

# Projecto VALIMED

## Estudo e Validação do Cálculo de Incertezas de Medição

### A IMPORTÂNCIA DA VALIDAÇÃO DA COMPONENTE EXPERIMENTAL NO ACTUAL ENQUADRAMENTO PROBABILÍSTICO DA MEDIÇÃO

Álvaro Silva Ribeiro  
Laboratório Nacional de Engenharia Civil I.P.  
Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, Portugal, [asribeiro@lnec.pt](mailto:asribeiro@lnec.pt), [www.lnec.pt](http://www.lnec.pt)

## 1. Introdução

A medição tem, na actualidade, uma crescente importância nos contextos Científico, Industrial e Legal, constituindo um dos pilares da organização da sociedade contemporânea. Essa importância decorre de diversos factores, um dos quais é considerado preponderante – a sua ligação ao conceito de Qualidade.

A medição de grandezas encontra-se indissociavelmente ligada ao processo experimental, envolvendo um conjunto de recursos (técnicos e humanos) qualificados que permitem obter informação acerca de fenómenos ou objectos. Este processo constitui uma interface privilegiada para o conhecimento traduzida na expressão do resultado da medição. Este exprime-se por dois parâmetros: a **estimativa** da grandeza mensurável e a **incerteza de medição** associada.

Destes dois parâmetros, o primeiro (a estimativa) tem uma forma de obtenção que, em regra, encontra-se consolidada embora, como se verá adiante, se possa discutir a sua validade nalguns casos. No que respeita à incerteza de medição, esta constitui um parâmetro recente (o primeiro guia sobre a sua avaliação foi editado pela ISO em 1993) [1] que representa uma importante alteração conceptual dos fundamentos da Metrologia e, consequentemente, do próprio conceito de medição. Essa evolução consiste na transição de uma abordagem clássica determinística da medição (associada aos conceitos de estimativa e de erro) para uma abordagem contemporânea probabilística, subjacente à qual corresponde a ideia de que o resultado da medição não é um valor exacto mas um conjunto de valores atribuíveis à mensuranda com determinado grau de probabilidade, i.e., com uma determinada incerteza.

O modelo de medição de grandezas traduz-se frequentemente numa sequência de fases que envolvem o estudo dos fenómenos, a modelação, a concepção e desenvolvimento experimental e a análise de resultados, podendo resultar desta última o retorno à primeira fase de estudo seguindo-se uma perspectiva iterativa e convergente para uma solução satisfatória. Neste processo, a aplicação de processos de validação têm particular interesse em duas das fases mencionadas: na modelação e na fase experimental.

Estas duas fases possuem uma estrutura /Fig. 1) que incorpora elementos formais distintos cuja transição depende da inclusão de elementos de ligação que estabelecem o fluxo de informação entre estas.

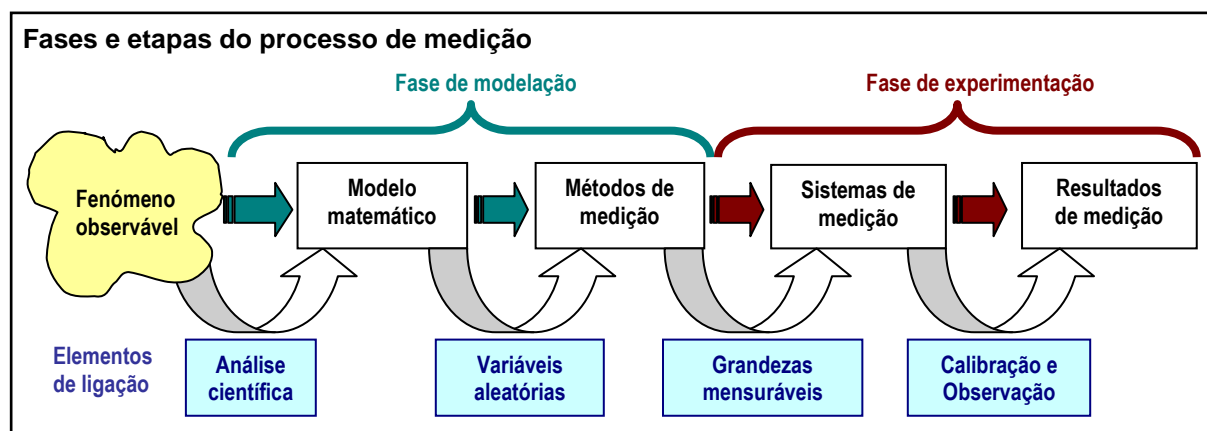


Figura 1 – Diagrama ilustrativo de duas das fases do processo de medição

O conteúdo informativo associado ao processo de medição pode ser afectado pelas imperfeições quer associadas aos modelos matemáticos adoptados e aos métodos associados à modelação quer associadas ao desempenho da instrumentação aplicada na fase experimental. Assim, considera-se admissível que qualquer uma delas possa requerer a evidência da compatibilidade da Qualidade dessa medição com os requisitos inerentes à sua aplicação. A ferramenta de garantia da Qualidade que permite atingir esse objectivo é a validação.

No processo de medição a fase de modelação concentra, em regra, a atenção no que se refere à aplicação de técnicas de validação. Na modelação matemática, a validação decorre, por um lado, da sua capacidade explicativa dos fenómenos em observação e, por outro lado, da sua capacidade preditiva do comportamento dos mesmo, No que se refere ao método de medição este é, em regra, um elemento que, sistematicamente, é sujeito a um processo de validação.

Quando se transita para a fase experimental, excluindo o que se aplica ao método de calibração<sup>1</sup>, existe uma tendência para se considerar que são cumpridas as condições aplicáveis seja no que se refere ao método de correcção dos valores observados como no que se refere aos métodos aplicados na avaliação das incertezas de medição conduzindo a que os resultados sejam frequentemente aceites sem qualquer formalismo de validação.

A presente comunicação pretende: realçar algumas das condições que determinam a necessidade de se proceder à validação da componente experimental do processo de medição, lembrando algumas das condições de aplicabilidade de métodos utilizados na fase experimental; a utilidade de proceder à validação mesmo em circunstâncias em que, aparentemente, os parâmetros obtidos merecem confiança; apresentar soluções que permitam concretizar, nalgumas dessas circunstâncias, o processo de validação.

No conteúdo deste documento incluem-se, ainda, exemplos de aplicação que visam ilustrar a prática associada à validação de resultados de medição.

## 2. Enquadramento probabilístico da medição

A Metrologia, definida como a “Ciência da Medição”, teve uma evolução recente envolvendo uma modificação profunda do formalismo e dos seus fundamentos, associada à transição de uma concepção determinística da medição para uma concepção probabilística. Esta transformação, iniciada por Leaning e Finkelstein em 1979 [2], consistiu na introdução do Postulado da Incerteza, sendo este parâmetro a tradução da dimensão probabilística da medição.

A “incerteza de medição” assumiu, por essa via, o papel central que até então era desempenhado pelo parâmetro “erro da medição”, o qual, de acordo com esta nova abordagem é, pela sua definição<sup>2</sup> [3], inatingível e, consequentemente, apenas tem representatividade num plano conceptual.

Esta transição é expressa nas duas figuras ao lado, sendo que na primeira (Fig. 2) se adopta uma abordagem determinística em que o valor observado e o valor verdadeiro determinam o erro,  $\zeta$ , e na segunda (Fig. 3), se admite que quer o valor observado quer o valor (convencionalmente) verdadeiro ou valor de referência possuem distribuições de probabilidade características

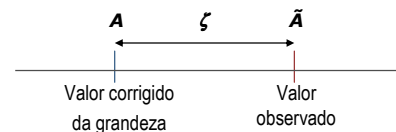


Figura 2 – Erro de medição (abordagem determinística)

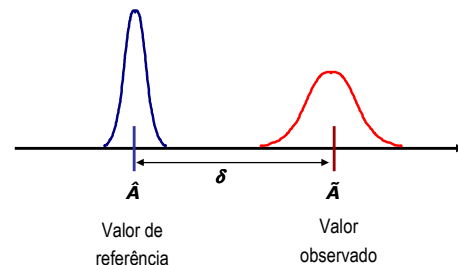


Figura 3 – Desvio de medição (abordagem probabilística)

<sup>1</sup> No contexto de Sistemas de Gestão (da Qualidade) o método de calibração ou corresponde a um método normalizado publicado numa norma ou é sujeito a um processo de validação no âmbito de um processo de acreditação

<sup>2</sup> Define-se erro de medição como a diferença entre o valor lido e o valor verdadeiro da grandeza. Uma vez que não é possível, numa abordagem probabilística, obter o valor verdadeiro da grandeza, consequentemente, torna-se impossível determinar o erro da medição. Este facto não diminui a sua importância, uma vez que se entende que as componentes de incerteza não são mais do que as diferentes contribuições associadas a variáveis aleatórias que determinam a distribuição de probabilidade desse erro.

existindo um desvio de medição.  $\delta$ , que corresponde à diferença entre as duas melhores estimativas desses valores. Esta alteração profunda do formalismo da Metrologia criou a necessidade de se promover o desenvolvimento de métodos visando a avaliação da incerteza de medição.

Tendo entendido a importância desse passo, o BIPM associado a outras organizações internacionais ligadas à Metrologia criou uma Comissão Técnica dedicada ao estudo e desenvolvimento de um método de avaliação de incertezas de medição simultaneamente prático e adequado a múltiplas aplicações, visando promover uma rápida disseminação destes novos conceitos. Assim, como resultado desse trabalho, surgiu em 1993 o “*Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*” [1], também conhecido por “ISO-GUM”, contendo um método baseado no desenvolvimento em série de Taylor de 1ª ordem da relação funcional genérica exposta em (1), originando o que ficou conhecida como a expressão da Lei de Propagação de Incertezas (LPI) apresentada em (2) na sua forma mais geral (incluindo as componentes de correlação entre grandezas de entrada).

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

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \cdot u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=1}^N \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \right) \cdot \left( \frac{\partial f}{\partial x_j} \right) \cdot u(x_i) \cdot u(x_j) \cdot r(x_i, x_j) \quad (2)$$

Nesta expressão, o termo  $u_c(y)$  representa a *incerteza de medição padrão combinada* associada à grandeza de saída,  $y$ , o termo  $u(x_i)$  representa a componente de incerteza de medição associada à grandeza de entrada  $x_i$ ,  $N$  corresponde ao número de grandezas de entrada do modelo matemático (exposto em 1), e  $r(x_i, x_j)$  o coeficiente de correlação associada a cada par de grandezas de entrada.

A incerteza de medição constitui um elemento central da análise da Qualidade da medição. Com efeito, este parâmetro permite comparar a exactidão de medições obtidas por vias distintas (por exemplo, associadas a diferentes equipamentos ou a diferentes métodos de medição, pode ser aplicado na definição do critério de confirmação metrológica, é preponderante para a definição das melhores capacidades de laboratórios, entre outras aplicações relevantes.

O processo conducente à avaliação de incertezas de medição pode ser sistematizado em três etapas fundamentais (Fig. 4):

- a caracterização probabilística das grandezas de entrada -  $x_i$ ;
- a aplicação de um modelo matemático e dos elementos adicionais de cálculo requeridos;
- a avaliação probabilística da grandeza de saída -  $y$ .

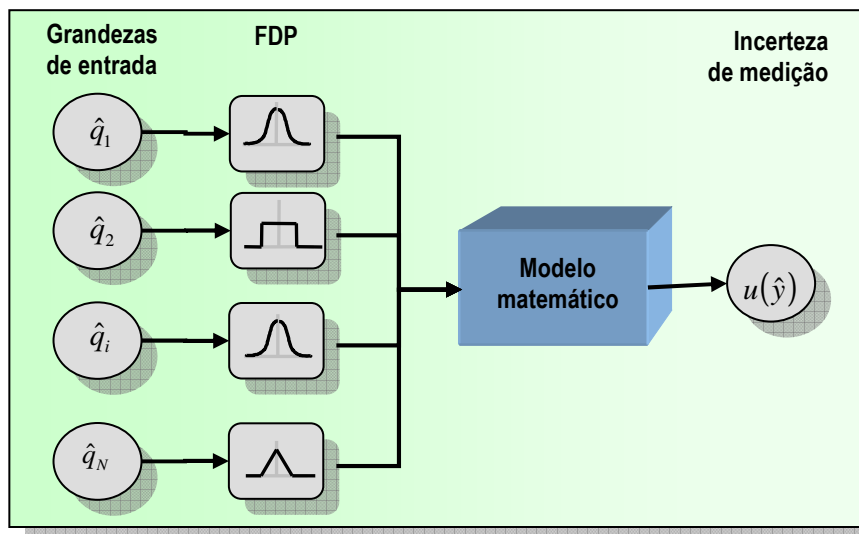


Figura 4 – Esquema associado ao processo de avaliação de incertezas

A primeira etapa envolve uma caracterização da família paramétrica de funções de distribuição de probabilidade (FDP) que melhor descreve cada grandeza de entrada.

A segunda etapa encontra-se relacionada com o cálculo inerente à aplicação da informação associada às grandezas de entrada no modelo matemático conjuntamente com a informação obtida na primeira etapa e elementos adicionais de cálculo requeridos pelo método aplicado<sup>3</sup>.

Na terceira fase efectua-se a análise dos resultados do cálculo visando a obtenção do resultado da medição (estimativa e incerteza de medição), parâmetros que caracterizam a função distribuição de probabilidade da grandeza de saída.

A aplicação do ISO-GUM mostrou-se, após a sua publicação, particularmente eficaz na avaliação de incertezas de medição. Contudo, a sua rápida disseminação cedo proporcionou o aparecimento de problemas metrológicos cuja natureza originou dificuldades, por vezes inultrapassáveis (por razões como, por exemplo, a não diferenciabilidade das relações funcionais, da não-linearidade dos modelos, de sistemas com múltiplas grandezas de saída), à sua aplicação. A necessidade de validação surge, frequentemente, associada a este tipo de situações em que existem condições que determinam a sua aplicabilidade e a Qualidade dos resultados obtidos.

Um problema similar coloca-se relativamente à obtenção da estimativa da grandeza mensurável, onde a determinação da melhor estimativa, por vezes, envolve a existência de condições específicas que carecem de validação. Duas situações que podem ocorrer são:

- a configuração da distribuição de probabilidade faz com que o estimador “média” não seja o parâmetro mais adequado para corresponder à melhor estimativa da grandeza;
- o estimador da grandeza resulta de uma aplicação inapropriada de uma curva de correcção.

Em qualquer dos casos existem soluções conhecidas de métodos robustos que permitem obter resultados de referência, os quais podem ser utilizados em processos de validação. Alguns destes métodos de referência serão apresentados nas secções 4 e 5, dedicados ao problema de validação da correcção dos valores observados usando o método dos mínimos quadrados e ao problema de validação do método de avaliação de incertezas de medição.

### 3. Validação de métodos associados à componente experimental da medição

A validação de métodos entende-se como o conjunto de actividades que visam a evidenciação de que *a aplicação de um método específico é adequado ao objectivo pretendido*.

Esta definição tem um sentido amplo, podendo aplicar-se em contextos mais restritivos como o da medição associada ao objectivo de se obter um resultado de medição a partir das observações de um fenómeno ou de um objecto recorrendo a instrumentação científica e a modelação matemática.

A selecção de uma técnica de validação apropriada pode ser efectuada mediante o conhecimento de um número significativo de técnicas que são amplamente conhecidas e aplicadas noutros contextos, um dos quais é o da validação de software [4], [5]. Conhecendo a natureza dos métodos que se pretende validar (neste caso dedicados à correcção dos valores lidos e da estimativa e incerteza da medição) existem algumas técnicas que se considera particularmente adequadas para esse efeito, designadamente:

- **Prova de exactidão** (proof of correctness) – técnica de avaliação do tipo formal, envolvendo o desenvolvimento de modelos de natureza matemática ou teórica, visando a demonstração, pelo cálculo, da exactidão do método sujeito a avaliação;
- **Comparação com método de referência** - técnica de avaliação baseada na comparação dos resultados obtidos pelo método sujeito a avaliação com os obtidos com um método de referência tendo em conta as condições de base;

---

<sup>3</sup> Por exemplo, a aplicação do ISO-GUM requer que se proceda à diferenciação do modelo matemático relativamente a cada uma das grandezas de entrada e a determinação dos coeficientes de correlação entre pares de grandezas de entrada.

- **Especificações formais** (formal specifications) – técnica baseada em métodos que providenciam especificações formais completas, permitindo efectuar uma avaliação do cumprimento de requisitos formais de aplicação do método ao processo de medição em análise;
- **Conjunto de testes de referência** (reference test sets) – técnica baseada no desenvolvimento de conjuntos de dados de referência e de resultados, com os quais é efectuada uma comparação objectiva com valores equivalentes de teste recorrendo a parâmetros métricos. Esta comparação visa a avaliação do grau de correcção de algoritmos face a requisitos de exactidão associados à sua utilização.

Acerca da aplicação destas técnicas deve-se salientar que estas (e outras que não são aqui mencionadas) podem ser conjugadas entre si de modo a construir testes combinados que, por vezes, são mais adequados a determinadas condições de avaliação do desempenho dos sistemas observados.

O processo de validação requer que se promovam cinco tarefas fundamentais:

- A selecção de uma técnica de validação apropriada;
- o desenvolvimento de um procedimento de validação;
- a adopção de um método para obtenção dos resultados de referência;
- a elaboração de um protocolo de validação do método (incluindo a identificação dos dados de entrada, dos resultados expectáveis e de um critério de validação);
- a elaboração de um relatório contendo a conclusão.

Este processo aplica-se indiscriminadamente quer à validação da estimativa corrigida da grandeza quer à validação da incerteza de medição obtida expondo-se, nas duas secções seguintes, as abordagens para esse efeito.

#### 4. Validação da aplicação do método dos mínimos quadrados

No enquadramento probabilístico da medição entende-se que as componentes sistemáticas do erro devem ser corrigidas e as suas componentes aleatórias constituem a incerteza de medição [1]. Esta abordagem requer que se utilizem métodos para efectuar uma correcção (quando aplicável), sendo o método dos mínimos quadrados provavelmente o de maior disseminação para esse efeito.

O método dos mínimos quadrados consiste em obter os parâmetros de uma regressão linear do tipo:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x \quad (1)$$

Que minimize os desvios dos valores corrigidos face aos valores observados, tendo como suporte o conhecimento de um conjunto de  $n$  pares de valores  $(x_i, y_i)$ . Os estimadores dos parâmetros em causa são determinados usando as conhecidas expressões:

$$b_0 = \hat{\beta}_0 = \bar{y} - b_1 \bar{x} \quad (2)$$

$$b_1 = \hat{\beta}_1 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (3)$$

A aplicação deste método requer, porém, que se verifique um conjunto de requisitos que visam “validar” a sua aplicação: os critérios de Gauss-Markov; e a análise da representação gráfica dos desvios residuais.

No primeiro caso, os critérios de Gauss-Markov são os seguintes:

- a.  $E[\varepsilon_i] = 0, \forall i$  – o valor esperado (média) das diferenças entre os valores medidos e o valor da estimativa obtida em cada ponto devem convergir para o valor nulo;

- b.  $\text{var}[\varepsilon_i] = E(\varepsilon_i - E[\varepsilon_i])^2 = E[\varepsilon_i^2] = \sigma^2$  – a variância associada a cada ponto que determina a regressão linear deverá ser equivalente, permitindo que essa variância seja uma representação da variância da população com igual grau de significância;
- c.  $E[\varepsilon_i \varepsilon_j] = 0, \forall i \neq j$ , ou seja, as estimativas não podem ser correlacionadas.

O procedimento de validação proposto neste caso (Fig. 5) consiste na técnica de validação designada por “especificações formais”, correspondendo a uma avaliação do cumprimento de cada uma das especificações estabelecidas pelos critérios mencionados. Neste caso, o método utilizado para obter os resultados de referência é a aplicação das condições de Gauss-Markov e a análise gráfica dos desvios residuais.

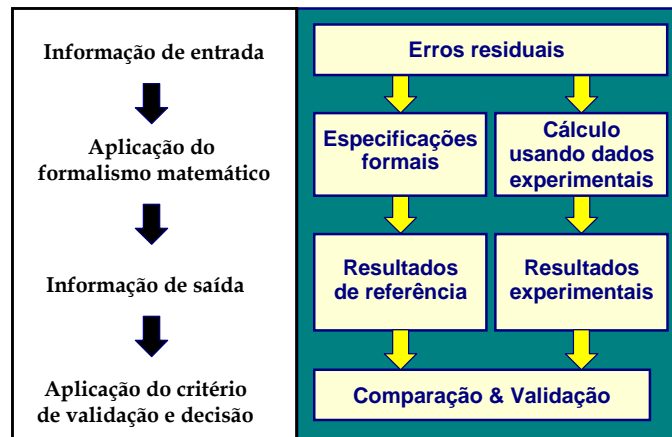


Figura 5 – Procedimento de validação da aplicação do método dos mínimos quadrados

Cada uma das condições mencionadas indica os dados de entrada, os parâmetros de quantificação e os critérios a aplicar. Como exemplo admite-se que os valores médios que determinam uma determinada regressão linear são obtidos recorrendo a amostras cuja dimensão difere de caso para caso originando valores de dispersão distintos (vide Fig. 6). A especificação formal de validação consiste na segunda condição de Gauss-Markov que estabelece que:  $\text{var}[\varepsilon_i] = E(\varepsilon_i - E[\varepsilon_i])^2 = E[\varepsilon_i^2] = \sigma^2$  com  $s^2[\varepsilon_i] = s^2, \forall \varepsilon_i$ , sendo  $s^2$  o estimador da variância. Como se depreenda da Fig. 6, este critério de Gauss-Markov não é cumprido.

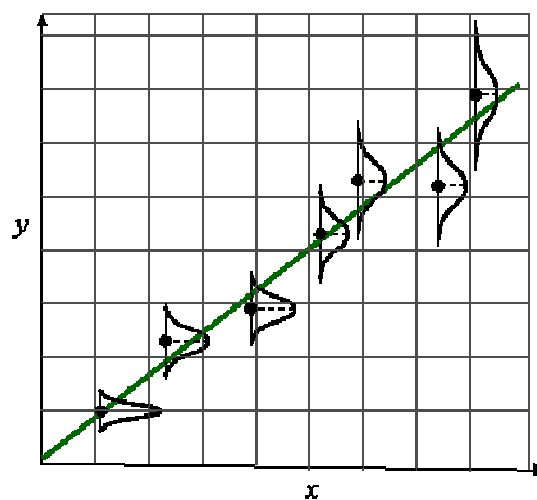
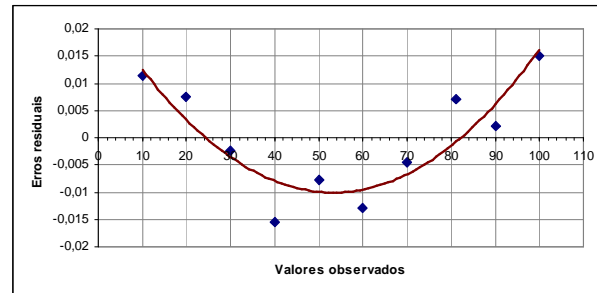
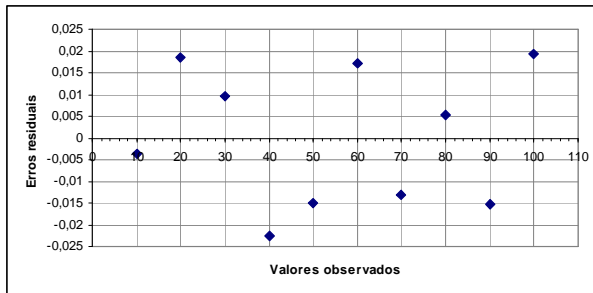


Figura 6 – Representação de uma regressão linear em que os pontos possuem variâncias distintas

Esta avaliação baseada na técnica das especificações formais deverá, ainda, ser complementada com a análise gráfica da distribuição dos desvios residuais. Neste caso, dever-se-á observar se a disposição

desses desvios cumpre o critério de aceitação que consiste em verificar que a sua disposição pode-se considerar como de natureza “aleatória”.

Com as Figuras 7 e 8 procura-se ilustrar duas situações distintas que cumprem os critérios de Gauss-Markov verificando-se, no entanto, que na primeira, a disposição dos desvios residuais possuem uma disposição “aleatória” permitindo a validação da aproximação linear enquanto que na segunda, os desvios residuais apresentam uma tendência que é comum quando a aproximação despreza um termo significativo de segunda ordem o que, conseqüentemente, permite considerar que a solução linear é inadequada para o caso em estudo.



Figuras 7 e 8 – Representação de dois conjuntos de desvios residuais exibindo, no primeiro caso, um conjunto com uma disposição “aleatória” e no segundo caso, indiciando uma não contabilização de uma componente de segunda ordem

Esta forma visual de análise da distribuição dos desvios residuais pode ser aplicada a outros tipos de curvas de correcção (por exemplo, polinomiais), permitindo complementar o uso de procedimentos de análise formal que se possam desenvolver numa fase preliminar.

## 5. Validação do método de avaliação de incertezas de medição

Actualmente admite-se a utilização de diferentes métodos visando a avaliação de incertezas de medição, com destaque para o ISO-GUM devido à sua disseminação, o método de Monte Carlo recentemente introduzido como via alternativa à utilização do ISO-GUM [6] e, finalmente, o método analítico o qual, pela sua natureza, pode ser aplicado desde que exista a possibilidade de se dispor de um enquadramento matemático formal do problema metrológico.

A validação do método de avaliação das incertezas de medição pode ser aplicado em dois contextos:

- na perspectiva de validação do cumprimento das condições de aplicação do método em causa;
- na perspectiva de validação dos resultados de medição.

Da diversidade de métodos, aquele que contém requisitos mais estritos à sua aplicação é o ISO-GUM e, por essa razão, a sua validação (frequentemente ignorada) concentra a atenção. As condições fundamentais da aplicação do ISO-GUM, nalguns casos definidas implicitamente em [1], são as seguintes:

- a correcção completa de desvios sistemáticos;
- a simetria das distribuições de probabilidade associadas às grandezas de entrada;
- a aplicação do Teorema do Limite Central de que resulta necessariamente uma distribuição de probabilidade Gaussiana da grandeza de saída;
- a diferenciabilidade do modelo matemático;
- a linearidade da relação funcional<sup>4</sup>.

<sup>4</sup> O ISO-GUM apresenta uma formulação alternativa da LPI contendo os termos de 2ª ordem da expansão em série de Taylor. Esta solução, porém, apenas expande a aplicabilidade para uma classe limitada de modelos matemáticos, sendo mais complexa e, por vezes, desconhecida de muitos utilizadores no método em causa.

O incumprimento de qualquer uma das condições mencionadas implica a possibilidade de incorrecção dos resultados obtidos, designadamente, da estimativa da grandeza mensurável e da sua incerteza de medição e, conseqüentemente, a recomendação para a aplicação de um processo de validação decorre desta circunstância.

Para se efectuar uma validação dos resultados obtidos pelo ISO-GUM quando qualquer uma das condições referidas não é cumprida, a técnica de validação adoptada consiste na *comparação com um método de referência*.

A concretização ideal deste processo faria uso da via analítica como referência, no entanto, o grau de complexidade atingido em grande parte dos modelos matemáticos associados a processo de medição impede a sua aplicação. Ao contrário, o MMC tem-se mostrado particularmente adaptado a essa função, sabendo-se que converge para as soluções exactas, que não dispõe de constrangimentos significativos e, também, porque não requer informação adicional aquela que habitualmente se dispõe para a aplicação do ISO-GUM (a sua aplicação não requer, por exemplo, o conhecimento das derivadas parciais do modelo matemático). Refira-se, porém, que o próprio MMC pode ser validado recorrendo à comparação com o resultado da convolução de FDPs usando a via analítica [7];

A técnica de validação baseada na comparação com um método de referência apresenta uma configuração do tipo da exposta na Figura seguinte.

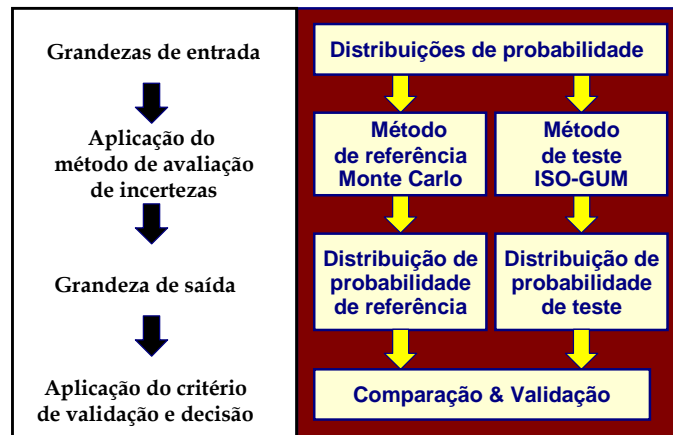


Figura 9 – Procedimento de validação da aplicação do método ISO-GUM

No processo de validação a qualidade da informação de referência é essencial, salientando-se que esse aspecto é particularmente relevante no MMC, uma vez que uma das suas características consiste em fornecer a distribuição de probabilidade da grandeza de saída sendo, por isso, mais informativa que o método ISO-GUM cujo resultado de saída é meramente paramétrico.

Esta importante particularidade permite, em qualquer caso, que se possa validar não só o intervalo de incerteza (objectivo apontado nesta secção) mas, também, a melhor estimativa da grandeza.

Da diversidade de exemplos que podem ser apresentados de forma a ilustrar esta abordagem, é apresentado o estudo do caso particular associado a um modelo matemático associado a uma função do tipo  $Y = X_1 / X_2$ ;

Este estudo reflecte uma aplicação comum em contextos de análise química em que se pretende efectuar a medição de grandezas como, por exemplo, a concentração, a fracção molar ou a molaridade.

$$C = \frac{X_1}{X_2} \quad (4)$$

Admitindo que a grandeza de entrada  $X_1$  possui um valor médio de 0,2 com uma FDP rectangular cujos limites são  $\pm 0,05$  e que a grandeza de entrada  $X_2$  possui um valor médio de 0,5 com uma FDP rectangular cujos limites são  $\pm 0,1$  então, a estimativa de  $C$  é igual a 0,4 sendo a incerteza de medição obtida por:



$$u^2(C) = \frac{C^2}{X_1^2} \cdot u^2(X_1) + \frac{C^2}{X_2^2} \cdot u^2(X_2) = \frac{0,4^2}{0,2^2} \cdot \frac{0,05^2}{3} + \frac{0,4^2}{0,5^2} \cdot \frac{0,1^2}{3} \quad (5)$$

$$u(C) = \pm 0,07(4) \quad (6)$$

$$U_{95}(C) = 2,00 \cdot u(C) \approx \pm 0,15 \quad (7)$$

Utilizando o MMC, verifica-se a existência de uma assimetria que se manifesta nos limites do intervalo de incerteza de medição apresentados no Quadro 1 (como se depreende da Fig. 10 onde se apresentam os intervalos de incerteza obtidos usando o ISO-GUM e o MMC).

Quadro 1 – Resultados obtidos usando o ISO-GUM e o MMC (Exemplo 1)

| Parâmetros                                      | ISO-GUM | MMC     |
|---|---------|---------|
| Valor médio                                     | 0,40    | 0,40(5) |
| Mediana   | 0,40    | 0,40(0) |
| Limite inferior do Intervalo de incerteza (95%) | 0,25    | 0,278   |
| Limite superior do Intervalo de incerteza (95%) | 0,55    | 0,565   |
| Amplitude do Intervalo de incerteza (95%)       | 0,30    | 0,287   |

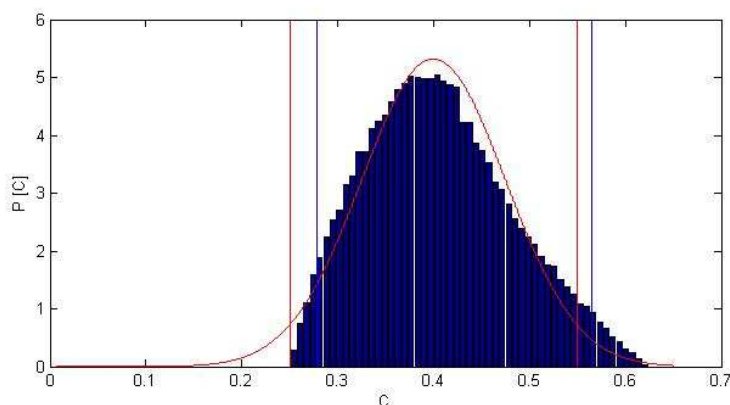


Figura 10 – Distribuições de probabilidade e intervalos de incerteza associados ao primeiro exemplo obtidos usando o ISO-GUM (encarnado) e o MMC (azul)

A observação da Fig. 10 permite verificar, desde logo, a configuração não-Gaussiana da distribuição de probabilidade associada à grandeza de saída obtida usando o MMC, bem como, a assimetria reflectida no facto do intervalo de incerteza não ser centrado no valor médio (*vide* Quadro 1). Verifica-se, também, que existe uma diferença entre a amplitude desse intervalo de incerteza obtido usando o MMC comparativamente com o obtido usando a abordagem do ISO-GUM, sendo o primeiro inferior ao segundo em cerca de 4%.

## 6. Conclusões

No processo de medição a componente experimental constitui um dos elementos que contribui para a Qualidade do resultado de medição, o que justifica a necessidade de se aplicarem processos de validação desses resultados sempre que subsistam dúvidas acerca das vias adoptadas para a obtenção das estimativas da grandezas mensuráveis e das respectivas incertezas de medição.

A aplicação de um processo de validação requer o conhecimento prévio: das condições de aplicabilidade dos métodos estatísticos e probabilísticos que determinam as estimativas e da natureza da modelação matemática que suporta os cálculos; da existência de métodos que possuam a robustez e a exactidão necessárias para a sua aceitação como métodos de referência; e o conhecimento dos requisitos associados

à aplicação em causa. Com base nesse conhecimento, podem-se estabelecer procedimentos de validação adequados visando promover a garantia da Qualidade, o que constitui um elemento chave no âmbito de Sistemas de Gestão.

Neste documento foram apresentados argumentos e exemplos que sustentam a necessidade de se proceder à validação da componente experimental da medição, bem como, algumas técnicas e estratégias de concretização desse objectivo, com destaque para as que são orientadas para a validação da incerteza de medição, sabendo que esta constitui uma componente central do resultado da medição no actual enquadramento probabilístico da medição.

## 7. Referências bibliográficas

- [1] *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*, BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML. Geneva, Switzerland, 1995.
- [2] Leaning, M. S. and Finkelstein, L. – A Probabilistic Treatment of Measurement Uncertainty in the Formal Theory of Measurement. In *Acta IMEKO VIII.*, Elsevier, Amsterdam, 1979
- [3] Vocabulário Internacional de Metrologia (VIM) – GUIA ISO/IEC 99:2007 – Versão Portuguesa (Novembro de 2008). 3ª Edição. Instituto Português da Qualidade, Caparica, Portugal.
- [4] Wichmann, B., Parkin, G. and Barker, R. – SSfM Best Practice Guide No 7: Validation of Software in Measurement Systems *Technical Report DEM-ES-014*, National Physical Laboratory, Teddington, UK, 2007.
- [5] Ribeiro, A. S. – Validação de Ferramentas Computacionais. Elementos Sobre a sua Incidência em Metrologia. Informação Técnica de Metrologia (ITM5). Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal, 2001.
- [6] *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 Guides in Metrology (JCGM), 2008.
- [7] Dietrich, C.F. – *Uncertainty, Calibration and Probability*, 2nd edition. Adam Hilger, UK, 1991.