

UMA INTRODUÇÃO AO "GUIA PARA
A EXPRESSÃO DE INCERTEZA DE MEDIÇÃO"
E A DOCUMENTOS CORRELATOS

INTRO GUM 2009

AVALIAÇÃO DE DADOS DE MEDIÇÃO

1ª Edição Brasileira da 1ª Edição do BIPM de 2009: Evaluation of measurement data
An introduction to the "Guide to the expression of uncertainty in measurement" and related documents





Avaliação de dados de medição – Uma introdução ao “Guia para a expressão de incerteza de medição” e a documentos correlatos – INTROGUM 2009

Evaluation of measurement data – An introduction to the “Guide to the expression of uncertainty in measurement” and related documents

Tradução autorizada pelo BIPM da 1ª edição de 2009 de sua publicação “Evaluation of measurement data – An introduction to the “Guide to the expression of uncertainty in measurement” and related documents”.

Grupo de trabalho para tradução do INTROGUM 2009

Coordenador:

Antonio Carlos Baratto – Inmetro/Dimci/Dmtic

Equipe:

Jailton Carreteiro Damasceno – Inmetro/Dimci/Dimat

Jorge Trota Filho – Inmetro/Dimci/Dimec

José Carlos Valente de Oliveira - Inmetro/Dimci/Dimec

Paulo Roberto Guimarães Couto – Inmetro/Dimci/Dimec

© 2014 Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO)

Qualquer parte desta publicação pode ser reproduzida, desde que citada a fonte.

Título original em inglês

Evaluation of measurement data – “Guide to the expression of uncertainty in measurement” and related documents - JCGM 104:2009

Inmetro

Oscar Acserald

Presidente do Inmetro em Exercício

Humberto Siqueira Brandi

Diretor de Metrologia Científica e Industrial

Paulo Roberto Rodrigues

Diretoria de Planejamento e Articulação Institucional em Exercício

Renata Bondim

Centro de Informação e Capacitação em Metrologia e Avaliação da Conformidade

Edson Seiti Miyata

Chefe do Serviço de Produtos de Informação

Desenvolvimento e Edição

Antonio Carlos Baratto

Coordenador da Tradução

Alciene Salvador

Coordenação Editorial

Disponível também em: <<http://www.inmetro.gov.br>>

Catálogo no Serviço de Documentação e Informação do Inmetro

A945 Avaliação de dados de medição: uma introdução ao “Guia para a expressão de incerteza de medição” e a documentos correlatos – INTROGUM 2009. Duque de Caxias, RJ: INMETRO/CICMA/SEPIN, 2014.
43 p.

Inclui índice.

Traduzido de: Evaluation of measurement data: an introduction to the “Guide to the expression of uncertainty in measurement” and related documents – JCGM 104:2009 - INTROGUM 2009. ISBN: 978-85-86920-14-1

1. Incerteza de medição. 2. Avaliação. I. INMETRO II. Título

CDD530.801

Apresentação

O Grupo de Trabalho 1 do Comitê Conjunto para Guias em Metrologia do BIPM publica uma série de documentos referenciados genericamente sob o título *Avaliação de dados de medição*. Compõem essa série o GUM e os diversos suplementos que o complementam, sendo que quatro foram já concluídos, aprovados e publicados, e três estão, até a presente data, ainda em estágio inicial de preparação. Os suplementos auxiliam a interpretação do GUM, aprimoram seu emprego nas áreas tradicionais e ampliam as possibilidades de aplicação em áreas por ele ainda não abrangidas, ou em que seu uso se dá apenas marginalmente.

O presente documento foi preparado como texto introdutório ao GUM e aos outros suplementos. Assim, nele se deverão buscar principalmente orientação, informação e discussão de caráter geral sobre o conteúdo desses documentos, nos quais se encontrarão as descrições mais específicas e mais detalhadas de procedimentos e procedimentos referentes à avaliação de incertezas. Este (JCGM 104:2009) é o primeiro dos suplementos a ser traduzido no Brasil.

O Inmetro tem funcionado como principal repositório do saber metrológico no Brasil. É esse um aspecto importante de sua missão institucional, o qual porém se esgotaria em si mesmo se não houvesse um esforço de disseminação desse saber para o âmbito da sociedade. Com mais essa publicação, que ora colocamos à disposição da sociedade, carrego a certeza de que estamos cumprindo adequadamente também um de nossos principais papéis – o de divulgador da cultura metrológica no Brasil.

João Alziro Herz da Jornada
Presidente do Inmetro

JCGM 104:2009

Avaliação de dados de medição — Uma introdução ao “Guia para a expressão de incerteza de medição” e a documentos correlatos



Évaluation des données de mesure — Une introduction au “Guide pour l’expression de l’incertitude de mesure” et aux documents qui le concernent

Primeira edição (original) julho de 2009

Primeira edição brasileira outubro de 2014

© JCGM 2009

Documento produzido pelo Grupo de Trabalho 1 do Comitê Conjunto para Guias em Metrologia (JCGM/WG 1).

Document produit par le Groupe de travail 1 du Comité commun pour les guides en métrologie (JCGM/WG 1).

Os direitos legais derivados deste documento são compartilhados pelas organizações membro do JCGM (BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP e OIML).

Les droits d'auteur relatifs à ce document sont la propriété conjointe des organisations membres du JCGM (BIPM, CEI, IFCC, ILAC, ISO, UICPA, UIPPA et OIML).

Direitos autorais

Mesmo estando a versão eletrônica deste documento gratuitamente disponível no sítio do BIPM (www.bipm.org), os direitos autorais deste documento são compartilhados pelas organizações membro do JCGM, as quais mantêm seu interesse nos respectivos emblemas e logomarcas que são nele usados, todos protegidos internacionalmente. Terceiros não podem reescrever ou remodelar este documento, publicá-lo ou vender cópias dele ao público, divulgá-lo ou usá-lo *on-line*. Para qualquer uso comercial, reprodução ou tradução deste documento e/ou das logomarcas, dos emblemas, das publicações ou de outras criações nele contidos, é necessário obter prévia permissão por escrito do Diretor do BIPM.

Droits d'auteur

Même si une version électronique de ce document peut être téléchargée gratuitement sur le site internet du BIPM (www.bipm.org), les droits d'auteur relatifs à ce document sont la propriété conjointe des organisations membres du JCGM et l'ensemble de leurs logos et emblèmes respectifs leur appartiennent et font l'objet d'une protection internationale. Les tiers ne peuvent réécrire ou modifier, distribuer ou vendre des copies au public, diffuser ou le mettre en ligne. Tout usage commercial, reproduction ou traduction de ce document et/ou des logos, emblèmes et/ou publications qu'il comporte, doit recevoir l'autorisation écrite préalable du directeur du BIPM.



Comitê Conjunto para Guias em Metrologia

JCGM

104

2009

Avaliação de dados de medição — Uma introdução ao “Guia para a expressão de incerteza de medição” e a documentos correlatos

Évaluation des données de mesure — Une introduction au "Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure" et aux documents qui le concernent

© JCGM 2009

Os direitos autorais sobre este documento orientador do JCGM são compartilhados pelas organizações membro do JCGM (BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP e OIML).

Direitos autorais

Mesmo se versões eletrônicas estiverem gratuitamente disponíveis em endereços eletrônicos de uma ou mais organizações membro do JCGM, direitos econômicos e morais relacionados a todas as publicações do JCGM são internacionalmente protegidos. O JCGM não permite que, sem sua autorização escrita, terceiros reescrevam ou repaginem edições, vendam cópias ao público, divulguem ou usem *on-line* suas publicações. Da mesma maneira, o JCGM também se contrapõe a distorções, acréscimos ou mutilações em suas publicações, incluindo seus títulos, lemas e logomarcas, ou aqueles de suas organizações membro.

Versões oficiais e traduções

As únicas versões oficiais dos documentos são aquelas publicadas pelo JCGM em suas línguas originais.

As publicações do JCGM podem ser traduzidas em outras línguas que não aquelas em que os documentos foram originalmente publicados pelo JCGM. Permissão do JCGM deve ser obtida antes de uma tradução ser feita. Todas as traduções devem respeitar os formatos originais e oficiais das fórmulas e unidades (sem qualquer conversão para outras fórmulas e unidades), e conter a seguinte declaração (a ser traduzida para a língua em questão):

Todos os produtos do JCGM são protegidos internacionalmente por direitos autorais. Esta tradução do documento original do JCGM foi realizada com a permissão do JCGM. O JCGM mantém direitos autorais integrais, protegidos internacionalmente, sobre os formatos e conteúdos deste documento e sobre os títulos, lemas e logomarcas do JCGM. As organizações membro do JCGM também mantêm direitos integrais protegidos internacionalmente sobre seus títulos, lemas e logomarcas incluídos nas publicações do JCGM. A única versão oficial é o documento publicado pelo JCGM, nas línguas originais.

O JCGM não assume qualquer responsabilidade pela relevância, exatidão, completeza ou qualidade das informações e materiais disponibilizados em qualquer tradução. Uma cópia da tradução deve ser providenciada para o JCGM por ocasião da publicação.

Reprodução

As publicações do JCGM podem ser reproduzidas desde que seja obtida permissão escrita do JCGM. Uma amostra de qualquer documento reproduzido deverá ser providenciada ao JCGM por ocasião da reprodução, e deverá conter a seguinte declaração:

Este documento é reproduzido com a permissão do JCGM, o qual mantém direitos autorais integrais protegidos internacionalmente sobre os formatos e conteúdos deste documento e sobre os títulos, lemas e logomarcas do JCGM. As organizações membro do JCGM também mantêm direitos integrais protegidos internacionalmente sobre seus títulos, lemas e logomarcas incluídos nas publicações do JCGM. As únicas versões oficiais são as versões originais dos documentos publicadas pelo JCGM.

Responsabilidade

O JCGM e suas organizações membro publicaram este documento para aumentar o acesso a informação sobre metrologia. Envidarão esforços para atualizá-lo regularmente, mas não podem garantir sua correção a todo o momento e não poderão ser responsabilizados por qualquer prejuízo direto ou indireto que possa resultar de seu uso. Qualquer referência a produtos comerciais de qualquer tipo (incluindo, mas não restritivamente, qualquer *software*, dados ou *hardware*) ou indicações para endereços eletrônicos na internet, sobre os quais o JCGM e suas organizações membro não têm nenhum controle e pelos quais não assumem qualquer responsabilidade, não implicam aprovação, endosso ou recomendação pelo JCGM e suas organizações membro.

Sumário	Página
Prefácio da primeira edição brasileira.....	4
Prefácio da primeira edição original.....	5
Introdução.....	6
1 Escopo.....	7
2 Referências normativas.....	8
3 O que é incerteza de medição?	8
4 Conceitos e princípios básicos.....	10
5 Etapas da avaliação de incerteza.....	14
6 A etapa da formulação: desenvolvendo um modelo de medição.....	15
7 A etapa do cálculo (propagação e sumarização) da avaliação de incerteza....	16
7.1 Geral.....	16
7.2 A metodologia de incerteza do GUM.....	17
7.3 Métodos analíticos.....	18
7.4 Método Monte Carlo.....	19
7.5 Modelos de medição com qualquer número de grandezas de saída.....	19
8 Incerteza de medição na avaliação da conformidade.....	20
9 Aplicação do método dos mínimos quadrados.....	21
Anexos	
A Siglas e abreviaturas.....	22
Bibliografia.....	23
Índice alfabético em português.....	25
Índice alfabético em inglês.....	27
Notas dos tradutores.....	29

Prefácio da primeira edição brasileira

O presente documento é parte de uma série de documentos correlatos do JCGM designados genericamente sob o título unificador *Avaliação de dados de medição*, e constitui-se como uma introdução ao conteúdo do GUM e dos seus diversos suplementos, já publicados ou a publicar. Pela sua própria extensão não se espera que se preste ao papel de guia detalhado para as atividades práticas referentes à medição, o que deve ser buscado nos documentos acima referidos. É um texto relativamente curto dirigido principalmente a iniciantes. Não obstante, metrologistas mais experientes certamente nele encontrarão material interessante para reflexão em algumas observações e discussões sobre as diferentes abordagens empregadas na determinação de incertezas de medição.

Este suplemento fornece uma idéia geral sobre a medição e os conceitos e princípios básicos subjacentes contidos no tratamento de incerteza do GUM. Dá uma descrição das etapas essenciais a uma determinação de incerteza em medição e faz uma comparação das diversas abordagens presentemente adotadas: propagação de incertezas, propagação de distribuições e métodos analíticos. Aborda também, porém não exaustivamente, o ajuste de curvas pelo método dos mínimos quadrados e os problemas envolvidos na determinação de incerteza no âmbito da avaliação da conformidade.

Até agosto de 2014 outros três suplementos do GUM aqui citados (JCGM 101:2008 e JCGM 102:2011 e JCGM 106:2012) tinham sido já publicados, todavia ainda sem tradução no Brasil. Os outros suplementos encontravam-se em fase de desenvolvimento.

É de se notar que o documento propõe (ver o parágrafo final da Introdução) uma distinção entre o uso do termo ‘erro’ como uma grandeza e como um valor de grandeza, o que é novo no contexto do GUM. Isso nos obrigou à criação de termos correspondentes em português para expressar esses novos conceitos não consignados no GUM ou no VIM.

Não podemos nos furtar ao comentário de que o original do presente documento não se caracteriza propriamente por uma linguagem escorreita e livre de percalços, como acontece com o GUM 2012 que, tendo já passado por diversas revisões, apresenta-se bastante claro e objetivo, não obstante as dificuldades conceituais a ele inerentes. Assim, para uma melhor compreensão do texto ou do contexto em algumas passagens mais problemáticas julgamos conveniente remeter o leitor para o final do documento, onde apresentamos algumas notas explicativas (NT – Nota dos Tradutores). No entanto, com o fito de propiciar uma leitura mais suave e sem interrupções, tentou-se evitar uma profusão de NTs. Optou-se assim, quando necessária uma explicação, e sempre que possível e mais conveniente, por acrescentar um texto curto complementar ou explicativo entre parênteses, em vermelho, em vez de uma NT adicional.

Os tradutores

Prefácio

Em 1997, as sete organizações internacionais que haviam originalmente (1993) elaborado o “Guia para a expressão de incerteza de medição (GUM)” e o “Vocabulário internacional de metrologia - conceitos fundamentais e gerais e termos associados” (VIM) criaram um Comitê Conjunto para Guias em Metrologia (JCGM – *Joint Committee for Guides in Metrology*), presidido pelo Diretor do BIPM. O JCGM assumiu a responsabilidade por estes dois documentos do Grupo Consultivo Técnico 4 da ISO (ISO *Technical Advisory Group* - TAG4).

O JCGM é formado pelo Bureau Internacional de Pesos e Medidas (BIPM - *Bureau International des Poids et Mesures*) conjuntamente com a Comissão Eletrotécnica Internacional (IEC – *International Electrotechnical Commission*), a Federação Internacional de Química Clínica e Medicina Laboratorial (IFCC – *International Federation of Clinical Chemistry and Laboratory Medicine*), a Cooperação Internacional para Acreditação de Laboratórios (ILAC – *International Laboratory Accreditation Cooperation*), a Organização Internacional de Normalização (ISO - *International Organization for Standardization*), a União Internacional de Química Pura e Aplicada (IUPAC – *International Union of Pure and Applied Chemistry*), a União Internacional de Física Pura e Aplicada (IUPAP – *International Union of Pure and Applied Physics*) e a Organização Internacional de Metrologia Legal (OIML – *International Organization of Legal Metrology*).

O JCGM possui dois Grupos de Trabalho. O Grupo de Trabalho 1, “Expressão de incerteza em medição”, tem a tarefa de promover o uso do GUM e preparar Suplementos e outros documentos para a sua ampla aplicação. O Grupo de Trabalho 2, “Grupo de Trabalho para o Vocabulário internacional de termos fundamentais e gerais em metrologia (VIM)”, tem a tarefa de revisar e promover o uso do VIM. Para mais informações sobre a atividade do JCGM, ver www.bipm.org.

O presente documento foi elaborado pelo Grupo de Trabalho 1 do JCGM, tendo recebido a contribuição de revisões detalhadas realizadas pelas organizações membro do JCGM.

Este documento constitui uma parte de uma série de documentos do JCGM sob o título genérico de *Avaliação de dados de medição*. As partes que compõem a série são

- JCGM 100:2012. Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM) (ver Capítulo 2) [Avaliação de dados de medição — Guia para a expressão de incerteza de medição (GUM)],
- JCGM 101:2008. Evaluation of measurement data — Supplement 1 to the “Guide to the expression of uncertainty in measurement” — Propagation of distributions using a Monte Carlo method (ver Capítulo 2),
- JCGM 102:2011. Evaluation of measurement data — Supplement 2 to the “Guide to the expression of uncertainty in measurement” — Models with any number of output quantities,
- JCGM 103. Evaluation of measurement data — Supplement 3 to the “Guide to the expression of uncertainty in measurement” — Modelling,
- JCGM 104:2009. Evaluation of measurement data — An introduction to the “Guide to the expression of uncertainty in measurement” and related documents [Avaliação de dados de medição — Uma Introdução ao “Guia para a expressão de incerteza de medição” e documentos correlatos] (este documento),
- JCGM 105. Evaluation of measurement data — Concepts and basic principles,
- JCGM 106:2012. Evaluation of measurement data — The role of measurement uncertainty in conformity assessment, e
- JCGM 107. Evaluation of measurement data — Applications of the least-squares method.

Introdução

Uma declaração de incerteza de medição é indispensável para o julgamento da adequação de um valor medido para a aplicação pretendida. Ao comprar no mercado um quilograma de frutas, o consumidor ficaria satisfeito se a balança indicasse um valor dentro de, digamos, 2 gramas do peso real de fruta. Entretanto, as dimensões dos componentes dos giroscópios situados nos sistemas de navegação inercial de aviões comerciais são checadas por meio de medições até partes por milhão para um correto funcionamento.

Incerteza de medição é um conceito geral associado a qualquer medição. Ela pode ser utilizada em processos de decisão profissionais ou como atributo de julgamento em muitas áreas, tanto teóricas quanto experimentais. À medida que as tolerâncias aplicadas à produção industrial se tornam mais exigentes, o papel da incerteza de medição se torna cada vez mais importante quando da avaliação da conformidade a essas tolerâncias. A incerteza de medição assume um papel central na avaliação da qualidade e na normalização.

A medição está presente em quase toda atividade humana, incluindo, mas não exclusivamente, as atividades industriais, comerciais, científicas, de saúde, de segurança e de meio ambiente. A medição auxilia no processo de decisão em todas essas atividades. A incerteza de medição permite que os usuários de um valor medido façam comparações, no contexto da avaliação da conformidade, para obter a probabilidade de tomar uma decisão incorreta com base na medição, e gerenciar os riscos consequentes.

Este documento serve como uma introdução à incerteza de medição, ao GUM e aos documentos correlatos indicados no Prefácio. Uma base probabilística é utilizada para a avaliação da incerteza. O Anexo A fornece as siglas e as abreviaturas utilizadas neste documento.

Pretende-se, em futuras edições do JCGM 200 (VIM), estabelecer uma clara distinção entre o uso do termo *erro* como uma grandeza e como um valor de uma grandeza. O mesmo se aplica ao termo *indicação*. Tal distinção é feita no presente documento. O JCGM 200:2008 não faz, explicitamente, distinção entre esses diferentes usos.

Avaliação de dados de medição — Uma introdução ao “Guia para a expressão de incerteza de medição” e a documentos correlatos

1 Escopo

O Comitê Conjunto para Guias em Metrologia (JCGM) preparou este documento para promover a correta avaliação da incerteza de medição através do uso do GUM (ver Capítulo 2) e para fornecer uma introdução aos Suplementos do GUM e a outros documentos que o JCGM vem produzindo: JCGM 101:2008 (ver Capítulo 2) e referências (3, 4, 5, 6, 7).

Assim como no GUM, este documento trata principalmente da expressão da incerteza relacionada à medição de uma grandeza bem definida – o *mensurando* [JCGM 200:2008 (VIM) 2.3] – a qual pode ser caracterizada por *um valor verdadeiro essencialmente único* [JCGM 200:2008 (VIM) 2.11 Nota 3]. O GUM fornece uma base racional para não se usar o termo “verdadeiro”, mas este termo será mantido neste documento sempre que, de outra maneira, houver possibilidade de confusão ou ambiguidade.

A finalidade dos Suplementos do GUM e dos demais documentos produzidos pelo JCGM é ajudar na interpretação do GUM e aumentar seu âmbito de aplicação. Pretende-se, com os Suplementos do GUM e os demais documentos, alcançar uma abrangência consideravelmente maior do que aquela conseguida pelo GUM.

Este documento apresenta o conceito de incerteza de medição, o GUM, seus Suplementos e demais documentos que dão suporte ao GUM. Está predominantemente direcionado à medição de grandezas que podem ser caracterizadas por variáveis contínuas tais como comprimento, temperatura, tempo e quantidade de substância.

Este documento introdutório provê, sem se limitar especificamente, orientação relacionada a

- atividades científicas e disciplinas em geral,
- atividades industriais e disciplinas em geral,
- laboratórios industriais de calibração, ensaio e inspeção, laboratórios ligados a saúde, segurança e meio ambiente, e
- organismos de avaliação e acreditação.

Espera-se que ele seja útil também para projetistas, já que uma especificação de produto que melhor leva em conta requisitos de inspeção (e medições associadas) pode resultar em requisitos de fabricação menos rigorosos. Ele está direcionado também à academia, na esperança de que mais departamentos de universidades venham a incluir módulos sobre avaliação de incerteza de medição em seus cursos. Como resultado, uma nova geração de estudantes poderá estar mais bem capacitada para entender e fornecer declarações de incertezas associadas a valores de grandezas medidas, e assim chegar a uma melhor apreciação da medição.

Este documento introdutório, o GUM, seus Suplementos e demais documentos devem ser usados em conjunto com o “Vocabulário Internacional de Metrologia - Conceitos fundamentais e gerais e termos associados” e todas as três partes da norma ISO 3534 citada no Capítulo 2, a qual define termos estatísticos (usados em estatística e probabilidade, incluindo estatística aplicada e projeto de experimentos), e expressá-los em um sistema básico conceitual de acordo com a prática terminológica normativa. A última consideração está relacionada ao fato de que o suporte teórico para a avaliação de dados de medição e a avaliação de incerteza de medição é fornecido por estatística e probabilidade matemáticas.

2 Referências normativas

Os documentos referenciados a seguir são indispensáveis para a aplicação deste documento. Para referências datadas, apenas a edição citada se aplica. Para referências não datadas aplica-se a última edição do documento referenciado (incluindo quaisquer emendas).

JCGM 100:2008. Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM). Joint Committee for Guides in Metrology (Avaliação de dados de medição – Guia para expressão de incerteza de medição).

JCGM 101:2008. Evaluation of measurement data – Supplement 1 to the “Guide to the expression of uncertainty in measurement” – Propagation of distributions using a Monte Carlo method. Joint Committee for Guides in Metrology.

JCGM 200:2008. International Vocabulary of Metrology – Basic and general concepts and associated terms, 3rd Edition. Joint Committee for Guides in Metrology (Vocabulário Internacional de Metrologia – Conceitos fundamentais e gerais e termos associados).

ISO 3534-1:2006. Statistics – Vocabulary and symbols – Part 1: General statistical terms and terms used in probability.

ISO 3534-2:2006. Statistics – Vocabulary and symbols – Part 2: Applied statistics.

ISO 3534-3:1999. Statistics – Vocabulary and symbols – Part 3: Design of experiments.

3 O que é incerteza de medição?

3.1 O propósito de uma medição é fornecer informação a respeito de uma grandeza de interesse – um *mensurando* [JCGM 200:2008 (VIM) 2.3]. O mensurando pode ser o volume de um vaso, a diferença de potencial (elétrico) entre os terminais de uma bateria ou a concentração de chumbo na água contida num frasco.

3.2 Nenhuma medição é exata. Quando uma grandeza é medida, o resultado depende do sistema de medição [JCGM 200:2008 (VIM) 3.2], do procedimento de medição, da perícia do operador, do ambiente e de outros efeitos [1]. Mesmo que a grandeza seja medida várias vezes do mesmo modo e nas mesmas circunstâncias, em geral um *valor indicação* [JCGM 200:2008 (VIM) 4.1] (valor medido [JCGM 200:2008 (VIM) 2.10]) diferente é obtido a cada vez, assumindo-se que o sistema de medição tenha resolução suficiente para distinguir entre os valores obtidos. Tais valores são tomados como ocorrências (**particulares**) da grandeza indicação. (**Ver NT 1**)

3.3 A *dispersão* das indicações estaria relacionada a o quão bem a medição é feita. A *média* (**das indicações**) forneceria uma *estimativa* [ISO 3534-1:2006 1.31] do *valor verdadeiro* [JCGM 200:2008 (VIM) 2.11] da grandeza, a qual geralmente deveria ser mais confiável do que uma indicação individual. A dispersão e o número de indicações forneceriam informação relacionada ao valor médio como uma estimativa do valor verdadeiro da grandeza. Esta informação, contudo, nem sempre seria apropriada. (**Ver NT 2**)

3.4 O sistema de medição pode fornecer indicações que estão dispersas não em torno do valor verdadeiro da grandeza, mas em torno de um valor dele desviado. A diferença entre este valor desviado e o valor verdadeiro da grandeza é chamada algumas vezes de *valor erro sistemático* [JCGM 200:2008 (VIM) 2.17] (**Ver NT 3**). Considerem-se as balanças de banheiro de uso doméstico. Suponha-se que elas não indiquem zero quando não há carga sobre elas, mas que indiquem algum valor desviado de zero. Então, independentemente de quantas vezes a massa de uma pessoa seja medida, o efeito desse desvio estará inerentemente presente na média das indicações. Em geral, um erro sistemático, considerado como uma grandeza, é um componente de erro que permanece constante ou que depende de uma maneira específica de alguma outra grandeza.

3.5 A grandeza erro de medição (**Ver NT 4**) pode ser de dois tipos, *sistemático* e *aleatório* [JCGM 200:2008 (VIM) 2.19]. Um erro sistemático (cuja estimativa é conhecida como *tendência* [JCGM 200:2008 (VIM) 2.18]) está associado ao fato de que o valor medido de uma grandeza contém um desvio. Um erro aleatório está associado ao fato de que quando uma medição é repetida fornecerá, geralmente, um valor medido diferente do valor anterior. Ele é aleatório no sentido de que o próximo valor medido a ser obtido na medição não pode ser exatamente previsto com base nos valores obtidos anteriormente. (Se fosse possível fazer uma predição, o efeito poderia ser levado em conta com uma

provisão apropriada!). Em geral, a cada um desses tipos de erro estará associado certo número de contribuições.

3.6 Um desafio no campo da medição é saber qual a melhor forma de expressar o que se conheceu sobre o mensurando. A expressão dos valores dos erros sistemático e aleatório obtidos na medição, juntamente com uma melhor estimativa do mensurando, era uma abordagem frequentemente utilizada antes da introdução do GUM. O GUM proveu um modo diferente de pensar a medição, em particular sobre como expressar a qualidade percebida do resultado de uma medição. Em vez de expressar o resultado fornecendo uma melhor estimativa do mensurando juntamente com informação sobre os valores dos erros sistemático e aleatório (na forma de uma “análise de erros”), a abordagem do GUM expressa o resultado de uma medição como uma melhor estimativa do mensurando, acompanhada de uma *incerteza de medição* associada.

3.7 Uma das premissas básicas da abordagem do GUM refere-se à possibilidade de caracterizar a qualidade de uma medição pelo tratamento dos erros sistemáticos e aleatórios em bases similares, e um método é fornecido para isso (ver 7.2). Este método refina a informação que era anteriormente fornecida por uma “análise de erros”, e a coloca em uma base probabilística por meio do conceito de incerteza de medição.

3.8 Outra premissa básica da abordagem do GUM consiste em que é impossível afirmar o quão bem o valor essencialmente único do mensurando é conhecido, mas apenas quão bem se acredita seja ele conhecido. A incerteza de medição pode ser descrita, assim, como uma medida de o quão bem se acredita conhecer o valor verdadeiro essencialmente único do mensurando. Essa incerteza reflete um conhecimento incompleto do mensurando. A noção de “confiança” é aqui muito importante, uma vez que leva a metrologia a um campo em que os resultados de medição precisam ser considerados e quantificados em termos de *probabilidades* que expressam graus de confiança.

3.9 A discussão acima se refere à medição direta de uma grandeza, a qual, aliás, raramente ocorre. As balanças de banheiro de uso doméstico podem converter um valor medido da extensão de uma mola em uma estimativa do mensurando, isto é, a massa da pessoa sobre a balança. A relação particular entre a extensão e a massa é determinada pela *calibração* [JCGM 200:2008 (VIM) 2.39] das balanças.

3.10 Uma relação tal como a citada em 3.9 constitui uma regra para conversão do valor de uma grandeza no correspondente valor do mensurando. A regra é usualmente conhecida como um *modelo de medição* [JCGM 200:2008 (VIM) 2.48] ou simplesmente um modelo. Na prática há muitos tipos de medição e, assim, muitas regras ou modelos. Mesmo para um tipo particular de medição pode bem haver mais de um modelo. Um modelo simples (por exemplo, uma regra proporcional, em que a massa é proporcional à extensão da mola) pode ser suficiente para o uso doméstico diário. Alternativamente, um modelo mais sofisticado de pesagem, envolvendo efeitos adicionais tais como o empuxo do ar, é capaz de fornecer melhores resultados para fins industriais ou científicos. Em geral haverá, com frequência, várias grandezas diferentes, como, por exemplo, temperatura, umidade e deslocamento, que contribuem para a definição do mensurando, e que necessitam ser medidas.

3.11 Termos de correção devem ser incluídos no modelo quando as condições de medição não são exatamente as estipuladas. Esses termos correspondem a valores de erros sistemáticos [JCGM 200:2008 (VIM) 2.17]. Tendo sido obtida uma estimativa do termo de correção, a grandeza em questão deve ser corrigida por essa estimativa [JCGM 100:2008 (GUM) 3.2.4]. Haverá uma incerteza associada à estimativa, mesmo que esta seja zero, como frequentemente ocorre. Exemplos de erros sistemáticos surgem em medição de altura, quando o instrumento de medição não está perfeitamente alinhado na vertical ou a temperatura ambiente é diferente da prescrita. Nem o alinhamento do instrumento de medição nem a temperatura ambiente são especificados exatamente, porém informação referente a estes efeitos está disponível de alguma forma (por exemplo, a falta de alinhamento é no máximo de 0,001° e a temperatura ambiente na hora da medição difere daquela estipulada em no máximo 2 °C).

3.12 Uma grandeza pode depender do tempo como, por exemplo, no decaimento de uma amostra de radionuclídeos numa determinada taxa. Pretendendo-se trabalhar um mensurando correspondente a uma medição em um determinado instante de tempo, tal efeito deve ser incorporado ao modelo.

3.13 Assim como dados brutos que representam valores medidos de grandezas, existe outra forma de dados que é frequentemente necessária em um modelo. Alguns desses dados estão relacionados a grandezas que representam constantes físicas que não são perfeitamente conhecidas. Exemplos disso são constantes associadas a materiais, tais como módulo de elasticidade e calor específico. Há amiúde outros dados relevantes fornecidos em livros de referência, certificados de calibração etc, considerados como estimativas de outras grandezas.

3.14 Os itens requeridos por um modelo para definir um mensurando são conhecidos como *grandezas de entrada num modelo de medição* [JCGM 200:2008 (VIM) 2.50]. A regra ou modelo é referida frequentemente como uma *relação funcional* [JCGM 100:2008 (GUM) 4.1]. A *grandeza de saída num modelo de medição* [JCGM 200:2008 (VIM) 2.51] é o mensurando.

3.15 Formalmente, a grandeza de saída, denotada por Y , sobre a qual se requer informação, está frequentemente relacionada a grandezas de entrada, denotadas por X_1, \dots, X_N e sobre as quais existe informação disponível, por intermédio de um modelo de medição [JCGM 100:2008 (GUM) 4.1.1] na forma de uma função de medição [JCGM 200:2008 (VIM) 2.49]

$$Y = f(X_1, \dots, X_N) \quad (1)$$

3.16 Uma expressão geral para um modelo de medição [JCGM 200:2008 (VIM) 2.48 nota 1] é

$$h(Y, X_1, \dots, X_N) = 0 \quad (2)$$

Considera-se que, tendo sido dados X_1, \dots, X_N , existe um procedimento para calcular Y pela equação (2), e que Y é definido por essa equação de maneira unívoca.

3.17 Os valores verdadeiros das grandezas de entrada X_1, \dots, X_N são desconhecidos. Na abordagem proposta, X_1, \dots, X_N são caracterizadas por distribuições de probabilidade [JCGM 100:2008 (GUM) 3.3.5, ISO 3534-1:2006 2.11] e tratadas matematicamente como variáveis aleatórias [ISO 3534-1:2006 2.10]. Essas distribuições descrevem as respectivas probabilidades de seus valores verdadeiros se localizarem em diferentes intervalos, e são atribuídas com base em conhecimento disponível sobre X_1, \dots, X_N . Ocasionalmente alguns dos ou todos os X_1, \dots, X_N são interrelacionados e as distribuições relevantes, que são conhecidas como *conjuntas*, aplicam-se a essas grandezas tomadas em conjunto. As considerações que se seguem, largamente aplicadas a grandezas não relacionadas entre si (independentes), podem ser estendidas a grandezas interrelacionadas.

3.18 Considerem-se, respectivamente, estimativas x_1, \dots, x_N das grandezas de entrada X_1, \dots, X_N , obtidas de certificados e relatórios, especificações de fabricantes, análise de dados de medição, e assim por diante. As distribuições de probabilidade que caracterizam X_1, \dots, X_N são escolhidas de maneira tal que as estimativas x_1, \dots, x_N são, respectivamente, as *esperanças* [JCGM 101:2008 3.6, ISO 3534-1:2006 2.12] de X_1, \dots, X_N . Adicionalmente, considere-se, para a i -ésima grandeza de entrada, uma assim referida *incerteza-padrão* [JCGM 200:2008 (VIM) 2.30], com símbolo $u(x_i)$, definida como o *desvio-padrão* [JCGM 101:2008 3.8, ISO 3534-1:2006 2.37] da grandeza de entrada X_i . Esta incerteza-padrão é dita estar *associada* com a (correspondente) estimativa x_i . A estimativa x_i é melhor no sentido de que $u^2(x_i)$ é sempre menor que a diferença quadrática (média) esperada de X_i com relação a qualquer outro valor. (Ver NT 5)

3.19 O uso de conhecimento disponível para estabelecer uma distribuição de probabilidade que caracterize cada grandeza de interesse aplica-se às X_i e também a Y . No último caso, a distribuição de probabilidade que caracteriza Y é determinada pela relação funcional (1) ou (2) juntamente com as distribuições de probabilidade das X_i . A determinação da distribuição de probabilidade para Y a partir desta informação é conhecida como *propagação de distribuições* [JCGM 101:2008 5.2].

3.20 Conhecimento prévio sobre o valor verdadeiro da grandeza de saída Y pode ser também considerado. Com relação à balança doméstica de banheiro, podem-se considerar o fato de que a massa de uma pessoa qualquer é sempre positiva, e que o que está sendo medido é, em vez da massa de um carro, a massa de uma pessoa. Ambos os fatos constituem conhecimento prévio sobre os possíveis valores do mensurando neste exemplo. Tal informação adicional pode ser usada para prover uma distribuição de probabilidade para Y que possa fornecer-lhe um menor desvio-padrão e, então, uma menor incerteza-padrão associada com sua estimativa [2, 13, 24].

4 Conceitos e princípios básicos

4.1 Conceitos fundamentais e princípios de teoria da probabilidade que servem de base à abordagem proposta para a avaliação e expressão de incerteza em medição são fornecidos em JCGM 105:2008 [4], adicionalmente àqueles já discutidos no Capítulo 3. (Ver NT 6)

4.2 A incerteza de medição é definida [JCGM 200:2008 (VIM) 2.26] como

parâmetro não negativo que caracteriza a dispersão dos valores atribuídos a um mensurando, com base nas informações utilizadas.

Essa definição é consistente com as considerações de 3.8 e 3.17 a 3.20.

4.3 Duas representações de uma distribuição de probabilidade [JCGM 101:2008 3.1, ISO 3534-1:2006 2.11] para uma variável aleatória X são usadas em avaliação de incerteza:

— a *função de distribuição* [JCGM 101:2008 3.2, ISO 3534-1:2006 2.7], uma função que fornece, para cada valor de seu argumento, a probabilidade de X ser menor que aquele valor ou igual a ele, e

— a *função densidade de probabilidade* [JCGM 101:2008 3.3, ISO 3534-1:2006 2.26], a derivada da função de distribuição.

4.4 O conhecimento de cada grandeza de entrada X_i em um modelo de medição é muitas vezes sintetizado pela melhor estimativa x_i e pela incerteza-padrão associada $u(x_i)$ (ver 3.18). Se, para cada i e j , X_i e X_j são relacionados (interdependentes), a informação sintetizada incluirá também uma medida da intensidade dessa relação, especificada como uma covariância [ISO 3534-1:2006 2.43] ou uma correlação. Se X_i e X_j não estão relacionados entre si (são independentes) a sua covariância é zero.

4.5 A *avaliação de dados de medição*, no contexto do modelo de medição (1) ou (2), é realizada pelo uso de conhecimento disponível sobre as grandezas de entrada X_1, \dots, X_N , representadas pelas distribuições de probabilidade usadas para caracterizá-las, de forma a deduzir a distribuição correspondente que caracteriza a grandeza de saída Y . A avaliação de dados de medição pode acabar se limitando apenas à determinação de uma descrição resumida desta distribuição.

4.6 O conhecimento sobre uma grandeza de entrada X_i é inferido a partir de repetidos valores indicação (*avaliação de incerteza do Tipo A*) [JCGM 100:2008 (GUM) 4.2, JCGM 200:2008 (VIM) 2.28], ou julgamento científico ou outras informações sobre os possíveis valores da grandeza (*avaliação de incerteza do Tipo B*) [JCGM 100:2008 (GUM) 4.3, JCGM 200:2008 (VIM) 2.29].

4.7 Nas avaliações de incerteza de medição do Tipo A [JCGM 200:2008 (VIM) 2.28] é muitas vezes feita a suposição de que a distribuição que melhor descreve uma grandeza de entrada X , havendo repetidos valores indicação da mesma (obtidos independentemente), é uma distribuição gaussiana [ISO 3534-1:2006 2.50]. A grandeza X tem então esperança igual à média dos valores indicação e desvio-padrão igual ao desvio-padrão da média. Quando a incerteza é avaliada a partir de um pequeno número de valores indicação (considerados como ocorrências de uma grandeza indicação caracterizada por uma distribuição gaussiana) (**Ver NT 1**), a distribuição correspondente pode ser tomada como uma distribuição- t [ISO 3534-1:2006 2.53]. A Figura 1 mostra uma distribuição gaussiana e uma distribuição- t (curva tracejada) com quatro graus de liberdade. Outras considerações se aplicam quando os valores indicação não são obtidos de forma independente.

4.8 Para uma avaliação do Tipo B da incerteza [JCGM 200:2008 (VIM) 2.29], muitas vezes a única informação disponível é que X está contido em um intervalo especificado $[a, b]$. Neste caso o conhecimento da grandeza pode ser caracterizado por uma distribuição de probabilidade retangular [JCGM 100:2008 (GUM) 4.3.7, ISO 3534-1:2006 2.60] com limites a e b (Figura 2). Se informações diferentes estivessem disponíveis outra distribuição de probabilidade, consistente com essas informações, seria utilizada [26].

4.9 Uma vez que as grandezas de entrada X_1, \dots, X_N tenham sido caracterizadas por distribuições de probabilidade apropriadas, e o modelo de avaliação tenha sido desenvolvido, a distribuição de probabilidade para o mensurando Y estará totalmente especificada em termos dessas informações (ver também 3.19). Em particular, a esperança de Y é utilizada como a estimativa de Y , e o desvio-padrão de Y como a incerteza-padrão associada a esta estimativa.

4.10 A Figura 3 mostra a função de medição aditiva $Y = X_1 + X_2$ para o caso em que X_1 e X_2 são caracterizadas, cada uma, por uma diferente distribuição de probabilidade retangular. Neste caso Y tem uma distribuição de probabilidade trapezoidal simétrica.

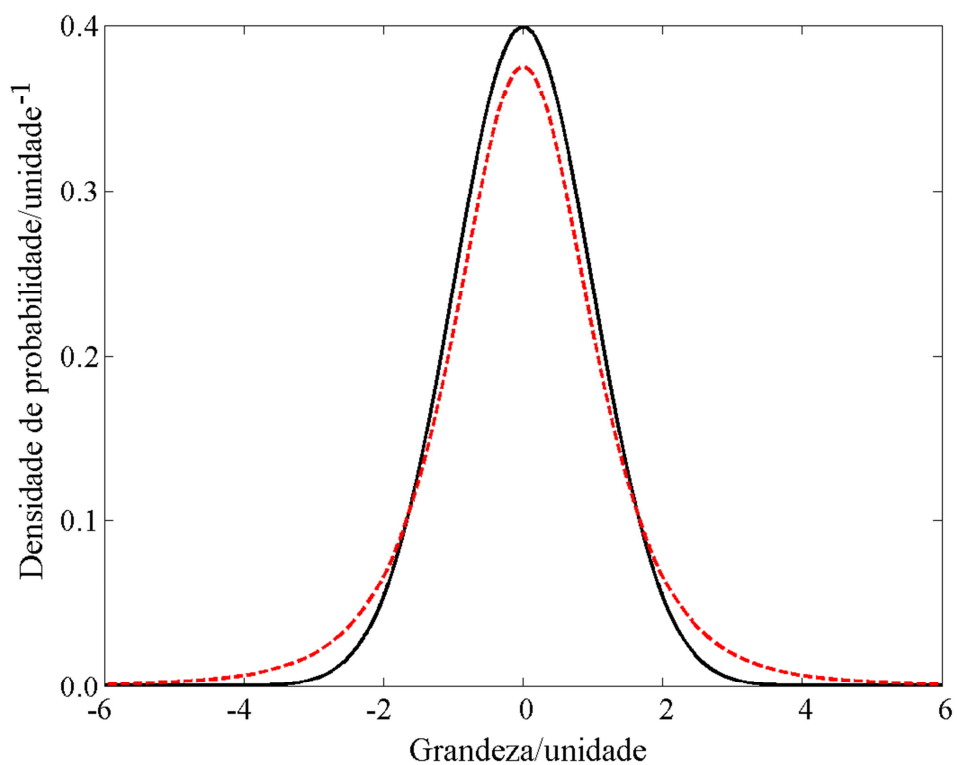


Figura 1 — Uma distribuição gaussiana (curva preta contínua) e uma distribuição- t com quatro graus de liberdade (curva vermelha tracejada) ('unidade' denota unidade arbitrária)

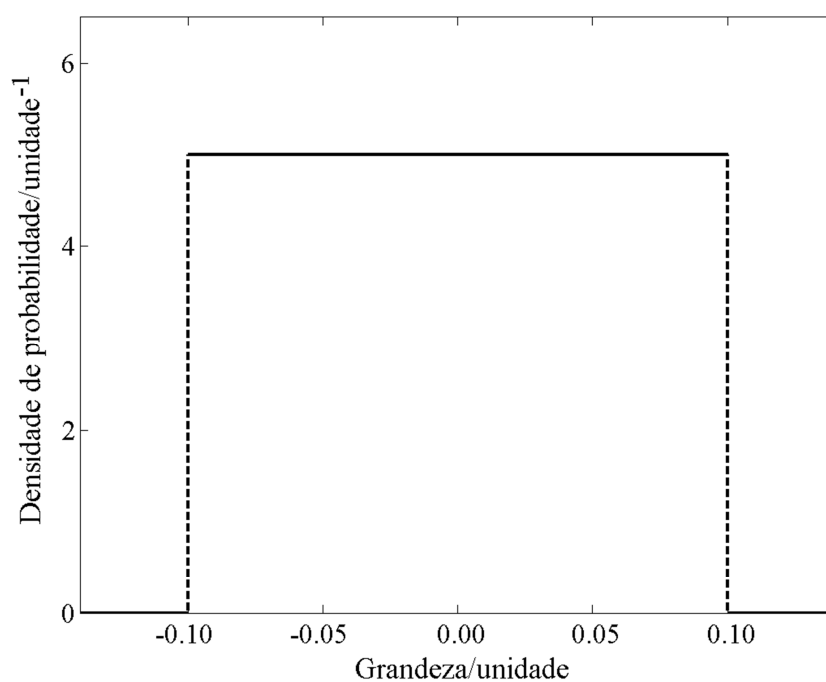


Figura 2 — Distribuição de probabilidade retangular com limites $-0,1$ unidade e $0,1$ unidade ('unidade' denota unidade arbitrária)

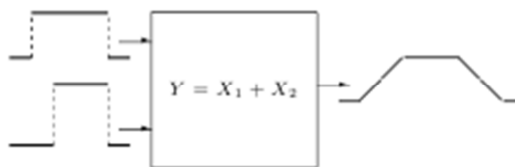


Figura 3 — Uma função de medição aditiva com duas grandezas de entrada X_1 e X_2 caracterizadas por distribuições de probabilidade retangulares

4.11 Muitas vezes é requerido um intervalo que contém Y com uma determinada probabilidade. Tal intervalo, um *intervalo de abrangência* [JCGM 200:2008 (VIM) 2.36], pode ser deduzido a partir da distribuição de probabilidade de Y . A probabilidade especificada é conhecida como a *probabilidade de abrangência* [JCGM 200:2008 (VIM) 2.37].

4.12 Para uma probabilidade de abrangência específica, há mais de um intervalo de abrangência,

- a) o *intervalo de abrangência probabilisticamente simétrico* [JCGM 101:2008 3.15], para o qual as probabilidades (um menos a probabilidade de abrangência) de um valor à esquerda e à direita do intervalo são iguais, e
- b) o *mínimo intervalo de abrangência* [JCGM 101:2008 3.16], cujo comprimento é o menor dentre todos os intervalos de abrangência com a mesma probabilidade de abrangência.

4.13 A Figura 4 mostra uma distribuição de probabilidade (uma distribuição gaussiana truncada e escalonada, indicada pela curva decrescente) com as respectivas extremidades dos intervalos de abrangência (95% de confiança) para uma grandeza caracterizada por esta distribuição: o menor intervalo (linhas verticais azuis contínuas) e o intervalo probabilisticamente simétrico (linhas verticais tracejadas em vermelho). A distribuição é assimétrica e os dois intervalos de abrangência são diferentes (mais notavelmente em suas extremidades à direita). O menor intervalo de abrangência tem a sua extremidade à esquerda em zero, o menor valor possível para a grandeza. O intervalo de abrangência probabilisticamente simétrico neste caso é 15% maior que o mínimo intervalo de abrangência.

4.14 Os *coeficientes de sensibilidade* c_1, \dots, c_N [JCGM 100:2008 (GUM) 5.1.3] descrevem como a estimativa y de Y seria influenciada por pequenas variações nas estimativas x_1, \dots, x_N das grandezas de entrada X_1, \dots, X_N . Para a função de medição (1), c_i é igual à derivada parcial de primeira ordem de f com relação a X_i avaliados em $X_1 = x_1, X_2 = x_2$, etc. Para a função de medição linear

$$Y = c_1 X_1 + \dots + c_N X_N, \quad (3)$$

com X_1, \dots, X_N independentes, uma variação em x_i igual a $u(x_i)$ produziria uma variação $c_i u(x_i)$ em y . Em geral, considerando os modelos de medição (1) e (2) (ver 7.2.4), esta seria uma declaração aproximada. As magnitudes relativas dos termos $|c_i|u(x_i)$ são úteis para avaliar as respectivas contribuições das grandezas de entrada para a incerteza-padrão $u(y)$ associada com y .

4.15 A incerteza-padrão $u(y)$ associada com a estimativa y da grandeza de saída Y não é obtida da soma dos termos $|c_i|u(x_i)$, mas da sua combinação em soma quadrática [JCGM 100:2008 (GUM) 5.1.3], ou seja, por

$$u^2(y) = c_1^2 u^2(x_1) + \dots + c_N^2 u^2(x_N). \quad (4)$$

(uma expressão que, para os modelos de medição (1) e (2), é geralmente apenas aproximada)

4.16 Quando as grandezas de entrada X_i mantêm dependências, a fórmula (4) é acrescida de termos contendo covariâncias [JCGM 100:2008 (GUM) 5.2.2], o que pode aumentar ou diminuir $u(y)$.

4.17 De acordo com a Resolução 10 do 22º CGPM (2003) "... o símbolo para o marcador decimal deve ser o ponto sobre a linha ou a vírgula na linha...". O JCGM decidiu adotar, em seus documentos em Inglês, o ponto sobre a linha.

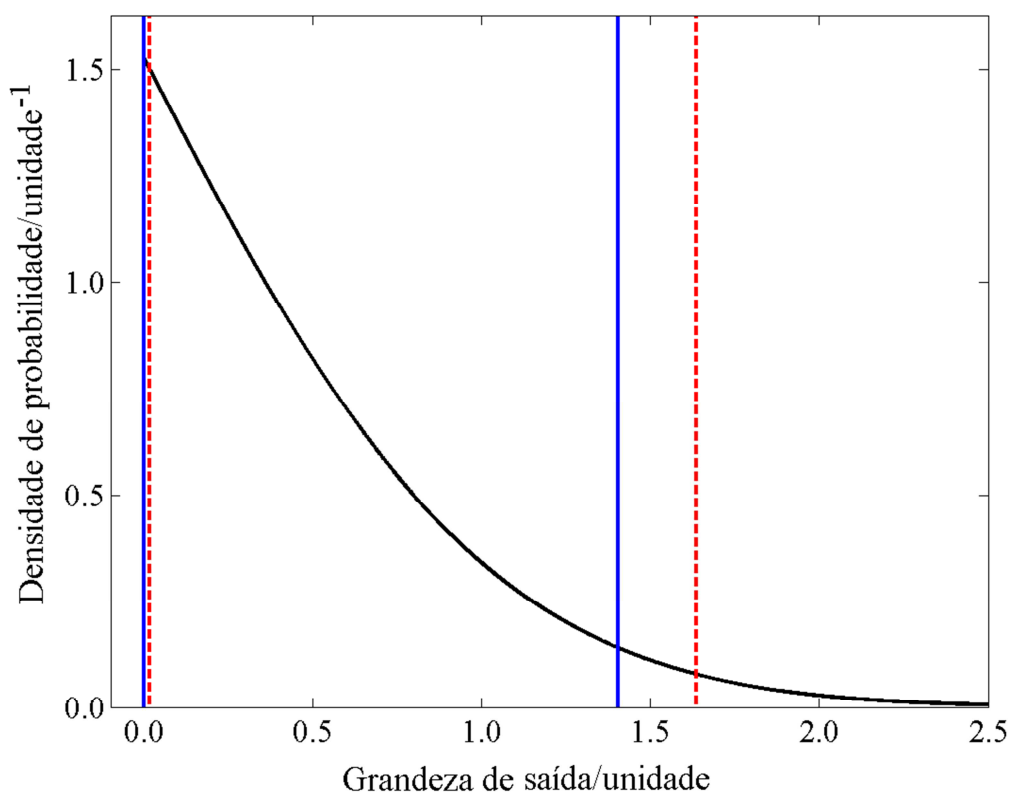


Figura 4 — Mínimo intervalo de abrangência de 95 % (pontos extremos indicados por linhas verticais contínuas azuis) e intervalo de abrangência probabilisticamente simétrico de 95% (linha vermelha tracejada) para uma grandeza caracterizada por uma distribuição gaussiana truncada e escalonada (“unidade” denota unidade arbitrária)

5 Etapas da avaliação de incerteza

5.1 As principais etapas da avaliação de incerteza são a formulação e o cálculo, sendo que esta última etapa consiste na propagação e na sintetização do resultado.

5.2 A etapa de formulação (ver Capítulo 6) compreende

- a definição da grandeza de saída Y (o mensurando),
- a identificação das grandezas de entrada das quais Y depende,
- o desenvolvimento de um modelo de medição relacionando Y às grandezas de entrada, e
- com base no conhecimento disponível, a atribuição de distribuições de probabilidade – gaussianas, retangulares, etc. – para as grandezas de entrada (ou distribuições conjuntas de probabilidades para as grandezas de entrada que não são independentes).

5.3 A etapa de cálculo (ver Capítulo 7) consiste na propagação das distribuições de probabilidade das grandezas de entrada através do modelo de medição para obter a distribuição de probabilidade da grandeza de saída Y e, usando esta distribuição, sintetizar o resultado final para obter

- a esperança de Y , tomada como uma estimativa y de Y ,
- o desvio-padrão de Y , tomado como a incerteza-padrão $u(y)$ associada com y [JCGM 100:2008 (GUM) E.3.2], e
- um intervalo de abrangência contendo Y com uma probabilidade de abrangência especificada.

6 A etapa de formulação: desenvolvendo um modelo de medição

6.1 A etapa de formulação da avaliação de incerteza envolve o desenvolvimento de um modelo de medição incorporando, conforme necessário, correções e outros efeitos. Em algumas áreas de medição esta etapa pode ser muito difícil. Ela envolve também o uso de conhecimentos disponíveis para caracterizar as grandezas de entrada do modelo por distribuições de probabilidade. O JCGM 103 [6] fornece orientações para desenvolver e trabalhar modelos de medição (Ver NT 7). A atribuição de distribuições de probabilidade para as grandezas de entrada em um modelo de medição é abordado pelo JCGM 101 [JCGM 101:2008 6] e pelo JCGM 102 [5].

6.2 Um modelo de medição relacionando as grandezas de entrada à grandeza de saída é inicialmente desenvolvido. Pode haver mais de uma grandeza de saída (ver 6.5). O modelo é construído em bases teóricas ou empíricas, ou ambas, e, geralmente, depende de diversas áreas da metrologia: elétrica, dimensional, de massa, térmica, etc. O modelo é, então, acrescido de termos constituídos por grandezas de entrada adicionais, que descrevem efeitos que influenciam a medição. O JCGM 103 [6] fornece orientação sobre tratamento desses efeitos adicionais, que podem ser classificados em efeitos aleatórios e efeitos sistemáticos.

6.3 O JCGM 103 considera classes mais amplas de modelos de medição do que o faz o GUM, e categoriza os modelos observando se

- a) as grandezas envolvidas são reais ou complexas,
- b) o modelo de medição tem a forma geral da equação (2) ou pode ser expresso como uma função de medição segundo a equação (1), e
- c) há uma única grandeza de saída ou mais de uma grandeza de saída (ver 6.5).

Com referência à categoria (a), grandezas complexas ocorrem especialmente em metrologia elétrica, e também na metrologia acústica e óptica. Quanto à categoria (b), para uma função de medição a grandeza de saída é expressa diretamente como uma fórmula (1) envolvendo as grandezas de entrada, e para um modelo de medição geral, uma equação deve ser resolvida para a grandeza de saída em termos das grandezas de entrada (ver 6.5).

6.4 Exemplos de uma gama de disciplinas de metrologia ilustram vários aspectos do JCGM 103. São ali fornecidas orientações sobre aspectos de análise numérica que surgem no tratamento desses exemplos. As orientações incluem também o uso de mudanças de variáveis de modo a que todas ou algumas das grandezas resultantes sejam não correlacionadas ou apenas fracamente correlacionadas.

6.5 O GUM e o JCGM 101: 2008 se concentram em modelos de medição na forma de funções de medição que possuem uma única grandeza Y de saída. Há, no entanto, muitos problemas de medição para os quais existem mais de uma grandeza de saída que são dependentes de um conjunto comum de grandezas de entrada. Essas grandezas de saída são denotadas por Y_1, \dots, Y_m . Exemplos incluem (a) uma grandeza de saída complexa, representada em termos de seus componentes real e imaginário (ou magnitude e fase), (b) grandezas que representam os parâmetros de uma função de calibração, e (c) grandezas que descrevem a geometria da superfície de um artefato. O GUM não trata diretamente de tais modelos, embora sejam dados exemplos de medição simultânea de resistência e reatância [JCGM 100:2008 (GUM) H.2] e de calibração de um termômetro [JCGM 100:2008 (GUM) H.3].

6.6 Na avaliação de incerteza, a etapa de formulação, para o caso de mais de um mensurando, é consistente com aquela usada para um modelo de medição com um mensurando único: ela compreende o desenvolvimento de um modelo e a atribuição de distribuições de probabilidade para as grandezas de entrada com base no conhecimento disponível. Da mesma forma que no caso de um modelo de medição com uma grandeza de saída única, há uma estimativa e uma incerteza-padrão associada para cada grandeza de entrada (e possivelmente covariâncias associadas a pares de estimativas). Adicionalmente, uma vez que, em geral, cada grandeza de saída depende de todas as grandezas de entrada, além de determinar estimativas das grandezas de saída e suas incertezas-padrão associadas, é necessário avaliar as covariâncias associadas com todos os pares dessas estimativas.

6.7 Para o caso de um número m de grandezas de saída, o uso da função de medição (1) leva a

$$Y_1 = f_1(X_1, \dots, X_N), Y_2 = f_2(X_1, \dots, X_N), \dots, Y_m = f_m(X_1, \dots, X_N), \quad (5)$$

em que há m funções f_1, \dots, f_m . A Figura 5 ilustra um modelo de medição para este caso.

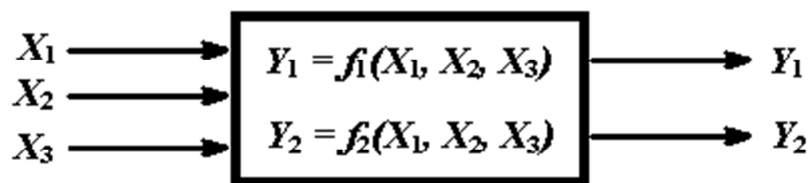


Figura 5 — Um modelo de medição com três grandezas de entrada X_1 , X_2 e X_3 , duas funções de medição f_1 e f_2 e duas grandezas de saída Y_1 e Y_2

6.8 Modelos de medição multi-etapas, em que as grandezas de saída de etapas anteriores se tornam as grandezas de entrada para etapas subsequentes, são também tratados no JCGM 103. Um exemplo comum de um modelo de medição multi-etapas diz respeito à construção e utilização de uma função de calibração [JCGM 200:2008 (VIM) 2.39] (ver Figura 6):

- Tendo sido obtidos valores de grandezas fornecidos por padrões de medição, e valores correspondentes de indicação oriundos de um sistema de medição, determine as estimativas dos parâmetros da função de calibração. As incertezas-padrão associadas com os valores medidos das grandezas e com os valores indicação dão origem a incertezas-padrão associadas com essas estimativas e, em geral, a covariâncias associadas com todos os pares de estimativas;
- Obtido um novo valor indicação, utilize a função de calibração para obter o correspondente valor medido da grandeza. Esta etapa envolve o inverso da função de calibração. As incertezas-padrão e as covariâncias associadas com as estimativas dos parâmetros da função de calibração, juntamente com a incerteza-padrão associada ao valor da nova indicação, dão origem a uma incerteza-padrão associada com este valor medido da grandeza.

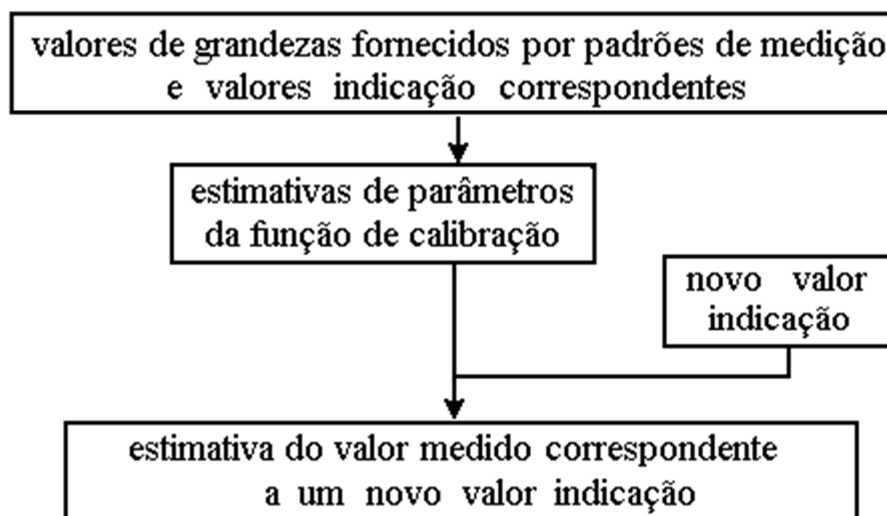


Figura 6 — Um modelo de medição de duas etapas para uma função de calibração em que valores de grandezas fornecidos por padrões de medição e correspondentes valores indicação são utilizados para estabelecer estimativas dos parâmetros da função de calibração. Essas estimativas serão usadas posteriormente para, dado um novo valor indicação, estimar o correspondente valor medido

7 A etapa de cálculo (propagação e sintetização) da avaliação de incerteza

7.1 Geral

7.1.1 A etapa de propagação da avaliação de incerteza é conhecida como *propagação de distribuições* [JCGM 101:2008 5.2], estando para isso disponíveis várias abordagens, incluindo

- a abordagem de incerteza do GUM, que consiste na aplicação da lei de propagação de incertezas, caracterizando-se a grandeza de saída Y por uma distribuição gaussiana ou uma distribuição- t (ver 7.2),

b) métodos analíticos, em que análise matemática é utilizada para derivar uma forma algébrica para a distribuição de probabilidade para Y (ver 7.3), e

c) um método Monte Carlo (MMC), em que uma aproximação para a função de distribuição de Y é estabelecida numericamente por meio de escolhas aleatórias a partir das distribuições de probabilidade associadas às grandezas de entrada, a avaliação do modelo sendo feita com base nos valores daí resultantes (ver 7.4).

7.1.2 Com relação a qualquer problema particular de avaliação de incerteza pode ser usada a abordagem a) ou b) ou c) (ou alguma outra abordagem), sendo que a) é geralmente aproximada, b) é exata, e c) fornece uma solução com uma exatidão numérica que pode ser controlada.

7.1.3 A aplicação das abordagens a) e c) a funções de medição com qualquer número de grandezas de saída, e a modelos gerais de medição, é considerada em 7.5.

7.2 A abordagem de incerteza do GUM

7.2.1 A abordagem de incerteza do GUM [JCGM 100:2008 (GUM) 3.4.8, 5.1] (representada na Figura 7) utiliza

- a) as melhores estimativas x_i das grandezas de entrada X_i ,
- b) as incertezas-padrão $u(x_i)$ associadas com os x_i , e
- c) os coeficientes de sensibilidade c_i (ver 4.14)

para formar uma estimativa y da grandeza de saída Y e a incerteza-padrão associada $u(y)$.

7.2.2 Uma variante [JCGM 100:2008 (GUM) 5.2] de 7.2.1 aplica-se quando as incertezas de entrada são mutuamente dependentes (não indicado na Figura 7). Assumindo-se a distribuição de probabilidade de Y como gaussiana, é-lhe também determinado um intervalo de abrangência correspondente à probabilidade de abrangência especificada [JCGM 100:2008 (GUM) G.2]. Quando o número de graus de liberdade [ISO 3534-1:2006 2.54] relativo a qualquer $u(x_i)$ é finito, determina-se um número (efetivo) de graus de liberdade relativo a $u(y)$, e a distribuição de probabilidade para Y é tomada como uma distribuição- t .

7.2.3 Há muitas circunstâncias nas quais a abordagem de incerteza do GUM [JCGM 100:2008 (GUM) 5] pode ser aplicada, levando a declarações válidas de incerteza. Se a função de medição for linear nas grandezas de entrada e as distribuições de probabilidade para essas grandezas forem gaussianas, a abordagem de incerteza do GUM fornecerá resultados exatos [JCGM 101:2008 5.7]. Mesmo quando essas condições não se aplicam, a abordagem frequentemente funciona suficientemente bem para fins práticos [JCGM 101:2008 5.8].

7.2.4 Há situações em que a abordagem de incerteza do GUM pode não ser satisfatória, incluindo aquelas em que

- a) a função de medição não é linear,
- b) as distribuições de probabilidade para as grandezas de entrada são assimétricas,
- c) as contribuições de incerteza $|c_1|u(x_1), \dots, |c_N|u(x_N)$ (ver 4.14) não são (pelo menos) aproximadamente da mesma magnitude [JCGM 100:2008 (GUM) G.2.2], e
- d) a distribuição de probabilidade para a grandeza de saída é ou assimétrica, ou uma distribuição não gaussiana ou uma distribuição- t .

Algumas vezes é difícil estabelecer de antemão que existem as circunstâncias satisfatórias para que a abordagem de incerteza do GUM seja aplicada.

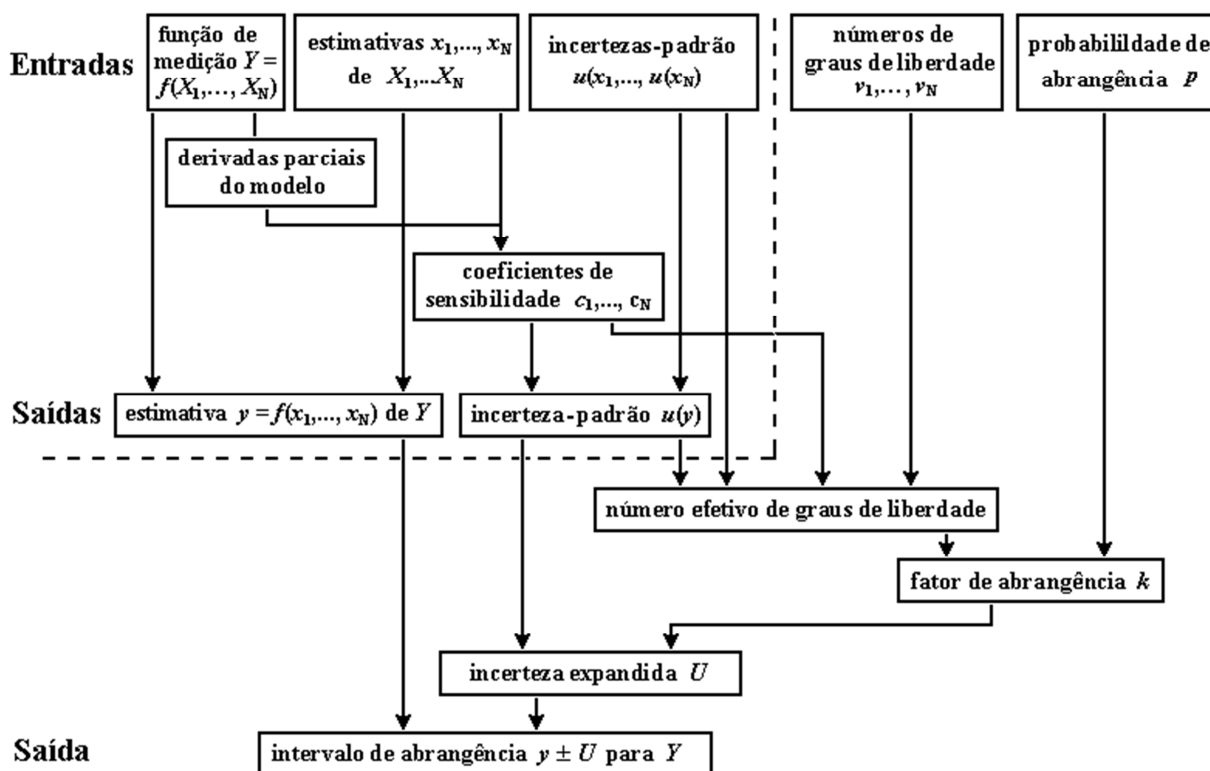


Figura 7 – Avaliação da incerteza de medição utilizando a abordagem de incerteza do GUM, onde a parte superior esquerda da figura (delimitada pelas linhas tracejadas) refere-se à obtenção de uma estimativa y da grandeza de saída Y e da incerteza-padrão associada $u(y)$, com o restante da figura referindo-se à determinação de um intervalo de abrangência para Y

7.2.5 O uso da abordagem de incerteza do GUM torna-se mais difícil quando da obtenção de derivadas parciais (ou aproximações numéricas para elas) para um modelo de medição complicado, como exigido pela lei de propagação de incertezas (possivelmente com termos de ordens superiores) [JCGM 100:2008 (GUM) 5]. Um tratamento válido e algumas vezes mais prontamente aplicável é obtido pela aplicação de uma implementação adequada da propagação de distribuições por Monte Carlo (ver 7.4).

7.3 Métodos analíticos

7.3.1 Métodos analíticos, pelos quais uma forma algébrica para a distribuição de probabilidade da grandeza de saída pode ser obtida, não introduzem qualquer aproximação, mas podem ser aplicados apenas em casos relativamente simples. Um tratamento de tais métodos pode ser obtido em [8, 12]. Alguns casos que podem ser manipulados desta forma para um número geral N de grandezas de entrada são funções lineares de medição (expressão (3)), em que as distribuições de probabilidade para todas as grandezas de entrada são gaussianas, ou todas são retangulares com a mesma largura. Um exemplo com duas grandezas de entrada ($N = 2$), cujas distribuições de probabilidade são retangulares, e com distribuição de probabilidade trapezoidal para a grandeza de saída [10], é ilustrado na Figura 3.

7.3.2 Casos em que existe uma grandeza de entrada ($N = 1$) podem frequentemente ser tratados analiticamente usando uma fórmula [25, páginas 57-61] para obter algebricamente uma distribuição de probabilidade para a grandeza de saída. Casos assim surgem na transformação de unidades de medida, por exemplo, da unidade linear para a logarítmica [10, páginas 95-98].

7.3.3 Uma vantagem de uma solução algébrica é que ela propicia uma (boa) compreensão (do processo) ao explicitar a dependência da distribuição de probabilidade obtida para a grandeza de saída com relação aos parâmetros das distribuições de probabilidade das grandezas de entrada.

7.4 Método Monte Carlo (MMC)

7.4.1 O JCGM 101:2008 fornece informações detalhadas sobre a utilização do MMC como ferramenta para a propagação de distribuições [JCGM 101:2008 5.9]. O MMC tem menos condições (**restritivas**) associadas ao seu uso do que a abordagem de incerteza do GUM [JCGM 101:2008 5.10]. A Figura 8 ilustra o procedimento correspondente. O JCGM 101:2008 fornece exemplos para comparar o MMC com o uso da abordagem de incerteza do GUM [JCGM 101:2008 9].

7.4.2 O JCGM 101:2008 fornece um procedimento MMC adaptativo em que o número de iterações de Monte Carlo é determinado automaticamente utilizando uma medida de convergência de todo o processo [JCGM 101:2008 7.9].

7.4.3 No JCGM 101:2008 existe um procedimento que utiliza o MMC para decidir, em cada caso particular, se a aplicação da abordagem de incerteza do GUM é válida [JCGM 101:2008 8].

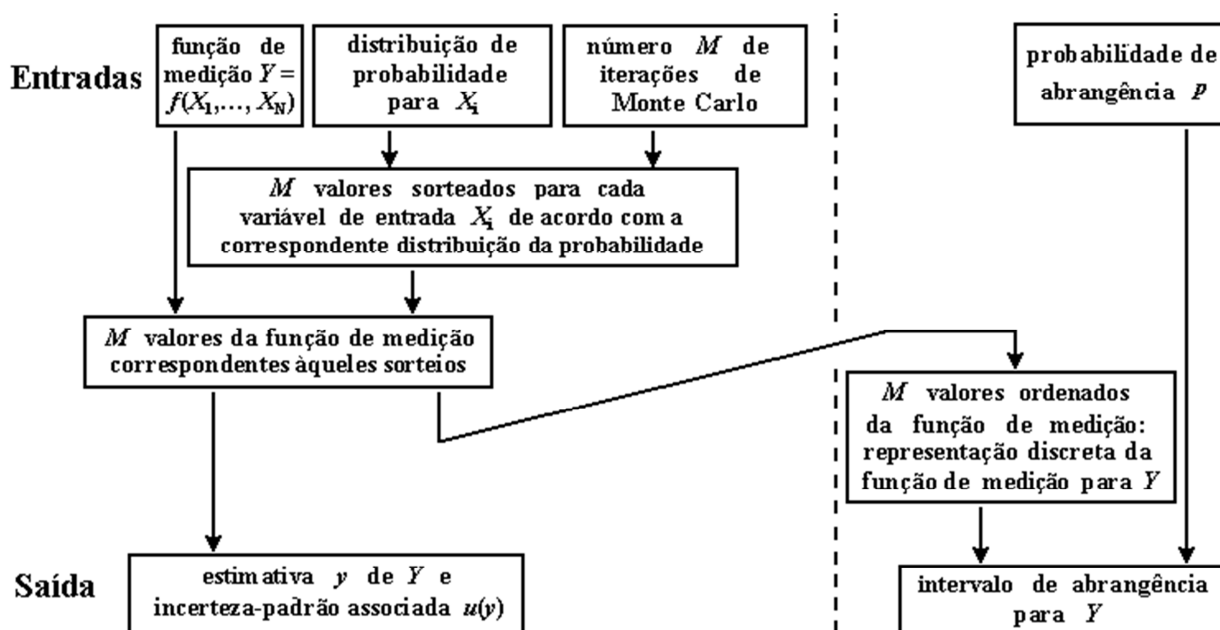


Figura 8 — Avaliação da incerteza de medição usando um método Monte Carlo, onde a parte da figura à esquerda da linha tracejada relaciona-se à obtenção de uma estimativa y da grandeza de saída Y e sua incerteza-padrão associada $u(y)$, e a parte restante relaciona-se à determinação de um intervalo de abrangência para Y .

7.5 Modelos de medição com qualquer número de grandezas de saída

7.5.1 Para avaliar as incertezas e as covariâncias associadas com as estimativas das grandezas de saída para modelos de medição com qualquer número de grandezas de saída, tanto a abordagem de incerteza do GUM quanto a do MMC, conforme tratado no JCGM 101:2008, exigem extensão. O GUM [JCGM 100:2008 (GUM) F.1.2.3] descreve uma extensão para a sua abordagem, considerando-a porém apenas em exemplos.

7.5.2 No JCGM 102 [5] é estabelecido que a lei de propagação de incertezas, elemento principal da abordagem de incerteza do GUM, pode, equivalentemente, quando aplicada a um modelo de medição tendo uma única grandeza de saída, ser expressa de maneira sucinta em uma forma matricial. A expressão matricial tem a vantagem de ser adequada como base para a implementação em *software*, e para extensão a tipos mais gerais de modelos de medição.

7.5.3 Essa extensão é fornecida no JCGM 102 para uma função de medição com qualquer número de grandezas de saída. A extensão para qualquer número de grandezas de saída em um modelo de medição geral (ver 3.16) é também tratada no JCGM 102.

7.5.4 O JCGM 102 aplica também o MMC para modelos de medição com qualquer número de grandezas de saída. Uma representação discreta da distribuição de probabilidade para as grandezas de saída é fornecida. São dadas expressões para as estimativas das grandezas de saída, as incertezas-padrão associadas a essas estimativas, e as covariâncias associadas com pares dessas estimativas em termos daquela representação.

7.5.5 Além de obter as estimativas das grandezas de saída, juntamente com as incertezas-padrão e covariâncias associadas, pode ser necessário obter uma *região* que contenha as grandezas de saída com uma probabilidade (de abrangência) especificada. É natural considerar a extensão (**desse processo**) para regiões correspondentes a intervalos de abrangência probabilisticamente simétricos e a intervalos de mínima probabilidade de abrangência. No entanto, não há contrapartida natural de um intervalo de abrangência probabilisticamente simétrico na forma de uma região de abrangência, o que ocorre no caso de um intervalo mínimo de abrangência. A determinação de uma região de mínima abrangência é geralmente uma tarefa difícil.

7.5.6 Em algumas circunstâncias é razoável fornecer uma região de abrangência *aproximada* tendo forma geométrica simples. Duas formas particulares de região de abrangência são consideradas a este respeito. Uma forma resulta da caracterização das grandezas de saída por uma distribuição gaussiana conjunta com base, por exemplo, no teorema central do limite [JCGM 100:2008 (GUM) G.2]. Neste caso a região de mínima abrangência é limitada por um hiper-elipsóide. A outra forma constitui-se numa região de abrangência hiper-retangular. Procedimentos para a obtenção dessas formas são fornecidos em JCGM 102.

8 Incerteza de medição na avaliação da conformidade

8.1 A avaliação da conformidade é uma área de importância no controle da qualidade de produção, na metrologia legal, e na manutenção da saúde e segurança. A inspeção industrial durante a fabricação de peças e componentes leva a que decisões sejam tomadas referentes à compatibilidade das peças com as especificações do projeto. Questões semelhantes surgem no contexto da regulamentação (relativamente a emissões, radiação, drogas, controle de *doping*, etc) a propósito de se conhecer se limites estipulados para valores verdadeiros das grandezas foram ultrapassados. Orientação é fornecida em JCGM 106 [7]. Ver também referência [18]. (**Ver NT 8**)

8.2 Medição é parte intrínseca da avaliação da conformidade quando da decisão sobre se a grandeza de saída, ou mensurando, está em conformidade com uma exigência especificada. Para uma grandeza (**de saída**) única, tal exigência normalmente assume a forma de limites de especificação que definem um intervalo de valores permissíveis. Na ausência de incerteza, um valor medido que se situe dentro desse intervalo é dito ser conforme; em caso contrário ele é dito não conforme. A extensão pela qual a incerteza de medição influencia o processo de inspeção é determinada por um balanço de riscos entre produtores e consumidores.

8.3 Os valores possíveis de uma grandeza de interesse Y são representados por uma distribuição de probabilidade. A probabilidade de Y estar de acordo com uma especificação pode ser calculada a partir desta distribuição de probabilidade e dos limites de especificação.

8.4 Devido ao conhecimento incompleto da grandeza Y (segundo o codificado em sua distribuição de probabilidade), há o risco de decisões equivocadas quando de uma decisão pela conformidade a uma especificação. Tais decisões equivocadas são de dois tipos: a grandeza admitida como conforme pode ser realmente não-conforme, e uma grandeza rejeitada como não-conforme pode ser, na realidade, conforme. Os riscos relacionados correspondem, respectivamente, a um *risco do consumidor* e a um *risco do produtor* (ver JCGM 106).

8.5 A definição de um *intervalo de aceitação* de valores medidos aceitáveis pode equilibrar os riscos de decisões equivocadas concernentes a aceitação ou rejeição, minimizando assim os custos associados a essas decisões [19]. O problema de calcular a probabilidade de conformidade e as probabilidades dos dois tipos de decisão equivocada, dados a distribuição de probabilidade, os limites de especificação e os limites do intervalo de aceitação, é abordado em JCGM 106. A escolha dos limites do intervalo de aceitação é uma questão que depende das implicações que podem ser acarretadas pelas decisões equivocadas.

8.6 Embora a distribuição de probabilidade considerada em 8.3 a 8.5 seja geral, o JCGM 106 faz um tratamento particularizado para o caso mais importante na prática, ou seja, quando a distribuição de probabilidade é gaussiana.

9 Aplicações do método dos mínimos quadrados

9.1 Orientação sobre a aplicação do método dos mínimos quadrados (também conhecido como ajuste por mínimos quadrados) para os problemas de avaliação de dados em metrologia é fornecida em JCGM 107 [3]. (Ver NT 9) Em tais problemas há frequentemente uma relação teórica subjacente entre uma variável independente e uma variável dependente. Essa relação constitui a base do problema de ajuste de parâmetro ou ajuste de curva. As grandezas de entrada no correspondente modelo de medição são as grandezas (variáveis dependentes e independentes) cujos valores medidos constituem os resultados (obtidos num dado procedimento de medição). As grandezas de saída (do modelo de medição, ou do método dos mínimos quadrados) são as grandezas que representam os parâmetros requeridos. A maneira pela qual as grandezas de saída são obtidas a partir das grandezas de entrada por meio de um procedimento de mínimos quadrados define o modelo de medição.

9.2 Na terminologia da calibração (ver 6.8), um valor medido de uma variável independente será normalmente oriundo de um padrão. O valor correspondente da variável dependente será uma indicação retornada pelo sistema de medição para aquele valor da variável independente. No contexto de ajuste de curva, que inclui calibração como um caso especial, o procedimento de ajuste utilizado em JCGM 107 é uma versão generalizada do procedimento usual de mínimos quadrados.

9.3 A tarefa aqui é estimar os parâmetros (e às vezes até mesmo o seu número) a partir de (certo número *N* de) pares de valores medidos e indicações correspondentes. Esses pares, juntamente com as incertezas-padrão associadas e, quando apropriado, as covariâncias, constituem os dados de entrada para o ajuste.

9.4 Problemas típicos de medição em que o JCGM 107 pode ser aplicado incluem

(a) problemas lineares ou não-lineares de ajuste de curva, incluindo o caso de valores não perfeitamente conhecidos da variável independente, e

(b) ajuste de modelos gerais para estimar parâmetros em um processo físico.

A aplicação do JCGM 107 não se restringe estritamente aos problemas de ajuste de curva. Ele pode ser usado também para tratar, por exemplo, problemas de convolução [21], ajuste de constantes fundamentais [22], e avaliação de dados em comparações-chave [9].

9.5 No caso de problemas do tipo (a) em 9.4, tendo sido o método dos mínimos quadrados utilizado para estimar os parâmetros de uma função de calibração e avaliar as incertezas-padrão e covariâncias associadas, o sistema de medição será subsequentemente utilizado para medição. As estimativas dos parâmetros da função de calibração, juntamente com um particular valor indicação (em geral obtido numa medição posterior), são então utilizados para estimar a grandeza correspondente. A incerteza-padrão associada a essa estimativa é avaliada por meio das incertezas-padrão e covariâncias associadas com as estimativas dos parâmetros e da incerteza-padrão associada com o (particular) valor indicação.

9.6 É enfatizado no documento JCGM 107 que a *estrutura de incerteza* deve ser integralmente levada em conta quando da formulação e resolução de problemas de mínimos quadrados. A 'estrutura de incerteza' refere-se às incertezas-padrão associadas com os valores medidos, com os valores indicação e com quaisquer covariâncias associadas a pares desses valores.

9.7 Raramente, no caso de problemas do tipo (b) em 9.4, ou quando da determinação dos parâmetros em problemas do tipo (a), o problema de ajuste é um problema envolvendo uma única grandeza de saída. O problema envolve, em geral, uma série de grandezas de saída em que a formulação matemática pode ser convenientemente expressa em termos de matrizes. O JCGM 107 faz uso extensivo do formalismo matricial, o qual é bem adaptado a soluções numéricas (buscadas) com o uso de um computador, o que é normalmente requerido na prática (ver também 7.5).

A Abreviaturas e siglas

A Tabela A.1 apresenta as abreviaturas e siglas usadas neste documento

Tabela A.1 — Abreviaturas e siglas

Abreviatura ou sigla	Descrição
BIPM	Bureau Internacional de Pesos e Medidas (<i>Bureau International des Poids et Mesures</i>)
GUM	Guia para a expressão de incerteza de medição (<i>Guide to the expression of uncertainty in measurement</i>)
IEC	Comissão Internacional de Eletrotécnica (<i>International Electrotechnical Commission</i>)
IFCC	Federação Internacional de Química Clínica e Medicina Laboratorial (<i>International Federation of Clinical Chemistry and Laboratory Medicine</i>)
ILAC	Cooperação Internacional de Acreditação de Laboratórios (<i>International Laboratory Accreditation Cooperation</i>)
ISO	Organização Internacional de Normalização (<i>International Organization for Standardization</i>)
IUPAC	União Internacional de Química Pura e Aplicada (<i>International Union of Pure and Applied Chemistry</i>)
IUPAP	União Internacional de Física Pura e Aplicada (<i>International Union of Pure and Applied Physics</i>)
JCGM	Comitê Conjunto para Guias em Metrologia (<i>Joint Committee for Guides in Metrology</i>)
MMC	Método Monte Carlo
OIML	Organização Internacional de Metrologia Legal (<i>International Organization of Legal Metrology</i>)
TAG4	Grupo Consultivo Técnico 4 da ISO (<i>ISO Technical Advisory Group 4</i>)
VIM	Vocabulário internacional de metrologia - conceitos fundamentais e gerais e termos associados (<i>Vocabulary of Metrology — Basic and general concepts and associated terms</i>)

Bibliografia

- [1] Bell, S. Measurement Good Practice Guide No. 11. A Beginner's Guide to Uncertainty of Measurement. Tech. rep., National Physical Laboratory, 1999. 3.2
- [2] Bernardo, J., and Smith, A. Bayesian Theory. John Wiley & Sons, New York, USA, 2000. 3.20
- [3] BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP, and OIML. Evaluation of measurement data - Applications of the least-squares method. Joint Committee for Guides in Metrology, JCGM 107, in preparation. 1, 9.1
- [4] BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP, and OIML. Evaluation of measurement data - Concepts and basic principles. Joint Committee for Guides in Metrology, JCGM 105, in preparation. 1, 4.1
- [5] BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP, and OIML. Evaluation of measurement data – Supplement 2 to the “Guide to the expression of uncertainty in measurement” - Models with any number of output quantities. Joint Committee for Guides in Metrology, JCGM 102, in preparation. 1, 6.1, 7.5.2
- [6] BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP, and OIML. Evaluation of measurement data - Supplement 3 to the - Guide to the expression of uncertainty in measurement” - Modelling. Joint Committee for Guides in Metrology, JCGM 103, in preparation. 1, 6.1, 6.2
- [7] BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP, and OIML. Evaluation of measurement data | The role of measurement uncertainty in conformity assessment. Joint Committee for Guides in Metrology, JCGM 106, in preparation. 1, 8.1
- [8] Casella, G. C., and Berger, R. L. Statistical Inference. Duxbury Press, Pacific Grove, 2001. Second Edition. 7.3.1
- [9] Cox, M. G. The evaluation of key comparison data. Metrologia 39 (2002), 589{595. 9.4
- [10] Cox, M. G., and Harris, P. M. SSfM Best Practice Guide No. 6, Uncertainty evaluation. Tech. Rep. DEM-ES-011, National Physical Laboratory, Teddington, UK, 2006. 7.3.1, 7.3.2
- [11] Cox, M. G., and Harris, P. M. Software specifications for uncertainty evaluation. Tech. Rep. DEM-ES-010, National Physical Laboratory, Teddington, UK, 2006.
- [12] Dietrich, C. F. Uncertainty, Calibration and Probability. Adam Hilger, Bristol, UK, 1991. 7.3.1
- [13] Elster, C. Calculation of uncertainty in the presence of prior knowledge. Metrologia 44 (2007), 111{116. 3.20
- [14] EURACHEM/CITAC. Quantifying uncertainty in analytical measurement. Tech. Rep. Guide CG4, EURACHEM/CITEC,[EURACHEM/CITAC Guide], 2000. Second edition.
- [15] Feller, W. An Introduction to Probability Theory and its Applications, Volume I. Wiley, 1968.
- [16] Feller, W. An Introduction to Probability Theory and its Applications, Volume II. Wiley, 1971.
- [17] Hibbert, D. B. Quality Assurance for the Analytical Chemistry Laboratory. Oxford University Press, Oxford, UK, 2007.
- [18] IEC. IEC Guide 115. Application of uncertainty of measurement to conformity assessment activities in the electrotechnical sector. International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland, 2007. 8.1
- [19] ISO. ISO 10576-1. Statistical methods | Guidelines for the evaluation of conformity with specified requirements — Part 1: General principles, 2003. International Standards Organization, Geneva. 8.5

- [20] ISO/IEC. ISO/IEC 17025. General requirements for the competence of testing and calibration laboratories, 2005. International Standards Organization, Geneva.
- [21] Korczynski, M. J., Cox, M. G., and Harris, P. M. Convolution and uncertainty evaluation. In *Advanced Mathematical Tools in Metrology VII* (Singapore, 2006), P. Ciarlini, E. Felipe, A. B. Forbes, and F. Pavese, Eds., World Scientific, pp. 188{195. 9.4
- [22] Mohr, P. J., and Taylor, B. N. CODATA recommended values of the fundamental physical constants: 2002. *Rev. Mod. Phys.* 76 (2004), 4. 9.4
- [23] NIST. Uncertainty of measurement results.
- [24] Possolo, A., and Toman, B. Assessment of measurement uncertainty via observation equations. *Metrologia* 44 (2007), 464{475. 3.20
- [25] Rice, J. R. *Mathematical Statistics and Data Analysis*, second ed. Duxbury Press, Belmont, Ca., USA, 1995. 7.3.2
- [26] Weise, K., and Wöger, W. A Bayesian theory of measurement uncertainty. *Meas. Sci. Technol.* 3 (1992), 1{11.

Índice alfabético

A

aceitação	8.5
ajuste de curva	9.1, 9.2, 9.4
abordagem de incerteza do GUM	7.1.1, 7.2, 7.2.3-5, 7.4.1, 7.5.1, 7.5.2
comparada com o método Monte Carlo ..	7.4.1
condições de uso	7.2.3, 7.2.4
validação utilizando MMC	7.4.3
avaliação de incerteza	6.6
Tipo A	4.6, 4.7
Tipo B	4.6, 4.8
etapas	5
abordagens	7.1
problema particular	7.1.1-3
avaliação de dados	9.1

C

cálculo <i>ver</i> etapas da avaliação de incerteza	
cálculo de incerteza <i>ver</i> avaliação	
calibração	3.9, 9.2
coeficiente de sensibilidade	4.14, 7.2.1
combinação quadrática de termos	4.15
comparação chave	9.4
conformidade	
avaliação	8, 8.1, 8.2
especificação	8.3, 8.4
conhecimento disponível	3.19, 5.2, 6.6
conhecimento incompleto	8.4
conhecimento prévio	3.20
consolidação	5.1
constante física	3.13
constante fundamental	9.4
controle de qualidade	8.1
convolução	9.4
correção	
incerteza associada	3.11
correlação	4.4
covariância ...	4.4, 4.16, 6.6, 6.8, 7.5.1, 7.5.4, 7.5.5, 9.3, 9.5, 9.6

D

decisão equivocada	8.4, 8.5
derivada parcial	4.14, 7.2.5
desvio-padrão	3.18, 4.7, 4.9
dispersão	3.3
distribuição de probabilidade....	3.17, 3.18, 4.3, 5.2, 6.6, 7.1.1, 7.2.2-4, 7.3, 8.3-6
<i>t</i>	4.7, 7.1.1, 7.2.2
assimétrica	4.13, 7.2.4
atribuída a grandezas de entrada	6.1
conjunta	3.17
função de distribuição	4.3, 7.1.1
função densidade de probabilidade	4.3
gaussiana	4.7, 5.2, 7.1.1, 7.2.2, 7.2.3, 7.3.1, 8.6

gaussiana conjunta	7.5.6
representação discreta	7.5.4
retangular	4.8, 4.10, 7.3.1
trapezoidal	4.10, 7.3.1

E

equivocada <i>ver</i> decisão	
especificação de projeto	8.1
esperança	3.18, 4.9
estimativa	3.3, 4.9, 6.6, 6.8, 7.2.1, 7.5.1, 7.5.4, 7.5.5
melhor	3.18, 4.4, 7.2.1
etapas da avaliação de incerteza	
cálculo	5.1, 7
formulação	5.1, 6
exigência especificada	8.2

F

forma matricial	7.5.2, 9.7
formulação <i>ver</i> etapas de avaliação da incerteza	
função de calibração	6.5, 6.8
inversa	6.8
parâmetro	6.8, 9.7
função de medição	3.15, 4.14
aditiva	4.10
linear	4.14, 7.2.3, 7.3.1
não linear	7.2.4

G

grandeza	8.2, 8.4
de entrada	3.14, 3.15, 5.2, 6.6, 6.8, 7.1.1, 7.2.3, 7.3, 9.1
dependente	4.4, 4.16, 7.2.2
dependente do tempo	3.12
de saída	3.14, 3.15, 5.2, 6.6, 6.8, 7.2.1, 7.2.4, 7.3, 7.5.1, 7.5.2, 7.5.4, 7.5.5, 8.2, 9.1, 9.7
independente	4.14
valores possíveis	8.3
grandeza erro	
aleatório	3.5
sistemático	3.4, 3.5
grandeza indicação	3.2, 4.7
graus de confiança	3.8
graus de liberdade (número de)	7.2.2
número efetivo de	7.2.2
GUM <i>ver</i> abordagem de incerteza do GUM	

H

hiper-elipsóide	7.5.6
-----------------------	-------

I

implementação de <i>software</i>	7.5.2
incerteza, avaliação <i>ver</i> avaliação	
incerteza de medição	3.6, 3.8, 4.2, 8.2, 9.6
incerteza-padrão	3.18, 4.4, 4.9, 4.14, 6.6, 6.8, 7.2.1, 7.5.4, 7.5.5, 9.3, 9.5, 9.6
inspeção industrial	8.1
intervalo de abrangência	4.11, 7.2.2
probabilisticamente simétrico	4.12, 7.5.5
mínimo	4.12, 7.5.5
intervalo de aceitação	8.5
intervalo especificado	4.8

J

julgamento específico	4.6
-----------------------------	-----

L

lei de propagação de incertezas	7.1.1, 7.5.2
termos de ordens superiores	7.2.5
limites de especificação	8.2, 8.3, 8.5
limites estipulados	8.1

M

média	3.3
mensurando	3.1, 3.6, 5.2, 8.2
método analítico	7.1.1, 7.3
método Monte Carlo	7.1.1, 7.2.5, 7.4, 7.5.1, 7.5.4
adaptativo	7.4.2
comparação com a abordagem de incerteza do GUM	7.4.1
condições de utilização	7.4.1
exemplos	7.4.1
número de iterações	7.4.2
metrologia legal	8.1
mínimos quadrados	9, 9.5, 9.6
ajuste	9.1, 9.2
modelo de medição	3.10, 3.14, 3.15, 4.14, 5.2, 6.6, 7.5.1, 7.5.2
ajuste de parâmetros	9.1, 9.3
avaliação	7.1.1
complicado	7.2.5
com um número qualquer de grandezas de saída	6.6, 7.5, 7.5.3, 7.5.4
expressão geral	3.16, 7.1.3
múltiplos estágios	6.8

N

número de graus de liberdade <i>ver</i> graus de liberdade	
--	--

P

padrão de medição	6.8, 9.2
parâmetro	
função calibração	9.5
estimativa	9.4

probabilidade	3.8, 8.3
conformidade	8.5
probabilidade de abrangência	4.11, 4.12, 7.2.2, 7.5.5
propagação	5.1
de distribuições	3.19, 7.1.1, 7.2.5, 7.4.1

R

região de abrangência	7.5.5
aproximada	7.5.6
hiper-retangular	7.5.6
mínima	7.5.5, 7.5.6
regulamentação	8.1
rejeição	8.5
relação subjacente (entre variável dependente e independente)	9.1
requisito especificado <i>ver</i> exigência	
risco	8.4
balanço de	8.2
consumidor	8.4
produtor	8.4

S

saúde e segurança	8.1
sistema de medição	3.2, 3.4, 9.2, 9.5
solução numérica	9.7

T

tendência	3.5
teorema central do limite	7.5.6

U

unidades de medição, conversão	7.3.2
--------------------------------------	-------

V

valor duma grandeza	6.8
intervalo permitido para o	8.2
medido	3.2, 6.8, 8.2, 8.5, 9.2, 9.3, 9.6
conforme	8.2
não conforme	8.2
verdadeiro	3.3, 8.1
valor erro	
aleatório	3.6
sistemático	3.4, 3.6, 3.11
valor verdadeiro	3.17
valor indicação	3.2, 4.6, 4.7, 6.8, 9.2, 9.3, 9.5, 9.6
não obtidos independentemente	4.7
número pequeno de	4.7
repetidos	4.6
variável	
dependente	9.1, 9.2
valores medidos	9.1
independente (s)	9.1, 9.2, 9.4
valores medidos	9.1
variável aleatória	3.17

Alphabetical index

A

acceptance 8.5
 acceptance interval 8.5
 analytic method 7.1.1, 7.3
 available knowledge 3.19, 5.2, 6.6
 average 3.3

C

Calculation see stages of uncertainty evaluation
 calibration 3.9, 9.2
 calibration function 6.5, 6.8
 inverse 6.8
 parameter 6.8, 9.7
 central limit theorem 7.5.6
 conformity
 assessment 8, 8.1, 8.2
 specification 8.3, 8.4
 convolution 9.4
 correction
 associated uncertainty 3.11
 correlation 4.4
 covariance 4.4, 4.16, 6.6, 6.8, 7.5.1,
 7.5.4, 7.5.5, 9.3, 9.5, 9.6
 coverage interval 4.11, 7.2.2
 probabilistically symmetric 4.12, 7.5.5
 shortest 4.12, 7.5.5
 coverage probability 4.11, 4.12, 7.2.2, 7.5.5
 coverage region 7.5.5
 approximate 7.5.6
 hyper-rectangular 7.5.6
 smallest 7.5.5, 7.5.6
 curve fitting 9.1, 9.2, 9.4

D

data evaluation 9.1
 degrees of belief 3.8
 degrees of freedom 7.2.2
 effective 7.2.2
 design specification 8.1
 dispersion 3.3

E

error quantity
 random 3.5
 systematic 3.4, 3.5
 error value
 random 3.6
 systematic 3.4, 3.6, 3.11
 estimate 3.3, 4.9, 6.6, 6.8, 7.2.1,
 7.5.1, 7.5.4, 7.5.5
 best 3.18, 4.4, 7.2.1
 evaluation of uncertainty
 Type A 4.6, 4.7
 Type B 4.6, 4.8
 expectation 3.18, 4.9

F

formulation see stages of uncertainty evaluation
 fundamental constant 9.4

G

GUM uncertainty framework 7.1.1, 7.2, 7.2.3-5
 7.4.1, 7.5.1, 7.5.2
 compared with Monte Carlo method 7.4.1
 conditions on use 7.2.3, 7.2.4
 validation using MCM 7.4.3

H

health and safety 8.1
 hyper-ellipsoid 7.5.6

I

incomplete knowledge 8.4
 indication quantity 3.2, 4.7
 indication values 3.2, 4.6, 4.7, 6.8, 9.2, 9.3, 9.5, 9.6
 not obtained independently 4.7
 repeated 4.6
 small number 4.7
 industrial inspection 8.1

K

key comparison 9.4

L

law of propagation of uncertainty 7.1.1, 7.5.2
 higher-order terms 7.2.5
 least squares 9, 9.5, 9.6
 adjustment 9.1, 9.2
 legal metrology 8.1

M

matrix form 7.5.2, 9.7
 measurand 3.1, 3.6, 5.2, 8.2
 measurement bias 3.5
 measurement function 3.15, 4.14
 additive 4.10
 linear 4.14, 7.2.3, 7.3.1
 non-linear 7.2.4
 measurement model 3.10, 3.14, 3.15,
 4.14, 5.2, 6.6, 7.5.1, 7.5.2
 complicated 7.2.5
 evaluation 7.1.1
 general form 3.16, 7.1.3
 multistage 6.8
 parameter adjustment 9.1, 9.3
 with any number of output quantities ... 6.6,
 7.5, 7.5.3, 7.5.4
 measurement standard 6.8, 9.2
 measurement uncertainty 3.6, 3.8, 4.2, 8.2, 9.6

measurement units, transformation.....	7.3.2	possible values	8.3
measuring system	3.2, 3.4, 9.2, 9.5	time-dependent	3.12
mistaken decision	8.4, 8.5	quantity value.....	6.8
Monte Carlo method... 7.1.1, 7.2.5, 7.4, 7.5.1, 7.5.4		interval of permissible	8.2
adaptive	7.4.2	measured..... 3.2, 6.8, 8.2, 8.5, 9.2, 9.3, 9.6	
comparison with the GUM uncertainty		conforming	8.2
framework	7.4.1	non-conforming	8.2
conditions on use.....	7.4.1	true	3.3, 8.1
examples	7.4.1		
number of trials	7.4.2		
		R	
N		random variable	3.17
numerical solution	9.7	regulation	8.1
		rejection	8.5
P		risk	8.4
parameter		balance of	8.2
calibration function.....	9.5	consumer	8.4
estimation	9.4	producer.....	8.4
partial derivative	4.14, 7.2.5		
physical constant	3.13	S	
prior knowledge	3.20	scientific judgment	4.6
probability	3.8, 8.3	sensitivity coefficient.....	4.14, 7.2.1
conformity	8.5	software implementation.....	7.5.2
probability distribution..... 3.17, 3.18, 4.3, 5.2, 6.6,		specification limits.....	8.2, 8.3, 8.5
7.1.1, 7.2.2-4, 7.3, 8.3-6		specified interval.....	4.8
<i>t</i>	4.7, 7.1.1, 7.2.2	specified requirement	8.2
assigned to input quantities	6.1	stages of uncertainty evaluation	
asymmetric	4.13, 7.2.4	calculation	5.1, 7
discrete representation	7.5.4	formulation	5.1, 6
distribution function.....	4.3, 7.1.1	standard deviation	3.18, 4.7, 4.9
Gaussian... ..	4.7, 5.2, 7.1.1, 7.2.2,	standard uncertainty	3.18, 4.4, 4.9, 4.14,
7.2.3, 7.3.1, 8.6		6.6, 6.8, 7.2.1, 7.5.4, 7.5.5, 9.3, 9.5, 9.6	
joint	3.17	stipulated limits	8.1
joint Gaussian.....	7.5.6	summarizing	5.1
probability density function	4.3		
rectangular.....	4.8, 4.10, 7.3.1	T	
trapezoidal	4.10, 7.3.1	terms combined in quadrature	4.15
propagation.....	5.1	true value	3.17
of distributions.....	3.19, 7.1.1, 7.2.5, 7.4.1		
		U	
Q		uncertainty evaluation	6.6
quality control	8.1	problem	7.1.2
quantity	8.2, 8.4	stages	5
dependent.....	4.4, 4.16, 7.2.2	underlying relationship	9.1
independent.....	4.14		
input... ..	3.14, 3.15, 5.2, 6.6, 6.8,	V	
7.1.1, 7.2.3, 7.3, 9.1		variable	
output.....	3.14, 3.15, 5.2, 6.6, 6.8,	dependent.....	9.1, 9.2
7.2.1, 7.2.4, 7.3, 7.5.1, 7.5.2, 7.5.4, 7.5.5,		measured values.....	9.1
8.2, 9.1, 9.7		independent	9.1, 9.2, 9.4
		measured values.....	9.1

Notas dos Tradutores

- NT 1 (item 3.2)** Ressalte-se que o termo ‘grandeza indicação’ (indication quantity) não existe no VIM 2012. O termo ali consignado é VIM 2012 4.1 - Indicação (Indication). Ver o parágrafo final da Introdução ao presente documento para um melhor entendimento da proposta para o uso da expressão. O documento propõe, na realidade, que o termo indicação, a depender do contexto, possa ser entendido ora como uma grandeza, ora como um valor (observado ou a ser observado). No presente trabalho traduzimos os termos como “grandeza indicação” e “valor indicação”. Este comentário é válido também para a NT 4 abaixo.
- NT 2 (item 3.3)** Os itens 3.3 e 3.4 abordam um mesmo aspecto da medição e devem ser lidos como um único período. O termo ‘systematic error value’ em 3.4 foi traduzido como “*valor erro sistemático*”. No VIM 2012 um termo correlato consignado é *erro sistemático* (**systematic measurement error**)
- NT 3 (item 3.4)** O termo “systematic error value” (traduzido aqui como ‘valor erro sistemático’ não está consignado no VIM 2012. O termo correspondente (VIM 2.17) é ‘**erro sistemático**’ (**systematic measurement error** ; systematic error of measurement ou systematic error).
- NT 4 (item 3.5)** O termo “measurement error quantity” (traduzido aqui como ‘grandeza erro’ ou ‘grandeza erro de medição’) não está consignado no VIM 2012. Um termo correlato existente no VIM 2012 é ‘measurement error’ (erro de medição). Mas este é um termo referente a um valor e não a uma grandeza.
- NT 5 (item 3.18)** x_i é a melhor escolha ... como estimativa para representar a esperança de X_i .
- NT 6 (item 4.1)** O documento referido (JCGM 105. Evaluation of measurement data — Concepts and basic principles) encontra-se (agosto de 2014) em preparação, portando a referência a 2008 é inadequada. Ver bibliografia.
- NT 7 (item 4.1)** O documento referido (JCGM 103. Evaluation of measurement data — Supplement 3 to the “Guide to the expression of uncertainty in measurement” — Modelling) encontra-se (agosto de 2014) ainda em preparação.
- NT 8 (item 8.1)** O referido documento (Evaluation of measurement data — The role of measurement uncertainty in conformity assessment, JCGM 106) foi publicado em 2012 e pode ser obtido no site do BIPM: <http://www.bipm.org/en/publications/guides/gum.html> .
- NT 9 (item 9.1)** Leia-se: ‘Orientação será fornecida...’.
O documento (Evaluation of measurement data — Applications of the least-squares method, JCGM 107) encontra-se (agosto de 2014) ainda em preparação.