar uma seta para cada grandeza de entrada e se indagar pelas fontes de incerteza que podem afetar cada uma delas, o pesquisador se vale da montagem do diagrama para o levantamento das fontes, bem como para visualizar os pontos críticos do procedimento de medição.

O GUM sugere que o levantamento das fontes de incerteza deve ser feito pela **modelagem do procedimento de medição**, mediante a construção da **função** que relaciona as grandezas de entrada com a grandeza de saída. Para orientar o metrologista, apresenta uma lista com as principais fontes de incerteza em medições (INMETRO, 2012a, 3.3.2), que discutimos mais adiante. Nenhum método assegura a identificação de todas as fontes de incerteza. Pode ser que nem todos os fatores que influenciam nas grandezas de entrada sejam imediatamente identificáveis. Para assegurar uma estimativa fidedigna das incertezas envolvidas, o guia recomenda a revisão do levantamento das fontes e de suas estimativas, a adoção de métodos de checagem internos e de comparações com outras medições do mesmo mensurando. Nessa questão, são valiosas as comparações e as trocas de informações entre laboratórios. Além disso, o guia enfatiza a necessidade de um conhecimento detalhado do procedimento de medição e da adoção de um olhar crítico e honesto sobre a estimativa da incerteza:

O modelo matemático deve ser revisado sempre que os dados observados, incluindo o resultado de determinações independentes do mesmo mensurando, demonstrarem que ele está incompleto. Um experimento bem projetado pode facilitar sobremaneira avaliações confiáveis da incerteza e é uma parte importante da arte de medição. [...] Embora este Guia proporcione uma metodologia para avaliar incertezas, **ele não pode substituir o raciocínio crítico, a honestidade intelectual e a habilidade profissional**. A avaliação de incerteza não é uma tarefa de rotina nem uma tarefa puramente matemática; ela depende de conhecimento detalhado da natureza do mensurando e da medição. A qualidade e utilidade da incerteza indicada para o resultado de uma medição dependem, portanto, em suma, da **compreensão, análise crítica e integridade** de todos aqueles que contribuem para o estabelecimento de seu valor. (INMETRO, 2012a, 3.4; grifos nossos).

A metodologia para a estimativa da incerteza de medição, com seu conteúdo técnico e matemático, pode passar a falsa impressão de que o cálculo está isento de problemas e de que

a incerteza é apenas um detalhe técnico a ser expresso juntamente com o resultado da medição. Embora a avaliação de incertezas, como alerta o guia, não deva ser uma tarefa de rotina no laboratório de metrologia, também não é um problema que se resolva de uma vez por todas quando o laboratório “fecha” a estimativa de incerteza de um procedimento. Reavaliações das incertezas não são rotineiras, mas não deixam de ser frequentes, sobretudo, não deixam de **desafiar** os metrologistas em seu cotidiano. A **instabilidade** na estimativa de incerteza de medição de um procedimento se revela em muitas situações: pequenas alterações no procedimento de medição, novas formas de avaliar as fontes de incerteza já consideradas, contrastes com avaliações realizadas por outros profissionais ou outros laboratórios etc.

Tal instabilidade constitui uma das faces do caráter **problemático** da estimativa da incerteza de medição. Caráter problemático não no sentido de que a avaliação das incertezas seja, frequentemente, malconduzida, mas no sentido de ser uma instância colocadora de problemas e de ser susceptível a revisões. Alguns problemas relativos à incerteza foram enfocados no capítulo anterior. Interessa-nos nessa seção, principalmente, o caráter revelador da correspondência **inexata** entre as leis e teorias científicas, seus modelos e os valores obtidos no processo empírico de medição.

4.1.2 Tipologia de erros e incertezas

O que os erros e as incertezas podem nos dizer sobre os experimentos? Para o filósofo da ciência israelense Giora Hon, a investigação pela via dos erros, que ele denomina de “perspectiva negativa”, possibilita uma avaliação epistemológica dos experimentos (HON, 2003, p. 176, 196). A perspectiva é negativa porque explora as ‘falhas’ na obtenção de conhecimento pelo experimento. Ao invés de olhar apenas para o resultado do experimento, olha-se para seus possíveis erros. Segundo Hon, a distinção entre erros aleatórios e sistemáticos está relacionada com a maneira com que os erros são matematicamente quantificados e pode não ser suficiente para fornecer uma **perspectiva epistemológica do experimento**. Ele propôs, então, uma **tipologia de erros** que levasse em conta os diferentes estágios de um experimento. Para isso, classificou os erros como provenientes da “(1) teoria de base”, das “(2) suposições concernentes ao arranjo experimental usado e seu

funcionamento”, dos “(3) relatórios observacionais” e das “(4) conclusões teóricas”¹⁰⁶ (HON, 1989, p. 479).

Seria essa categorização pertinente para a filosofia da medição? Enquanto atividade experimental, a medição compartilha muitos aspectos com outras atividades experimentais, mas também guarda algumas particularidades. Quando se fala em medições, três questões têm que ser consideradas: a primeira diz respeito à caracterização da medição como **aquisição e produção de dados**, a segunda é se a atividade experimental de medição é carregada pela teoria (*theory-ladden*) e a terceira está relacionada à **função**, apontada por Kuhn, que as medições desempenham nos períodos **normais** das ciências. Tratamos, a seguir, dessas três questões.

O emprego das medições para caracterizar os fenômenos previstos pelas teorias é muitas vezes descrito, de forma abreviada, como uma etapa da metodologia científica. Entretanto, é importante estabelecer uma distinção entre a produção de dados realizada pelos sistemas de medição (MSs) e a caracterização de fenômenos, conforme mostraram os filósofos da ciência estadunidenses James Bogen e James Woodward (1988). Em geral, os dados, tais como os resultados de medição, não podem ser preditos ou sistematicamente explicados pela teoria, pois dependem, em larga medida, dos MSs empregados. Os dados são “idiossincráticos”¹⁰⁷, isto é, dependentes do contexto experimental em que foram produzidos. Já os fenômenos, por contraste, não são específicos do contexto experimental. Espera-se que sejam estáveis, características repetíveis que podem ser detectadas por meio de uma variedade de procedimentos, que podem gerar diferentes tipos de dados (BOGEN; WOODWARD, 1988, p. 317).

¹⁰⁶ Em capítulo de livro no qual busca ir além da mera descrição de experimentos, Hon faz uma analogia dos erros que distinguiu em sua classificação com uma tipologia de “ídolos” que, embora inspirada na tipologia de ídolos do filósofo moderno inglês Francis Bacon (1561-1626), pretende ir além dela e suprir suas deficiências. A tipologia de Hon se concentra em quatro elementos de uma encenação teatral: o roteiro, o palco, o espectador e a moral do espetáculo (HON, 2003, p. 190). Cada um dos quatro elementos teatrais está relacionado, na ordem apresentada, a um dos estágios do experimento: (1) teoria de base – roteiro; (2) suposições relativas aos instrumentos – palco; (3) relatório – espectador; e (4) conclusões – moral. Essa categorização dos erros permite não somente a avaliação epistemológica dos experimentos, como também perceber a condução de um experimento como similar à estrutura de uma encenação teatral: “Num experimento, a natureza será levada, se você assim desejar, a apresentar um show num palco concebido e projetado em algum roteiro. O show é observado e registrado por um espectador humano ou automatizado e, finalmente, uma interpretação é proposta para fornecer uma moral – isto é, o resultado do experimento como conhecimento do mundo físico” (HON, 2003, 190).

¹⁰⁷ O termo “idiossincrático” é empregado para enfatizar que os dados produzidos são característicos da metodologia e do MS empregados. Cada um dos três métodos de determinação de D_w que apresentamos nas subseções 1.1.2.5 e 2.1.3 (calorimetria, ionometria e dosimetria química Fricke) produzem dados brutos distintos que são submetidos a análises estatísticas apropriadas para esses dados. Na estimativa das incertezas, certamente serão identificadas fontes de incerteza próprias referentes às grandezas de entrada de cada modelo matemático.

Para os filósofos estadunidenses, os fenômenos são previstos e explicados pelas teorias científicas bem desenvolvidas, mas raramente podem ser diretamente observados. A observação, em geral, se dá pela produção de dados, que além de dependerem dos instrumentos empregados para obtê-los, dependem também, em larga medida, de tratamentos matemáticos posteriores à sua aquisição (BOGEN; WOODWARD, 1988, p. 305-10).

A medição como instância experimental produz dados que carregam consigo as características do modo como foram produzidos. Na etapa da pós-medição, os dados podem ser interpretados para diferentes finalidades, inclusive sua associação a fenômenos sob investigação. O que queremos ressaltar é que muitos **experimentos** envolvem a medição de grandezas, mas não se limitam à essa atividade. Então, é preciso considerar as particularidades da medição enquanto **produção de dados** no âmbito da filosofia dos experimentos. Além disso, nosso foco aqui é menos a questão de saber se as teorias predizem os fenômenos ou de saber como dados podem detectar os fenômenos, mas, ao contrário, **como os dados são produzidos a partir dos conhecimentos dos fenômenos e das teorias**. Isso porque as incertezas que afetam os dados obtidos na medição, conforme abordaremos a partir da próxima seção, surgem exatamente do desajuste (inevitável, mesmo que pequeno) entre os fenômenos empíricos e as teorias científicas.

Uma questão importante para a filosofia do experimento é a de responder à argumentação de que as atividades científicas de observação (portanto, os experimentos) se dão com base na teoria¹⁰⁸, isto é, se essas atividades são **carregadas de teoria** (*theory-ladden*). A argumentação de que os experimentos são carregados de teoria teve origem em críticas à distinção entre “termos teóricos” e “termos observacionais” proposta por empiristas lógicos. Se os experimentos são guiados pelas teorias e têm seus resultados interpretados à luz das teorias, eles não são, de fato, autônomos em relação das teorias. Acreditamos que essa questão não pode ser respondida independente do contexto em que os experimentos são realizados. Porém, no caso dos experimentos de medição, na maioria das vezes, a atividade se dá baseada no modelo matemático construído a partir das teorias. Desde o primeiro capítulo (subseção 1.2.2.1, sobre o artigo de Kuhn, e subseção 1.4.3, sobre o artigo de Mari e colegas de 2017), antecipamos que a medição pode ser caracterizada como uma atividade experimental carregada de teoria.

¹⁰⁸ O problema pode ser tratado de diferentes maneiras conforme se diga que os experimentos são realizados com base na teoria, ou guiado pela teoria, ou ainda carregado de teoria. Embora, em muitos contextos, essas distinções sejam importantes, aqui vamos tratar a questão de maneira simplificada. Para a nossa discussão, o termo “com base na teoria” tem o mesmo significado que “guiado pela teoria” ou “carregado de teoria”.

O filósofo da ciência alemão Michael Heidelberger, no ensaio “*Theory-ladenness and scientific instruments in experimentation*” (2003), distingue entre as funções produtiva, construtiva e representativa dos instrumentos científicos nos experimentos. As duas primeiras funções dos instrumentos são requeridas nos estágios **exploratórios** da investigação científica, um nível preliminar em que a busca pode se dar **sem** a orientação de uma teoria. Em um segundo nível da investigação, quando os instrumentos são empregados com função **representativa**, a experimentação é realizada “como ajuste ao contexto teórico” ou “assimilação a uma interpretação teórica” (HEIDELBERGER, 2003, p. 147). É nesse segundo nível que, em geral, o experimento envolve o emprego de **instrumentos de medição**.

No artigo, Heidelberger pretende mostrar que o experimento não é necessariamente carregado de teoria (*theory-ladden*) e, por isso, sublinha que, em muitos casos, “a experimentação pode e é perseguida sem levar em conta o segundo nível” (HEIDELBERGER, 2003, p. 150). Entretanto, tendo em vista a distinção que o filósofo propõe, o emprego de instrumentos de medição comumente ocorre no segundo nível, que **depende da teoria**. Isso não significa que os instrumentos de medição não possam ser empregados nos estágios exploratórios das investigações, sem o apoio de teorias, mas que tal emprego não é usual. Essa constatação é semelhante à de Kuhn acerca das funções da medição nos diferentes períodos de evolução das ciências, que é a terceira questão sobre as peculiaridades da medição enquanto atividade experimental e que comentamos a seguir.

Conforme discutimos no primeiro capítulo, Kuhn sustentou que as medições nas ciências físicas têm finalidades distintas nos períodos de ciência normal e de pesquisa extraordinária. A terceira questão em relação às particularidades da medição que queremos ressaltar diz respeito ao fato de que a maior parte do trabalho dos cientistas nos períodos “normais” é uma tarefa que visa à **melhoria da qualidade das medições** e não à avaliação de teorias. Uma parte significativa das medições é realizada no âmbito da metrologia, ou seja, para **reforçar a confiança** das medições e **melhorar suas exatidões**. Assim, identificamos a necessidade de adaptar a classificação das fontes de erro experimental proposta por Hon às medições. A etapa das “conclusões teóricas”, em muitas situações, pode ser assimilada ao relatório da observação. Isso porque o resultado da medição não terá por finalidade produzir conclusões sobre a qualidade das teorias, mas apenas sobre a qualidade das próprias medições. O relatório de observação, quando materializado em um certificado de calibração, destina-se apenas a fornecer confiança às futuras medições a serem realizadas com o instrumento ou o padrão calibrado.

Feitas as três observações que visam chamar a atenção para as particularidades do processo de medição, em relação aos experimentos de um modo geral, retomamos a investigação das medições pela “perspectiva negativa”, isto é, a partir das fontes de incerteza. Como dissemos acima, o GUM apresenta uma relação, não exaustiva, das possíveis fontes de incerteza em medições. As fontes que o guia relaciona são as seguintes:

a) definição incompleta do mensurando; b) realização imperfeita da definição do mensurando; c) amostragem não representativa [...]; d) conhecimento inadequado dos efeitos das condições ambientais sobre a medição ou medição imperfeita das condições ambientais; e) erro de tendência pessoal na leitura de instrumentos analógicos; f) resolução finita do instrumento ou limiar de mobilidade; g) valores inexatos dos padrões de medição e materiais de referência; h) valores inexatos de constantes e de outros parâmetros obtidos de fontes externas e usados no algoritmo de redução de dados; i) aproximações e suposições incorporadas ao método e procedimento de medição; j) variações nas observações repetidas do mensurando sob condições aparentemente idênticas (INMETRO, 2012a, 3.3.2).

O guia acrescenta ainda que “[E]ssas fontes não são necessariamente independentes e algumas das fontes de a) até i) podem contribuir para a fonte j)” (INMETRO, 2012a, 3.3.2). Ou seja, todas as fontes de incerteza Tipo B, descritas nos itens (a) até (i), podem contribuir para as fontes de incerteza Tipo A, descrita no item (j). Além disso, o guia alerta, ainda no mesmo item 3.3.2, para a possibilidade de efeitos sistemáticos não serem identificados e assim não serem levados em conta na estimativa de incerteza. Embora a lista, conforme o próprio texto apresenta, não seja exaustiva, pode nos servir de orientação para pensarmos a inevitabilidade da incerteza em função de suas fontes.

Podemos ensaiar o estabelecimento de uma relação entre as fontes destacadas pelo guia e a classificação de erros dos experimentos proposta por Hon. Das fontes mencionadas no GUM, a primeira (a) se refere à incerteza definicional, para a qual o guia não fornece indicações sobre como avaliá-la e que, em geral, não é mesmo levada em conta nas planilhas de incerteza. A fonte (a) juntamente com a fonte (b), realização imperfeita da definição, e parte das fontes descritas nos itens (d), conhecimento inadequado dos efeitos das condições ambientais, e (i), aproximações e suposições incorporadas ao método e procedimento, referem-se a erros provenientes das **teorias de base**. Esses erros advêm de aproximações ou simplificações feitas no modelo de medição. Também podemos incluir nos erros devidos às teorias de base aqueles relativos aos valores inexatos de constantes e parâmetros empregados nos cálculos (h).

Segundo a mesma classificação, as incertezas relacionadas às calibrações de equipamentos (g) juntamente com parte daquelas descritas nos itens (d), medição imperfeita

das condições ambientais, e (f), resolução e sensibilidade dos instrumentos, seriam atribuídas ao **arranjo experimental**. Restariam apenas os erros de tendência pessoal na leitura de instrumentos analógicos (e) para serem classificados como oriundos dos **relatórios observacionais**. Como antecipamos, no caso das medições, não são, em geral, identificados erros ou incertezas na fase das **conclusões teóricas**. A tipologia dos erros experimentais de Hon nos auxilia a obter uma imagem da incidência de erros em três estágios das medições: boa parte deles se deve à “teoria de base”, outra boa parte se deve ao “arranjo experimental” e uma pequena parte viria dos “relatórios observacionais” da medição. Acreditamos que essa classificação juntamente com a relação das fontes de incerteza descritas no GUM nos permitem dar um passo além em busca das origens das incertezas em medições.

As incertezas que se devem às **teorias** nas quais as medições se baseiam apontam para limitações relacionadas à **modelagem** dos fenômenos envolvidos. Felizmente, as questões que envolvem os modelos têm sido extensamente discutidas na filosofia da medição produzida nas últimas décadas. Assim, podemos nos valer desses estudos para compreendermos melhor a função dos modelos e como as incertezas têm origem na modelagem. As incertezas oriundas do **arranjo experimental**, por sua vez, estão relacionadas à inexatidão que os instrumentos comportam quando submetidos ao **sistema empírico**. Essas incertezas concernem aos assim chamados **MSs** (sistemas de medição), que também têm sido discutidas pela filosofia da medição contemporânea. Além dessas fontes, pela tipologia de Hon, restam apenas as poucas incertezas que surgem devido aos relatórios de medição que são erros relacionados à observação, portanto, subjetivos. Erros desse tipo são cada vez menores em função da crescente substituição de escalas de indicação analógicas por digitais e também da automação dos processos. Vale lembrar que estamos falando de fontes de incerteza e não de possíveis enganos na elaboração dos relatos. Em função da pouca importância que as possíveis incertezas oriundas da fase de relatos comportam, vamos deixá-las de lado.

Da tipologia de Hon, juntamente com a relação de fontes de incerteza do GUM, podemos apontar, grosso modo, preliminarmente, que as incertezas que afetam às medições são devidas à **teoria/modelagem** e ao **MS/sistema empírico**. Como também observou Hon, “[O] erro é um fenômeno epistemológico multifacetado” (HON, 2003, 190). Portanto, investigar as possíveis fontes de inexatidão de um experimento requer o exame das diversas facetas epistemológicas dos erros envolvidos. Uma vez que o conceito de modelo é crítico para a medição e, principalmente, para a identificação das fontes de incerteza, vamos enfocá-lo na próxima seção. Sendo o tema dos modelos caro à filosofia da medição, voltaremos a publicações dessa disciplina que o abordam.

4.2 A filosofia da medição e os papéis dos modelos

Vimos o conceito de modelo surgir reiteradamente em nossa pesquisa. Na estimativa da incerteza de medição, a modelização é crucial para a identificação e quantificação das fontes de incerteza de um procedimento de medição. O GUM destaca a importância da modelização para a obtenção do valor do mensurando, bem como para a estimativa das fontes de incertezas de medição:

O modelo matemático da medição, que transforma o conjunto de observações repetidas no resultado de medição, é de **importância crítica** porque, além das observações, ele geralmente inclui várias grandezas de influência que são conhecidas de forma inexata. Essa falta de conhecimento contribui para a incerteza do resultado da medição, assim como também contribuem as variações das observações repetidas e qualquer incerteza associada ao próprio modelo matemático (INMETRO, 2012a, 3.1.6; grifo nosso).

Como apresentamos anteriormente (3.1.3 e 3.2.1.1), o guia trata a modelização da grandeza como a construção de uma **relação funcional** entre o valor do mensurando, os valores das grandezas de entrada e demais parâmetros envolvidos. O grau de modelização, isto é, a amplitude do modelo adotado, depende do propósito da medição. Não é razoável estabelecer um modelo complexo no qual compareçam grandezas cuja influência no resultado seja pequena comparada às demais fontes de incerteza. Quando se trata, por exemplo, de medição a ser realizada em uma aula prática, não faz sentido empregar um modelo muito sofisticado. Por outro lado, quando a medição visa a realização primária de uma grandeza em laboratórios dos Institutos Nacionais de Metrologia (INM), não é razoável deixar de fora do modelo grandezas e parâmetros que possam aumentar a incerteza de medição e/ou comprometer o desempenho do INM em comparações laboratoriais.

Alguns trabalhos da filosofia da medição que abordam o tema dos modelos foram apresentados ainda no primeiro capítulo. Antes de recapitularmos as conclusões dos trabalhos discutidos na seção 1.4.2 sobre modelos e de abordarmos outras contribuições ao tema dos modelos nas medições, vamos **problematizar o conceito de modelo nas ciências de uma forma geral**. Chamamos de modelo, como já vimos, as relações matemáticas que construímos a partir das teorias e, especificamente, a função matemática que estabelecemos entre o valor do mensurando (grandeza de saída) e os valores das grandezas de entrada e demais parâmetros. A quantificação das grandezas se dá pela aplicação das teorias científicas aos fenômenos envolvidos **via modelagem matemática**. Mas também chamamos de modelos

entes tão variados quanto partes de teorias científicas, mapas, maquetes, modelos estatísticos, dispositivos empíricos construídos para testar teorias e simulações computacionais empregadas para prever o estado futuro de um sistema ou calcular os valores de grandezas. Afinal, o que caracteriza os modelos? O que os diferenciam das teorias? Qual a sua função e como são construídos?

4.2.1 Modelos como mediadores

Mary Morgan e Margaret Morrison editaram o volume *Models as Mediators – Perspectives on Natural and Social Sciences* (1999) para suprir as lacunas das literaturas científica e filosófica sobre o conceito de modelo. Apesar de muito difundida, a ideia de modelo havia recebido raros tratamentos a fim de precisar seu significado, suas características e suas funções. No segundo capítulo do referido do volume, intitulado “*Models as mediating instruments*”, as editoras da obra propõem uma perspectiva abrangente sobre o tema dos modelos e lançam mão dos exemplos discutidos nos outros capítulos do livro para ilustrar sua proposta. As autoras citam as obras de Mary Hesse (modelos como analogias, 1966) e a de Nancy Cartwright (modelos como simulacros, 1983) como pioneiras na discussão científico-filosófica sobre a construção de modelos (MORRISON; MORGAN, 1999, p. 13). Mas Morrison e Morgam buscam ampliar a visada sobre o tema de modo a contemplar as diversas formas de empregar o conceito.

As autoras enfatizam que, embora os modelos funcionem de diferentes modos dentro das ciências, sua característica básica é funcionarem como “instrumentos de investigação” (MORRISON; MORGAN, 1999, p. 10) tanto das teorias, quanto dos fenômenos aos quais as teorias se referem. Uma vez que os modelos são construídos com relativa independência em relação às teorias e ao mundo, podem fornecer novas informações sobre ambos. Eles atuam como **mediadores** entre os campos teórico e empírico, podendo ser empregados para desenvolver as teorias ou para obter dados sobre os sistemas empíricos. Modelos são, a um só tempo, instrumentos e representações: funcionam como instrumentos que fornecem informações proporcionando aprendizagem e são representações do mundo, da teoria ou de ambos (MORRISON; MORGAN, 1999, p. 11-2). Em relação à variedade de formas dos modelos e seu papel na investigação, as autoras resumem:

Modelos podem ser objetos físicos, estruturas matemáticas, diagramas, programas de computadores ou o que seja, mas todos agem como uma forma de instrumento

para investigar o mundo, nossas teorias ou, mesmo, outros modelos (MORRISON; MORGAN, 1999, p. 32).

Um aspecto distintivo dos modelos, que apresenta especial importância no contexto desta tese, é que eles são construídos adotando-se **graus variados de simplificação** em relação às teorias. Estas últimas, em geral, não podem ser aplicadas diretamente para obter dados sobre o mundo, exigindo simplificações, aproximações e/ou correções que são adotadas na construção dos modelos para **situações específicas**. Em alguns casos, a distinção entre teoria e modelo é simples: teorias são princípios gerais para descrever um grupo de fenômenos, enquanto modelos são mais restritos. Em outros casos, a distinção é mais sutil¹⁰⁹ (MORRISON; MORGAN, 1999, p. 11-2).

O papel extraordinário exercido pelos modelos nas ciências está diretamente relacionado com a simplificação que promovem ao representarem a realidade física. Em muitas situações, a complexidade dos sistemas reais exige a modelização para que seja possível um tratamento científico do problema. O processo físico sob medição compreende múltiplas “interações entre propriedades do sistema empírico, instrumento, operadores e ambiente, mas os modelos usados para representar tal processo negam ou simplificam muitas dessas interações” (TAL, 2012, p. 78).

Os modelos podem ser aperfeiçoados no sentido de se tornarem mais próximos da realidade física, mas esse aperfeiçoamento é limitado pelo próprio papel exercido pelo modelo. Na curta narrativa intitulada “Sobre o Rigor na Ciência” (parte da qual serve de epígrafe para o atual capítulo da tese), o escritor argentino Jorge Luis Borges captou esse compromisso entre a representação científica e o real representado. A narrativa, de apenas um parágrafo, foi publicada por Borges originalmente em 1946 e atribuída ao historiador fictício Suárez Miranda. Versa sobre um império onde a arte da cartografia era tão estimada que se demandava dos cartógrafos mapas cada vez mais perfeitos. Isso fez com que os mapas fossem aumentando de tamanho até atingirem a escala absurda de 1:1, em que cada acidente geográfico estava fielmente representado no modelo. A narrativa prossegue (a partir do trecho reproduzido na epígrafe) e finaliza da seguinte forma:

Menos Afeitas ao Estudo da Cartografia, as Gerações Seguintes entenderam que esse dilatado Mapa era Inútil e não sem Impiedade o entregaram às Inclemências do Sol e dos Invernos. Nos desertos do Oeste perduram despedaçadas Ruínas do Mapa,

¹⁰⁹ É o caso do Modelo Padrão de Partículas Elementares. Segundo as autoras: “Muitos físicos pensam o modelo padrão como uma teoria; mesmo que ele tenha vários parâmetros livres, seu sucesso notável tem aliviado as dúvidas sobre suas suposições fundamentais” (MORRISON; MORGAN, 1999, p. 18, nota 3).

habitadas por Animais e por Mendigos; em todo o País não há outra relíquia das Disciplinas Geográficas (BORGES, 2008).

A curta narrativa de Borges fala por si da inutilidade de um modelo excessivamente complexo. Com o intuito de reforçar a relação do texto de Borges com as funções dos modelos científicos, lançamos mão de comentários recentes do professor e pesquisador em literatura Karl Erik Schøllhammer. Segundo o pesquisador, o mapa aparece em muitos textos da obra de Borges “sempre como representante dos modelos científicos” e, na narrativa em questão, o mapa é “a imagem da metodologia científica”. No império descrito nessa narrativa, “se persegue seu rigor [do mapa] tão cegamente que se esquece sua lógica intrínseca, e com ela, também a finalidade de seu projeto” (SCHØLLHAMMER, 2021). A lógica e a finalidade dos modelos pressupõem a simplificação do objeto representado, sendo que o grau de simplificação é ditado pelo “rigor” que se pretende alcançar. Justamente por pressupor a simplificação, o rigor que se pode alcançar com a modelagem é limitado.

O modelo de medição é uma simplificação das diversas teorias envolvidas, pois não é possível, nem necessário, contemplar exhaustivamente as possíveis interações entre teorias. **O grau de simplificação da modelagem vai depender do conhecimento teórico dos fenômenos envolvidos, do propósito da medição e dos recursos disponíveis.** Nos primeiros estágios da quantificação de uma grandeza, em geral o modelo é muito simplificado e, conforme se aumentam os conhecimentos acerca da grandeza, o modelo vai ganhando em complexidade. Dessa forma, a modelagem contribui para a investigação de métodos, de padrões ou de instrumentos de medição, pois o emprego dos modelos pode fornecer conhecimentos relevantes das instâncias envolvidas na medição. Contribui, até mesmo, para o aprimoramento dos próprios modelos, fornecendo dados para a construção de modelos mais realísticos. Essa funcionalidade epistêmica experimental dos modelos pode ser associada ao conceito de iteração epistêmica de Hasok Chang, que discutimos nos itens 1.2.3.3 e 1.4.2: a cada estágio de desenvolvimento da quantificação de uma grandeza, os modelos são ajustados para fornecer medições mais exatas e com melhor concordância em comparações. Em estágios mais avançados da quantificação de uma grandeza, os modelos tendem a ser muito complexos, buscando incluir efeitos mais sutis para a medição da grandeza em tela.

Morrison e Morgan apontam que modelos, além de estruturarem medições, podem funcionar diretamente como instrumentos de medição. Um dos exemplos que as autoras fornecem é o do emprego de pêndulos para a medição da aceleração local da gravidade (g). O ponto de partida é um modelo **idealizado**, baseado nas leis da dinâmica newtoniana, do funcionamento do pêndulo. Para que o modelo possa funcionar a contento, são adicionadas

correções para as forças que atuam nas diferentes partes do pêndulo real. Uma vez consideradas essas correções, o dispositivo pode funcionar como instrumento de medição de g , fornecendo não só precisão (repetibilidade), mas também exatidão (pode-se alcançar até quatro algarismos significativos). Por um lado, os modelos **simplificam** as teorias, mas, por outro lado, **incluem correções** que adicionam elementos à estrutura matemática do modelo idealizado, tendo em vista o aparato real. As autoras chamam atenção para essa dupla função dos modelos quando empregados como dispositivos experimentais: ao mesmo tempo que as leis teóricas são **modeladas**, um aparato construído segundo o modelo, devidamente corrigido, pode funcionar como **instrumento de medição** (MORRISON; MORGAN, 1999, p. 21-2).

Essa função dos modelos é também relevante para a investigação genealógica das incertezas. Os instrumentos de medição são modelos construídos a partir de teorias para fornecer indicações das grandezas que medem. Alguns instrumentos são muito complexos fazendo com que nunca pensemos neles como modelos. Mas a diferença em relação a um dispositivo simples ao qual associamos de imediato o conceito de modelo é apenas de grau. Construir um instrumento de medição significa adaptar as teorias envolvidas na medição para um dispositivo físico, que requer tanto a simplificação das teorias quanto a incorporação de correções. **Simplificar** e **aproximar** as relações teóricas, bem como **corrigir** algum efeito, estão envolvidas na introdução de componentes de incertezas no processo. É por isso que os estágios da modelagem e do emprego do arranjo experimental se **interpenetram**, pois os instrumentos constituem parte da modelagem.

É importante esclarecer a distinção entre as expressões “introduzir componentes de incerteza” e “produzir incerteza” (ou “produzir fontes de incerteza”). **Introduzir um componente** de incerteza significa simplesmente **identificar** e **quantificar** um componente de incerteza; essa atividade não aumenta a incerteza global do processo, ela apenas aumenta o **número** de componentes¹¹⁰ consideradas no cálculo da incerteza. **Produzir**¹¹¹ **incerteza** ou **produzir fontes de incerteza** significa **aumentar a incerteza global** do processo, isto é, significa fazer com que resulte em novas fontes que aumentarão a incerteza combinada. Acima, falamos que, ao simplificar, aproximar e corrigir, os modelos introduzem componentes de incerteza. É preciso acrescentar que o fazem de modo diferente: simplificar e

¹¹⁰ Exploramos aqui a distinção entre “fonte de incerteza” e “componente de incerteza” que comentamos na nota n° 89.

¹¹¹ “Introduzir” também seria um bom verbo, mas optamos por “produzir” para acentuar a diferença em relação à introdução de componentes.

aproximar produzem erros que serão estimados como incertezas, portanto, produzem incerteza. Já as correções diminuem os erros e tendem a diminuir a incerteza global do processo, mas também comportam alguma incerteza, portanto, introduzem componentes de incerteza.

A introdução de componentes incertezas via modelização é necessária para empregar um procedimento de medição baseado em teorias científicas. Um modelo mais complexo introduz um número maior de componentes de incerteza, mas isso não quer dizer que a incerteza combinada ficará mais alta. Ao contrário, quanto mais complexo um modelo de medição, mais baixa tende a ser a incerteza final do processo. O que o modelo possibilita é a identificação e a quantificação dos componentes de incerteza. Um modelo mais complexo tende a introduzir um maior **número** de componentes de incerteza identificáveis e quantificáveis, mas tende também a proporcionar uma incerteza final do processo (a incerteza combinada) **mais baixa**.

Muitos dos textos da filosofia da medição também explicam os meios pelos quais os modelos introduzem componentes de incerteza. No já mencionado capítulo de livro “*Modelling measurement: error and uncertainty*” (2014), Mari e Giordani argumentam que os recentes desenvolvimentos da filosofia da medição sobre o papel dos modelos permitem **conciliar** as abordagens de incerteza e de erro. Ressaltam que o modelo é usado tanto como **ferramenta teórica** para interpretar nossos conceitos, quanto como **ferramenta operacional** para estudar as porções de mundo correspondentes (MARI; GIORDANI, 2014, p. 82). A conciliação se dá porque a questão da “verdade” sobre o resultado da medição (que a abordagem de erro evoca) se refere à **grandeza modelada**, enquanto a incerteza caracteriza tanto a relação do resultado com a grandeza modelada, quanto o “grau de similaridade entre o modelo da grandeza e a grandeza real, empírica” (MARI; GIORDANI, 2014, p. 83). Com essa conciliação, o conceito de VV de uma grandeza permaneceria relevante dentro da abordagem de incerteza. Em nossa pesquisa, estamos mais interessados naquilo que os modelos revelam sobre as incertezas do que na conciliação das abordagens de erro e incerteza. Quanto ao nosso ponto de interesse, os autores buscam esclarecer:

Portanto, a atribuição de um valor a uma grandeza envolve a incerteza tanto porque a grandeza é modelada de forma que seja difícil, ou mesmo impossível, em princípio saber seu valor (p. ex.: porque é modelada de tal forma que seu valor está em um conjunto de números reais) e porque o modelo da grandeza não é necessariamente exato (*accurate*) (p. ex.: grandezas de influência não são adequadamente levadas em conta) (MARI; GIORDANI, 2014, p. 84).

Essa interpretação das fontes de incerteza de Mari e Giordani, à primeira vista, difere da que propusemos no último parágrafo da seção anterior, quando chamamos atenção para as relações entre teoria/modelo e MS/sistema empírico. A incerteza de medição, para os autores, é devida à **dupla idealização**: aquela relacionada à **idealização da teoria** (de que o mundo empírico possa corresponder à teoria modelada) e aquela relacionada à **simplificação do modelo** (que não leva em conta fatores que influenciam o mensurando). Para eles, ambas as idealizações que implicam em incertezas estão **ligadas ao modelo**: ou a teoria na qual o modelo se baseia não corresponde exatamente ao fenômeno de interesse ou o modelo é, em algum nível, simplificado.

Em nossa formulação acima, identificamos incertezas referentes à modelização dos fenômenos e atribuímos as demais incertezas, provisoriamente em nossa investigação, à interação do MS com o sistema empírico. Estas últimas correspondem ao que Mari e Giordani atribuem à “forma” da modelização, que faz com que o resultado da medição não seja um valor único, mas uma faixa de valores. Quando se referem à forma da modelização, os autores estão apontando para a **formalização** (ou idealização) da teoria, como fica claro no exemplo que descrevem e que reproduzimos abaixo. Acreditamos ser produtivo para nossa investigação mantermos o paralelo entre nossa formulação (provisória) do problema e a formulação apresentada em “*Modelling measurement*”.

O exemplo “simples, mas paradigmático”, a que os autores recorrem para ilustrar a distinção entre idealização da teoria e simplificação do modelo, também nos fornece elementos para a investigação. Trata-se da medição da área de uma folha de papel retangular. O modelo teórico para o cálculo do valor da grandeza diz que a área (S) é o produto dos lados (l_1 e l_2) da folha, ou seja, formalmente: $S = l_1 \times l_2$. Basta medirmos os dois lados, multiplicarmos os valores e obtemos a área da folha.

Porém, o modelo pressupõe, de modo idealizado, que a folha é “perfeitamente retangular”, o que, na prática, não acontece. Sempre há características empíricas que não correspondem às idealizações e produzem incertezas na medição, fazendo com que o resultado tenha que ser representado por uma faixa de valores e não por um único valor. A **forma idealizada** do modelo produz incertezas no resultado da medição em função das características empíricas do mensurando.

Além da idealização devida à forma da teoria, o modelo é simplificado no sentido de não levar em conta possíveis influências nas grandezas de entrada, por exemplo, a umidade pode ter influência sobre o comprimento dos lados. Então, outras fontes de incerteza são

produzidas pela **simplificação do modelo**, ao estabelecê-lo apenas como o produto dos comprimentos dos lados (MARI; GIORDANI, 2014, p. 84).

As fontes de incerteza devidas à forma idealizada do modelo têm relação com os **limites da própria teoria modelada** frente às “imperfeições”¹¹² do sistema empírico. Já as fontes de incerteza devidas à simplificação do modelo apontam para fatores que surgem na **interface** das teorias e que podem ser (parcialmente) corrigidos no modelo ou, se não fizerem parte do modelo, introduzirão incertezas mais altas. O exemplo reforça nosso entendimento de que a distinção proposta por Mari e Giordani é semelhante à nossa. Retomamos na próxima seção a essa questão.

O texto de Mari e Giordani empreende uma análise das operações envolvidas na medição e na calibração dos instrumentos de medição para estabelecer o esquema lógico que subjaz a essas operações. Como dissemos, seu intento é mostrar que o papel de mediador dos modelos permite conciliar a abordagem tradicional de erro com a abordagem de incerteza proposta pelo GUM. Não vamos, aqui, discutir os esquemas apresentados pelos autores, nem sua sugestão de conciliação das referidas abordagens. Na questão que nos interessa mais neste ponto da tese, qual seja, a relação entre os modelos e as fontes de incerteza, os autores apresentam algumas “dicas” (*hints*) de causas relacionadas à modelagem. Dentre elas encontram-se a modelagem da hierarquia de calibração, do processo de transdução (na identificação das leis e na seletividade do transdutor) e do próprio mensurando (MARI; GIORDANI, 2014, p. 95-6). Exploramos mais adiante a natureza do processo de transdução como fonte de incertezas ligadas ao sistema empírico.

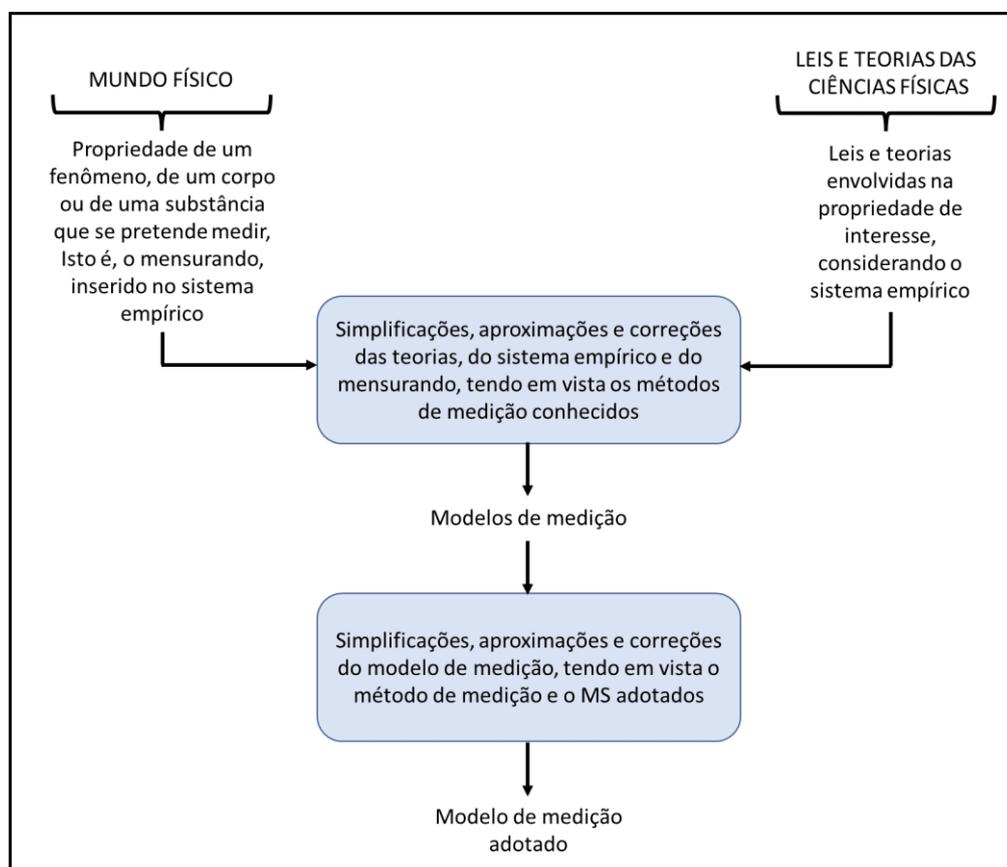
Um outro aspecto da modelização peculiar que a medição emprega diz respeito aos níveis de modelização e às etapas do processo. Para chegar à relação funcional que é empregada para o cálculo do valor da grandeza, bem como para a estimativa da incerteza, o metrologista tem que levar em conta as **diferentes teorias científicas** que tratam das variáveis envolvidas no processo. Conforme vimos na seção 1.4.3, a modelização se dá em diferentes níveis, de acordo com as etapas preparatórias para medição. Mari e colaboradores distinguiram, do ponto de vista estrutural¹¹³, quatro etapas prévias à medição que demandam diferentes níveis de modelização, simplificadamente: **a definição do mensurando, a modelagem das leis gerais, a modelagem da propriedade específica** relativa ao

¹¹² Aqui chamamos atenção para o modo como, habitualmente, nos referimos à incompatibilidade entre nossas idealizações e o mundo empírico, isto é, como imperfeições desse último. A rigor, se podemos considerar algo imperfeito, esse algo deveria ser nossa idealização.

¹¹³ Ou seja, do ponto de vista da estrutura comum entre diferentes tipos de medição (MARI *et al.*, 2017).

mensurando e o **estabelecimento da relação funcional** que leva em conta o **MS** empregado (cf. MARI et al., 2017. p. 51-3).

Figura 19 – Diagrama da modelização em um processo de medição genérico



Legenda: As chaves representam a redução a partir um conjunto maior em um conjunto menor. Os retângulos de arestas arredondadas azuis representam processos de modelização.

Fonte: O autor.

As considerações sobre a função dos modelos na filosofia da medição acima discutidas, juntamente com trabalhos em filosofia da ciência que abordam questões relacionadas aos modelos (MORRISON; MORGAN, 1999; CARTWRIGHT, 1983 e 1999; VAN FRAASSEN, 2012; MARI *et al.*, 2017; SOTO, 2020), fornecem elementos para compreendermos melhor a relação entre os sistemas empíricos visados, as teorias e as etapas da modelagem que possibilitam a medição de uma grandeza. Dessas reflexões, buscamos compor um diagrama (figura 19) que esquematiza as relações e os processos envolvidos na modelagem.

Da complexidade de fenômenos que são observados no mundo físico, visa-se a propriedade que se apresenta de modo “proeminente e estável” (SOTO, 2020) para ser submetida à medição. Das inúmeras leis e teorias científicas, são destacadas aquelas que

possuem relevância para o estudo da propriedade em questão, dentro do sistema na qual será medida. Tendo em vista a complexidade de ambos, da propriedade inserida no sistema empírico e das teorias envolvidas, são construídos **modelos** que possibilitam a realização prática dos métodos de medição conhecidos. Ao selecionar um método para ser realizado, com os recursos instrumentais disponíveis e o domínio das técnicas pelos profissionais envolvidos, empreende-se a **modelização específica** do mensurando.

O esquema da figura 19 possibilita visualizar com mais clareza as funções **mediadoras** da modelização na medição, bem como dá uma ideia da **multiplicidade de processos** que a modelização requer. Mas, como veremos na seção seguinte, os modelos também nos ajudam a compreender a **consistência** teórica dos procedimentos de medição e a **coerência** entre os resultados de medição.

4.2.2 A coerência e a consistência dada pelos modelos

Conforme apresentamos no primeiro capítulo (subseção 1.4.2), o coerentismo e o papel desempenhado pelos modelos são temas abordados de modo recorrente nos trabalhos da filosofia da medição publicados nas últimas décadas. Muitas vezes, esses conceitos aparecem relacionados, pois os modelos são fundamentais para obter coerência nas medições. A concordância entre resultados de medição dentro do sistema metrológico internacional muito se deve à modelização dos mensurandos. Essas e outras reflexões da filosofia da medição contemporânea, que discutimos no primeiro capítulo (seção 1.4.2), são fundamentais para o desenvolvimento da presente tese.

Segundo Eran Tal, os problemas filosóficos “emaranhados” da coordenação, da exatidão de medição e da individuação da grandeza podem ser resolvidos, simultaneamente, do ponto de vista de uma **epistemologia baseada em modelos**. A **coerência** e a **consistência** que caracterizam o processo de medição (ou seja, a obtenção de valores coerentes com outros processos de medição e consistentes com as teorias físicas disponíveis) são possibilitadas justamente porque as medições são baseadas em modelos teóricos (TAL, 2012, p. 17). Alcança-se a coerência e a consistência em um procedimento de medição por meio do emprego de um **modelo simplificado dos fenômenos envolvidos**, inclusive dos fenômenos que ocorrem na interação do mensurando com o MS. O modelo proporciona a **objetividade** do processo e a possibilidade de **comparação** do resultado de medição (TAL, 2012, p. 78-9).

A “múltipla realizabilidade” das unidades básicas (TAL, 2012, p. 33-7), bem como a multiplicidade de métodos de medição de uma grandeza, todos baseados na mesma definição

da grandeza e todos fornecendo apenas resultados aproximados, só são possíveis porque os modelos de medição fornecem a coerência e a consistência necessárias. Mais uma vez, os três métodos de medição de D_w que apresentamos e comentamos nos capítulos anteriores são bons exemplos da múltipla realizabilidade de uma grandeza. As incertezas de medição estimadas com base nos respectivos modelos são fundamentais para avaliar se os resultados de medição são consistentes entre si. Uma vez que “nenhum método pode nos livrar completamente das aproximações” (TAL, 2012, p. 35) e que não se pode esperar coincidências digo-a-digo entre diferentes medições do mesmo mensurando, as margens de incerteza fornecem os parâmetros necessários para a avaliação da coerência.

Ampliando um pouco o foco, podemos problematizar a relação entre as leis e teorias das ciências físicas e a modelização que fazemos a partir delas. A modelização é necessária para aplicar as leis e teorias físicas aos fenômenos, por exemplo, na medição de certa propriedade. Isso porque os conceitos teóricos da física “descrevem o mundo somente via modelos que interpretam esses conceitos mais concretamente” (CARTWRIGHT, 1999, p. 4). Os conceitos das teorias físicas não podem ser aplicados **diretamente** porque, numa situação empírica, encontramos diversos fenômenos, muitas vezes fenômenos que são tratados por teorias procedentes de outras áreas da física, que concorrem para alterar a magnitude da propriedade que se deseja medir. De fato, mesmo dentro do escopo de sua aplicação, a lei vale somente *ceteris paribus*, isto é, se todas as demais condições permanecem inalteradas, se não há interferências de outras leis. Grande parte do esforço de um laboratório de metrologia é para **isolar, blindar**, a propriedade que se deseja medir de possíveis interferências de outros fenômenos ou, então, de inserir as interferências que podem ser corrigidas via modelo de medição (CARTWRIGHT, 1999, p. 4; 29).

A obra da filósofa estadunidense Nancy Cartwright fornece uma interpretação do sucesso alcançado em muitos processos de medição. As propriedades que conseguimos medir com baixas incertezas são justamente aquelas que **visamos** por apresentarem, em determinadas situações, a **regularidade** necessária para serem submetidas à medição. A esse conjunto de fatores que proporcionam a abordagem científica quantitativa bem-sucedida Cartwright chama de **máquina nomológica** (*nomological machine*), definida como:

...um arranjo (suficientemente) fixo de componentes, ou fatores, com capacidades (suficientemente) estáveis que no tipo certo de ambiente (suficientemente) estável, com repetidas operações, dará lugar a um tipo de comportamento regular que nós representamos em nossas leis científicas (CARTWRIGHT, 1999, p. 50).

Capacidades, para Cartwright, são “propensões” ou “poderes” que as propriedades carregam (CARTWRIGHT, 1994, p. 9), que se manifestam regularmente de uma determinada maneira. Dessa forma, as leis científicas empiricamente bem-sucedidas são aquelas para as quais conseguimos construir **modelos** que possibilitam a determinação quantitativa das capacidades envolvidas em termos de repetibilidade e de reprodutibilidade, ou seja, para as quais conseguimos construir “máquinas nomológicas”. De modo que, as relações empíricas baseadas em leis científicas submetidas à medição e o conjunto de procedimentos e arranjos experimentais de medição são “**dois lados da mesma moeda**” (BOUMANS, 2005, 858; grifo nosso). O conceito de máquina nomológica pode ser empregado para explicar o sucesso de medições de grandezas físicas para as quais as variáveis envolvidas nas medições podem ser **suficientemente** conhecidas e controladas. Esse sucesso pode ser evidenciado por resultados em comparações da medição da mesma grandeza entre laboratórios com concordâncias dentro de estreitas margens de incerteza.

Os laboratórios se valem de uma série recursos teóricos e empíricos que são arregimentados de modo a reforçar a coerência dos resultados. “Nossas teorias preservadas e o mundo se encaixam tão confortavelmente menos porque nós encontramos como o mundo é, do que porque nós adaptamos um ao outro” (HACKING, 1992, p. 31). Leis científicas referem-se somente às propriedades dos fenômenos que apresentam “**proeminência e estabilidade**” e as propriedades que apresentam essas características são “identificadas” por medições baseadas em modelos das teorias (SOTO, 2020, p. 80; grifo nosso). A “fundamentação empírica”, que distingue as teorias físicas bem-sucedidas, depende de critérios¹¹⁴ que requerem a possibilidade da realização de medições compatíveis com os modelos construídos a partir da teoria (VAN FRAASSEN, 2012, p. 783). Segundo essa interpretação, com a qual nos alinhamos, a modelização dos fenômenos, feita a partir das teorias, e a coerência dos resultados de medição obtidos são duas faces do mesmo processo virtuoso de quantificação.

O tema central da tese **não** está direcionado para o conteúdo ou a forma das leis e teorias físicas ou para os critérios de fundamentação empírica dessas leis. Essas questões aparecem no contexto da tese porque, de algum modo, envolvem medições e os modelos

¹¹⁴ Os critérios de fundamentação empírica de uma teoria, segundo van Fraassen, são a **determinabilidade** (a teoria deve ter parâmetros que possam ser determinados através de medições), a **concordância** (com dois aspectos, a determinação deve ser feita com base nas conexões colocadas pela teoria e as grandezas devem ser unicamente coordenadas, devendo haver concordância nos valores determinados por diferentes meios) e a **refutabilidade** (deve haver a possibilidade de um resultado de medição refutar as hipóteses teóricas com base nas mesmas conexões colocadas pela teoria) (VAN FRAASSEN, 2012, p. 783).

construídos a partir das teorias para possibilitar as medições. Nosso foco concentra-se nos papéis desempenhados pelos modelos que estão estreitamente relacionados à incerteza de medição, seja funcionando como fonte de incerteza, seja minimizando a incerteza global. Sem dúvida, a modelização baseada nas teorias é um dos principais fatores que proporcionam a consistência e a coerência das medições científicas dentro do SI.

À primeira vista, essa interpretação do sucesso das medições da física de ponta através do conceito de máquinas nomológicas pode ser tomado como depreciativo para a atividade científica. Pode ser tomado como uma explicação que atribui o sucesso das teorias mais a artifícios de um sistema autorreferente do que ao “acerto” ou à “verdade” das teorias. Entretanto, pensar o sucesso das medições em termos das condições que são instituídas para a obtenção de boas exatidões (condições para o estabelecimento de máquinas nomológicas) **não significa fazer juízo de valor** sobre o conteúdo das teorias, se elas correspondem ao real ou se são apenas empiricamente adequadas. Ademais, ser empiricamente adequada é, por si só, um sinal muito significativo de sucesso das teorias. Ao contrário de depreciá-las, é uma forma de apreciá-las – basta pensar na complexa rede de grandezas físicas submetidas a medições bem-sucedidas. São grandezas pertencentes a diferentes áreas das ciências físicas que **interagem** entre si.

Sem dúvida, as baixas incertezas declaradas pelos laboratórios para a medição de muitas grandezas físicas constituem conquistas dos métodos científicos empregados. Deve-se ressaltar que esses resultados são obtidos pelo emprego de diversas teorias e métodos e, portanto, representam uma **expressiva concordância** entre todos os recursos científicos envolvidos. Uma mesma grandeza pode ser medida por diferentes métodos que, muitas vezes, envolvem diferentes áreas das ciências físicas. Cabe lembrar o exemplo da medição da **dose absorvida na água** (D_w), uma das mais importantes na área das radiações ionizantes, pode ser realizada de forma primária por três métodos bem distintos: calorimetria (medição do calor transferido pela deposição de energia), ionometria (medição de cargas elétricas formadas em cavidades de câmaras de ionização) e dosimetria química Fricke (medição de espécies químicas transformadas). Ao menos os dois primeiros métodos fornecem resultados concordantes dentro de margens de incerteza expandida (nível da confiança de aproximadamente 95 %) inferiores a 0,5 %¹¹⁵.

Mesmo a realização de uma unidade básica envolve princípios oriundos de diferentes áreas. Contribui para a concordância expressiva que mencionamos acima os ajustes que são

¹¹⁵ As incertezas relativas para as diferentes medições podem ser encontradas na busca por comparações-chave (KCDB) no sítio do BIPM (<https://www.bipm.org/kcdb/>).

empreendidos para obter os “melhores” valores para as **constantes fundamentais**. As baixas incertezas nas medições das constantes fundamentais realizadas por diferentes métodos são evidências do fino ajuste alcançado pelas ciências físicas.

Os “**valores**” transmitidos pelas instituições metrológicas também colaboram para um sistema que amarra internamente suas referências. A padronização e a normatização, que marcam as boas práticas metrológicas, bem como a rastreabilidade e a comparabilidade são formas de manter o sistema amarrado às referências bem-sucedidas. Os padrões, além de possuir outras qualidades, devem possibilitar medições com boas repetibilidade e reprodutibilidade. A observância de normas em comum assegura a condução de práticas e métodos consagrados, que favorecem resultados compatíveis entre si dentro da rede metrológica. De modo que os valores disseminados pelas instituições metrológicas atuam no sentido de reproduzir e manter máquinas nomológicas aplicadas a diferentes capacidades e integradas entre si. Muito longe de depreciar a metrologia e as ciências de uma forma geral, o bom desempenho dessas “máquinas” é uma expressão da **qualidade** do trabalho dessas instituições – e, também, da **quantidade** de trabalho que nelas se realiza!

4.2.3 Esboço de uma genealogia das fontes de incerteza

Nas subseções 4.1.2 e 4.2.1, quando tratamos da tipologia de erros de Giora Hon, das fontes de incerteza relacionadas no GUM e do capítulo de livro “*Modeling measurement*” de Mari e Giordani, começamos a formular a genealogia geral das fontes de incerteza. Na presente seção, vamos desenvolver o que começamos a investigar nas referidas subseções. Para que essa seção não fique totalmente dependente do que já foi discutido antes, vamos recapitular a linha de raciocínio que empregamos nas subseções 4.1.2 e 4.2.1 e adicionar novos enfoques e argumentos. A genealogia é “geral” porque estamos atribuindo origens não específicas às fontes de incerteza, estamos buscando generalizar os “lugares” ou “instâncias” de onde emanam as fontes de incerteza.

4.2.3.1 Genealogia geral das incertezas

À primeira vista, podemos atribuir as origens das incertezas ao **aspecto empírico** do processo de medição. Os valores que obtemos em leituras sucessivas da indicação do

instrumento de medição variam¹¹⁶ devido à natureza empírica da interação entre o sensor do instrumento, o mensurando e demais grandezas de influência. Os próprios valores indicados pelo **instrumento** comportam uma incerteza previamente estimada no processo empírico de calibração do mesmo. As indicações do instrumento são experimentalmente limitadas à sua resolução. As grandezas de influência também são medidas por aparatos empíricos e trazem dessa medição incertezas que se propagam para o resultado da medição. As incertezas que podem ser atribuídas ao aspecto empírico da medição estão fortemente associadas ao arranjo experimental (ou **MS**) empregado no procedimento de medição.

Poderíamos continuar atribuindo ao aspecto empírico a origem da maioria das incertezas. Entretanto, essa seria uma forma de conduzir a investigação que não proporcionaria resultados epistemológicos. Até onde for possível, nos interessa conhecer melhor os “mecanismos” geradores de incertezas. Além do mais, nosso enfoque visa dar conta das medições científicas que são largamente baseadas em **teorias** físicas. Como já vimos na subseção 4.2.1, os **modelos**, que funcionam como intermediários entre as teorias e as propriedades visadas, constituem instâncias que introduzem boa parte dos componentes de incerteza. Podemos, então, refinar a investigação pelas lentes dos modelos empregados na medição. Há um compromisso, via grau de modelização, entre as fontes de incerteza terem suas origens no sistema empírico ou na limitação do modelo.

Um exemplo simples pode ilustrar o compromisso entre grau de modelização e sistema empírico como origem das incertezas. Pensemos em um processo de medição no qual certa grandeza de influência não tenha sido identificada e, portanto, não tenha sido incorporada ao modelo de medição. As indicações do instrumento de medição variam também em função da grandeza de influência não identificada e tal variação seria atribuída, de forma genérica, ao sistema empírico. Uma vez que a influência seja identificada e incorporada ao modelo, as indicações devem ser corrigidas pela evolução das grandezas de influência e, dessa forma, a incerteza devida à repetibilidade será menor. Isso significa que o modo com que avaliamos a variabilidade das indicações depende do grau de refinamento do modelo empregado. Então, muitas das incertezas que, à primeira vista, parecem ser devidas ao sistema empírico, são, na verdade, devidas à simplificação na modelagem do mensurando.

A partir das reflexões envolvendo fontes de incerteza e modelos, chegamos aos pares **MS/sistema empírico** e **teoria/modelo**, mas conscientes de que essa divisão é problemática por várias razões. Uma delas é que, como vimos na subseção 4.2.1, os instrumentos de

¹¹⁶ Variação que, avaliada por método estatístico, caracteriza a precisão em condições de repetibilidade e fornece um componente de incerteza tipo A.

medição podem ser vistos como modelos. Os instrumentos interagem com o sistema empírico segundo modelos construídos a partir das teorias. As relações entre os elementos dos pares acima tendem a não ficar separadas em seus pares. Ainda assim, aqueles pares são nossos pontos de partida.

Conforme os fatores que influenciam no mensurando são adequadamente inseridos no modelo de medição, melhora-se a estabilidade (repetibilidade e reprodutibilidade) e a exatidão do procedimento. Os fatores que **não são** incluídos no modelo geram incertezas devido à **simplificação** do modelo. Os que **são** incluídos introduzem componentes incertezas devido à **forma imperfeita** com que tratam os fenômenos implicados na medição do mensurando. Baseados nessas duas maneiras de relacionarmos incertezas à modelagem, Mari e Giordani falaram em “dupla idealização” relacionada ao modelo de medição: a simplificação do modelo e a idealização da teoria (a forma como a teoria trata o sistema empírico, sua formalização). Note-se que a **correção imperfeita** tem o mesmo sentido que **insuficiência** (ou idealização, ou imperfeição) **da teoria** para dar conta dos fenômenos tal qual eles se manifestam no sistema empírico. De fato, verifica-se uma dificuldade em distinguir claramente entre incertezas oriundas da complexidade do sistema empírico e oriundas da modelização dos fenômenos. Além disso, a simplificação do modelo não acrescenta muita informação porque são justamente as influências que não são identificadas ou contabilizadas. Tratamos dessas dificuldades mais adiante.

Uma dificuldade semelhante surge quando pensamos na relação entre modelização e matematização. O modelo é construído estabelecendo-se uma relação funcional, matemática, entre as grandezas de entrada (variáveis e constantes). Mas há incertezas devidas propriamente à aproximação requerida pelo emprego da **matemática**. Elas emanam do modelo, mas **não** são devidas ao processo de modelagem e sim a limitações **internas** da matemática. Embora não tenhamos até aqui problematizado a origem de incertezas na matemática, entendemos que essa instância é diferente da modelagem. Todas as variáveis e constantes incluídos no modelo são empregados nos cálculos adotando-se números reais (ou imaginários) arredondados, cuja aproximação comporta incerteza.

Em geral, as incertezas provenientes da aproximação matemática são muito baixas quando comparadas com as demais. Elas têm origem na tarefa exercida pela matemática nas ciências, que é fundamental para possibilitar as medições, mas que “cobra” seu (baixo) “preço” com a introdução dessas fontes de incerteza. Deve-se ressaltar que a necessidade de arredondamento se refere a limites internos à matemática e não ao problema da adequação ou da efetividade das ferramentas matemáticas para descrever os fenômenos físicos que

abordamos na seção 2.1.4. Este último problema, na verdade, está relacionado com as origens na complexidade do sistema empírico e/ou na modelagem.

Neste ponto, acreditamos ter elementos para propor uma genealogia geral das incertezas nas medições. Tendo em vista os objetivos da tese e do presente capítulo, o que apresentamos a seguir não pretende ser uma busca exaustiva da gênese das incertezas. Reconhecemos, como mencionamos acima, a dificuldade na clara distinção entre as instâncias de origem das incertezas em algumas situações. Trata-se de uma abordagem que visa fornecer elementos para uma perspectiva epistemológica das fontes de incerteza. Nesse sentido, propomos três origens ou três instâncias de origem para as incertezas nos processos de medição, quais sejam, sucintamente:

- (i) A modelização empregada no procedimento;
- (ii) A complexidade do sistema empírico; e
- (iii) A necessidade de aproximação matemática.

Sustentamos que é **inevitável** que incertezas tenham origem a partir dessas três instâncias. Vamos, a seguir, comentar cada uma delas. Continuamos a deixar de lado as incertezas que têm origem nos “relatórios observacionais”, segundo a tipologia dos erros experimentais de Hon. Além de serem menos interessantes do ponto de vista da investigação da gênese das incertezas, não é inevitável que incertezas emanem dos relatórios.

Em relação à origem de incertezas na modelização do procedimento de medição (i), que também poderíamos denominar “simplificação ou limitação do modelo”, já discutimos seus aspectos básicos tanto na seção anterior, quanto nos parágrafos anteriores da atual seção. Há ainda aspectos importantes a respeito dessa instância que serão abordados mais à frente. Vamos, primeiramente, abordar a questão da complexidade do sistema empírico (ii), que, como vimos, apresenta problemas para ser distinguida da modelização como geradora de incertezas. A questão que se coloca é a seguinte: o que chamamos de origem de incerteza na “complexidade do sistema empírico” não pode ser assimilada à origem na modelização?

A maneira como Mari e Giordani (2014) trataram o problema parece sugerir que sim, que a complexidade do sistema empírico remete à forma imperfeita da teoria que serve de base para a modelagem. Consideramos pertinente a distinção dos metrologistas italianos entre idealização devida à **simplificação** do modelo e idealização devida à **forma da teoria** (que serve de base para o modelo). De fato, são duas idealizações distintas e ambas relacionadas com o modelo. A simplificação do modelo, em geral, é condicionada pelo propósito da medição. É uma idealização que o metrologista assume como conveniente frente ao propósito da medição, ela produz incerteza (aumenta a incerteza geral da medição), embora possa não

introduzir componentes de incerteza. Já a idealização devida à forma (ou formalização) da teoria não tem como ser melhorada pelo metrologista, a não ser que ele se proponha a melhorar a teoria. É um problema concernente às limitações das teorias, que não possibilitam modelos mais realísticos em relação ao sistema empírico. O que ele pode fazer é trabalhar com um MS que realize o modelo com incertezas mais baixas.

Mas, por que a idealização da forma da teoria é inevitável? O mais comum é que as teorias sejam relativamente simples (pode-se dizer, elegantes) visando um escopo limitado de sistemas e de variáveis. As teorias são consideradas boas (simples, elegantes e eficazes) mesmo com o escopo de aplicação restrito. A tentativa de complexificar teorias para aumentar seus escopos também seria insuficiente: de qualquer modo, a **complexificação das teorias (e, portanto, dos modelos) não é suficiente para dar conta da complexidade dos sistemas empíricos**. Deste modo, enfatizamos que as teorias encontram limites nas características **complexas** dos fenômenos. Como as situações reais contêm muitos fenômenos interagindo que envolvem também muitas variáveis, é necessário compor modelos com partes de diferentes teorias. Em virtude de limitações próprias das teorias, há sempre **inadequações residuais** entre os fenômenos físicos e os modelos que os representam.

Por que é inevitável que cada uma das instâncias (i), (ii) e (iii) deem origem a incertezas, mesmo que algumas sejam de fato muito baixas?

É inevitável que a modelização (i) emane incerteza porque ela está relacionada com a **definição limitada do mensurando**, isto é, pelo fato de o modelo de medição levar em conta algumas grandezas que afetam o resultado da medição e não outras.

Nem todas as grandezas que afetam o resultado da medição são levadas em conta porque não se considera que a influência delas no resultado seja apreciável (para o propósito da medição) ou porque não se conhece a maneira (a relação matemática) que elas influenciam. Outras, ainda, não são consideradas porque sequer sabemos que elas influenciam no resultado. Como sugeriu Borges, o rigor que o modelo permite é limitado pela sua própria lógica e finalidade simplificadora. Por melhor que o mensurando seja definido, como o próprio GUM afirma, ele “não pode ser *completamente* descrito sem um número infinito de informações” (INMETRO, 2012a, D.1.1; grifo do guia), o que implicaria um número infinito de termos matemáticos no modelo de medição.

É inevitável que a complexidade do sistema empírico (ii) emane incertezas porque as teorias não se **adequam** perfeitamente aos fenômenos, nem se **encaixam** perfeitamente para tratar fenômenos complexos. Isso se reflete na exatidão limitada alcançada pelos instrumentos de medição empregados. Os instrumentos refletem, ao mesmo tempo, o **conhecimento**

teórico dos fenômenos envolvidos (através da incorporação das teorias via modelagem) e as **limitações tecnológicas** para fornecerem indicações condizentes com a formalização. Segundo o filósofo da ciência estadunidense Paul Teller, quando examinamos as representações científicas do ponto de vista da **linguagem**, pode-se apontar a impossibilidade de uma adequação perfeita entre a representação e o representado. É através de idealizações que nós conhecemos o mundo, o que faz com que precisão e exatidão completas não sejam alcançáveis:

O mundo é muito complexo para termos representações que o caracterizem exatamente – isto é, com precisão perfeita e exatidão perfeita. Nossas representações sempre ficam aquém de um ou dos dois modos. Isso é verdade tanto para o conhecimento perceptual quanto para o teórico. Mas sabemos muito. Conhecer o mundo é conhecer o mundo através de idealizações e, nessa medida, imperfeitamente (TELLER, 2018, p. 294-5).

E, finalmente, é inevitável que a aproximação matemática (iii) introduza incertezas (em geral, baixas) porque os valores empregados nos cálculos previstos pelos modelos têm que ser **arredondados**.

Como frisamos, a investigação visa contribuir para uma epistemologia das incertezas, não para a tarefa técnica de identificar e estimar as fontes de incerteza. As fontes de incerteza devidas à repetibilidade das medições (fontes Tipo A) podem ter origem tanto no sistema empírico (ou forma da teoria) quanto na limitação do modelo. Trata-se de componentes devidos a efeitos aleatórios cujas causas são indeterminadas. Todas as demais fontes são, em princípio e em geral, devidas à complexidade do sistema empírico, pois são consideradas em função de constarem no modelo. Dissemos “em princípio” porque esses componentes podem refletir efeitos aleatórios de medições anteriores das grandezas de entrada. E dissemos “em geral” porque não é usual estimar a limitação do modelo, que equivale a estimar a incerteza definicional, mas não é inapropriado fazê-lo.

No exemplo da medição de D_w pela dosimetria Fricke, a fonte de incerteza tipo B relativa ao rendimento químico [$G(Fe^{+3})$] foi obtida em medições anteriores dessa grandeza. Portanto, o valor da incerteza que aparece na planilha (0,62 %) computa os efeitos aleatórios de sua determinação anterior. Por isso esse valor pode, em parte, ser devido ao modelo de medição limitado que foi usado quando da medição de $G(Fe^{+3})$. Se “abirmos” as componentes de incerteza presentes nas planilhas, podemos encontrar fontes de incerteza ocultas por medições anteriores. Esse foi um dos motivos pelos quais muitos metrologistas

resistiram à expressão da incerteza em um único valor: a perda informação sobre os efeitos (aleatórios ou sistemáticos) que levaram ao valor de um dado componente.

Vamos, a seguir, explorar algumas questões que podem fornecer elementos para uma epistemologia das incertezas. Dificilmente, um modelo de medição pode ser construído baseado em apenas uma lei ou teoria científica: os modelos são compostos por teorias de diferentes áreas das ciências físicas. A dosimetria química Fricke, por exemplo, incorpora conhecimentos, pelo menos, da física das radiações (interação da radiação com a matéria), das reações químicas e da espectrofotometria. Por isso vamos direcionar nossa atenção para as interfaces e as interações entre teorias. Nos interessa também focar nas interações entre os sensores dos instrumentos de medição e as propriedades que são medidas, bem como na estabilidade temporal dessas propriedades.

4.2.3.2 Do mosaico de teorias à instabilidade das grandezas

Nessa subseção, vamos olhar para as origens das incertezas buscando entender os motivos pelos quais elas são inevitáveis. Vamos focar as leis e teorias das ciências de um ponto de vista mais abrangente, mas também vamos abordar questões específicas relacionadas à estabilidade das grandezas e à interação entre os instrumentos de medição e o sistema empírico. Das três instâncias geradoras de incertezas que propusemos na subseção anterior, em relação à aproximação matemática (iii) já indicamos que a justificativa se encontra na própria ferramenta empregada. Também mencionamos que as incertezas que emanam da matemática são, em geral, bem menores que as demais. De modo que não problematizaremos essa instância de origem de incertezas nessa subseção.

Restam as duas instâncias que, de alguma forma, estão relacionadas com a modelização. Uma se refere à simplificação do modelo de medição (i) e a outra à “forma” da modelização (ii). A esta última chamamos de “complexidade do sistema empírico” porque tem a ver com as limitações inerentes às teorias em possibilitar a construção de modelos fiéis àquela complexidade. Os modelos tornam possíveis as medições científicas, mas, seja por um motivo ou por outro, impõem restrições à quantificação perfeita das grandezas físicas. Cada lei ou teoria física possui um escopo limitado de fenômenos aos quais pode ser aplicada. Essa limitação implica na **segmentação** das áreas de aplicação, que a obra de Nancy Cartwright nos permite visualizar.

Em *The Dappled World – A study of the boundaries of science*, livro publicado em 1999, Cartwright propõe uma imagem do conjunto de leis e teorias físicas como uma colcha

de retalhos, um *patchwork* com domínios e bordas bem definidos. “*Dappled World*” pode ser traduzido livremente como **mundo salpicado**, ou **malhado**. A ideia é que as melhores teorias físicas são “severamente limitadas em seu escopo” (CARTWRIGHT, 1999, p. 9) e, por isso, possuem interfaces entre seus domínios.

Para essa ideia, a autora se inspirou nos ensinamentos do filósofo da ciência Otto Neurath (1882-1945). Embora tenha participado do Círculo de Viena, Neurath não se alinhou à ideia dominante entre seus pares de que as ciências podem ser representadas por um “sistema” unificado e hierarquizado. Ao contrário, ele propôs uma imagem das ciências composta por diferentes balões que possuem limites definidos (os domínios das teorias), mas que podem ser ligados ou sobrepostos de maneiras diversas para resolver diferentes problemas (CARTWRIGHT, 1999, p. 6-7). Para justificar essa imagem, Cartwright descreve a necessidade de empregar diversas teorias para alcançar bons resultados da seguinte forma:

Desafortunadamente, o tipo especial de circunstância que se ajusta aos modelos de uma única teoria acontece de ser duro de achar e difícil de construir. Mais frequentemente, nós temos que combinar conhecimento com *know-how* técnico de grande número de diferentes campos para produzir um modelo que concordará bem o suficiente nas matérias que buscamos predizer, com o método de combinação justificado, no máximo, localmente. [...] O ponto é que as alegações de conhecimento que nós podemos defender pelo nosso impressionante sucesso científico não argumenta por um mundo unificado de ordem universal, mas por um mundo salpicado de objetos manchados (CARTWRIGHT, 1999, p. 10).

A imagem de um mundo salpicado, dividido em diferentes domínios, nos permite interpretar que as propriedades do sistema empírico sujeitas à medição sofrem interferências de diferentes domínios que não podem ser perfeitamente modeladas. Principalmente do ponto de vista da “forma” de modelização, que não reproduz exatamente a complexidade empírica, mas também do ponto de vista da simplificação do modelo. Uma vez que não há como contemplar a infinidade de influências que o mensurando sofre, a modelização necessariamente introduz fontes de incerteza de medição. A “complexidade natural”, com a “interconexão” e as “interfaces” entre sistemas (ANDLER; FAGOT-LARGEAULT; SAINT-SERNIN, 2011, p. 225-6) faz com que as **interferências** entre domínios desafiem continuamente a engenhosidade dos metrologistas para blindar o mensurando ou incluir nos modelos os efeitos que o afetam. Por mais que se invista na blindagem ou na complexificação do modelo, no entanto, essas ações não têm como eliminar as incertezas.

A segmentação dos domínios das teorias nos permite compreender a inevitabilidade da incerteza nas medições, uma vez que as variáveis envolvidas, afetadas por fenômenos concernentes a diversas teorias, não podem ser **perfeitamente** conhecidas e controladas.

Julgamos que essa imagem das teorias das ciências físicas formando um *patchwork* (ou um mosaico) explica ao menos em parte a inevitabilidade da incerteza de medição e por isso a apresentamos aqui. Mas, conforme mencionamos na subseção anterior, não faz parte dos objetivos da presente tese a discussão aprofundada dos conceitos de leis e teorias científicas. Cabe, entretanto, refletir: se recusarmos a imagem segmentada dos domínios das teorias proposta por Cartwright, o que poderíamos propor em seu lugar? Uma teoria unificada da física para todos os fenômenos? Seremos capazes de medir com uma teoria unificada todas as grandezas que medimos tão bem com as várias teorias de que dispomos?

Apesar de terem escopos limitados, as teorias consagradas são muito bem-sucedidas em suas medições. Como salientou Cartwright, apesar de se dizer que a mecânica quântica substituiu a mecânica clássica, **na prática**, a mecânica clássica continua funcionando melhor em algumas situações:

[...] meus estudos das aplicações mais bem-sucedidas da teoria quântica me ensinaram que a física quântica funciona somente em situações de tipo muito específico que se encaixam nos conjuntos muito restritos de modelos que ela pode fornecer; e ela nunca funcionou bem onde a física clássica funciona melhor (CARTWRIGHT, 1999, p. 2)

Nesse sentido, a limitação no escopo de aplicação das teorias não significa que essas teorias são incompletas. De modo geral, as melhores teorias, aquelas que são concisas e que possibilitam medições mais exatas, são, justamente por isso, **limitadas**. Esse modo de pensar não obstrui a busca por teorias com escopos mais extensos, nem a aceitação de teorias com essa característica que venham a ser propostas. Podemos dizer, com base no trabalho de Cartwright, que se trata de uma constatação e, também, que deve haver boas razões para que as teorias das ciências físicas componham um mosaico e não uma pirâmide ou uma totalidade sem interfaces. Para nossa pesquisa, o *patchwork* fornece uma imagem da **impossibilidade de exatidão** em medições que envolvam fenômenos tratados por teorias de diferentes domínios.

Depois dessa imagem abrangente das teorias, vamos tratar de questões mais específicas. Por exemplo, seguindo a dica de Mari e Giordani (2014), que mencionamos na subseção 4.2.1, podemos explorar o processo de transdução empregado em muitos procedimentos de medição. A **transdução** é o processo pelo qual uma propriedade empírica do sistema (diferente do mensurando) é quantificada, fornecendo um valor que pode ser empregado para obter o valor do mensurando ou de uma grandeza de entrada do modelo de medição. Para o VIM3, o “transdutor de medição” é um “[D]ispositivo, utilizado em medição,

que fornece uma grandeza de saída, a qual tem uma relação especificada com uma grandeza de entrada” (INMETRO, 2012b, 3.7).

Um exemplo comum de transdutor, também citado pelo VIM3, é o do termopar. Termopares são aparatos constituídos por dois fios de metais diferentes empregados para medir temperatura. Em uma das pontas do par, os fios são unidos para funcionar como sensor de temperatura e, entre os fios da ponta oposta, é inserido um medidor de diferença de potencial elétrico. A partir do valor da diferença de potencial formado entre os fios da ponta oposta é possível obter a temperatura no sensor¹¹⁷ (POLLOCK, 2018, p. 33-4). A diferença de potencial é a grandeza de saída que pode ser empregada para fornecer o valor da temperatura no sensor (grandeza de entrada)¹¹⁸. Na medição de grandezas da área de radiação ionizante, as câmaras de ionização também funcionam como transdutores (embora não recebam esse nome), pois fornecem uma corrente elétrica proporcional à intensidade da radiação a que são submetidas.

Podemos dizer que o transdutor realiza o **mapeamento** de uma grandeza para fornecer o valor de outra grandeza correlacionada com a primeira (MARI; GIORDANI, 2014, p. 88). Alguns instrumentos de medição realizam o processo de cálculo da correlação entre as grandezas e apresentam a indicação diretamente na grandeza que afeta o sensor, ou seja, o mensurando para o instrumento. Nosso interesse no processo de transdução, empregado na maioria das medições indiretas, é devido às incertezas que podem ter origem nesse processo.

As incertezas surgem porque dificilmente o sensor será afetado **apenas** pela propriedade que deve mapear, mas também porque o processo de transdução não é perfeito. Este envolve interações entre componentes (do sistema empírico e do instrumento) e transformações de fenômenos de um tipo em fenômenos de outro tipo, portanto, transformações de energia. Processos desse tipo são instâncias sujeitas a perda de energia que têm que ser corrigidas. São transformações de calor em eletricidade, de pressão em eletricidade, de radiação ionizante em eletricidade etc. A transdução **não é perfeita** porque, em geral, é impossível modelar a complexidade das interações entre o sensor e o sistema empírico e a complexidade das transformações de energia envolvidas. Embora muitas das imperfeições sejam corrigidas, sabemos que as correções comportam incertezas. Assim, o

¹¹⁷ O valor da diferença de potencial está relacionado com a composição química dos fios e com a diferença da temperatura entre as extremidades unida e oposta do termopar. O efeito foi descoberto pelo físico Thomas Johann Seebeck (1770-1831) em 1821 (POLLOCK, 2018, p. 33).

¹¹⁸ Os termos grandeza de entrada e de saída, quando aplicados ao processo de transdução, podem causar confusão. Em um modelo de medição, a grandeza de saída é o mensurando. Já na transdução, a grandeza de saída é diferente do mensurando, pois o que se pretende medir é a grandeza de entrada, aquela que afeta o sensor do transdutor.

processo de transdução implica em incertezas decorrentes da simplificação do modelo e da complexidade do sistema empírico, sendo difícil fazer a distinção entre elas.

Pode-se alegar que a perfeição da transdução não é necessária pois, em muitas situações que empregam instrumentos de alta precisão e de alta exatidão, são alcançadas incertezas desprezáveis nas indicações do MS. Porém, aqui, no campo filosófico, estamos olhando para **o que resta de inexato** (o que falta para encher o copo) e não para o sucesso das conquistas metrológicas de alto nível (o copo quase cheio, conforme a analogia que apresentamos na seção 2.1.4).

Outra questão que se pode colocar é em relação à estabilidade da grandeza do ponto de vista **temporal**. As grandezas físicas mantêm o seu estado físico e o seu valor ao longo do tempo? Os modelos de medição ou não consideram a evolução do sistema ao longo do tempo (por exemplo, na medição da área de uma folha de papel), ou incluem em seu algoritmo matemático a evolução temporal das variáveis (por exemplo, na medição de qualquer grandeza integrada em radiações ionizantes). Em sistemas cuja evolução temporal não está incluída no modelo, é preciso adotar algumas **suposições** ou **aproximações** para considerar que ele permanece inalterado ao longo do tempo. Por outro lado, se o modelo inclui a evolução temporal das variáveis, também é preciso se basear em **suposições** que afetam a exatidão do modelo. A seguir, mencionamos algumas dessas suposições, sem aprofundar a discussão sobre os conceitos e as questões aí envolvidas. Buscamos apenas apontar o problema da estabilidade temporal, mesmo reconhecendo que, em muitas situações práticas, as incertezas relacionadas a tal estabilidade são baixas.

Em primeiro lugar, para desconsiderar a evolução temporal do mensurado, supõe-se que a dinâmica da **subestrutura atômica** de todos os corpos envolvidos pode ser ignorada. Como observou Grégis, em medições de grandezas fenomenológicas (não fundamentais), os efeitos relacionados com a dinâmica da subestrutura não fazem parte da definição do mensurando (GRÉGIS, 2016, p. 218-9). Essa simplificação faz com que as grandezas fenomenológicas tenham necessariamente uma incerteza definicional relacionada à subestrutura. Toda medição só tem sentido numa determinada **escala**. Mesmo desconsiderando seus efeitos, nosso conhecimento da subestrutura da matéria mostra que os constituintes atômicos não possuem a estabilidade que os objetos macroscópicos aparentam possuir.

Em segundo lugar, supõe-se que a **troca energética** entre os componentes do sistema e entre o sistema e seu entorno, ao longo do tempo, são desprezáveis. Como se comportam os transdutores no decorrer do processo de medição? O mais provável é que haja dissipação de

energia e que a irreversibilidade nas trocas de energia leve ao aumento da entropia do sistema (segunda lei da termodinâmica). Evitar as trocas e as dissipações de energia ou contabilizá-las com exatidão são ambas tarefas difíceis e sujeitas a incertezas.

O problema da dissipação de energia e a dinâmica da subestrutura dos corpos envolvidos nas medições apontam para a **variabilidade** do estado da grandeza física ao longo do processo de medição. Essa variação indica que é melhor pensar nas grandezas físicas como estando em permanente “**devir**”, mais do que as pensar como “seres” estáveis. A noção “primeira” que caracteriza a grandeza física é a da “variabilidade” (TREINER, 2011, p. 12). Podemos dizer que ela permanece a mesma após a interação com o sistema de medição? O que podemos dizer **com certeza** é que algumas grandezas permanecem **aproximadamente** as mesmas.

Ao problema da evolução temporal, podemos acrescentar problemas relacionados às escalas **microscópica** e **cosmológica**, bem como problemas relacionados ao caráter **não determinístico** de alguns fenômenos. Na escala microscópica, encontramos limites relacionados à perda de informação e ao princípio da incerteza de Heisenberg, enquanto, na escala cosmológica, desafios relacionados ao horizonte observacional são colocados para as medições (PERDIJON, 1998, p. 82-90). Alguns fenômenos envolvidos em medições são dependentes de distribuições de probabilidade, comportando flutuações e incertezas intrínsecas. Em radiações ionizantes, muitas das grandezas submetidas à medição são dependentes de fenômenos estocásticos.

Todos esses problemas, de algum modo, introduzem incertezas nas medições que podem advir das três instâncias apontadas: sistema empírico, modelagem e matemática. É verdade que muitos destes problemas encontram soluções satisfatórias do ponto de vista metrológico que tornam possíveis medições com incertezas muito baixas. Mas voltamos a repetir que nossa investigação filosófica está menos preocupada com resultados satisfatórios do que com fontes de incerteza **persistentes**, mesmo que muito baixas.

Tratamos de problemas pontuais que levam a incertezas nas medições de grandezas físicas de forma sucinta porque nosso objetivo não é investigar detalhadamente cada uma delas. Elas são trazidas aqui apenas para apontar que o *patchwork* de leis apresenta reflexos específicos em cada situação. Os complexos e sofisticados instrumentos de medição de alta exatidão funcionam como modelos que lançam mão de diversas teorias para quantificar certa propriedade em permanente interação com diferentes fenômenos. O movimento que fizemos nessa seção nos aproximou de um ponto de vista **ontológico**, pois olhamos para o modo com as grandezas são compostas com partes de teorias e como as propriedades visadas evoluem

temporalmente e interagem com os sensores dos instrumentos de medição. A partir do nosso esboço de genealogia das incertezas nos interessa mais apontar suas consequências epistemológicas, o que fazemos na próxima seção.

4.3 Epistemologia das incertezas

As abordagens científicas e filosóficas sobre as medições realizadas durante o século XX visaram esclarecer suas bases lógicas e/ou situá-las no contexto maior da filosofia da ciência. As MTs são exemplos claros da busca por bases lógicas, enquanto o realismo, o operacionalismo e o convencionalismo são exemplos da reflexão sobre os objetivos e os resultados das medições segundo perspectivas gerais das ciências. Sem deixar essas questões de lado, a filosofia da medição produzida a partir das últimas décadas do século XX tomou como referência a prática das medições para discutir, principalmente, aspectos relacionados ao conhecimento envolvido nessas atividades. Por isso, é possível dizer que boa parte das recentes abordagens das medições trabalham em uma **epistemologia da medição**. Eran Tal descreve essas abordagens da seguinte maneira:

No sentido mais amplo, a epistemologia da medição é o estudo das relações entre medição e conhecimento. Os tópicos centrais que caem sob a alçada da epistemologia da medição incluem as condições sob as quais a medição produz conhecimento; o conteúdo, o escopo, a justificativa e os limites de tal conhecimento; as razões pelas quais metodologias específicas de medição e padronização têm sucesso ou falham em dar suporte a afirmações de conhecimento específicas [:] e as relações entre medição e outras atividades de produção de conhecimento como observação, teorização, experimentação, modelagem e cálculo (TAL, 2020, p 38-9).

Acreditamos que a investigação na qual as incertezas de medição são o próprio objeto de estudo constitui uma epistemologia da medição e que podemos pensá-la como um tipo específico de epistemologia: aquela que, nas palavras de Giora Hon (2003, p. 176, 196), adota uma “perspectiva negativa”, uma **epistemologia das incertezas**. Também Fabien Grégis fala do “valor epistêmico da incerteza”, uma vez que é por meio do conceito de incerteza de medição que “os cientistas dão conta (*rendent compte*) dos limites de suas investigações experimentais” (GRÉGIS, 2016, p. 335). A seguir, argumentamos em favor da ideia de que as incertezas fornecem elementos para uma epistemologia.

Outra forma de caracterizar a epistemologia da medição é apontar que ela trata da relação entre **medição** e **conhecimento** colocando duas questões: qual o conhecimento **envolvido** (requerido e empregado) na realização de medições e qual o conhecimento que as

medições **fornecem**? Formulamos dessa maneira porque entendemos que a epistemologia das incertezas gira em torno de duas questões semelhantes: qual o conhecimento **envolvido** (requerido e empregado) **para estimar a incerteza de medição** e qual o conhecimento **que a estimativa da incerteza fornece**. Em relação este último, nos referimos ao conhecimento que o processo de avaliação da incerteza fornece para o próprio cientista que realiza a medição, para o cientista que posteriormente usará o resultado da medição e para o pesquisador interessado na incerteza do ponto de vista epistemológico.

Ao proporcionar uma metodologia comum para os pesquisadores, o GUM facilita bastante a complexa tarefa de levantamento e estimativa das fontes de incerteza. Seguindo as recomendações do GUM, o metrologista responsável pela medição terá de levantar um **largo conjunto de dados** que são usados para estimar as fontes de incerteza. Embora muitos destes dados estejam à disposição do pesquisador, como aqueles referentes aos instrumentos que emprega no procedimento de medição, muitos deles certamente permaneceriam “fechados” nos manuais dos equipamentos se não houvesse a necessidade de buscá-los para realizar a avaliação das incertezas. O processo de levantamento das incertezas estimula o pesquisador a ter acesso a dados que são fundamentais para suas atividades e possibilita que ele adote uma **perspectiva** sobre seu trabalho diferente daquela que a rotina lhe impõe. Esse é o aspecto epistemológico do conhecimento envolvido na avaliação de incertezas. A mudança na perspectiva do pesquisador se deve também à própria abordagem estatística requerida pela metodologia do GUM.

A epistemologia das incertezas se revela mais fértil do ponto de vista do conhecimento que a avaliação das incertezas **proporciona**. Deste ponto de vista, podemos distinguir o conhecimento técnico-científico que o levantamento das incertezas fornece e as lições mais propriamente epistemológicas que podemos extrair das fontes de incerteza. Em relação ao conhecimento técnico-científico, acreditamos que é consenso, ao menos entre os metrologistas, que a perspectiva das incertezas é fundamental tanto para o cientista responsável pelo procedimento de medição, quanto para os cientistas que usam posteriormente o resultado da medição.

Ao implantar um método de medição, o cientista ganha conhecimentos sobre os pontos fortes e os pontos fracos do procedimento implantado. Mas ao levantar e estimar as incertezas presentes no procedimento, mais do que conhecer os pontos fortes e fracos, o cientista adquire **informações quantitativas** sobre esses pontos. Ele passa a ter um **diagnóstico ponderado** de cada elemento do procedimento e uma planilha com as incertezas estimadas para cada componente. Com essas informações, o cientista pode avaliar a relação

custo-benefício que os investimentos na melhoria de cada ponto do arranjo experimental trariam. Custo-benefício não somente financeiro, mas também do trabalho humano empenhado.

Para o cientista que usa um resultado de medição em sua pesquisa, a incerteza se reflete na confiança que ele deposita no valor que será empregado. As CMCs dos laboratórios acreditados para realizar calibrações são muitas vezes consultadas por um pesquisador para decidir qual laboratório ele escolherá para calibrar seu instrumento de medição. A mesma consulta pode acontecer quando o pesquisador necessita de uma medição especializada. Se o cientista tiver acesso à planilha de incertezas, ele saberá a composição das fontes de incerteza que levaram ao valor final. Dessa forma, a confiança no resultado da medição não estará baseada em apenas um valor de incerteza, mas no conhecimento das fontes que levaram àquele valor. Obviamente, o valor da incerteza e os valores que constam na planilha de incertezas servem para gerar uma confiança tanto positiva quanto negativa no resultado da medição. De qualquer forma, o ganho em conhecimento técnico-científico acerca do resultado da medição representado pela incerteza e pela planilha de incerteza é significativo e, acreditamos, consensual entre os intérpretes do sistema metrológico.

Em relação ao aprendizado epistemológico, vamos discutir algumas questões que abordamos ao longo do presente capítulo, mas enfatizando novas perspectivas das medições e da metrologia que a reflexão sobre as incertezas aporta. O exame da **estrutura conceitual da metrologia** indica que o conceito de incerteza de medição exerce uma função **central** dentro da referida estrutura. Neste sentido, a publicação do GUM em 1993, como buscamos mostrar nas seções 3.3 e 3.4, afeta os principais conceitos metrológicos. Mesmo que a dita “mudança de abordagem” que a publicação do guia inaugura possa não ter sido tão drástica quanto a própria designação faz crer, ela tem implicações sobre os conceitos basilares relacionados com a medição. Talvez por isso mesmo, a mudança de abordagem continue a ser interpretada de diferentes maneiras.

O fato é que a expressão da qualidade do resultado da medição é tão importante quanto o próprio valor medido e que a maneira de estimar essa qualidade evoca os principais problemas implicados na medição. A mudança de abordagem teve o mérito de explicitar a diferença entre erro e incerteza: o termo “erro” não é adequado para expressar a **dúvida** remanescente ao processo de medição. Assim, a mudança da abordagem de erro para incerteza representou um reconhecimento explícito da presença da dúvida numa atividade científica imediatamente associada à objetividade do conhecimento. Justamente por isso, por

auxiliar a desmistificar a ideia de que os conhecimentos científicos são absolutamente exatos e objetivos, entendemos que a disseminação do conceito é, além de tudo, oportuna.

O elemento subjetivo envolvido na estimativa da incerteza de medição de forma alguma torna o conceito de incerteza menos adequado. Ao contrário, lembrando o que o próprio GUM afirma sobre a avaliação da incerteza (no trecho que reproduzimos na seção 4.1.1), **qualquer atividade científica** é dependente do **conhecimento**, da **habilidade**, da **análise crítica** e da **integridade** dos profissionais envolvidos na produção do conhecimento.

Como vimos na seção 3.3.2 e 3.3.4, no centro do debate sobre a mudança de abordagem estão os conceitos de VV e de incerteza definicional. Estes, por suas vezes, como vimos ao longo da tese (em especial nas seções 1.3.5, 3.3.4 e 3.4), trazem à baila a tradicional discussão da filosofia da ciência entre **realismo** e **antirrealismo** (ou sobre outras perspectivas filosóficas). Vemos reproduzir-se no campo específico das medições discussões tradicionalmente travadas no campo mais amplo da filosofia da ciência a respeito do caráter do empreendimento científico. Acreditamos que a filosofia da medição, especialmente a epistemologia das incertezas, pode contribuir em alguns aspectos desse debate.

A nosso ver, embora os cientistas tenham a tendência de preservar uma visão **realista** de seu trabalho, a investigação sobre a gênese das incertezas faz emergir uma imagem menos realista do mensurando. As diversas teorias empregadas na modelagem do mensurando requerem simplificações, aproximações e correções, além de que é difícil pensar que o mensurando permaneça estável durante o processo de medição. Mas é interessante constatar que perspectivas realistas e antirrealistas são compatíveis com a estrutura conceitual da metrologia. Segundo Grégis, uma interpretação **instrumental** do conceito de VV, dentro de uma abordagem filosófica coerente, como é o caso do “empirismo construtivo” de van Fraassen, é viável (GRÉGIS, 2016, 178-80). A observação é relevante tendo em vista que o próprio Grégis defende um realismo científico baseado na noção de verdade aproximada (GRÉGIS, 2016, p. 232). Teller enfatiza que “precisão e exatidão completas não são humanamente alcançáveis”, mas também que “não são necessárias”, pois “um conhecimento imperfeito é ainda conhecimento do mundo” (TELLER, 2018, p. 295). Isso demanda um novo tipo de realismo, um realismo moderado e não metafísico.

Parece-nos, sobretudo, que o foco específico proporcionado pela filosofia da medição tem mostrado a possibilidade de **avancar** a discussão para outras questões relevantes. Sem recusar a reflexão sobre temas caros à filosofia da ciência, o enfoque na medição busca avançar com a reflexão em direção a problemas mais específicos. Essa pode ser também a face virtuosa de uma perspectiva epistemológica das incertezas: fazer ver os **pontos**

nevrálgicos do conhecimento quantitativo. Acreditamos que, a partir desses pontos, é possível ampliar o foco para os temas mais amplos da filosofia da ciência.

Na subseção 3.2.2, sustentamos que a expressão unificada do valor da incerteza de medição, disseminada pela adoção da metodologia do GUM, possibilita que visualizemos melhor que a incerteza de medição funciona como junta **articuladora** entre as medições realizadas dentro da rede metrológica internacional. A concordância na comparação entre os resultados de medição só é possível devido à margem de incerteza e a rastreabilidade de um resultado é mediado por essa margem de alto a baixo da hierarquia metrológica. As margens de incerteza fornecem a flexibilidade necessária para manter a rede interligada de forma coerente e coesa. Explicitar o papel articulador da incerteza de medição significa destacar o papel **epistemológico** essencial que a incerteza desempenha no quadro dos conhecimentos quantitativos. A função articuladora da incerteza é epistemológica: ela regula a confiança nos conhecimentos que circulam pela rede.

Por fim, defendemos que a investigação genealógica das fontes de incerteza, mesmo que apenas esboçada aqui, revela aspectos epistemológicos das medições. O principal deles é fornecer, num certo nível, uma explicação da **inevitabilidade** da incerteza nas medições. A incerteza corporifica a impossibilidade de realizarmos medições com exatidão absoluta e a genealogia das fontes de incerteza permite que identifiquemos suas instâncias produtoras e seus mecanismos de produção. Dentro da pesquisa genealógica, o papel desempenhado pelos **modelos** ganha destaque e, dessa forma, permite apreciar a posição mediadora dos modelos entre as teorias e mundo. Colocamos, em nossa investigação, ênfase numa genealogia **geral** das fontes de incerteza, mas apresentamos também indicações de que o exame de pontos mais **específicos e detalhados** dos procedimentos de medição possibilitam diferentes perspectivas das incertezas.

Entendemos que a abordagem epistemológica é mais adequada para falar não apenas das incertezas, mas também para falar dos resultados de medições de grandezas, pois os números obtidos não são definitivos: outras medições podem fornecer valores diferentes e margens de incerteza maiores ou menores. Os resultados das medições, ao invés de valor ontológico, possuem **valor epistemológico**. Eles dependem de uma série de fatores idiossincráticos, como a definição do mensurando, o método e os recursos empregados, o conhecimento disponível etc. Por isso, ao invés de tomar a incerteza como uma espécie de não-ser da grandeza é melhor pensá-la como **extensão** do valor da grandeza, como expressão da dúvida sobre o valor da grandeza. A margem de incerteza, como índice da qualidade do procedimento de medição, caracteriza o valor epistemológico da medição.

Por outro lado, a **inevitabilidade** da incerteza revela que a grandeza não possui um VV único, estável e conhecível, o que aponta para um estatuto **ontológico** problemático. Embora tenhamos privilegiado o ponto de vista epistemológico, a investigação genealógica das fontes de incerteza, juntamente com a interpretação da composição de teorias para chegar aos modelos de medição, nos colocou na posição de olhar para a natureza das propriedades físicas submetidas à medição. Esse ponto de vista foi reforçado com a indagação sobre a estabilidade temporal das grandezas e sobre as interações entre os sensores e as grandezas. Uma breve especulação metafísica sobre o estatuto ontológico das grandezas pode fornecer resultados instigantes. Não possuindo um VV, a grandeza **carece de ser** ou possui um ser **dilatado e instável**. Tendo em vista o nosso escopo epistemológico, não avançaremos nessa direção, mas retomamos a questão na conclusão da tese.

Pode-se dizer que a estimativa da incerteza é também incerta, sempre admite incerteza sobre si mesma: uma **incerteza da incerteza**. Trata-se de uma “incerteza de segunda ordem que está sempre presente na caracterização dos procedimentos de medição” (TAL, 2012, p. 179), pois a avaliação de incertezas está sempre sujeita à revisão dos seus fundamentos. Por ser uma avaliação baseada em um modelo de medição, em distribuições de probabilidade e dependente da abordagem adotada pelo laboratório, o valor da incerteza é, em si mesmo, **incerto**¹¹⁹. Dificilmente dois metrologistas experientes num mesmo procedimento de medição de uma grandeza chegarão a valores idênticos de incerteza para aquele procedimento. A normatização e os guias publicados para uma área das ciências colaboram para que as discrepâncias entre estimativas de incerteza sejam reduzidas, mas não as eliminam. Ou seja, a incerteza é uma estimativa que **se dobra sobre si mesma**. Configura-se como um conhecimento aproximado sobre o conhecimento obtido a respeito do mensurando.

Enfim, buscamos mostrar a fertilidade da investigação epistemológica das medições a partir da “perspectiva negativa”, apontando as diversas questões nas quais conhecimento e incerteza encontram-se implicados. Essa visada, ao mesmo tempo que se vale da produção recente em filosofia da medição, pretende para ela contribuir.

4.4 Comentários finais do quarto capítulo

¹¹⁹ Para mostrar que “as avaliações baseadas em observações repetidas [Tipo A] não são necessariamente superiores àquelas obtidas por outros meios [Tipo B]”, o GUM apresenta uma estimativa da “incerteza da incerteza” Tipo A de acordo com número de observações realizadas. Para 5 medições o valor relativo da incerteza da incerteza é de 36 % e para 10 medições é de 24 % (INMETRO, 2012a, E.4.6, Tabela E.1).

Buscamos, neste capítulo, pensar as incertezas presentes nas medições de uma perspectiva **genealógica** e **epistemológica**. As filosofias do experimento e da medição, juntamente com conhecimentos metrológicos, forneceram elementos para uma investigação das fontes de erros e de incertezas. Identificamos as instâncias em que as fontes de incerteza têm origem e as implicações epistemológicas das questões enfrentadas no capítulo. Uma vez que na seção 4.3 comentamos a investigação realizada neste capítulo, vamos nos concentrar aqui em fazer uma breve **avaliação** da epistemologia da medição.

Para isso, vamos levantar os resultados das teses e artigos publicados por Eran Tal e Fabien Grégis que tratam de questões que envolvem medição e conhecimento. Obviamente, incluiremos os resultados de nosso próprio trabalho na discussão. Comentários sobre outros trabalhos dessa linha de problematização podem ser encontrados no verbete sobre “Medições na ciência” da *Stanford Encyclopedia of Philosophy* (TAL, 2017, p. 36-45). Quais as particularidades e os resultados dessas abordagens? Vamos nos concentrar no exame da **fertilidade** da epistemologia da medição, sem entrar no mérito das posições dos trabalhos sobre questões sensíveis, como a do realismo. Quanto a esse último tema, fazemos apenas algumas observações sobre a reincidência de questões ontológicas.

O trabalho de Tal se propõe a avaliar o embasamento de **alegações de conhecimento** associadas às medições e à **eficácia** dos métodos metrológicos para superar alguns problemas filosóficos colocados pela atividade de medição. Como mostramos no primeiro capítulo (subseção 1.4.2.1), os três problemas que Eran Tal enfrenta são o da coordenação, o da exatidão e o da individuação da grandeza. As estratégias propostas pela metrologia para enfrentar esses problemas são pertinentes e eficazes? Por exemplo, a estimativa da incerteza de medição é eficaz para superar o problema da exatidão? Tal entende que sua abordagem epistêmica baseada em modelo pode contribuir para preencher **lacunas** existentes entre as metodologias metrológicas recomendadas pelos documentos da JCGM e os problemas filosóficos relacionados à medição (TAL, 2012, p. 3-16).

O filósofo observa que a adoção de **modelos idealizados** constitui a “pré-condição” para a inserção coerente do processo de medição num contexto maior. De fato, é difícil imaginar medições científicas coerentes sem recorrer a teorias científicas e à adaptação dessas sob a forma de modelos. Da abordagem de Tal, emergiu uma “condição geral evidencial para testar alegações [*claims*] de medição” por ele denominada “**convergência sob representações**” (TAL, 2012, p. 178; grifo nosso). As alegações estão relacionadas com os três problemas acima mencionados e são avaliadas testando se os modelos idealizados que representam diferentes processos de medição convergem entre si. A convergência requer tanto

que os modelos sejam construídos com base em teorias coerentes umas com as outras, quanto que os resultados de medição convirjam dentro das incertezas associadas aos processos de medição. Uma convergência **robusta** é suficiente para resolver os três problemas, mas não fornece certeza absoluta: futuras medições podem indicar a necessidade de revisões dos modelos (TAL, 2012, p. 178-9).

Da mesma forma que Bogen e Woodward haviam observado que a produção de dados científicos tem um caráter idiossincrático, Tal conclui que as reivindicações de conhecimento relacionadas às medições são “contextuais” (TAL, 2012, p. 179), ou seja, estão relacionadas com os recursos empregados. Entretanto, essa característica não significa que a validade da medição fique restrita ao laboratório em que é realizada. A estrutura da rede metrológica assegura que a validade dos resultados possa ser estendida para toda rede. Tal conclui também que os resultados da sua tese têm importantes consequências para alguns debates em andamento na filosofia da ciência. Dessas consequências, destacamos aquela que nos parece ser a mais significativa que é sobre a relação entre as teorias científicas e o mundo. Segundo Tal, sua abordagem baseada em modelos **mina** a ideia de que a representação científica é uma relação entre duas instâncias, a **abstrata** das teorias e dos modelos e a **concreta** dos objetos e dos eventos:

Sob minha análise, se um modelo idealizado representa adequadamente ou não um processo de medição é uma questão cuja resposta é relativa à adequação representacional de *outros* modelos em relação a *outros* processos de medição. Portanto, a abordagem baseada em modelo implica um tipo de coerentismo representacional, i. e., a difusão de condições de adequação representacional através de toda a rede de instrumentos e alegações de conhecimento (TAL, 2012, p. 180; grifo do autor).

A epistemologia baseada em modelo de Eran Tal aponta que a maneira de as medições fornecerem conhecimento sobre as propriedades físicas envolve uma ampla estrutura **científica** e **metrológica**. É ilusório pensar nas medições científicas como atividades individuais isoladas, uma vez que elas envolvem diversas teorias, instrumentos de medição complexos e padronizações em variados níveis. As medições se inserem num conjunto maior de atividades teóricas, experimentais e, até mesmo, institucionais. Essa constatação tem peso na filosofia da ciência em geral uma vez que a medição é um dos principais recursos das ciências físicas para sustentar suas alegações de conhecimento.

Enquanto a tese de Tal sobre epistemologia da medição é concisa e objetiva, a de Fabien Grégis sobre “o valor da incerteza” é extensa e com foco em diferentes aspectos da estimativa de incertezas. Grégis explora as metodologias estatísticas para avaliar incertezas e

a evolução histórica e institucional de conceitos relacionados à incerteza. Na subseção 3.3.2.2, trouxemos algumas considerações de Grégis muito úteis, principalmente sobre incerteza definicional e VV. Essa talvez seja a parte de discussão filosófica mais significativa de sua tese, especialmente quanto à incerteza definicional, sobre a qual Grégis desenvolve uma perspectiva original e esclarecedora. Da parte histórico-institucional, sua narrativa do processo de elaboração do GUM é inestimável para a compreensão da dinâmica própria das instituições metrológicas.

Aqui vamos discutir algumas de suas conclusões. O filósofo investigou as duas principais **metodologias estatísticas** para estimar incertezas, a frequentista e a bayesiana, e sugeriu que a medição poderia ser vista como uma atividade objetiva, se adotamos a interpretação frequentista, ou como subjetiva, se adotamos a interpretação bayesiana das probabilidades. Ao final de sua investigação, defende que **não teria sentido decidir** entre os diferentes métodos estatísticos (ambos são úteis em situações diferentes), nem entre as epistemologias que os acompanham.

A partir da discussão sobre o conceito de VV de uma grandeza, cujos principais argumentos apresentamos no terceiro capítulo, Grégis conclui que, embora não seja possível conhecer exatamente o VV, é possível **se aproximar** daquele valor. Além disso, o fato de o VV não ser único, não constitui obstáculo ao seu emprego e essa característica é aproveitada como oportunidade para **reavaliar** as teorias e os modelos nos quais as grandezas físicas estão inseridas. Sua resposta aos problemas da não existência e da não unicidade do VV se apoia na ideia de que é possível “conhecer aproximadamente” o VV e localizá-lo dentro do intervalo finito de valores dados pela incerteza. Apesar de ser “impossível garantir a exatidão de uma medição”, “é possível melhorar essa exatidão por meio de um processo de correção dos erros de medição”. Assim, a melhoria na exatidão estaria vinculada à ideia de progresso.

Grégis salienta que sua postura epistemológica **não é abstrata**, mas está relacionada ao que os físicos percebem na prática do ajuste das constantes universais (prática metrológica que emprega como exemplo). Os físicos desenvolveriam “uma epistemologia voltada para o **progresso futuro**, estabelecendo um processo permanente e interminável de correção de erros experimentais”. Mesmo sem aderir explicitamente à concepção frequentista, os físicos preservariam um apego ao caráter “**avaliativo**” (objetivo) da medição, frente à influência bayesiana de apontar uma conotação de “estado de crença” (subjetivo) (GRÉGIS, 2016, p. 339; grifos nossos).

Observa-se, então, que o trabalho de Grégis enfoca o conceito de incerteza de medição como questão em disputa entre concepções acerca das medições, disputa que pode ser

estendida para concepções acerca do *modus operandi* e dos **objetivos** das ciências físicas. Um outro modo de colocar a questão, conclui Grégis, é compreender a relação entre os conceitos de **incerteza** (em sua concepção epistêmica) e **exatidão** (metafísica, como proximidade da verdade). Essa relação tem implicação no significado do limite do conhecimento (que pode ser expresso por ambos os conceitos):

A questão dos limites do conhecimento experimental que subjaz a esta tese equivale a questionar a relação que é possível fazer emergir entre esses dois conceitos, enfim entendidos como duas faces da noção de conhecimento. É claro que não é possível responder a essa pergunta de forma simples e direta, pois o conhecimento é por natureza sempre incerto. Nosso trabalho nos leva antes à conclusão de que “conhecer” não é tanto dizer o “verdadeiro” quanto buscar alcançá-lo (GRÉGIS, 2016, p. 339).

O detalhado e aprofundado trabalho de Grégis contribui para a compreensão do funcionamento de instituições metrológicas, da visão que metrologistas têm de suas atividades e, em especial, do significado da incerteza de medição e de como o problema do realismo das grandezas físicas tem sido pensado. Sua tese e seus trabalhos, assim como os de Eran Tal, têm mostrado como a reflexão sobre a atividade científica de medição pode contribuir para os temas fundamentais da filosofia da ciência.

Em nossa tese, argumentamos na seção 4.3 em favor da relação entre os problemas tratados ao longo do trabalho com questões epistemológicas. Talvez possamos dividir os problemas (bem como os achados) de nossa tese em **dois grupos** relacionados aos dois últimos capítulos, mas sem perder de vista a estreita conexão entre os dois grupos. No terceiro capítulo, problematizamos a mudança de abordagem de erro para incerteza proporcionada pela publicação do GUM e questões relacionadas com essa mudança. Nossa conclusão do primeiro grupo de problemas é apontar a **centralidade** do conceito de incerteza de medição na estrutura conceitual da metrologia e a **implicação** de questões relacionadas à realidade das grandezas físicas.

Nesse primeiro grupo de problemas, a discussão tangenciou muitas das questões tratadas por Grégis, embora tenhamos divergido pontualmente em algumas interpretações. Foram apontados alguns aspectos que merecem ser realçados aqui como significativos para uma perspectiva epistemológica: o **papel articulador da incerteza de medição** na rede metrológica internacional, a **mobilização** dos pesquisadores para reduzir e quantificar realisticamente as incertezas, os problemas colocados pela prática que privilegia **conceitos operacionais** e as **perspectivas filosóficas** presentes na metrologia que são manifestadas em função de questões ensejadas pelo conceito de incerteza.

O segundo grupo de problemas foi levantado a partir de investigações sobre **erros experimentais**. Esse caminho nos levou a constatar a **inevitabilidade** de fontes de incertezas que se originam, principalmente, na modelagem e na complexidade do sistema empírico. No trajeto, encontramos dois conceitos que possuem ressonância com o trabalho de Eran Tal: os **modelos** que possibilitam o emprego das teorias e a **coerência** entre as teorias de base e entre os resultados de medição. Diferentemente de Tal, que analisou os recursos metrológicos que validam as alegações de conhecimento, nossa pesquisa visou os mecanismos pelos quais os modelos introduzem componentes de incerteza e o papel da coerência na estabilização do “*patchwork*” de teorias físicas.

Interpretações divergentes à parte, os três textos (as teses de Tal e de Grégis e o nosso trabalho) tocam em questões que estão no cerne de problemas caros à filosofia da ciência. Mais do que isso, entendemos que a filosofia da medição, especialmente a vertente que coloca ênfase nas questões epistemológicas, pode contribuir para ir além da argumentação de inspiração puramente conceitual ou histórica. A filosofia da medição busca compreender a **prática científica** e as bases sobre as quais as ciências se apoiam para sustentar suas alegações de **conhecimento quantitativo**. Fundamental para esse tipo de conhecimento é a avaliação da qualidade da medição, ou seja, da incerteza de medição. Em função disso, os três trabalhos abordam questões que relacionam medição e conhecimento e que envolvem o conceito de incerteza. De forma resumida: como os cientistas estimam as incertezas, como a incerteza provê confiança nas medições e por que as fontes de incerteza são inevitáveis?

É interessante notar que o foco em questões epistemológicas não afasta de modo radical as questões **metafísicas** e/ou **ontológicas**. Por mais que essas últimas não constituam o foco dos trabalhos, reaparecem na discussão em diversos pontos. Isso acontece porque, sob certas perspectivas, algumas questões epistemológicas repousam sobre questões ontológicas. Por exemplo, em algumas situações, o status do conceito de VV de uma grandeza é determinado por características metafísicas do conceito. Uma argumentação que sustente que as grandezas são reais e possuem VV único deve sustentar também que conceitos relacionados ao VV (como erro ou exatidão “metafísica”) possuem mais valor epistemológico do que conceitos menos objetivos, como o de incerteza. O exemplo foi propositalmente descrito em linguagem realista mais radical, que é menos frequente nos debates do que o realismo moderado.

Apesar do principal foco dos recentes trabalhos sobre medições recair sobre aspectos epistemológicos, é preciso reconhecer que as questões ontológicas têm o poder de atrair a atenção da discussão filosófica. A epistemologia das medições tende a ser agnóstica em

relação a questões ontológicas, mas essas questões reaparecem naturalmente nas abordagens. Elas estão relacionadas de modo mais cabal com as tradicionais questões da filosofia da ciência e, até mesmo, com as questões gerais da filosofia. Esse pode ter sido um fator que tenha contribuído também para o aparecimento dessas questões em trabalhos de viés epistemológico. Argumentando em favor de um realismo aproximativo, Grégis associa o progresso do conhecimento à ideia de que as medições obtêm valores cada vez mais próximos do VV, pois,

[...] se há um progresso possível do conhecimento, é porque há um conhecimento possível quanto ao valor verdadeiro. Se é impossível justificar totalmente este ponto de vista – pois ele exige uma adesão ao realismo que não pode encontrar justificação lógica ou empírica –, nos parece [...], que ela corresponde em grande parte à concepção geral que os cientistas têm das grandezas físicas e da atividade de medição, contrariamente ao que defendem os documentos da metrologia discutidos aqui (GRÉGIS, 2016, p. 338).

A postura cética que adotamos poderia ser defendida com a observação de Grégis de que não há justificação lógica nem empírica para um realismo metafísico. Entendemos, entretanto, que os documentos metrológicos não são contrários à concepção em geral realista dos cientistas, pois não defendem explicitamente a não existência ou a não unicidade metafísica do VV. Os documentos afirmam apenas que o VV não é conhecível e que a incerteza definicional impede a unicidade do VV para as grandezas não fundamentais.

De todo modo, a peculiaridade da filosofia da medição, e por extensão, da epistemologia da medição é direcionar a visada para a **prática da medição**. Note-se que, conforme já frisamos, a prática da medição científica envolve, necessariamente, as dimensões teórica e experimental. Ao se concentrar na prática, a filosofia da medição identifica e trabalha questões **próprias**, mas também questões tradicionais da filosofia da ciência a partir de **perspectivas próprias** e diferentes das abordagens tradicionais. Observamos em alguns pontos da tese que a abordagem tinha como característica positiva sobrepassar as questões tradicionais da filosofia da ciência em favor de outras questões mais específicas, mas também mais produtivas. Em virtude de a medição ser uma atividade das ciências já consagrada como produtora de conhecimentos, a abordagem da filosofia da medição tende a privilegiar questões epistemológicas.

CONCLUSÃO

Retomo aqui o tom mais pessoal e em primeira pessoa com que apresentei a motivação, os objetivos e a metodologia da tese na introdução. Retomo também a situação cômica lá descrita. Por que a incerteza de medição é usada em uma piada recorrente como o assunto preferencial para expressar a identidade da prática na metrologia? As razões para isso residem em algumas características do conceito que apontei ao longo do texto: a **centralidade** que ocupa dentro da estrutura conceitual da metrologia, as **funções** desempenhadas na rede metrológica e o modo pelo qual a incerteza é **avaliada**. A seguir, comentamos cada uma dessas características.

Começo pelo modo como a incerteza é **avaliada**. Essa estimativa é uma tarefa minuciosa e difícil que depende da “compreensão, análise crítica e integridade de todos aqueles que contribuem para o estabelecimento de seu valor” (INMETRO, 2012a, 3.4). Envolve considerações objetivas e subjetivas, mas também científicas e institucionais. Requer o levantamento de muitos dados relacionados com os instrumentos empregados e uma análise baseada em distribuições de probabilidade. Embora lance mão de teorias físicas e estatísticas, a avaliação de incertezas é uma atividade essencialmente prática e integrada às atividades metrológicas.

O enfoque adotado para a estimativa da incerteza de uma medição está sempre sujeito a críticas e revisões. Conforme comentei na seção 3.4, é recomendável que haja um esforço para realizar estimativas realísticas das incertezas de medição pois a imagem da instituição, para o bem ou para o mal, fica atrelada a esses valores. Para os laboratórios que atuam na rotina metrológica, é através dos valores das incertezas de medição que suas capacidades de medição e calibração se tornam públicas (expressas nos CMCs dos laboratórios acreditados). Também observei nas seções 3.4 e 4.3, que os cientistas são mobilizados pelas fontes de incertezas identificadas porque representam os pontos do procedimento de medição que requerem atenção e investimento e que o processo de avaliação de incertezas fornece um diagnóstico ponderado do procedimento.

No decorrer da tese apontei algumas **funções** que o conceito de incerteza exerce. O valor da incerteza está relacionado com a exatidão que se consegue alcançar nos experimentos em determinada área das ciências. É através da incerteza que os laboratórios que atuam em pesquisas de ponta assinalam os limites do conhecimento quantitativo. Em se tratando de laboratórios do mais alto nível, a incerteza pode ser tomada praticamente como uma medida do estado-da-arte da respectiva área. A incerteza de medição representa a tradução

contemporânea da ideia de “concordância razoável” entre valores teóricos e experimentais que Kuhn apontou.

Mais importante do que indicar a aproximação com a realidade ou a adequação das teorias é o papel de possibilitar comparações. Os critérios preestabelecidos para que se reconheça a concordância entre valores experimentais é fundamental para qualquer pesquisa que recorra a métodos experimentais quantitativos. Sem a comparação não há como reconhecer concordâncias entre medições e sem essas, como apontou Eran Tal, torna-se difícil saber se os procedimentos são adequados para medir certa grandeza, saber se dois procedimentos medem a mesma grandeza e saber qual a exatidão de um procedimento de medição. A comparação entre padrões do mesmo nível na hierarquia metrológica (comparabilidade) pode ser interpretada como uma articulação entre medições possibilitada pela incerteza: a articulação horizontal. No sentido vertical da rede metrológica internacional, a incerteza toma parte da rastreabilidade das medições.

A **centralidade** se mostra na atração que o conceito exerce em muitas discussões científicas e filosóficas. Na tese, procurei mostrar como a mudança de abordagem que propôs a expressão da incerteza como o principal índice da qualidade da medição levou à ampla revisão dos principais conceitos metrológicos. Chamei atenção para conceitos correlatos que foram afetados pela reformulação e para a implicação do próprio conceito de medição. Mas, ao mesmo tempo, apontei que a mudança de abordagem procurou manter conceitos e perspectivas da abordagem de erro, o que mostra que a mudança não foi radical.

Por seu turno, as **metodologias** para estimar incertezas constituem também foco de interesse científico e filosófico. As ferramentas estatísticas desenvolvidas a partir das teorias das probabilidades incorporam dimensões **objetiva** e **subjativa** que possuem ressonâncias no modo com as incertezas são estimadas. O emprego da estatística nas medições implica a “importação” de problemas filosóficos inerentes à probabilidade e à estatística para o rol de problemas metrológicos. Como mostrei em algumas passagens da tese, foram levantadas advertências contra a possibilidade de questões filosóficas paralisarem as discussões nos fóruns metrológicos. Mas observei também que a evitação de discussões filosóficas pode prejudicar a coerência da estrutura conceitual da metrologia.

Sem dúvida, a publicação do GUM representa um dos mais expressivos marcos no desenvolvimento da metrologia. A despeito dos diversos problemas apontados por especialistas em metrologia e em estatística, bem como do ponto de vista filosófico, a publicação do guia tem que ser reconhecida como uma conquista em favor da **harmonização** das práticas metrológicas. Alguns autores entendem que a abordagem operacional adotada

pelos documentos da JCGM, que privilegia as grandezas conhecíveis, contraria a prática científica de trabalhar com grandezas teóricas e com os parâmetros ideais dos modelos estatísticos. Defendi, em algumas passagens da tese, que a abordagem operacional reconhece o emprego legítimo dos termos teóricos, mas é coerente com a **prática experimental** ao restringir a expressão de resultados em termos de grandezas conhecíveis.

Um aspecto nocivo do guia que se pode apontar, embora de menor importância, diz respeito a uma faceta inerente ao seu aspecto positivo mais notório. O fato de haver metodologias recomendadas pelas instituições metrológicas materializadas no guia e seus suplementos pode levar ao emprego automatizado e acrítico dessas metodologias. Como apontei, alguns especialistas frisaram que as suposições estatísticas são válidas quando os dados apresentam estabilidade estatística e outras condições. O próprio guia alerta para as condições que precisam ser satisfeitas, mas a real consequência pode ser o emprego irrefletido das metodologias. Já a apresentação da incerteza por um único valor, pode levar à perda de informação no uso subsequente do resultado da medição. Por outro lado, o valor único de incerteza permite a identificação mais imediata da função articuladora que a incerteza desempenha na rede metrológica.

Busquei mostrar que as fontes de incerteza podem funcionar como uma janela para visualizarmos os pontos em que as representações científicas não correspondem exatamente às propriedades representadas. Espero ter conseguido indicar também porque os erros experimentais não devem ser vistos como detalhes de menor importância, mas que possibilitam uma perspectiva epistemologicamente importante para as medições, a “perspectiva negativa”, como denominou Giora Hon.

Embora os conceitos metrológicos tenham desempenhado uma função fundamental nessa pesquisa, procurei ir além da maneira como as questões são tratadas no âmbito metrológico. Do ponto de vista genealógico e geral, as instâncias de origem das incertezas têm relativa independência em relação à evolução histórica da metrologia. Com a exceção dos erros observacionais, as fontes de incerteza que afetam as medições que realizamos hoje são as mesmas que afetavam as medições antes da adoção institucional do conceito de incerteza. Porém, sem dúvida, a adoção e a disseminação do conceito ajudaram a esclarecer muitos aspectos do problema.

A partir da tipologia dos erros experimentais referentes aos estágios de um experimento de Hon e de uma visada genealógica, identifiquei três principais instâncias das medições de onde se originam as incertezas: modelização (ou simplificação do modelo),

complexidade do sistema empírico e aproximação matemática. Fontes de incerteza emanam, inevitavelmente, de todas as três instâncias.

A **modelização** (ou modelagem), como mediadora entre as teorias e o experimento de medição, é o **processo** que se destaca por possibilitar a matematização dos fenômenos e, por isso, medições com alta exatidão. Ao mesmo tempo, por exigir simplificações, aproximações e correções, a modelagem constitui o principal processo de introdução de componentes de incertezas. Essas são introduzidas por dois motivos: pela limitação ou simplificação do modelo ou pela “forma” das teorias científicas incorporadas no modelo, que não são capazes de reproduzir fielmente a complexidade do sistema empírico. Na verdade, é em função da **complexidade do sistema empírico** que a modelização encontra limites em sua extensão e em sua forma. A simplificação do modelo (isto é, o limite imposto à extensão do modelo) é o que chamamos propriamente de instância de origem das incertezas na modelização. Já a forma da modelização diz respeito à limitação das próprias teorias incorporadas nos modelos para fornecerem representações adequadas da complexidade.

Como salientei na subseção 4.2.3.1, a identificação das instâncias não pretende ser exaustiva, nem supõe que seja sempre possível distinguir em qual delas uma dada fonte de incerteza tem origem. A reflexão pretende contribuir para uma interpretação epistemológica do processo de medição: o conhecimento proporcionado pela medição encontra seus limites nas instâncias de origem das incertezas. O próprio processo de levantamento e estimativa de incertezas de uma medição realizado pelos cientistas tem, também, caráter epistemológico. O ganho de conhecimento sobre o procedimento de medição nesse processo é inestimável. Na seção 4.3, apontei de forma mais detalhada os diversos aspectos e as diversas perspectivas pelas quais penso que é possível falar numa epistemologia das incertezas.

A mudança de abordagem promovida pelo GUM é reputada como uma **virada epistemológica**, cujo significado refere-se aos conhecimentos envolvidos na medição e à influência da estatística bayesiana. Com a mudança, passa a ser enfatizado que o valor medido é dependente das condições e do conhecimento empregado na medição e a qualidade do resultado passa a ser expressa pela estimativa da incerteza (um processo dependente do conhecimento e de julgamentos subjetivos). Mesmo que não tenha sido radical, a mudança de abordagem marca uma virada que coloca em foco o conhecimento envolvido na medição. Esta última pode ser pensada, então, como um **processo epistemológico**, mais do que ontológico, embora alguns intérpretes do sistema metrológico entendam que aspectos ontológicos devam ser restituídos.

A virada é, provavelmente, um dos motivos pelos quais a filosofia da medição produzida a partir das últimas décadas do século XX privilegia abordagens epistemológicas. É também o motivo pelo qual a incerteza de medição assume certo protagonismo dentro da estrutura conceitual da metrologia e que desperta o interesse pela pesquisa da presente tese. Na seção 4.4, destacamos as particularidades e os resultados de abordagens da epistemologia da medição. Da tese de Eran Tal, destacamos a conclusão de que a validade dos resultados de medição implica um tipo de “**coerentismo**”. A representação que a medição fornece é baseada em um modelo teórico e estatístico, mas também se vale de uma vasta rede de dispositivos e de conhecimentos, inclusive outros modelos, com resultados convergentes. Do trabalho de Fabien Grégis, dentre muitas discussões significativas, emerge uma **tensão** entre dois conceitos relacionados com a qualidade da medição: a incerteza, que possui um caráter mais epistêmico, e a exatidão, que remete ao valor teórico que se busca alcançar.

Do mesmo modo que no trabalho de Grégis, ao longo dessa tese ocorre o reaparecimento de questões **ontológicas**. Nos comentários finais do quarto capítulo (seção 4.4), já havia chamado atenção para essa reincidência. Não poderia ser diferente aqui na conclusão, pois entendo que a identificação das instâncias de origem da incerteza envolve questões ontológicas. Na verdade, aspectos ontológicos e epistemológicos estão sempre emaranhados e as questões ontológicas também nos levam de volta para as epistemológicas.

Na subseção 4.2.3.2, discuti conceitos e concepções de filósofos da ciência para interpretar a inevitabilidade da incerteza como consequência da relação entre as teorias científicas, os modelos de medição adotados e as propriedades físicas visadas. Também apontei, de um ponto de vista mais específico, que as interações entre os sensores dos instrumentos de medição e os mensurandos, bem como a instabilidade temporal das grandezas, jogam luz sobre a **inevitabilidade** da incerteza. Uma maneira resumida de formular a interpretação sobre essas reflexões é que a complexidade do sistema empírico não permite a matematização **perfeita** da natureza. Os sistemas empíricos (que já configuram recortes da natureza) são mais complexos que o cálculo que deles podemos fazer. Na verdade, esse é um outro modo de formular o empirismo relacionado à dimensão experimental a que nos referimos na introdução.

Dizer que a natureza é mais complexa que o cálculo não significa sustentar uma visão romântica da natureza, nem fazer pouco caso da nossa capacidade de cálculo e de medição nas ciências físicas. Como pesquisador em metrologia e tendo trabalhado com simulações computacionais (com o Método de Monte Carlo aplicado às radiações ionizantes) só posso dizer que a capacidade das ciências físicas de calcular e medir grandezas é espetacular! Ainda

assim (ou, talvez, por isso mesmo), constata-se que não pode haver coincidência perfeita em função da inevitabilidade da incerteza.

Para se acreditar que é possível fazer coincidir exatamente o cálculo e a medição é preciso crer em um universo pitagórico-matemático ou em um deus matemático. Não creio nem em uma coisa nem em outra e, por isso, entendo que a natureza sempre se esquivará de uma identificação perfeita. Pode-se também, seguindo Wigner, tomar a efetividade da matemática como misteriosa, mas esse me parece ser um modo sutil de insinuar uma das alternativas acima ou as duas juntas: o universo é estruturado pelo número porque deus é matemático. Por outro lado, também não subscreveria um misticismo romântico que vê na exuberância da natureza um mistério insondável.

Apesar dos limites com os quais as ciências se deparam, os sucessos dos métodos científicos são inegáveis e, em geral, fazem os limites recuarem, mas não os suprimem. A difícil batalha pela apreensão da complexidade da natureza fornece uma imagem das ciências menos milagrosamente abstrata e mística e mais calcada no **esforço**, na **colaboração** e no **engenho** humanos. Uma imagem que também não oculta os limites impostos à atividade científica. Mas os limites a que me refiro não tornam as ciências menos relevantes. Trata-se de reconhecer que o conhecimento será sempre, de alguma forma, cercado por **limites** – limites esses que as ciências são as primeiras a reconhecer e que constituem desafios a serem superados. No caso da medição, a incerteza representa o limite provisório reconhecido e o levantamento das fontes de incerteza fornece os pontos que podem ser atacados para diminuir a incerteza global.

Pode-se pensar que há humildade em reconhecer o limite do conhecimento através da expressão da incerteza de medição: é o reconhecimento da persistência da ignorância e da dúvida, mesmo que de pequeno valor. Por outro lado, pode-se pensar também que há ousadia, porque o limite é quantificado, a ignorância e a dúvida são estimadas. Esse é mais um aspecto paradoxal de um conceito relativamente novo que simboliza de forma notável as características do conhecimento científico.

REFERÊNCIAS

- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *NBR ISO 5735-1*: exatidão (veracidade e precisão) dos métodos e dos resultados de medição. Parte 1: Princípios gerais e definições. Rio de Janeiro, 2018.
- _____. *NBR ISO/IEC 17025*: requisitos gerais para a competência de laboratórios de ensaio e calibração. Rio de Janeiro, 2017.
- AIRY, G. B. *On the Algebraical and Numerical Theory of Errors of Observations and the Combination of Observations*. Londres: MacMillan, 1875.
- AMBLER, E. Letter from E. Ambler to J. Terrien. NIST's archives, United States Department of Commerce, Aug 25, 1977 (not published).
- ANDLER, D.; FAGOT-LARGEAULT, A.; SAINT-SERNIN, B. *Filosofía de las ciencias*. Cidade do México: Fondo de Cultura Económica, 2011.
- ATTIX, F. H. *Introduction to Radiological Physics and Radiation Dosimetry*. Weinheim: Willwy-VCH, 2004.
- BACHELARD, G. *Ensaio sobre o conhecimento aproximado*. Rio de Janeiro: Contraponto, 2004.
- _____. *Le Rationalisme Appliqué*. Paris: Presses Universitaires de France, 1966.
- BAKER, A. Explaining the Applicability of Mathematics in Science. *Interdisciplinary Science Reviews*, v. 36, n. 3, p. 255-267, 2011.
- BICH, W. How to revise the GUM? *Accred. Qual. Assur.*, v. 13, p. 271-275, 2008.
- _____. From Errors to Probability Density Functions: Evolution of the Concept of Measurement Uncertainty. *IEEE Trans. Instrum. Measur.*, v. 61, n. 8, p. 2153-2159, 2012.
- _____.; COX, M. G.; HARRIS, P. M. Evolution of the 'Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement'. *Metrologia*, v. 43, p. S161-S166, 2006.
- BIPM – BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES, *Rapport BIPM-80/3*: report on the BIPM enquiry on error statements. Sevres, 1980.
- _____. *The International System of Units (SI)*. (SI Brochure) 9th Ed. Sevres, 2019.
- BIRGE, R. The Calculation of Errors by the Method of Least Squares. *Physics Review*, v. 40, p. 207-227, 1932.
- BOGEN, J.; WOODWARD, J. Saving the phenomena. *The Philosophical Review*, v. XCVII, n. 3, 1988.

BOISVERT, R. et al. Mathematics and Measurement. *Journal of Research of the National Institute of Standard and Technology*, v. 106, p. 293–313, 2001.

BONTEMS, V. *Bachelard*. Paris: Belles Lettres, 2010.

BOREL, É. *Introduction géométrique à quelques théories physiques*. Paris: Gauthier-Villars, 1914.

BORGES, J. L. Sobre o Rigor na Ciência. In: _____. *O Fazedor*. Tradução de Josely Vianna Baptista. São Paulo: Companhia das Letras, 2008.

BOUMANS, M. Measurement Outside the Laboratory. *Philosophy of Science*, v. 72, n. 5, p. 850-863, 2005.

_____.; HON, G. Introduction. In: _____.; HON, G.; PETERSEN, A. (Ed.). *Error and Uncertainty in Scientific Practice*, London: Pickering & Chatto, 2014, p. 1-12.

_____.; _____.; PETERSEN, A. (Ed.) *Error and Uncertainty in Scientific Practice*. London: Pickering & Chatto, 2014.

BOREL, É. *Introduction Géométrique: Quelques Théories Physiques*. Paris: Gauthier-Villars, 1914.

BOYD, R. Realism, Approximate Truth, and Philosophical Method. In: SAVAGE, C. W. (Ed.) *Scientific Theories*. Minneapolis: University of Minnesota Press, 1990. (Minnesota Studies in the Philosophy of Science, v. 14).

BRADLEY, D. A.; PETLEY, B. W. Expressing doubt about uncertainty? *European Journal of Physics*, v. 3, p. 58-59, 1982. (Letters and Comments).

BRIDGMAN, P. *The Logic of Modern Physics*. Nova York: Macmillan, 1958.

_____. How Much Rigor is Possible in Physics? In: HENKIN, L.; SUPPES, P.; TARSKI, A. (Ed.) *Studies in Logic and the Foundations of Mathematics*, Elsevier, v. 27. p. 225-237, 1959.

BURNS, J. E., CAMPION, P. J.; WILLIAMS, A. Error and Uncertainty. *Metrologia*, v. 9, p. 101-102, 1973. (Letters to the Editor).

CALI, J. P.; MARSH, K. N. An Annotated Bibliography on Accuracy in Measurement. *Pure and Applied Chemistry*, v. 55, n. 6, p. 908-930, 1983.

CAMPBELL, N. *Physics: The Elements*. Cambridge: Cambridge University Press, 1920.

_____. The statistical theory of errors. *Proceed. of the Physical Society*, p. 800-809, 1935.

CAMPION, P; BURNS, J; WILLIAMS, A. *A Code of Practice for the Detailed Statement of Accuracy*. London: National Physical Laboratory, 1980.

CARTWRIGHT, N. *The Dappled World: A Study of the Boundaries of Science*. Cambridge: Cambridge University Press, 1999.

_____. *How the laws of physics lie*. Oxford: Clarendon Press; New York: Oxford University Press, 1983.

_____. *Nature's Capacities and Their Measurement*. Oxford: Clarendon Press; New York: Oxford University Press, 1994.

CHAKRAVARTTY, A. Scientific Realism. In: ZALTA, E. (Ed.) *Stanford Encyclopedia of Philosophy*, Summer Edition, 2017.

CHANG, H. *Inventing Temperature: Measurement and Scientific Progress*. New York: Oxford University Press, 2004.

_____. Operationalism: Old Lessons and New Challenges. In: MÖßNER, N.; NORDMANN, A. (Ed.) *Reasoning in Measurement*. London, New York: Routledge. p. 25-36, 2017.

_____; CARTWRIGHT, N. Measurement. In: PSILLOS, S.; CURD, M. (Ed.) *The Routledge Companion to Philosophy of Science*. New York: Routledge, p. 367-375, 2008.

CHATTERJEE, S. K. *Statistical Thought: A Perspective and History*. Oxford: Oxford University Press, 2003.

CIPM – COMITÉ INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURE, *Procès-Verbaux des Séances 67^a Session*, Sèvres: BIPM, 1978.

_____, *Procès-Verbaux de la 73^a session*, Sèvres: BIPM, 1984.

COHEN, H. F. The 'Mathematization of Nature': The Making of a Concept, and How It Has Fared in Later Years. In: REMMERT, V.; SCHNEIDER, M.; SØRENSEN, H. K. (Ed.) *Historiography of Mathematics in the 19th and 20th Centuries*, Cham (Switzerland): Birkhauser, Springer, 2016.

COX, M. G.; HARRIS, P. M. *Software Support for Metrology Best Practice Guide No. 6 - uncertainty evaluation*. NPL Report MS 6. London: NPL, 2010.

CREASE, R. *A medida do mundo - a busca por um sistema universal de pesos e medidas*. Rio de Janeiro: Zahar, 2013.

CREATH, R. Logical Empiricism. In: ZALTA, E. (Ed.) *Stanford Encyclopedia of Philosophy*, Winter Edition, 2021.

DAVID, F. N. *Games, Gods and Gambling - The origins and history of probability and statistical ideas from the earliest times to the Newtonian era*. New York: Hafner Publishing Company, 1962.

_____. Studies in the History of Probability and Statistics I. Dicing and Gaming (A Note on the History of Probability). *Biometrika*, v. 42, n. 1/2, p. 1-15, 1955.

DAVID, M. G. O papel ‘articulador’ do conceito de incerteza de medição na rede metrológica internacional. In: MOTTA, M. C.; VIDEIRA, A. A.; FRAGOZO, F. *Perspectivas Contemporâneas em Filosofia da Ciência*, v. II, São Paulo: Livraria da Física, 2021.

_____; CORRÊA, M. F.; VIDEIRA, A. A. Balancing the physics of radiation: Challenges to the system of quantities and units in radiological protection. *Philosophy Compass*, v. 14, n. 3, 2019a.

_____; _____. Some Critical Remarks on the Radiological Protection System: An epistemological analysis of radiation quantities and units. *Ciência e Sociedade*, CBPF - Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, v. 6, n.2, p. 1-18, 2019b.

DE COURTENAY, N. The Double Interpretation of the Equations of Physics and the Quest for Common Meanings. In: SCHLAUDT, O.; HUBER, L. *Standardization in measurement*. London: Pickering & Chatto, p. 53-68, 2015.

_____; GRÉGIS, F. The evaluation of measurement uncertainties and its epistemological ramification. *Studies in History and Philosophy of Science*, v. 65-66, 2017.

DEMING, W. E.; BIRGE, R. On the Statistical Theory of Errors. *Reviews of Modern Physics*, v. 6, n. 3, p. 119-161, 1934.

DIAS, J. L. de M. *Medida, Normalização e Qualidade: Aspectos da história da metrologia no Brasil*. Rio de Janeiro: INMETRO - Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial, 1998.

DÍEZ, J. A Hundred Years of Numbers: An Historical Introduction to Measurement Theory 1887-1990. Part II: Suppes and the Mature Theory. Representation and Uniqueness. *Studies in History and Philosophy of Science*. v. 28, n. 2, p. 237-265, 1997.

DIRAC, P. A. M. The Relation between Mathematics and Physics. *Proceedings of the Royal Society*, v. 59, Part II, 1939.

DOMOTOR, Z; BATISTSKY, V. The Analytic Versus Representational Theory of Measurement: A Philosophy of Science Perspective. *Measurement Science Review*, v. 8, Sec. 1, n. 6, 2008.

DORSEY, N. E.; EISENHART, C. On Absolute Measurement. *The Scientific Monthly*, v. 77, n. 2, p. 103-109, 1953.

EDGEWORTH, F. Y. Observations and statistics: an essay on the theory of errors of observation and the first principles of statistics. *Transactions of the Cambridge Philosophical Society*, v. 14, p. 138-169, 1885.

EHRlich, C. Terminological aspects of the Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM). *Metrologia*, v. 51, p. S145-S154, 2014.

_____.; DYBKAER, R.; WÖGER, W. Evolution of philosophy and description of measurement (preliminary rationale for VIM3). *Accred. Qual. Assur.*, v. 12, p. 201-218, 2007.

EISENHART, C. Expression of the Uncertainties of Final Results: Clear statements of the uncertainties of reported values are needed for their critical evaluation. *Science*, v. 160, n. 3833, p. 1201-1204, 1968.

_____. Realistic Evaluation of the Precision and Accuracy of Instrument Calibration Systems. *Journal of Research of the NBS*, v. 67C, n. 2, p. 161-187, 1963.

_____.; COLLÉ, R. Postscript to 'Expressions of imprecision, systematic error, and uncertainty associated with a reported value' (Chapter 2). *NBS Communications Manual for Scientific, Technical, and Public Information*. Gaithersburg, MD: NIST, 1980.

EL GAMAL, I. et al. The Fricke dosimeter as an absorbed dose to water primary standard for Ir-192 brachytherapy. *Phys. Med. Biol.*, v. 60, p. 4481-4495, 2015.

ELLISON, S. L. R.; WILLIAMS, A. (Ed.), *Quantifying Uncertainty in Analytical Measurement*. Third Edition. EURACHEM/CITAC CG4. 2012.

FERREIRÓS, J. Wigner's 'Unreasonable Effectiveness' in Context. *The Mathematical Intelligencer*, v. 39, p. 64-71, 2017.

FIENBERG, S. When Did Bayesian Inference Become 'Bayesian'? *Bayesian Analysis*, v. 1, n. 1, p. 1-40, 2006.

FILKELSTEIN, L.; LEANING, M. S. A review of the fundamental concepts of measurement. *Measurement*, v. 2, n. 1, 1984.

FISHER, R. *The Design of Experiments*. New York: Hafner Publishing Company, 1971.

FOUCAULT, M. *As palavras e as coisas: Uma arqueologia das ciências humanas*. Tradução de Salma Tannus Muchail. São Paulo: Martins Fontes, 1999.

FRANKLIN, A. *The Neglect of Experiment*. Cambridge: Cambridge University Press, 1986.

FRANKLIN, J. *The Science of Conjecture Evidence and Probability before Pascal*. Baltimore: The Johns Hopkins University Press, 2015.

FRIGERIO, A.; GIORDANI, A.; MARI, L. Outline of a general model of measurement. *Synthese*, v. 175, p. 123-149, 2010.

GARBER, D.; ZAMBELL, S. On the Emergence of Probability. *Archive for History of Exact Sciences*, v. 21, p. 33-52, 1979.

GIACOMO, P. News from BIPM. *Metrologia*, v. 17, p. 69-74, 1981. (Recomendação INC-1 (1980) em inglês).

GIGERENZER, G. et al. *The Empire of Chance: How probability changed science and everyday life*. Cambridge: Cambridge University Press, 1989.

GINGRAS, Y. What did mathematics do to physics? *History of Science*, v. 39, p. 383-416, 2001.

GODFREY-SMITH, P. *Theory and Reality: An introduction to the Philosophy of Science*. Chicago: The University of Chicago Press, 2003.

GOODAY, G. *The Morals of Measurement: Accuracy, Irony, and Trust in Late Victorian Electrical Practice*. Cambridge: Cambridge University Press, 2004.

GOODING, D. *Experiment and the Making of Meaning: Human Agency in Scientific Observation and Experiment*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1990.

GORHAM, G.; HILL, B.; SLOWIK, E. Introduction. In: GORHAM, G. et al. (Ed.) *The Language of Nature: Reassessing the Mathematization of Natural Philosophy in the Seventeenth Century*. Minneapolis: University of Minnesota Press, 2016.

GORHAM, G. et al. (Ed.) *The Language of Nature: Reassessing the Mathematization of Natural Philosophy in the Seventeenth Century*. Minneapolis: University of Minnesota Press, 2016.

GRATTAN-GUINNESS, I. Solving Wigner's Mystery: The Reasonable (Though Perhaps Limited) Effectiveness of Mathematics in Natural Sciences. *The Mathematical Intelligencer*, v. 30, n. 3, 2008.

GRÉGIS, F. Assessing accuracy in measurement: The dilemma of safety versus precision in the adjustment of the fundamental physical constants. *Studies in History and Philosophy of Science*, v. 74, p. 42-55, 2019b.

_____. Can We Dispense with the Notion of 'True Value' in Metrology? In: SCHLAUDT, O.; HUBER, L. *Standardization in Measurement: Philosophical, Historical and Sociological Issues*. London: Pickering & Chatto, 2015.

_____. *La valeur de l'incertitude: l'évaluation de la précision des mesures physiques et les limites de la connaissance expérimentale*. 2016. 385f. Thèse (Doctorat - Histoire et philosophie des sciences), Université Sorbonne Paris Cité, Paris, 2016.

_____. On the meaning of measurement uncertainty. *Measurement*, v. 133, p. 41-46, 2019a.

HACKING, I. *The Emergence of Probability: A Philosophical Study of Early Ideas about Probability, Induction and Statistical Inference*. New York: Cambridge University Press, 2006.

_____. *Representar e Intervir: tópicos introdutórios de filosofia da ciência natural*. Rio de Janeiro: EdUERJ, 2012.

_____. The Self-Vindication of the Laboratory Sciences. In: PICKERING, A. (Ed.) *Science as Practice and Culture*. Chicago: The University of Chicago Press, p. 29-64, 1992.

_____. *The Taming of Chance*. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.

HÁJEK, A. Interpretations of Probability. In: ZALTA, E. N. (Ed.) *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, Fall Edition, 2019.

HARVEY, A. The reasonable effectiveness of mathematics in the natural sciences. *General Relativity Gravitation*, v. 43, p. 3657-3664, 2016.

HEIDELBERGER, M. Theory-Ladenness and Scientific Instruments in Experimentation. In: RADDER, Hans. (Ed.) *The Philosophy of Scientific Experimentation*. Pittsburgh: University of Pittsburgh Press, 2003.

HOME D.; WHITACKER, M. Ensemble interpretation of quantum mechanics: a modern perspective. *Physics Reports*, v. 210, p. 223-317, 1992.

HON, G. The Idols of Experiment: Transcending the ‘Etc. List’. In: RADDER, H. (Ed.) *The Philosophy of Scientific Experimentation*. Pittsburgh: University of Pittsburgh Press, 2003.

_____. Towards a Typology of Experimental Errors: An epistemological view. *Studies in History and Philosophy of Science*, v. 20, n. 4, p. 469-504, 1989.

HUBER, L. Measuring by which Standard? How Plurality Challenges the Ideal of Epistemic Singularity. In: SCHLAUDT, O.; HUBER, L. (Ed.) *Standardization in measurement*. London: Pickering & Chatto, 2015.

_____.; SCHLAUDT, O. Introduction. In: SCHLAUDT, O.; HUBER, L. *Standardization in measurement*. London: Pickering & Chatto, 2015.

IAEA – INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Measurement Uncertainty: A Practical Guide for Secondary Standards Dosimetry Laboratories*. IAEA-TECDOC-1585. Vienna: IAEA, 2008.

_____. *Appendix to IAEA Calibration Certificate*. DOLP.011: Appendix 3A, Vienna, IAEA, 2020. Disponível em:
<http://www-naweb.iaea.org/nahu/DMRP/documents/DOLP_011_Appendix_3A.pdf>.
Acesso em: jan. 2022.

ILAC – INTERNATIONAL LABORATORY ACCREDITATION COOPERATION, *ILAC Policy for Measurement Uncertainty in Calibration*. ILAC-P14:09/2020. Silverwater: ILAC, 2020.

INMETRO – INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA, *Avaliação de dados de medição*: Guia para a expressão de incerteza de medição. (GUM, JCGM 100:2008), Rio de Janeiro: INMETRO, 2012a.

_____, *Avaliação de dados de medição*: Suplemento 1 do Guia para a expressão de incerteza de medição: Propagação de distribuições usando um método de Monte Carlo. (JCGM 101:2008), Duque de Caxias: INMETRO, 2020.

_____, *Vocabulário Internacional de Metrologia*: Conceitos fundamentais e gerais e termos associados. (VIM3; JCGM 200:2012), Ed. Luso-Brasileira. Rio de Janeiro: INMETRO, 2012b.

ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, *International Vocabulary of Basic and General Terms in Metrology*. (VIM1), Geneva: ISO, 1984.

JCGM – JOINT COMMITTEE FOR GUIDES IN METROLOGY, *Evaluation of measurement data: Supplement 1 to the GUM: Propagation of distributions using a Monte Carlo method*. Sèvres: BIPM, 2008.

_____, *International Vocabulary of Basic and General Terms in Metrology*. (VIM3) Sèvres, BIPM, 2012.

_____, *International Vocabulary of Metrology Fourth edition – Committee Draft (VIM4 CD)*, Jan. 2021.

JONES, M. W. Doric Measure and Architectural Design 1: The Evidence of the Relief from Salamis. *American Journal of Archaeology*, v. 104, p. 73-93, 2000.

KACKER, R. Measurement uncertainty and its connection with true value in the GUM versus JCGM documents. *Measurement*, v. 127, p. 525-532, 2018a.

_____. True value and uncertainty in the GUM. *Journal of Physics*, v. 1065, 2018b. (Conf. Series).

_____.; SOMMER, K.-D.; KESSEL, R. Evolution of modern approaches to express uncertainty in measurement. *Metrologia*, v. 44, p. 513-529, 2007.

KLASSEN, N. V. et al. Fricke dosimetry: the difference between G(Fe³⁺) for ⁶⁰Co -rays and high-energy x-rays. *Phys. Med. Biol.*, v. 44, p. 1609–1624, 1999.

KOYRÉ, A. *Estudos Galileanos*. Traducción de Mariano Gonzáles Ambóu. Madrid: Siglo XXI, 1980.

_____. *Estudos de história do pensamento científico*. Rio de Janeiro: Forense Universitária, Brasília: Ed. UnB, 1982.

_____. *Estudos de história do pensamento filosófico*. Rio de Janeiro: Forense Universitária, 1991.

_____. An experiment in measurement. *Proceedings of American Philosophical Society*, v. 97, n. 2, 1953.

KRANTZ, D. et al. *Foundations of Measurement – Vol. I – Additive and Polynomial Representations*. London, New York: Academic Press, 1971.

KRÜGER, L.; DASTON, L.; HEIDELBERGER, M. *The Probabilistic Revolution – Vol. I – Ideas in History*. Cambridge (MA): MIT Press, 1987.

KU, H. H. Expressions of Imprecision, Systematic Error, and Uncertainty Associated with a Reported Value. In: _____. (Ed.) *NBS Special Publication 300*, p. 73-76, 1968.

_____. (Ed.) *NBS Special Publication 300*, 1968.

KUHN, T. A função da medição na física moderna. In: _____. *A tensão essencial*. Tradução de Marcelo Amaral Penna-Forte. São Paulo: Ed. UNESP, p. 195-240, 2011.

_____. *A tensão essencial*. Tradução de Marcelo Amaral Penna-Forte. São Paulo: Ed. UNESP, 2011.

_____. Tradição matemática versus tradição experimental no desenvolvimento das ciências físicas. In: _____. *A tensão essencial*. Tradução de Marcelo Amaral Penna-Forte. São Paulo: Ed. UNESP, p. 55-88, 2011.

KULA, W. *Measures and Men*. Translation of Szreter, R. Princeton: Princeton University Press, 1986.

KUSCH, M. ‘A Branch of Human Natural History’: Wittgenstein’s Reflections on Metrology. In: SCHLAUDT, O.; HUBER, L. *Standardization in measurement*. London: Pickering & Chatto, p. 11-24, 2015.

LAÊRTIOS, D. *Vidas e doutrinas dos filósofos ilustres*. Tradução de Mário da Gama Kury. Brasília: Ed. da UnB, 1988.

LAPLACE, Pierre-Simon. *Ensaio filosófico sobre as probabilidades*. Tradução de Pedro Leite Santana. Rio de Janeiro: Contraponto, Ed. PUC Rio, 2010.

LARSON, R.; FABER, B. *Estatística aplicada*. Tradução de José Fernando Pereira Gonçalves. São Paulo: Education do Brasil, 2015.

LECOURT, D. *L’Épistémologie historique de Gaston Bachelard*. Paris: Vrin, 1969.

LINDLEY, D. V. The philosophy of statistics. *The Statistician*, v. 49, n. 3, p 293-337, 2000.

_____. *Understanding Uncertainty*. Hoboken (NJ): Willey-Interscience, 2006.

LIRA, I.; WÖGER, W. Comparison between the conventional and Bayesian approaches to evaluate measurement data. *Metrologia*, v. 43, p. S249-S259, 2006.

LUCE, R. D.; SUPPES, P. Representational measurement theory. In: PASHLER, H; WIXTED, J. (Ed.) *Stevens’ Handbook of Experimental Psychology*, 3rd Edition, New York: Willey, 2002. (v. 4: Methodology in Experimental Psychology).

LUCE, R. D. et al. *Foundations of Measurement – Vol. III – Representation, Axiomatization, and Invariance*. London, New York: Academic Press, 1990.

LÜTZEN, J. The Physical Origin of Physically Useful Mathematics. *Interdisciplinary Science Reviews*, v. 36, n. 3, p. 229-243, 2011.

MACH, E. *Error and Knowledge: Sketches on the Psychology of Enquiry*. Dordrecht, Boston: D. Reidel, 1976.

MANTUANO, A. et al. Linearity and reproducibility response of Fricke dosimetry for low energy X-Ray beam. *Journal of Physics*, v. 975, 2018. (Conf. Series).

MARGENAU, H. *The Nature of Physical Reality: A Philosophy of Modern Physics*. New York: McGraw-Hill, 1950.

MARI, L. Epistemology of measurement. *Measurement*, v. 34, p. 17-30, 2003.

_____. An Overview of the Current Status of Measurement Science: From Standpoint of the International Vocabulary of Metrology (VIM). In: SCHLAUDT, O.; HUBER, L. *Standardization in measurement*. London: Pickering & Chatto, p. 69-80, 2015.

_____. A quest for the definition of measurement. *Measurement*, v. 46, p. 2889-2895, 2013.

_____.; GIORDANI, A. Modeling Measurement: Error and Uncertainty. In: BOUMANS, M.; HON, G.; PETERSEN, A. *Error and Uncertainty*, London: Pickering & Chatto, p. 79-96, 2014.

MARI, L. et al. A structural interpretation of measurement and some related epistemological issues. *Studies in History and Philosophy of Science*, v. 65-66, p. 46-56, 2017.

_____.; MAUL, A.; WILSON, M. Can there be one meaning of “measurement” across the sciences? *Journal of Physics*, v. 1379, p. 1-5, 2019. (Conference Series).

MCEWEN, M. et al. *Determination of the radiation chemical yield (G) for the Fricke chemical dosimetry system in photon and electron beams*. Ottawa: NRC, 2014. (Report NRC-PIRS-1980).

MCKIE, D.; HEATHCOTE, N. H. V. *The Discovery of Specific and Latent Heats*. London: E. Arnold & Company, 1935.

MITCHELL, D.; TAL, E.; CHANG, H. The making of measurement: Editors’ introduction. *Studies in History and Philosophy of Science*, v. 65-66, p. 1-7, 2017.

MÖßNER, N.; NORDMANN, A. Epistemological Dimensions of Measurement. In: _____.; _____. (Ed.) *Reasoning in Measurement*, New York: Routledge, 2017.

_____.; _____. *Reasoning in Measurement*. London, New York: Routledge, 2017.

MORGAN, M.; MORRISON, M. *Models as Mediators: Perspectives on Natural and Social Science*. Cambridge: Cambridge University Press, 1999.

MORRISON, M.; MORGAN, M. Models as mediating instruments. In: MORGAN, M.; MORRISON, M. *Models as Mediators*. Cambridge: Cambridge University Press, p. 10-37, 1999.

MOTTA, M. C.; VIDEIRA, A. A.; FRAGOZO, F. *Perspectivas Contemporâneas em Filosofia da Ciência*, Volume II. São Paulo: Livraria da Física, 2021.

MOTTHEWS, R. *As leis do acaso: como a probabilidade pode nos ajudar a compreender a incerteza*. Rio de Janeiro: Zahar, 2017.

MÜLLER, J. W. Some Second Thoughts on Error Statements. *Nuclear Instruments and Methods*, v. 163, p. 241-251, 1979.

OKUNO, E.; YOSHIMURA, E. *Física das Radiações*. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

PAZ, M. de. From Jurisprudence to Mechanics: Jacobi, Reech, and Poincaré on Convention. *Science in Context*, v. 31, n. 2, p. 223–250, 2018.

PEIRCE, C. S. *The Collected Papers of Charles Sanders Peirce*. Cambridge, MA: Harvard University Press, 1994.

_____. *The Doctrine of Chances: the foundations of statistics and probabilistic reasoning*. Local Vandals Publishing, Kindle, 2020. (Readings in Pragmatism Book 6).

PERDIJON, J. *La mesure: Science et philosophie*. Paris: Flammarion, 1998.

PESCHARD, I. F.; VAN FRAASSEN, B. C. (Ed.) *The Experimental Side of Modeling*. Minneapolis: University of Minnesota Press, 2018. (Minnesota Studies in Philosophy of Science).

PICKERING, A. (Ed.) *Science as Practice and Culture*. Chicago: The University of Chicago Press, 1992.

PINHEIRO, F. F. *Investigações Epistêmicas das Medições Científicas: representações numéricas, conhecimento e objetividade*. Tese (Doutorado em Filosofia) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2021.

POLLOCK, D. *Physical Properties of Materials for Engineers*. Vol. II. Boca Raton: CRC Press, 2018.

POPKIN, R. *História do ceticismo de Erasmo a Spinoza*. Rio de Janeiro: Francisco Alves, 2000.

PORTER, T. *Trust in Numbers: The Pursuit of Objectivity in Science and Public Life*. Princeton: Princeton University Press, 1995.

PSILLOS, S.; CURD, M. (Ed.). *The Routledge Companion to Philosophy of Science*. New York: Routledge, 2008.

QUINN, T. From artefacts to atoms: A new SI for 2018 to be based on fundamental constant. *Studies in History and Philosophy of Science*, v. 65-66, p. 8-20, 2017.

_____; KOVALEVSKY, J. Measurement and society. *C. R. Physique*, v. 5, p. 791-797, 2004.

RADDER, H. (Ed.) *The Philosophy of Scientific Experimentation*. Pittsburgh: University of Pittsburgh Press, 2003.

_____. The philosophy of scientific experimentation: a review. *Automated Experimentation*, v. 1:2, 2009. Disponível em: <<http://www.aejournal.net/content/1/1/2>>. Acesso em: 15 dez. 2021.

REMMERT, V.; SCHNEIDER, M.; SØRENSEN, H. K. (Ed.) *Historiography of Mathematics in the 19th and 20th Centuries*, Cham (Switzerland): Birkhauser, Springer, 2016.

ROMEIJN, J.-W. Philosophy of Statistics. In: ZALTA, E. N. *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, Spring Edition, 2017.

ROQUE, T. *História da matemática: Uma visão crítica, desfazendo mitos e lendas*. Rio de Janeiro: Zahar, 2012.

ROUX, S. Forms of Mathematization (14th – 17th Centuries). *Early Science and Medicine*, v. 15, p. 319-337, 2010.

SALATA, C. et al. Validating Fricke dosimetry for the measurement of absorbed dose to water for HDR ¹⁹²Ir brachytherapy: a comparison between primary standards of the LCR, Brazil, and the NRC, Canada. *Phys. Med. Biol.*, v. 63, 2018.

SALSBURG, D. *Uma senhora toma chá...* Tradução de José Maurício Gradel. Rio de Janeiro: Zahar, 2009.

SANTORO, A. et al. *Estimativa e erros em experimentos da física*. Rio de Janeiro: EdUERJ, 2005.

SCHLAUDT, O.; HUBER, L. *Standardization in measurement*. London: Pickering & Chatto, 2015.

SCHNEIDER, I. Laplace and Thereafter: The Status of Probability Calculus in the Nineteenth Century. In: KRÜGER, L.; DASTON, L.; HEIDELBERGER, M. *The Probabilistic Revolution – Vol. I – Ideas in History*. Cambridge (MA): MIT Press, p. 191-214, 1987.

SCHØLLHAMMER, K. E. Do rigor da ciência. *Cosmos & Contexto*, Rio de Janeiro, v. 49, 3 de agosto de 2021. Disponível em: <<https://cosmosecontexto.org.br/do-rigor-da-ciencia/>>. Acesso em: 2 nov. 2021.

SEKERKA, R. *Thermal Physics: Thermodynamic and Statistic Mechanics for Scientists and Engineers*. Amsterdam: Elsevier, 2015.

SERRES, M. *Hermes: uma filosofia das ciências*. Tradução de Andréa Daher. Rio de Janeiro: Graal, 1990.

_____. “O que Tales viu aos pés da pirâmide? In: SERRES, M. *Hermes: uma filosofia das ciências*. Tradução de Andréa Daher. Rio de Janeiro: Graal, 1990.

SHAPPIN, S.; SCHAFFER, S. *Leviathan and the Air-pump: Hobbes, Boyle, and the Experimental Life*. Princeton: Princeton University Press, 2011.

SOARES, M. H. S. *O problema da objetividade em Gaston Bachelard: um estudo acerca da fenomenotécnica e do realismo científico*. 2015. 110f. Dissertação (Mestrado em Filosofia), Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

SOTO, C. Some morals from the physico-mathematical character of scientific laws. *Trans/From/Ação* v. 43, n. 4. p. 65-88, 2020.

STEVENS, S. S. On the Theory of Scales of Measurement. *Science*, v. 103, n. 2684, p. 677-680, 1946. (New Series).

STIGLER, S. M. *The History of Statistics: The Measurement of Uncertainty Before 1900*. Cambridge (MA), London: Harvard University Press, 1986.

STUDENT. Probable Error of a Mean. *Biometrika*, v. VI, n. 1, p. 1-25, 1908.

_____. Mathematics and agronomy. *Journal of the American Society of Agronomy*, v. XVIII, p. 703-719, 1926.

SUÁREZ, M. *Philosophy of Probability and Statistical Modelling*. Cambridge University Press: Cambridge, 2020.

SUPPES, P. Why the Effectiveness of Mathematics in the Natural Sciences is not Surprising. *Interdisciplinary Science Reviews*, v. 36, n. 3, p. 244-254, 2011.

SUPPES, P. et al. *Foundations of Measurement – Vol. II – Geometrical, Threshold, and Probabilistic Representations*. London, New York: Academic Press, 1989.

TABAK, J. *Probability & Statistics: The Science of Uncertainty*. New York: Facts On File, 2004.

TAL, E. *The Epistemology of Measurement: A Model-Based Account*. 2012. 196f. Thesis (Doctorate in Philosophy) - University of Toronto, Toronto, Canada, 2012.

_____. Measurement in science. In: ZALTA, E. (ed.) *Stanford Encyclopedia of Philosophy*, Fall Edition, 2017b.

_____. A Mode-Based Epistemology of Measurement. In: MÖßNER, N.; NORDMANN, A. *Reasoning in Measurement*. London, New York: Routledge, 2017a.

_____. Old and New Problems in Philosophy of Measurement. *Philosophy Compass*, v 8, n. 12, p. 1159-1173, 2013.

TAUHATA, L. et al. *Radioproteção e Dosimetria: Fundamentos*. Rio de Janeiro: IRD/CNEN, 2013.

TAYLOR, B.; KUYATT, C. *Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty of NIST Measurement Results*. Gaithersburg (Maryland): NIST, 1994. (*NIST Technical Note 1297*).

TAYLOR, J. *An Introduction to Error Analysis: The study of Uncertainties in Physical Measurements*. Sausalito (CA, USA): University Science Books, 1997.

TELLER, P. Measurement accuracy realism. In: PESCHARD, I.; VAN FRAASSEN, B. (Ed.) *The Experimental Side of Modeling*. Minneapolis: University of Minnesota Press, p. 273-298, 2018.

TILES, M. *Bachelard: Science and Objectivity*. Oxford: Oxford University Press, 1984.

THE AMERICAN HERITAGE: Dictionary of the English Language, Houghton Mifflin Harcourt. Disponível em: <<https://www.ahdictionary.com>>. Acesso em: 19 mar. 2021.

TREINER, J. Variabilité, incertitude, erreur. *Union des Professeurs de Physique et de Chimie*, v. 105, n. 930, 2011. (*Le Bup*).

VAN FRAASSEN, B. Modeling and Measurement: The Criterion of Empirical Grounding. *Philosophy of Science*, v. 79, n. 5, p. 773-784, 2012.

_____. *Scientific Representation: Paradoxes of Perspective*. Oxford: Oxford University Press, 2008.

VAZ, R. O. L. *Análise dos conceitos de confiabilidade e confiança na metrologia sob a ótica da filosofia das medições contemporânea*. 2017. 204f. Tese (Doutorado em Filosofia) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

VERA, H. The Social Construction of Units of Measurement: Institutionalization, Legitimation and Maintenance in Metrology. In: SCHLAUDT, O.; HUBER, L. *Standardization in measurement*. London: Pickering & Chatto, p. 173-187, 2015.

VIDEIRA, A. A. *Por que os Físicos Acreditam que as Coisas Existem?* Breves Comentários a Respeito das Relações entre Ciência e Metafísica. Braga: Aletheia - Universidade Católica Portuguesa, 2017.

WAGNER, S. R. On the Quantitative Characterization of the Uncertainty of Experimental Results in Metrology. *PTB-Mitteilungen*, v. 89, n. 2/79, p. 83-89, 1979.

WIGNER, E. The Unreasonable Effectiveness of Mathematics in the Natural Sciences. *Communications in Pure and Applied Mathematics*, v. 12, n. 1, 1960.

WILLIAMS, J. *Defining and Measuring Nature: The Make of All Things*. San Rafael, CA: Morgan & Claypool Publishers, 2014.

WILLINK, R.; WHITE, R. *Disentangling classical and Bayesian approaches to uncertainty analysis*. Paris: BIPM, 2012. (Technical Report No. CCT/12-08).

WITTGENSTEIN, L. *Nachlass: The Bergen Electronic Edition*. Oxford: Oxford University Press, 2000.

_____. *Philosophical Investigations*. Translation of G. E. M. Anscombe, P. M. S. Hacker and J. Schulte. Oxford: Wiley-Blackwell, 2009.

WULFF, J.; HEVERHAGEN, J. T.; ZINK, K. Monte Carlo perturbation and beam quality correction factors for thimble ionization chambers in high-energy photon beams. *Physics in Medicine and Biology*, July 2008.

YOULDEN, W. J. Systematic errors in physical constants. *Physics Today*, v. 14, n. 9, 32, p. 32-43, 1961.

ZALTA, E. N. (Ed.). *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*. Disponível em: <<https://plato.stanford.edu>> Acesso em 19 mar. de 2022.