

ENSAIOS EXPERIMENTAIS PARA ANÁLISE DE REPETITIVIDADE E REPRODUTIBILIDADE (R&R) NO LABORATÓRIO DE METROLOGIA

Hérica Guedes de Toledo (FEPI) hericagtoledo@hotmail.com
Paulo Henrique Paulista (FEPI) paulohpaulista@gmail.com

Resumo

O presente artigo apresenta um estudo sobre repetitividade e reprodutibilidade (R&R) a partir de ensaios experimentais no laboratório de metrologia. Inicialmente é apresentado um contexto, evidenciando a necessidade de se apresentar medidas confiáveis, para garantir a confiabilidade junto ao cliente. Em seguida, é feita uma descrição sobre conceitos importantes na área de metrologia, como medições, instrumentos de medição e erros, para em seguida discorrer acerca da repetitividade e da reprodutibilidade, bem como a maneira como são calculadas e a forma como é feita a análise de R&R. Logo depois, traz-se uma análise de R&R feita a partir de dados coletados no laboratório de metrologia.

Palavras-chave: Repetitividade; Reprodutibilidade; Metrologia

1.Introdução

A crescente globalização, juntamente com a evolução tecnológica, o aumento da concorrência e a existência de clientes cada vez mais exigentes, tem levado as empresas a buscar a qualidade como prioridade em seus processos. Uma das formas de garantir tal qualidade é através dos processos de fabricação e de medição.

A preocupação com a qualidade metrológica garante não somente os níveis de confiabilidade junto ao cliente, como também evita posteriores custos de não qualidade. Slack (2015), afirma que qualidade é fazer certo, fazer conforme as necessidades do cliente e que confiabilidade significa cumprir com os prazos de entrega estabelecidos. Desta forma, ao buscar fazer com que o processo seja realizado da maneira correta, atendendo às necessidades e expectativas do cliente, diminuem-se consideravelmente os índices de retrabalho e conseqüentemente, elevam-se as chances de que o produto seja entregue ao cliente no prazo solicitado, e como cada segundo de trabalho é precioso, isso faz com que os custos de não qualidade venham a diminuir.

Assim, para garantir que os objetivos de qualidade, confiabilidade e redução de custos sejam alcançados, é importante assegurar a existência de um sistema de medição capaz de fornecer valores confiáveis e com variabilidade mínima.

Através do estudo de repetitividade e reprodutibilidade (R&R) torna-se possível verificar os pontos onde se faz necessária a aplicação de melhorias, permitindo então elevados níveis de qualidade e satisfação do cliente.

2. Medições

Medição é o resultado de um procedimento experimental através do qual é determinado o valor de uma grandeza física, chamada mensurando (ALBERTAZZI e SOUZA, 2008).

No momento da medição, deve-se conhecer as condições do ambiente, o estado de conservação do instrumento de medição e a precisão do mesmo, bem como deve-se considerar o nível de conhecimento do operador acerca dos métodos de manuseio do instrumento e posicionamento do mensurando, isto porque tais condições irão influenciar no resultado da medição.

Deve-se destacar a importância do processo de medição, principalmente para o controle dos processos produtivos: medições bem realizadas e em condições devidamente controladas, permitem que o processo produtivo seja devidamente retratado, possibilitando então que melhorias sejam aplicadas.

2.1 Instrumentos de medição

Instrumento de medição é um dispositivo utilizado a fim de efetuar medições, de forma individual, sendo chamado de sistema de medição, ou juntamente com um ou mais dispositivos (VIM, 2012).

Para minimizar a diferença entre o valor real do mensurando e o valor medido, tem sido desenvolvidos sistemas de medição cuja precisão é cada vez maior. Dois instrumentos muito utilizados na indústria e que possuem grande precisão são o paquímetro e o micrômetro.

O paquímetro permite que as leituras sejam feitas em polegadas e milímetros, e tem suas escalas principais graduadas na parte fixa, e as escalas secundárias, as quais permitem a leitura de valores fracionários da unidade da escala principal, graduadas no cursor móvel,

também chamado de nônio. Este instrumento é capaz de fornecer medições de internas, externas, de profundidade e também ressaltos.

O micrômetro é um instrumento capaz efetuar medições com precisão de até 0,001 mm, sendo, por isso, amplamente utilizado na indústria.

“O princípio básico de construção do micrômetro é o deslocamento de uma haste mediante o giro de um parafuso roscado (fuso) o qual está acoplado a um tambor e a um cilindro fixo” (LIRA, 2013, p. 160)

2.2 Erros de medição

Deve-se considerar, que, no momento da medição o mensurando está sujeito a fatores que interferem no valor mensurado, ocasionando os chamados erros de medição. Isto acontece porque nenhum sistema de medição é perfeito, e para que não houvesse erros seria necessário ainda que o operador trabalhasse com habilidade perfeita, que o ambiente estivesse com a temperatura devidamente controlada e que o mensurando em questão fosse livre de imperfeições. Os erros de medição podem ser sistemáticos, os quais são previsíveis e correspondem ao erro médio, ou aleatórios, sendo estes imprevisíveis (ALBERTAZZI e SOUZA, 2008).

As fontes dos erros podem intrínsecas ou extrínsecas ao sistema de medição. No primeiro caso, podem estar relacionadas ao desgaste do instrumento, calibração, ou também limitações do processo de fabricação do mesmo. Já nas fontes externas, cita-se as vibrações do ambiente, as variações de temperatura (as quais causam dilatação tanto no instrumento como no mensurando), além da ação do operador, que afeta o resultado da medição através do grau de habilidade e manuseio do instrumento, acuracidade da visão e atenção ao realizar o processo de medição.

É importante destacar que os erros e suas fontes devem ser devidamente avaliados, para que sejam tomadas as decisões cabíveis em relação ao processo e/ou produto, pois o julgamento incorreto, acarreta em custos de não qualidade que não deveriam existir. Por exemplo, em um processo de medição no qual não sejam consideradas as fontes de erros de forma correta, os resultados serão diferentes do esperado, e o processo pode ser erroneamente considerado fora de controle, acarretando então em custos para a correção do mesmo de forma desnecessária.

3. Repetitividade e reprodutibilidade (R&R)

Repetitividade e reprodutibilidade são parâmetros utilizados para quantificar a dispersão do processo de medição (ALBERTAZZI e SOUZA, 2008).

No estudo de repetitividade e reprodutibilidade, as amostras de um determinado produto são medidas diversas vezes, em condições iguais ou diferentes, a fim de se avaliar a variabilidade dos resultados.

O estudo de R&R está presente de forma constante em laboratórios e indústrias, como forma de controlar a qualidade dos ensaios e para tomada de decisão acerca de aceitação ou rejeição de produtos (CHUI et al., 2004).

Segundo Doro (2004), o estudo de repetitividade e reprodutibilidade pode ser utilizado com várias finalidades, dentre elas:

- critério para julgamento de um novo equipamento de medição;
- para comparar equipamentos de medição;
- melhoramento da performance de equipamentos de medição;
- avaliação de equipamentos antes e após reparos;
- constituinte para melhora na estimativa de variação do processo;
- critério para decisão acerca de treinamento dos operadores do instrumento de medição.

3.1 Repetitividade

A repetitividade indica a variabilidade natural do processo de medição, quando realizadas diversas medições, em condições iguais, tais como mesmo operador, mesmo ambiente, mesmo instrumento, mesma técnica de medição, e em um pequeno intervalo de tempo.

A repetitividade é calculada com base na amplitude e no desvio padrão entre os resultados obtidos da medição de determinada característica do produto. Quanto menores a amplitude e o desvio padrão das medidas, melhor é a repetitividade sistema de medição.

Para calcular a repetitividade, tem-se como base o cálculo da estimativa do desvio padrão, a qual é dada pela equação 1.

$$S_{Rs} = \frac{\bar{R}}{d_2}$$

Em que:

S_{Re} : estimativa do desvio padrão para repetitividade;

\bar{R} : amplitude média

d_2 : constante em função do número de medições e operadores

A constante d_2 é definida em função da quantidade de medições por peça, do número de amostras e do número de operadores, e pode ser obtida através da Tabela 1, abaixo, onde m é o número de medições por peça e g é o produto entre o número de operadores e a quantidade de amostras.

Tabela 1 - Constante d_2 para estimativa do desvio padrão

	m									
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	1,41	1,91	2,24	2,48	2,67	2,83	2,96	3,08	3,18	
2	1,28	1,81	2,15	2,40	2,60	2,77	2,91	3,02	3,13	
3	1,23	1,77	2,12	2,38	2,58	2,75	2,89	3,01	3,11	
4	1,21	1,75	2,11	2,37	2,57	2,74	2,88	3,00	3,10	
5	1,19	1,74	2,10	2,36	2,56	2,73	2,87	2,99	3,10	
6	1,17	1,73	2,09	2,35	2,56	2,73	2,87	2,99	3,10	
7	1,17	1,73	2,09	2,35	2,55	2,72	2,87	2,99	3,10	
8	1,16	1,72	2,08	2,35	2,55	2,72	2,87	2,98	3,09	
9	1,16	1,72	2,08	2,34	2,55	2,72	2,86	2,98	3,09	
10	1,16	1,72	2,08	2,34	2,55	2,72	2,86	2,98	3,09	
11	1,15	1,71	2,08	2,34	2,55	2,72	2,86	2,98	3,09	
12	1,15	1,71	2,07	2,34	2,55	2,72	2,85	2,98	3,09	
13	1,15	1,71	2,07	2,34	2,55	2,71	2,85	2,98	3,09	
14	1,15	1,71	2,07	2,34	2,54	2,71	2,85	2,98	3,08	
15	1,15	1,71	2,07	2,34	2,54	2,71	2,85	2,98	3,08	
>15	1,128	1,693	2,059	2,326	2,534	2,704	2,847	2,970	3,078	

m = número de ciclos g = número de amostras \times número de operadores

Fonte: Albertazzi e Souza (2008)

De posse da estimativa do desvio padrão, calcula-se a repetitividade, com probabilidade de 99% de confiança, e para que isto ocorra, os limites em da repetitividade em relação à média, deve ser de $\pm 2,576 \sigma$, ou seja, a faixa total de repetitividade é de $5,152 \sigma$, tendo assim a equação 2.

$$Repe = 5,152 \cdot \frac{S_{Re}}{2}$$

Onde:

$Repe$: faixa de repetitividade

S_{Re} : estimativa do desvio padrão para repetitividade

3.2 Reprodutibilidade

A reprodutibilidade está relacionada à diferença entre a média das medições realizadas em diferentes condições de análise, como diferentes operadores, avaliadores, horários ou diferentes condições ambientais, utilizando-se o mesmo instrumento de medição. Quanto menor for a diferença entre as médias, maior é a capacidade de o sistema de medição em reproduzir os mesmos resultados nas medições.

A determinação da amplitude entre os operadores, a partir da média de cada operador é o ponto inicial para o cálculo da reprodutibilidade, e esta amplitude é dada pela equação 3.

$$R_{op} = \text{maior média} - \text{menor média} \quad 3$$

Em seguida, é encontrado o valor da estimativa do desvio padrão para reprodutibilidade, a partir da amplitude entre operadores e a constante d_2 obtida na Tabela 1, como demonstrado na equação 4.

$$S_{op} = \frac{R_{op}}{d_2} \quad 4$$

Tendo sido determinada a estimativa do desvio padrão, pode-se calcular a faixa de reprodutibilidade, também com probabilidade de 99%. Contudo, o valor encontrado não representa a reprodutibilidade final, porque esta é influenciada pela repetitividade do processo. A equação 5 apresenta fórmula para o cálculo da faixa de reprodutibilidade.

$$Repro_c = 5,152.S_{op} \quad 5$$

Para se obter a reprodutibilidade final, deve-se eliminar a influência da repetitividade, e isso é feito através da equação 6.

$$Repro = \sqrt{Repro_c^2 - \left[\frac{Repe^2}{n.r} \right]} \quad 6$$

Onde:

Repro: faixa de reprodutibilidade corrigida;

n: número de amostras;

r: número de operadores

3.3 Análise de R&R

O parâmetro R&R indica a variabilidade total do processo de medição e pode ser obtido em valores absolutos por meio da equação 7.

$$R\&R = \sqrt{Repe^2 + Repr^2}$$

7

Contudo, para avaliar se o processo de medição é aceitável, usualmente, apresenta-se R&R como valor percentual da tolerância ou da variação do processo. Neste caso, R&R será expresso pelo valor percentual da variação total do processo, conforme a equação 8.

$$\%R\&R = \frac{R\&R}{VT}$$

8

Em que VT representa a variação total do processo e é calculada por com base nas estimativas dos desvios padrão da repetitividade, da reprodutibilidade e do processo de fabricação, como pode-se observar na equação 9.

$$VT = \sqrt{(S_{re}^2 + S_{op}^2 + S_{sp}^2)}$$

9

Na qual:

S_{re} : estimativa do desvio padrão para repetitividade;

S_{op} : estimativa do desvio padrão para reprodutibilidade;

S_{sp} : estimativa do desvio padrão do processo de fabricação

Após o cálculo de R&R na forma percentual, o processo de medição pode ser considerado aprovado ou reprovado para fins de medição, de acordo com a tabela 2.

Tabela 2 – Critérios para aprovação dos processos de medição por meio do parâmetro R&R

%R&R	Conclusão
%R&R < 10%	Processo de medição <u>aceitável</u>
10% ≤ %R&R ≤ 30%	Processo de medição <u>pode ser aceitável</u> , dependendo da importância da aplicação, custo do sistema de medição e dos custos para obter melhorias.
%R&R > 30%	Processo de medição <u>não é aceitável</u> e precisa ser melhorado. Devem ser feitos esforços para identificar os problemas e minimizá-los.

Fonte: Adaptado de Albertazzi e Souza (2008)

3.4 Ensaio de R&R

Para demonstrar a repetitividade e a reprodutibilidade de um processo de medição, foram realizadas medições em uma amostra do laboratório de metrologia do Centro Universitário de Itajubá – FEPI, envolvendo 4 operadores. O instrumento utilizado foi o paquímetro universal de precisão 0,05 mm e os valores medidos correspondem ao diâmetro externo da amostra e encontram-se na Tabela 3.

Tabela 3- Medições realizadas

	Operador A	Operador B	Operador C	Operador D
	28,70	28,40	28,65	28,55
	28,65	28,55	28,70	28,50
	28,55	28,50	28,60	28,70
	28,55	28,45	28,50	28,50
	28,60	28,50	28,55	28,60
	28,60	28,50	28,60	28,65
	28,55	28,45	28,65	28,65
	28,65	28,40	28,65	28,55
	28,65	28,45	28,70	28,70
	28,65	28,50	28,65	28,70
Média	28,61	28,47	28,63	28,61
Amplitude	0,15	0,15	0,20	0,20

Fonte: Elaborado pelos autores

Inicialmente, a partir da equação 1, foi calculada a estimativa do desvio padrão para repetitividade:

$$S_{Re} = \frac{0,175}{3,10}$$

$$S_{Re} = 0,056452$$

A faixa de repetitividade, de acordo com a equação 2, portanto é:

$$Repe = 5,152 \cdot 0,056452$$

$$Repe = 0,290839$$

Este valor indica que, nas condições de repetitividade, os erros relacionados ao processo de medição encontram-se na faixa de 0,290839 mm, ou $\pm 0,145419$ em torno da média das medições.

Em seguida, determina-se a amplitude entre os operadores, a fim de se obter a estimativa do desvio padrão para reprodutibilidade, conforme as equações 3 e 4:

$$R_{op} = 28,63 - 28,47 = 0,16$$

$$S_{op} = \frac{0,16}{3,10} = 0,051612903$$

Abaixo, tem-se o cálculo da reprodutibilidade contaminada, e posteriormente, o resultado final da faixa de reprodutibilidade, segundo a seção 3.2 e as equações 5 e 6:

$$Repro_c = 5,152 \cdot 0,051612903 = 0,265909677$$

$$Repro = \sqrt{0,265909677^2 - \left[\frac{0,290839^2}{1,4} \right]} = 0,222623281$$

O valor encontrado para a reprodutibilidade indica a influência dos operadores no processo de medição. Os resultados obtidos para repetitividade e reprodutibilidade indicam que os erros do sistema de medição ocorrem principalmente devido às variações no mesmo, visto que o valor da repetitividade (0,290839) é maior que o da reprodutibilidade (0,222623281).

De posse do valor da repetitividade e da reprodutibilidade, calcula-se R&R em valores absolutos e em valor percentual da variação do processo, conforme as equações 7 e 8:

$$R\&R = \sqrt{0,290839^2 + 0,222623281^2} = 0,3662814$$

$$VT = 5,152 \cdot \sqrt{(0,056452^2 + 0,051612903^2)} = 0,394076478$$

$$\%R\&R = \frac{0,3662814}{0,394076478} = 0,929467806 = 92,95\%$$

Com este resultado e de acordo com a Tabela 3, verifica-se que o processo de medição não seria aprovado para realizar medições, necessitando de melhorias. Vale destacar que no caso em questão, os dados foram coletados durante aula em laboratório, por estudantes em fase de

aprendizado acerca do manuseio do instrumento e do mensurando, bem como os cuidados no momento da leitura, além de que o ambiente não possuía temperatura controlada.

4. Conclusão

O estudo de R&R está presente na Engenharia da Qualidade, como ferramenta de avaliação de um sistema de medição. Através desse estudo é possível determinar se um sistema é capaz de fornecer resultados confiáveis de suas medidas, de acordo com a variabilidade do mesmo.

Quando um sistema de medição apresenta um grau de variabilidade menor do que o do processo que está sendo avaliado, pode-se dizer que os resultados obtidos são seguros quanto ao sistema de medição, e havendo diferenças entre o valor nominal do mensurando e os valores obtidos na medição, estes são afetados por causas inerentes ao processo de medição, e podem ser causas comuns ou especiais.

Pelo contrário, quando a variabilidade do sistema de medição é maior que a do processo de medição, não existem condições para tomar decisões acerca de uma possível intervenção no processo produtivo ou de medição, isto porque, não se pode afirmar com exatidão se a causa da variabilidade é somente no sistema de medição ou se há alguma causa especial atuando sobre o processo e que esteja gerando tal variabilidade.

REFERENCIAS

ALBERTAZZI, A.; SOUZA, A. R. **Fundamentos da metrologia científica e industrial**. Barueri: Manole, 2008.

CHUI, Q. S. H.; BISPO, J. M. A.; IAMASHITA, C. O. **O papel dos programas interlaboratoriais para a qualidade dos resultados analíticos**. Quim. Nova, Vol. 27, No. 6, 993-1003, 2004.

DORO, M. M. **Sistemática para implantação da garantia da qualidade em empresas montadoras de placas de circuito impresso**. Florianópolis: UFSC, 2004. 149 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de pós graduação em metrologia científica e industrial, Universidade Federal de Santa Catarina, 2004.

LIRA, F. A. **Metrologia na indústria**. 9ª ed. São Paulo: Érica, 2013.

SLACK, N.; BRANDON-JONES, A.; JOHNSTON, R. **Administração da produção**. 4ª ed. São Paulo: Atlas, 2015.

VIM. **Vocabulário Internacional de Metrologia: Conceitos fundamentais e gerais e termos associados**. Ed. Luso-brasileira. Duque de Caxias: INMETRO, 2012.