

Gilberto Carlos Fidélis

Metrologia

Técnicas para Assegurar Resultados Confiáveis



Florianópolis

2010

Direitos desta edição reservados ao
CECT - Centro de Educação, Consultoria e Treinamento em Metrologia,
Sistema da Qualidade e Desenvolvimento de Pessoal Ltda.

Rua José Chafi Chein Chaia, 61
Bairro João Paulo
CEP 88030-650 Florianópolis – SC

Fone 48 3234 3920
publicacoes@cect.com.br
www.cect.com.br

Fidélis, Gilberto Carlos
Metrologia, Técnicas para Assegurar Resultados Confiáveis.
Florianópolis – SC, 2010. 1ª. Edição, CECT.

ISBN 978-85-63790-00-2

É proibida a Reprodução

Nenhuma parte desta obra poderá ser reproduzida, copiada, transcrita ou mesmo transmitida por meios eletrônicos ou gravações, sem a permissão por escrito do editor. Os infratores serão punidos pelas leis vigentes no país.

Agradecimentos

Agradeço a Deus, que me dá todas as coisas e que me permitiu mais esta conquista.

Agradeço a todos os alunos dos mais de 800 cursos que já ministrei e que tanto me ajudaram e incentivaram a aprender, a ensinar e persistir.

Agradeço ao leitor que me privilegia com a leitura deste livro.

Agradeço a Aferitec, na pessoa dos seus idealizadores, Reginaldo, Silvio, Evaldo e Henrique, exemplos de honestidade, perseverança, trabalho e dedicação, pela confiança e apoio na publicação desta obra.

Dedicatória

Este livro é dedicado a quatro pessoas que amo muito:

- Minha querida esposa Rosângela, na certeza de que o nosso amor está presente em todas as realizações de nossas vidas e

- Aos meus filhos maravilhosos Monique, Michelle e Matheus, presentes de Deus para a minha e vida, para os quais desejo um futuro brilhante.

Sumário

1. Um Breve Histórico da Metrologia	12
A Metrologia na Antiguidade.....	12
A Evolução na Definição do Metro.....	16
A Criação do Sistema Internacional de Unidades – SI.....	19
Causo Metrológico: Quanto é 80 Quilos em Quilogramas?.	22
2. Fundamentos da Metrologia.....	23
A Medição.....	26
Utilize o Termo Precisão com Cuidado.....	29
3. Os Algarismos Significativos e Arredondamento de Resultados.....	30
Mudança de Unidades.....	32
Potência de Dez.....	33
Zeros à Esquerda do Primeiro Algarismo Significativo.....	33
Zeros à Direita do Primeiro Algarismo Significativo.....	34
Zero Situado entre Algarismos Significativos.....	35
Critérios de Arredondamento.....	35
Operações com Algarismos significativos.....	36
Algarismos Significativos no Resultado de Medição.....	38
4. As Características Desejadas para o Metrologista.....	40
O Metrologista.....	40
O Perfil do Metrologista.....	41
Honestidade.....	41
Competência.....	42
Bom Senso.....	46
Observador.....	47
Analítico.....	47
Escritor.....	48
5. O Erro Grosseiro.....	49
Causo Metrológico: O Açougue do Seu Bigode.....	56

6.	O Erro de Medição.....	57
	Erro ou Desvio?.....	57
	Como Quantificar o Erro de Indicação de Um Instrumento de Medição.....	62
	O Resultado Corrigido.....	64
	Erros de Medição Absolutos Versus Relativos.....	65
7.	Os Tipos de Erros de Medição.....	68
	Os Tipos de Erros.....	70
	Erros Instrumentais.....	70
	Erros de Método.....	72
	Erros Devido as Grandezas de Influência Externa.....	73
	Erros Devidos ao Observador.....	74
	Erros Matemáticos.....	75
8.	O que é Exatidão?.....	76
9.	O que é o Mensurando?.....	79
10.	O que é a Resolução?.....	87
11.	O que é uma Calibração?.....	90
	Calibração Versus Ajuste Versus Aferição.....	93
	Quando os Instrumentos e Padrões Devem ser Calibrados.....	95
	Dicas para a Seleção de Fornecedores de Calibração.....	96
	Os Registros de Calibração.....	98
12.	Como Obter a Rastreabilidade Metrológica.....	100
	O Que Entendemos por Rastreabilidade Metrológica?.....	100
	Por que são Necessárias as Calibrações e a Rastreabilidade?.....	102
	Os Elementos que Compõem a Rastreabilidade.....	104
	Hierarquia das Calibrações.....	105
	Causo Metrológico: Novinho em Folha.....	109

13. Como Relatar o Resultado de Medição.....	111
Os Cinco Elementos de um Resultado de Medição.....	112
Um exemplo de Resultado de Medição a partir da Correção de Erros de Medição.....	113
Um Exemplo de Resultado de Medição sem Correção de Erros de Medição.....	115
14. A Incerteza de Medição.....	117
O que é Incerteza de Medição?.....	117
Como Caracterizar a Incerteza de Medição.....	118
Qual a Origem da Incerteza de Medição?.....	119
Por que a Incerteza de Medição é Importante?.....	120
A Incerteza de Medição na Avaliação de Conformidade de Produtos.....	122
Documentos de Referência para a Avaliação da Incerteza de Medição.....	126
Relação entre Erros e Incerteza de Medição.....	128
15. A Importância da Correção no Resultado da Medição.....	132
16. Como Analisar Criticamente um Certificado de Calibração.....	142
Um Exemplo de Certificado de Calibração.....	142
A Tendência Instrumental.....	144
Qual o Significado da Incerteza de Medição Expressa na Calibração?.....	145
O Erro Máximo Admissível.....	146
O Erro Máximo do Instrumento de Medição.....	149
Intervalo de Indicações e Intervalo de Medição.....	153
17. O Uso da Verificação para Assegurar Confiabilidade de Resultados.....	154
Por que Verificar os Instrumentos de Medição Periodicamente.....	157
Calibração Versus Verificação.....	160

Intervalos de Verificação.....	161
Gerenciando os Resultados das Verificações	163
O Erro Normalizado na Análise dos Resultados da Verificação.....	166
Os Métodos de Verificação.....	167
A Verificação como Ferramenta Gerencial das Calibrações.....	174
A Verificação não é Evidência de Rastreabilidade Metrológica.....	176
O que Fazer se um Instrumento de Medição não é Aprovado na Verificação?.....	177
Situação em que uma Verificação não Programada é Importante.....	177
18. Definição e Gerenciamento dos Intervalos de Calibração.....	178
Os Fatores Básicos para Estabelecer os Intervalos de Calibração.....	179
Recomendações de Intervalos Iniciais de Calibração.....	181
Um Método para a Determinação do Primeiro Intervalo de Calibração.....	184
O Método de Schumacher para Gerenciar os Intervalos de Calibração.....	191
19. Quem Vai Medir: João ou Pedro?.....	196
Repetir Bem é Fundamental.....	196
A Reprodutibilidade de Resultados.....	199
Reproduzir Bem é Medir Bem?.....	203
20. A Atuação das Grandezas de Influência no Comportamento do instrumento de Medição.....	205
As Grandezas de Influência mais Comuns.....	210
21. O Efeito da Temperatura na Medição.....	212
A Temperatura Atuando sobre o Instrumento de Medição.	213
Erro de Medição Devido a Temperatura.....	215
O Efeito Temperatura sobre o Mensurando.....	218

22. A Importância dos Procedimentos Técnicos na Confiabilidade Metrológica.....	222
Métodos Normalizados.....	225
A Confirmação do Método.....	229
Métodos Não Normalizados e a Validação de Métodos.....	230
Requisitos para os Procedimentos.....	235
Causo Metrológico: É Fácil Fazer um Bolo?.....	237
23. As Principais Normas de Gestão da Qualidade.....	239
ISO 10012 – Sistema de Gerenciamento da Medição.....	242
ISO 14253 – Regras de Decisão para Promover Conformidade ou Não Conformidade com Especificações	244
ISO/IEC 17025 – Requisitos Gerais para a Competência de Laboratórios de Ensaio e Calibração.....	247
ISO/IEC 17025: O Primeiro Princípio para o Sucesso.....	249
ISO/IEC 17025: O Segundo Princípio para o Sucesso.....	251
As Grandes Diferenças da NBR ISO/IEC 17025 em Relação à NBR ISO 9001.....	251
ISO/IEC 17025: Medições, Ensaio e Calibrações de Má Qualidade não Deveriam Acontecer.....	253
Referências Bibliográficas.....	254
Guias Práticos de Metrologia e Qualidade Publicados pelo CECT.....	256

Prefácio

Era agosto de 1981. Havia recém concluído a sétima fase do curso técnico de mecânica na então Escola Técnica Federal de Santa Catarina, atualmente denominada de Instituto Federal de Santa Catarina – IF-SC, em Florianópolis. Para concluir o curso técnico e receber o diploma como tal era necessário passar por um estágio. Mas onde iria fazer um estágio na área de mecânica em Florianópolis? Florianópolis não era e ainda não é uma cidade industrial. Desejava ficar na cidade para fazer curso superior em engenharia química, uma paixão de aluno secundarista.

Descobri que a Universidade Federal de Santa Catarina oferecia estágios e que poderia haver algum na minha área. Fui, cheio de esperança, conversar com o coordenador do curso de Engenharia Mecânica da UFSC. Na conversa ele comentou que havia uma vaga no laboratório de metrologia. Insisti em saber se realmente não havia outras oportunidades “melhores” e ele confirmou que não. Confesso que deixei naquela reunião todas as minhas esperanças em realizar o estágio pretendido. Fiquei pensando comigo: metrologia, essa não! É muito chato. Pensava que seria um grande sacrifício, pois não havia gostado de metrologia durante o curso técnico. Resolvi aceitar a vaga depois de tanto procurar “algo mais interessante” e não encontrar. Havia uma grande vantagem em fazer o estágio na UFSC. Era próximo da minha casa. Poderia ir a pé, sem custo de transporte e permaneceria na minha cidade natal.

O estágio começou em Setembro de 1981. Somente após ter participado de um curso de Calibração de Instrumentos de Medição é que comecei a olhar para a metrologia com outros

olhos. Fui designado na época para trabalhar com calibração de instrumentos na área de dimensional, força e pressão.

Muitas vezes terminei uma medição ou uma calibração e cheguei a conclusão que deveria refazer parte ou totalmente o trabalho. Ao analisar os dados obtidos procurava verificar se havia algum número “meio estranho” que pudesse comprometer o resultado. Por que? Ficava preocupado com a qualidade da informação e com o cliente.

Praticando e conhecendo melhor a metrologia percebi o seu potencial e a sua importância para a sociedade. Mesmo assim, havia decidido fazer vestibular para engenharia química. Passei no vestibular de 1982 e comecei o curso em março daquele ano. Pensei em abandonar a metrologia, mas esta passou a ser prazerosa em minha vida profissional a ponto de eu tomar uma decisão antes nunca imaginada. Iria tentar outro vestibular para engenharia mecânica. Em março de 1984 ingressei no curso de engenharia mecânica. A paixão não era mais exclusividade da química.

Depois de muitos serviços prestados e cursos ministrados para as indústrias, percebi que a “surpreendente” metrologia me ensinou muito. Com a metrologia aprendi a ser persistente, paciente, observador, metuculoso, detalhista e ter amor pela verdade.

Ah!....Como foi bom e importante conseguir aquele estágio!

Florianópolis, Julho de 2010.

Gilberto Carlos Fidélis
gcfidelis@cect.com.br

*Levítico, 19-36: Seja justa a balança e justos os pesos;
seja justo o alqueire e justa a medida*

13

Como Relatar o Resultado de Medição

Qual a forma adequada de informar o resultado de uma medição (RM)?

A definição apresentada no Vocabulário Internacional de Metrologia (VIM) para o resultado de uma medição é apresentada no quadro abaixo.

Conjunto de **valores** atribuídos a um **mensurando**, completado por todas as outras informações pertinentes disponíveis.

NOTA 1: Um resultado de medição geralmente contém “informação pertinente” sobre o conjunto de valores, alguns dos quais podem ser mais representativos do mensurando do que outros. Isto pode ser expresso na forma de uma função de densidade de probabilidade (FDP).

NOTA 2: Um resultado de medição é geralmente expresso por um único **valor medido** e uma **incerteza de medição**. Caso a incerteza de medição seja considerada desprezível para alguma finalidade, o resultado de medição pode ser expresso como um único valor medido. Em muitas áreas, esta é a maneira mais comum de expressar um resultado de medição.

NOTA 3: Na literatura tradicional e na edição brasileira anterior do VIM, o resultado de medição era definido como um valor atribuído a um mensurando obtido por medição, que poderia ser representado por uma **indicação**, ou um resultado não corrigido, ou um resultado corrigido, de acordo com o contexto.

Quando um resultado é dado, deve-se indicar, claramente, se ele se refere: à indicação; ao resultado não corrigido; ao resultado corrigido; e se corresponde ao valor médio de várias medições.

Os 5 Elementos de um Resultado de Medição

Considerando a definição, podemos escrever o resultado de uma medição pela seguinte expressão:

$$\text{RM} = \text{Rc} \pm \text{Incerteza do Resultado (unidade)}$$

(Fator de abrangência “k” e Probabilidade de abrangência)

Observe, portanto, que o RM deve sempre apresentar cinco elementos:

- **Rc = Resultado Corrigido** – É o valor obtido na medição após a correção dos erros de medição. Estes erros podem ser devidos às grandezas externas (como, por exemplo, a temperatura), ao próprio instrumento de medição e a outros erros que porventura surgirem durante a realização do trabalho de medição. Matematicamente expressamos o resultado corrigido como sendo:

$$\text{Rc} = \text{Indicação} + \text{Correção}$$

(no caso em que uma medição é realizada) ou

$$\text{Rc} = \text{Média das Indicações} + \text{Correção}$$

(no caso em que mais de uma medição é realizada)

- **Incerteza do Resultado** – É a incerteza expandida associada ao resultado corrigido. Deve ser avaliada aplicando-se a metodologia internacional preconizada pelo Guia para Avaliação de Incerteza de Medição, conhecido como ISO GUM, que é a metodologia apresentada em nosso livro “Incerteza de Medição”.

A incerteza do resultado da medição não é igual à incerteza declarada no certificado de calibração do instrumento sendo utilizado. A incerteza do resultado de medição é aquela obtida pela consideração de todas as componentes de incerteza presentes no momento da medição.

- **Unidade** – É a unidade do RM. Devemos utilizar as unidades do Sistema Internacional de Unidades - SI. É muito importante conhecer a forma correta de escrever os símbolos destas unidades.
- **Probabilidade de Abrangência (PA)** – Probabilidade de o resultado estar dentro do intervalo definido pela incerteza de medição. Em geral, seu valor é de aproximadamente 95%.
- **Fator de Abrangência (k)**: É o fator numérico pelo qual uma incerteza padrão combinada é multiplicada para se obter a incerteza de medição expandida do resultado da medição. Para uma PA de aproximadamente 95% o seu valor mínimo é 2, podendo chegar a quase 14.

Um Exemplo de Resultado de Medição a partir da Correção de Erros de Medição

No exemplo que segue demonstramos como podemos avaliar o resultado de uma medição. Um funcionário da empresa Medindo Bem Ltda. utilizou uma balança para medir a massa de um determinado produto. Ao colocar o produto sobre o prato da balança, esta indicou o valor de massa como sendo 255 g. Este valor é denominado de Indicação, ou seja, o valor da grandeza fornecido por um instrumento de medição.

O funcionário percebeu que o certificado de calibração da balança informava que o erro de indicação da mesma, para medições em torno de 250 g, é de + 10 g. Isto é, a balança media com erros para mais, sendo o valor do erro igual a 10 g.

Por outro lado, no certificado de calibração constava que a balança foi calibrada a $(20\pm 2)^{\circ}\text{C}$. No momento em que a medição da massa foi realizada a temperatura no ambiente estava em $(25\pm 2)^{\circ}\text{C}$. Era um dia de temperaturas elevadas e o sistema de ar-condicionado não conseguia manter a temperatura abaixo deste valor.

Consultando o manual de operação da balança o funcionário conseguiu a informação de que uma diferença de 5°C para mais, em relação à temperatura em que a balança foi calibrada, era responsável por um erro de medição de + 5 g.

Assim, o Resultado Corrigido - R_c pode ser escrito como:

$R_c = \text{Indicação} + \text{Correção devido ao erro de indicação} + \text{Correção devido ao efeito da temperatura}$

$R_c = \text{Indicação}(=255 \text{ g}) - \text{erro de indicação}(=+10 \text{ g}) - \text{erro devido ao efeito temperatura}(=+5 \text{ g})$

Logo, $R_c = 240 \text{ g}$

O funcionário aplicou a metodologia de cálculo do ISO GUM e avaliou que a incerteza expandida do resultado desta medição foi igual a $\pm 5 \text{ g}$, para uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95 % e com $k= 2,15$.

Com estes dados ele relatou o resultado da medição como:

$$RM = (240 \pm 5) \text{ g,}$$

com probabilidade de abrangência de 95% e $k= 2,15$.

Esta é a forma adequada de se expressar o resultado de uma medição. É assim que você faz? Caso contrário procure utilizar-se desta forma. Você estará demonstrando que entende de metrologia e informando um resultado confiável.

Mas como interpretar o resultado dessa medição? A única informação segura que o funcionário pode reportar é que o valor da massa do produto está, com uma probabilidade de 95%, entre 235 e 245 g. O valor mais provável da massa desse produto é 240 g. Ainda existem 5% aproximadamente de probabilidade de que o valor real da massa do produto esteja fora desse intervalo.

O resultado sem a expressão da incerteza está incompleto. Nas próximas medições expresse dessa forma o seu resultado.

Um Exemplo de Resultado de Medição sem Correção de Erros de Medição

Uma pequena mudança deve ser realizada na expressão do resultado de uma medição para a situação em que o usuário não deseja realizar a correção dos erros de medição, ou nos casos em que esta não seja necessária de ser realizada. Nestas situações fazemos:

$$RM = (\text{Indicação ou Média das Indicações}) \pm \text{Incerteza Máxima}$$

A incerteza máxima é definida por:

$$U_{\text{máx}} = |\text{Erro}| + \text{Incerteza de Medição}$$

No exemplo, temos que o erro de medição, considerando a tendência e a temperatura foi de 15 g e a incerteza de medição de ± 5 . Assim a $U_{\text{máx}}$ será de ± 20 g. Lembrando que a indicação foi de 255 g, podemos escrever o resultado da medição como:

$$RM = (255 \pm 20) \text{ g para PA de 95\% e } k=2,15.$$

O preço que pagamos por não corrigirmos os erros de medição é ter que aumentar o valor da incerteza do resultado da medição.

Para as indústrias, no chão de fábrica, este é um caminho muito recomendado. O importante é garantir que o instrumento de medição atenda ao Erro Máximo Admissível, eliminando-se a necessidade de eventuais correções. Abordaremos situações deste tipo no capítulo 17.

No capítulo 15 mostramos como apresentar o resultado da medição em uma medição indireta, ou seja, naqueles casos em que o valor da grandeza a medir é determinado por expressões matemáticas.

Metrologia, Técnicas para Assegurar Resultados Confiáveis
Guias Práticos de Metrologia e
Qualidade publicados pelo CECT

Na série Guias Práticos você encontrará informações de que precisa quando surgem dúvidas: conteúdos atualizados, apresentados de modo didático, sintético e dinâmico, leitura fluente e localização rápida de informações que o ajudarão na aplicação das técnicas específicas apresentadas em cada guia.

Os guias disponíveis são:

- Orientações para Implantação da NBR ISO/IEC 17025
- Estatística Aplicada nas Calibrações, Medições e Ensaios.
- Metrologia para Química Analítica
- Incerteza de Medição para Iniciantes
- Metrologia para Iniciantes
- Metrologia Dimensional
- Tratamento de Não Conformidades
- Controle Estatístico de Processos
- Auditorias Internas em Laboratórios de Calibração, Medição e Ensaios
- ISO 10015: Avaliação da Eficácia de Treinamentos
- MASP – Metodologia de Análise e Solução de Problemas
- BPL – Boas Práticas de Laboratórios
- Melhoria Contínua
- Calibração, Ajuste, Verificação e Certificação de Instrumentos de Medição
- Incerteza de Medição em Química Analítica
- Incerteza de Medição em Calibrações, Medições e Ensaios.

Solicite mais detalhes e informações de como adquirir os guias através do e-mail publicacoes@cect.com.br ou pelo telefone 48 3234 3920.