

# IMPLICAÇÕES ECONÓMICAS DA GESTÃO METROLÓGICA DA INSTRUMENTAÇÃO

A. Silva Ribeiro <sup>1</sup>, J. Alves e Sousa <sup>2</sup>, C. Sousa <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Laboratório Nacional de Engenharia Civil

<sup>2</sup> Laboratório Regional de Engenharia Civil – R. A. Madeira

<sup>3</sup> Instituto Superior de Engenharia do Porto

**Palavras-chave:** instrumentação, gestão metrológica, confirmação metrológica, eficiência.

## 1. Introdução

A importância crescente das medições na Sociedade resulta destas assumirem, cada vez mais, um papel fundamental na garantia da Qualidade na actividade desenvolvida quer em Laboratórios quer em actividades de produção. Este seu papel associado ao seu carácter transversal motivam a necessidade de se analisar o impacto económico associado aos processos de gestão metrológica inerentes à medição [1], [2].

A Qualidade da medição depende de diversos factores, sendo um dos mais importantes o desempenho do equipamento de medição que constitui a interface para a obtenção dos resultados face a requisitos metrológicos estabelecidos em função das aplicações pretendidas. A análise requer, portanto, o conhecimento dos requisitos aplicáveis (de natureza normativa ou determinada pelos próprios processos) e a existência de ferramentas que permitam a concretização da caracterização e da avaliação da capacidade destas para cumprir os requisitos.

Refira-se que a actividade laboratorial e industrial se desenvolve, cada vez mais, num enquadramento de Sistemas de Gestão (da Qualidade), SGQ, no âmbito do qual se estabelecem os níveis de confiança que determinam os requisitos a cumprir [3].

No que se refere à análise e avaliação do desempenho metrológico de equipamentos de medição, existem métodos e ferramentas de gestão metrológica apropriados para esse efeito, salientando-se como particularmente relevantes os que se encontram associados à definição das cadeias de rastreabilidade, ao estabelecimento da periodicidade de calibração, à confirmação metrológica, a procedimentos de correcção de resultados de medição, à aplicação de processos de manutenção preventiva e à realização de ensaios de comparação interlaboratorial.

A aplicação destes processos tem, necessariamente, duas perspectivas de observação: a técnica e a económica. Com efeito, a sua aplicação num contexto de gestão constitui um suporte das decisões e, conseqüentemente, possui um impacto económico que poderá ser directo (por exemplo, inaptidão de instrumentação, aquisição de novos padrões, encargos com processos de calibração) ou indirecto (por exemplo, tempo de inoperacionalidade de instrumentação, aumento de actividade dos técnicos, defeitos e reclamações).

Neste contexto, torna-se particularmente relevante o estabelecimento de análises económicas de custo-benefício como elementos de apoio à gestão e, simultaneamente, dispor de meios apropriados para concretizar a aplicação dos métodos de gestão metrológica da instrumentação (incluindo as componentes de planeamento, de desenvolvimento dos processos e de adequação dos meios envolvidos). No quadro da gestão metrológica da instrumentação aplicada em laboratórios de calibração e ensaio, os processos principais (mas não únicos) com impacto económico directo e indirecto são a confirmação metrológica, a determinação da periodicidade das calibrações e os ensaios de aptidão e de comparação interlaboratorial, pelo que a análise desenvolvida neste documento se centra nestes.

O objectivo deste estudo consiste em apontar factores determinantes para uma adequada análise económica da gestão metrológica da instrumentação e algumas vias para o estudo e desenvolvimento de soluções de racionalização e de optimização desses métodos tendo como base a experiência desenvolvida pelos autores em laboratórios de calibração e ensaio.

## 2. Avaliação de risco em Metrologia

A actividade metrológica possui duas fontes potenciais de risco, uma das quais intrínseca, decorrente do contexto legal ou comercial em que é desenvolvido e outra, associada à sua natureza transversal, realizada frequentemente a montante de outras actividades científicas e técnicas cuja componente de risco é significativa (por exemplo, associado à Medicina, a ensaios nucleares, químicos e biológicos ou aos diversos ramos da Engenharia) [4].

O risco metrológico associado à aplicação da instrumentação tem duas vertentes que importa analisar: a que decorre do uso indevido de instrumentação (com conseqüências económicas e, eventualmente, para a integridade humana e de instalações) e a que decorre da rejeição de instrumentação adequada (com conseqüências económicas directas).

Uma forma de caracterizar o risco envolvido no processo metrológico consiste em introduzir dois parâmetros probabilísticos,  $\alpha_M$  e  $\beta_M$ , aplicados em contextos similares correspondendo aos conhecidos erros tipo I e tipo II, o

primeiro dos quais representa a probabilidade de decisão de rejeição de um processo cujo desempenho metrológico é adequado e o segundo, de decisão de aceitação de um processo sendo o desempenho metrológico é inadequado. O Quadro seguinte apresenta todas as diferentes possibilidades:

Quadro 1 – Probabilidades associadas à classificação de processos metrológicos

Desempenho	Decisão	Aceitação	Rejeição
Adequado		$1 - \alpha_M$	$\alpha_M$
Inadequado		$\beta_M$	$1 - \beta_M$

Num âmbito mais generalista, aplicável neste contexto, é habitual designar o erro tipo I,  $\alpha_M$ , como risco do fornecedor e o erro tipo II,  $\beta_M$ , como risco do cliente.

Considerando-se que o nível de confiança adoptado em processos metrológicos corresponde a 95 % (aproximadamente dois desvios-padrão de uma distribuição gaussiana), este valor deverá determinar os níveis de confiança (e de risco) reflectidos nos parâmetros mencionados.

Assim, se o critério de aceitação for demasiado restritivo, a consequência é o aumento da probabilidade,  $\alpha_M$ , traduzindo um acréscimo de custos associados ao fornecedor, enquanto que, no caso do critério de aceitação ser menos restritivo, aumentará a probabilidade,  $\beta_M$ , cuja implicação é o aumento do risco comercial potencial.

Em qualquer das situações, a consequência dos efeitos é prejudicial (embora o erro tipo II tenha consequências potencialmente mais gravosas, o que deve ser tido em conta), o que suporta a convicção de que o estabelecimento do critério de aceitação deverá ser baseado, tanto quanto possível, em métodos que optimizem a relação custo-benefício subjacente à definição da probabilidade de erro (tipo I e tipo II) que é assumida *a priori*.

Em regra, é expectável que este tipo de erros possua um margem definida de probabilidade, o que, traduzido no contexto da Metrologia científica, Legal e industrial, é da ordem de 5% (remanescente de intervalos de confiança de 95%) e nos casos em que a integridade humana está em causa, da ordem de 1% ou menos.

Tendo como pressuposto que se encontra previamente estipulado um determinado intervalo de confiança, torna-se desejável que as organizações desenvolvam métodos que permitam efectuar um controlo metrológico visando obter a melhor aproximação face aos limites de probabilidade estabelecidos, sendo evidente que ao afastar-se desses estará a incrementar ou o risco associado à actividade metrológica ou os encargos económicos associados à gestão da instrumentação.

### 3. Confirmação metrológica

Por definição, a calibração é uma operação que estabelece a relação entre os valores da grandeza provenientes de padrões e as correspondentes indicações obtidas em instrumentos de medição, sempre considerando as incertezas envolvidas. Este acto metrológico, realizado por imposição da qualidade, é aceite universalmente e já ninguém põe em dúvida ser absolutamente necessário para que as medições sejam de confiança.

À calibração está associado um custo, por vezes considerado elevado, que poderá levar alguns decisores a ponderar se vale a pena calibrar. Ora, entre não fazer calibração e calibrar tudo que existe na empresa, existe um ponto de equilíbrio que é importante ser bem definido, pois que a esse ponto de equilíbrio está associada a possibilidade de minimizar custos mantendo assegurada a confiança nas medições [5].

Com o resultado de uma calibração podem-se atribuir valores das mensurandas às indicações observadas no equipamento em calibração e fazer as correcções necessárias no acto de medir.

A calibração permite determinar erros associados aos instrumentos e, conseqüentemente, definir correcções a fazer perante as indicações obtidas durante o processo de medição. Outras propriedades metrológicas podem ser determinadas, nomeadamente efeito de grandezas de influência, linearidade ou desvio de zero.

Tudo isto se aplica não só a instrumentos de medição, mas também a medidas materializadas ou a materiais de referência.

Assim, verifica-se que estabelecer uma relação entre os valores da grandeza provenientes de padrões e as indicações correspondentes, não constitui uma declaração de que o instrumento está apto a medir aquilo que se pretende, nem as outras propriedades metrológicas determinadas na calibração são acompanhadas de qualquer declaração de conformidade. A entidade que realiza a calibração deve fazer evidência de que a calibração foi efectuada e quando o foi – é a conhecida etiqueta que diz que a calibração foi realizada em determinada data, mas aí nada é declarado acerca da sua conformidade.

Resulta então que a calibração por si própria não é conclusiva da conformidade do equipamento de medição! Esta conclusão contraria o facilitismo que poderia pensar-se estar associado à obtenção de um certificado de calibração. Facilmente nos apercebemos que os erros, incertezas e outras propriedades metrológicas podem ser adequados para determinadas medições e perfeitamente inaceitáveis para outras.

Há, portanto, que validar o certificado de calibração para a função que lhe é atribuída. Essa validação, suportada num acto de verificação, tem o nome de **Confirmação Metrológica (CM)**, a qual é geralmente feita pelo utilizador, embora a norma ISO 17025 [6] preveja a emissão de certificados de calibração conclusivos (5.10.4.2 da ISO 17025).

A definição é dada pela norma NP EN ISO 10012 [7], onde o acto de comparar os resultados de uma calibração com os necessários para o trabalho a que se destina o instrumentos, bem como a protecção e marcação, incluindo o ajuste e eventuais reparações, se chama Confirmação Metrológica.

Pode ser afirmado que a calibração por si só não tem qualquer validade se não for objecto de análise que leve à conclusão de conformidade.

Os métodos seguidos para tomar a importante decisão de colocar ou retirar de serviço um instrumento de medição, são abordados no presente texto, podendo ser considerada como uma oportunidade extremamente actual (em tempo de crise) cuja consumação pode permitir uma redução de custos significativos quer seja ao nível da empresa quer ao nível da sociedade em geral.

O processo de confirmação metrológica tem 2 entradas (Figura 1):

os requisitos metrológicos do cliente (RMC);

as características metrológicas do equipamento de medição (CMEM).

e uma saída:

A evidência da Confirmação Metrológica

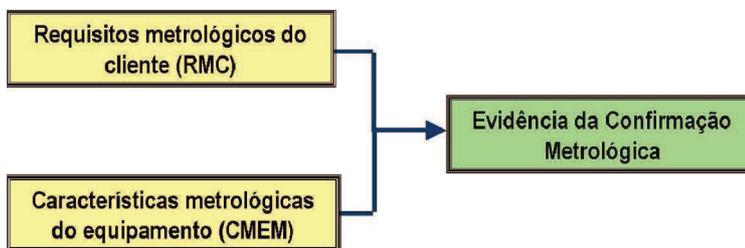


Figura 1 – Fluxograma do processo de confirmação metrológica

A simplicidade do processo de confirmação metrológica é notável, mas a sua compreensão e correcta aplicação é seguramente uma oportunidade de racionalização de custos com a medição.

O processo de confirmação metrológica pode ser efectuado usando abordagens distintas, as quais têm um impacto directo mensurável em custos da decisão.

O método mais difundido consiste na aplicação da seguinte relação:

$$|E| + |U| < EMA \quad (1)$$

onde  $E$  representa o erro máximo observado em calibração,  $U$  o valor positivo do intervalo da incerteza de medição expandida (para um nível de confiança de 95 %) e  $EMA$  o erro máximo admissível.

A utilização desta abordagem tem sido objecto de análise [8] havendo propostas alternativas que passam pela utilização de um enquadramento probabilístico mais consentâneo com a interpretação contemporânea do processo de medição. Uma dessas alternativas consiste, simplesmente, em substituir a componente de “Erro” associada ao desvio experimental pela variância,  $V(E)$ , de uma distribuição de probabilidade que represente adequadamente a distribuição dos desvios instrumentais (por exemplo, gaussiana ou rectangular) e um parâmetro probabilístico de avaliação, por exemplo, a incerteza (instrumental) alvo,  $U_A$  (cuja definição encontra-se exposta na versão actualizada do VIM [9]):

$$k_t(\nu) \cdot \sqrt{s^2(E) + u^2} < U_A \quad (2)$$

sendo  $k_t(\nu)$  o factor de expansão,  $s(E)$ , o desvio-padrão experimental dos desvios instrumentais (ou dos erros residuais, no caso de se aplicar uma correcção aos valores lidos) e  $u$  a incerteza de medição padrão.

A aplicação a um caso real da calibração de um termómetro de dilatação de líquido-em-vidro [10], que se segue, permite evidenciar quer o efeito na decisão resultante do processo de confirmação metrológica quer a análise comparativa num diagrama custo-benefício da utilização das diferentes abordagens.

Quadro 2 – Resultados obtidos nua calibração de um termómetro de dilatação de líquido em vidro

Temp. de referência $T_{ref} / ^\circ\text{C}$	Temp. lida no termómetro $T_i / ^\circ\text{C}$	Desvio instrumental $\delta T_i = T_i - T_{ref}$ $/ ^\circ\text{C}$	Incerteza de medição expandida $U_{95\%}(\delta T_i) / ^\circ\text{C}$
0,03	0,0	-0,03	0,10
5,08	5,1	0,02	0,10
10,15	10,1	-0,05	0,10
15,15	15,1	0,01	0,10
20,15	20,1	-0,05	0,10
25,11	25,2	0,09	0,10
30,09	30,2	0,11	0,10
35,14	35,1	-0,04	0,10
40,01	40,1	0,09	0,10

Considerando os dados apresentados no Quadro 2, verifica-se que, para um EMA de  $0,2^\circ\text{C}$  e com a aplicação do critério exposto na expressão (1), a decisão seria a rejeição do equipamento em causa,

$$0,11^\circ\text{C} + 0,10^\circ\text{C} > 0,2^\circ\text{C}. \quad (3)$$

Em alternativa, admitindo que o valor da incerteza alvo assume um valor equivalente ao EMA, ou seja,  $U_A = 0,2^\circ\text{C}$  e considerando que a distribuição dos desvios instrumentais admite uma distribuição gaussiana, então, os parâmetros dessa distribuição serão dados por:

$$\hat{E} = \delta\bar{T} = \frac{\sum \delta T_i}{n} = 0,016^\circ\text{C} \approx 0,0^\circ\text{C}; \quad (4)$$

$$s(\bar{E}) = \sqrt{\frac{\sum (\delta T_i - \delta\bar{T})^2}{n \cdot (n-1)}} \approx 0,020^\circ\text{C}; \quad (5)$$

de que resulta,

$$k_t(v) \cdot \sqrt{s^2(E) + u^2} = 2,05 \cdot 0,053 \approx 0,11 < U_A. \quad (6)$$

A expansão do resultado obtido para um intervalo de confiança de 95% efectua-se usando a fórmula de Welch-Satterthwaite [11-13] (usando os factores de relação entre distribuições t de student e gaussiana, considerando oito graus de liberdade associados aos erros e 50 associados à incerteza de medição). Desta forma, verifica-se que a adopção do critério condiciona a decisão, à qual encontram-se associados custos.

O resultado de uma análise comparativa do custo devido à aplicação destas abordagens encontra-se exposto nas Figuras 2 e 3, onde se comparam as magnitudes das contribuições associadas à abordagem convencional (C) e à abordagem proposta neste documento, considerando o caso em que a função distribuição de probabilidade (FDP) do erro assume a forma Gaussiana (G) ou a forma rectangular (R).

A representação da curva de custos é sobreposta à representação gráfica de base que indica a probabilidade associada ao erro tipo II em função da magnitude do erro (Fig. 2) ou da magnitude do primeiro membro do critério de CM (Fig. 3), estabelecendo-se esta relação em virtude da transição entre a aceitação e a rejeição corresponder ao limite de confiança (probabilidade) de 95 %.

No primeiro caso, Fig. 2, a representação mostra que, consoante a abordagem adoptada, a magnitude da contribuição para o critério (correspondente à probabilidade de 95 %) se obtém em diferentes posições da escala (igual a  $0,45E$  com a FDP Gaussiana; igual a  $0,95E$  com a FDP rectangular; e igual a  $E$ , usando a abordagem convencional, sendo  $E$  o erro máximo). Assim, a maior contribuição resultará de se aplicar a abordagem convencional.

No segundo caso, Fig. 3, procura-se comparar a magnitude dos parâmetros do primeiro membro do critério de confirmação metrológica, tomando como máximo o valor correspondente à soma, em valores absolutos, do erro e da incerteza (C). Neste caso, também se verifica uma relação de magnitudes desfavorável à abordagem convencional.

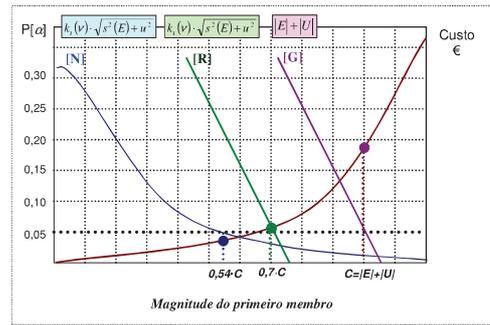
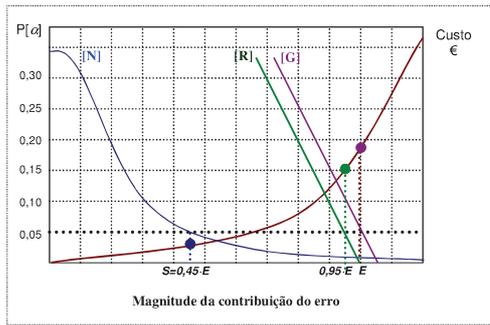


Figura 2 – Comparação de curva de custo com a contribuição associada ao erro máximo, em três casos distintos.

Figura 3 – Comparação de curva de custo com a magnitude do primeiro membro do critério de confirmação metrológica, em três casos distintos.

#### 4. Periodicidade de calibração

A definição dos intervalos de calibração aplicados ao equipamento de medição de uma organização constitui uma componente da gestão metrológica com elevado impacto na actividade das organizações.

O processo de calibração envolve diversos aspectos que concorrem para esse impacto, nomeadamente, os encargos directos decorrentes da realização interna ou externa da sua concretização, e os encargos indirectos decorrentes da duração do seu estado de inoperacionalidade. Assim, numa perspectiva de gestão, importa minimizar os riscos inerentes à aplicação inadequada do equipamento e, simultaneamente, minimizar os encargos associados a essa actividade.

A decisão da periodicidade de calibração, de acordo com o entendimento actual normativo aplicável a laboratórios de calibração e ensaios [6], é uma atribuição da organização, devendo esta **recolher a informação** relevante, **estabelecer um plano** e **seleccionar métodos** de modo a estabelecer intervalos de calibração adequados. Estes constituem os três enquadramentos a ter em consideração:

- recolher a informação de base disponível *a priori*;
- definir um plano com base na actividade e na exigência associadas à aplicação dos equipamentos;
- promover a selecção do(s) método(s) adequado(s) à definição optimizada do intervalo de calibração e concretizar a sua aplicação.

O objectivo desta secção será o de caracterizar algumas das opções incorporadas em cada um destes enquadramentos e apresentar vias de análise e selecção de métodos baseadas na experiência dos autores relacionada com a actividade de laboratórios de Metrologia.

##### 4.1 Recolha da informação de base

A definição do intervalo de calibração de um equipamento de medição depende da informação disponível relativamente a aspectos tão distintos como, por exemplo, a natureza e exigências da sua aplicação, as suas características metrológicas e a sua robustez, e o seu historial de calibração. Naturalmente que, quanto mais vasto for o seu historial e o conhecimento das contribuições envolvidas, mais detalhado e adequado poderá ser o processo de concretização do estudo que conduz à optimização do intervalo de calibração. Da diversidade de fontes de informação a considerar para a definição do intervalo de calibração, indicam-se as mais comuns:

- a. Natureza da aplicação e de serviço,
  - grandeza mensurável e tolerância permitida;
  - nível de esforço a que o equipamento é sujeito (número e tipo de utilização, condições ambientais);
  - exactidão da medição requerida;
  - formação dos recursos humanos.

Historial de calibrações,

- estabilidade / deriva observada no historial de calibrações;
- incerteza e depreciação da incerteza ao longo do tempo.

Requisitos da qualidade,

- requisitos de garantia da qualidade;

informação de taxas de falha.

#### 4.2 Plano de gestão das calibrações

A aplicação de métodos na optimização dos intervalos de calibração favorecendo a redução de encargos com esse processo, envolve encargos próprios que decorrem da análise prévia, desenvolvimento do método e a sua manutenção (em regra, operações de monitorização e ajustamento de parâmetros temporais).

A experiência evidencia que, em muitos casos, apenas uma parte da instrumentação é responsável por uma parte significativa dos riscos e dos encargos associados. Em laboratórios de metrologia, por exemplo, verifica-se uma concentração substancial nos padrões de referência que ocupam o topo das cadeias internas de rastreabilidade internas.

Neste enquadramento, considera-se ajustado desenvolver um plano de optimização dos intervalos de calibração que aplique a conhecida regra de Pareto, com eventuais correcções de parametrização adequadas, considerando que cerca de 20 % dos EMM serão responsáveis por cerca de 80 % do risco e dos custos. A racionalidade do plano implica que exista um maior esforço de rigor na definição dos intervalos de calibração desses 20 % traduzível

na aplicação de métodos que promovem uma convergência mais rápida para o intervalo optimizado, devendo aplicar-se métodos menos exigentes nos restantes casos. Desta forma, poder-se-á maximizar a rentabilidade do plano de acção, minimizando o esforço aplicado nos estudos e na implementação das abordagens adoptadas.

#### 4.3 Selecção de métodos de optimização dos intervalos de calibração

Existe uma diversidade considerável de métodos que podem ser aplicados na optimização dos intervalos de calibração, desde os mais simples envolvendo uma relação directa com uma periodicidade estabelecida com base em histórico pessoal ou externo, até métodos mais complexos associados a uma capacidade preditiva apoiada na utilização do método da máxima verosimilhança aplicado à função de fiabilidade.

Os métodos mais comuns encontram-se descritos em [14] e [15], sendo apresentados em seguida, numa sequência dos mais simples para os mais complexos.

*Método dos intervalos genéricos;*

*Método dos intervalos adaptados;*

*Método de análise de Engenharia (baseado em especificações de Engenharia);*

*Métodos reactivos:*

*Ajustamento automático "staircase";*

*Cartas de controlo;*

*Tempo de utilização;*

*Teste caixa-negra "black-box" (incorporando avaliações intermédias entre calibrações sucessivas) ;*

*Abordagens estatísticas e probabilísticas:*

*Método da máxima verosimilhança (MLE).*

Os três primeiros tipos de métodos são mais simples de concretizar, sendo facilmente aplicáveis a equipamentos e padrões de trabalho com menores requisitos de exactidão e, frequentemente, envolvendo menores custos associados à calibração. A sua análise é menos exigente e possui uma convergência mais lenta para o intervalo óptimo de calibração.

Os restantes são mais exigentes e rigorosos, nomeadamente, nos requisitos de informação de entrada mas a convergência é, em regra, muito mais elevada tornando-os recomendáveis para equipamentos de referência e para os que envolvem custos de calibração mais significativos para a organização.

No que se refere ao processo de ajustamento do intervalo de calibração, os métodos mencionados enquadram-se em duas abordagens alternativas:

Métodos reactivos (para os quais o ajustamento do intervalo de calibração resulta de dados históricos de calibração e é realizado *a posteriori*);

Métodos estatísticos e probabilísticos, suportados na função de fiabilidade e com recurso ao método da máxima verosimilhança.

O método reactivo mais simples designa-se por "método de resposta simples", cujo modelo matemático é o seguinte:

$$t_{n+1} = t_n (1 + \Delta t_a) y_n + t_n (1 - \Delta t_b) \bar{y}_n \quad (7)$$

sendo  $n = 0, 1, \dots$  o contador,  $t_n$  a duração do  $n$ ésimo intervalo de calibração,  $\Delta t_a > 0$  e  $\Delta t_b > 0$  parâmetros de cor

recção dos intervalos de tempo,  $y_n$  uma variável booleana igual a 1 se o resultado da calibração se encontra dentro da tolerância e 0 se o resultado se encontra fora de tolerância ( $\bar{y}_n$  representa o complemento de  $y_n$ ).

A abordagem estatística tem como objectivo efectuar a modelação da função fiabilidade que melhor é ajustada aos dados de calibração. Essa função será utilizada para se obter uma estimativa do intervalo de calibração optimizado que corresponde à sua intersecção com o parâmetro “fiabilidade-alvo” (Fig. 4) [14] e [16].

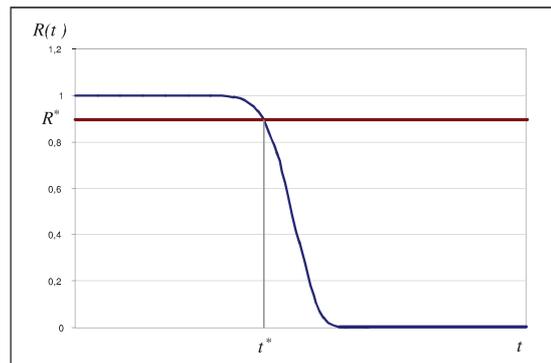


Figura 4 – Determinação do intervalo de calibração óptimo usando uma distribuição de probabilidade de Weibull.

O procedimento aplicado consiste em se estabelecer previamente o parâmetro “fiabilidade-alvo”,  $R^*$ , usando as regras estabelecidas em [14], sendo os intervalos atribuíveis a esse parâmetro dependentes de condições como, por exemplo, o impacto da incerteza no resultado da medição. O Quadro 3 [16] expressa a relação proposta.

Quadro 3 – Condições para se seleccionar um valor para o parâmetro: fiabilidade-alvo.

Condição	Fiabilidade-alvo %
Baixo impacto no resultado final (medição) ou intervalo de tolerância alargado.	$\leq 60$
Aplicação com redundância ou com criticidade média (SIL 2-3).	60 to 90
Aplicação crítica ou ausência de procedimentos de recuperação (backup).	$\geq 90$

O procedimento subsequente envolve a aplicação deste parâmetro no contexto do método da máxima verosimilhança de modo a se obter a função de fiabilidade,  $R(t, \hat{\theta})$ , que produz o melhor ajustamento dos dados. A determinação do intervalo de calibração optimizado resulta, então, de se obter a solução da equação:

$$R(t, \hat{\theta}) = R^* \quad (8)$$

A solução da equação implícita anterior pode ser efectuada por duas vias [10] e [14]: aplicar uma abordagem analítica ou o método numérico de Newton-Raphson; se não se obtiver uma convergência apropriada, poder-se-á optar por se aplicar uma abordagem de tentativa e erro. Da diversidade de funções que podem ser ajustadas à função de fiabilidade, algumas são mais comuns e como tal, recomendadas [14]: Exponencial; Weibull; Exponencial mista; Random Walk; Restricted Random Walk; Gamma modificada; curva de mortalidade; curva de garantia; e Log-normal. A selecção da abordagem mais adequada para a determinação do intervalo de calibração óptimo deve ser baseada nos requisitos, encargos e capacidades associadas a cada caso concreto. O Quadro seguinte apresenta um conjunto de critérios de selecção e o desempenho expectável dos diversos métodos apresentados, permitindo auxiliar o decisor acerca de qual a abordagem mais indicada tendo em conta essa relação.

Quadro 4 – Critérios de selecção e desempenho associado aos diversos métodos apresentados.

Critérios	Intervalos genéricos	Intervalos adaptados	Análise de engenharia	Ajustam. Automático	Cartas de controlo	Tempo de utilização	Teste Caixa-negra	MLE
	M1	M2	M3	A1	A2	A3	M4	M5
Cumprimento de requisitos da Qualidade	Reduzido	Reduzido – Médio	Reduzido	Reduzido	Reduzido	Reduzido	Elevado	Elevado
Requisitos de dados	Nulo	Nulo	Reduzido	Reduzido	Reduzido	Reduzido	Reduzido	Médio
Custos de desenvolvimento	Nulo	Nulo	Reduzido – Médio	Reduzido	Reduzido	Reduzido	Médio	Elevado
Custos de manutenção (anual)	Nulo	Nulo	Reduzido	Reduzido	Reduzido	Médio	Reduzido	Reduzido
Custos de operação (anual)	Nulo	Nulo	Reduzido	Médio – Elevado	Médio - Elevado	Elevado	Elevado	Reduzido
Requisitos recursos humanos (desenvolvimento)	Reduzido	Reduzido	Elevado	Médio	Médio	Médio	Médio	Elevado
Requisitos recursos humanos (utilizador)	Reduzido	Reduzido	Elevado	Médio	Médio	Elevado	Elevado	Médio
Requisitos de formação	Nulo	Nulo	Elevado	Reduzido	Reduzido	Médio	Médio	Reduzido
Requisitos de capacidade de processamento autom.	Nulo	Nulo	Nulo	Reduzido	Reduzido – Médio	Médio	Médio	Médio
Eficiência do processo	Reduzido	Reduzido	Médio	Reduzido	Reduzido – Médio	Reduzido – Médio	Elevado	Elevado
Poupança de recursos	Nulo	Reduzido	Reduzido	Reduzido	Reduzido – Médio	Reduzido	Reduzido	Elevado
Requisitos de fiabilidade e do equipamento	Médio	Médio	Médio	Médio	Elevado	Elevado	Elevado	Médio
Disponibilidade do equipamento	Médio	Médio	Médio	Médio	Médio	Médio	Elevado	Médio
Aplicabilidade a equipamentos específicos	Médio	Médio	Reduzido	Médio	Reduzido	Médio – Elevado	Elevado	Reduzido
Work-load balance	Médio	Médio	Médio	Médio	Médio	Médio - Elevado	Médio - Elevado	Reduzido

## 5. Ensaio de aptidão e de comparação interlaboratorial

O requisito 5.9, da norma NP EN ISO/IEC 17025:2005, *Garantir a qualidade dos resultados de ensaio e de calibração*, obriga a procedimentos de controlo da qualidade para monitorizar a validade dos ensaios e calibrações realizados, de forma planeada e sistemática, nos quais se inclui a participação em programas de comparação interlaboratorial ou ensaios de aptidão. Por sua vez o documento ILAC P9 [17] impõe como condição para a acreditação de laboratórios a participação em ensaios de comparação interlaboratorial (ECI) por categoria de ensaio a acreditar, como forma primordial de validação de métodos.

De facto, a participação em ECI configura um controlo externo de qualidade, por oposição a um controlo interno de qualidade que pode ser obtido, por exemplo, através da repetição ocasional de ensaios e/ou calibrações, o que conduz a um acréscimo significativo da credibilidade do laboratório nessa área, cuja contabilização não deve ser menosprezada e deve ser ponderada em relação aos custos que a apresentação de resultados incorrectos acarreta. A finalidade da participação em ECI é não só detectar tendências aplicando técnicas estatísticas apropriadas, prevenindo desta forma potencial trabalho não conforme, mas igualmente, e de forma mais imediata, como analisar os erros sistemáticos e a incerteza de medição do laboratório no tipo de ensaio particular em estudo.

Ao nível internacional, a participação em ECI está muito ligada à validação de métodos e de estimativas de incertezas de medição no âmbito da actividade dos Laboratórios de Medição Primários (NMI), e.g., IPQ no caso português, por um lado, e à eliminação de barreiras técnicas e de outra natureza numa vertente mais comercial, por outro, no âmbito das actividades de Mutual Recognition Agreement (MRA), que tiveram um impacto superior a € 4 biliões (KPMG report 2002) [18]. No caso dos NMI as poupanças totais resultantes da participação em ECI são estimadas em cerca de € 85 milhões.

Os benefícios imediatos da participação dos laboratórios em ECI podem ser resumidos nos seguintes pontos principais:

- Economia relativamente à aquisição de instrumentação primária para atingir os mesmos fins;
- Validação da periodicidade de calibração adoptada;
- Validação dos métodos e procedimentos de ensaio ou calibração utilizados;
- Validação da confirmação metrológica da instrumentação utilizada para a exactidão requerida no ensaio ou calibração analisado;
- Validação da qualificação do pessoal;
- Garantia da qualidade da instrumentação utilizada;

- Melhor controlo do processo de medição;
  - Menor índice de rejeição de itens, isto é, diminuição do trabalho não conforme;
- Maior satisfação dos clientes.

As mais-valias associadas à participação em ECI, cujos benefícios são aparentes da lista acima, podem, por vezes, ser contabilizadas mais facilmente se pensarmos nos custos que adviriam da não participação, como uma análise baseada na seguinte ponderação:

- Consequências técnicas e custos associados de manter um sistema de medição hierarquicamente superior para validar os ensaios em causa;
- Custos anuais para manter esse sistema alternativo (económicos e técnicos);
- Custos comparativos de implementação dos sistemas actual e alternativo;

Custos associados a trabalho não conforme, com repetição de ensaios ou calibrações, diminuição da confiança dos clientes e eventual perda da acreditação.

A diferença entre os vários cenários, em termos de custos, pode ser estimada utilizando diferentes expressões da ciência económica, como (a) Internal Rate of Return (IRR); (b) Benefit-to-Cost Ratio; (c) Net Present Value (NPV).

## 6. Conclusões

No contexto dos Sistemas de Gestão e da Qualidade Total, a avaliação de custo-benefício associado aos processos é considerada particularmente relevante para um exercício concordante com os princípios subjacentes a este enquadramento.

Os processos identificados neste estudo constituem, inequivocamente, fontes de encargos para as organizações, pelo que, a aplicação de métodos que permitam reduzir esses custos mantendo elevados níveis de Qualidade possuem um interesse particular enquanto ferramentas de gestão.

Neste sentido, considera-se que o presente documento constitui uma contribuição quer para uma melhor compreensão da diversidade de soluções aplicáveis a cada tipo de processo quer no desenvolvimento de planos de gestão e na selecção dos métodos apropriados à natureza dos processos envolvidos.

O estudo de diferentes metodologias aplicáveis na definição da Periodicidade da Calibração, da Confirmação Metrológica e de Comparação Interlaboratorial, permite concluir que é possível estabelecer estratégias racionais de gestão, planeamento e monitorização da instrumentação.

A aplicação de ferramentas de gestão apropriadas, como a análise de Custo-Benefício, permite otimizar os recursos envolvidos nessas actividades melhorando a sua eficiência e eficácia.

Salienta-se, ainda, que a abordagem apresentada poderá ser aplicada a outras vertentes da gestão metrológica, como por exemplo, aos processos de **validação de software**, de **verificação intermédia** e de concretização de **correções decorrentes de processos de calibração**, quando estas calibrações determinam encargos significativos para os Sistemas de Gestão da Organização.

## REFERÊNCIAS

- [1] Carlos Sousa, A Calibração e Confirmação Metrológica – visão da nova norma ISO 10012, Workshop A Medição em Processos Industriais, RELACRE, Lisboa, 1 de Abril de 2003.
- [2] Carlos Sousa, Gestão de Equipamentos de Medição - Relatos de Experiências de Certificação da Qualidade, Publicação de NPF – Pesquisa e Formação, Agosto de 2001.
- [3] NP EN ISO 9001:2008 – Sistemas de Gestão da Qualidade – Requisitos.
- [4] EURAMET, Metrology – in short, 3rd edition, July 2008.
- [5] Víctor Aranda, CONFIRMACIÓN METROLÓGICA – El proceso de confirmación metrológica de instrumentos de medición en laboratorios e industria, III Congreso Iberoamericano de Laboratorios, Bilbao, España, 16 y 17 de marzo del 2005
- [6] NP EN ISO/IEC 17025:2005. Requisitos gerais de competência para laboratórios de ensaio e calibração.
- [7] NP EN ISO 10012:2005. Sistemas de gestão da medição. Requisitos para processos de medição e equipamento de medição.
- [8] Sousa, C., Lourenço, A. e Ribeiro, A. S. – Erro mais Incerteza ?. 3º encontro Nacional da sociedade Portuguesa de Metrologia, 10 Out. 2008, ISEP, Porto.