

Análise de um sistema de medição

Profs. José Carlos de Toledo e Pedro Carlos Oprime

GEPEQ – Grupo de Estudo e Pesquisa em Qualidade (Departamento de Engenharia de Produção – Universidade Federal de São Carlos)

O estudo da repetitividade e reprodutibilidade (R&R) é uma ferramenta usada na análise da capacidade e estabilidade de Sistemas de Medição (SMs). Nesse estudo, o instrumento de medição e os avaliadores/inspetores são utilizados para medir repetidas vezes as amostras de um produto, com a finalidade de se analisar a variação nos resultados de medição, quando se muda ou mantém os recursos/fatores do SM.

A **repetitividade** mede a variabilidade inerente ao instrumento de medição e indica a capacidade deste fornecer resultados idênticos em medições repetidas e nas mesmas condições.

A **reprodutibilidade** quantifica a capacidade de apresentar os mesmos resultados quando ocorrem mudanças nas condições de medição sejam os avaliadores (ou inspetores) ou as condições ambientais da medição, sejam de procedimentos, de turno de trabalho, do ambiente de medição, etc. Conceitualmente a reprodutibilidade envolve mudanças diversas nas condições de medição, mas na prática como é difícil medir e controlar todas as possíveis mudanças considera-se “apenas” a mudança ou diferença entre avaliadores, pois é mais fácil e viável fazer comparações de resultados obtidos com diferentes pessoas. E normalmente, em muitas empresas, existe mais de uma pessoa (avaliador) que faz medições. .

O objetivo final de um estudo de R&R é determinar se a variabilidade devida a um SM pode ser considerada suficientemente menor que a variabilidade do processo ou do produto que está sendo controlado. Se a variabilidade do SM for maior que a inerente ao processo de manufatura, então não há informações seguras para se decidir sobre a necessidade de se intervir e corrigir esse processo.

Considera-se que o **erro aleatório** é dado pelas replicações (repetições em mesmas condições) de um mesmo tipo de medição. Já o **erro de medição** é mais abrangente, sendo composto pela dispersão do instrumento, pelo efeito do avaliador e pelo erro aleatório devido às replicações.

Se na análise de um SM, depois de realizada a medição e a análise de 30 valores de uma peça, constatar-se um valor de ndc (número de classes) igual a 5 (a fórmula para cálculo do valor do ndc será vista mais adiante), isso significa que esses 30 valores podem ser reunidos em 5 grupos distintos (ou classes de valores, na

linguagem da estatística). Nessa aplicação, o SM utilizado seria capaz de identificar e diferenciar 5 categorias ou agrupamentos de valores da peça medida.

O Anexo sobre “Análise do Sistema de Medição”, da norma ISO/TS 16949, prescreve o uso do critério “porcentagem da variabilidade do SM em relação à variabilidade total do processo” complementado pelo cálculo e análise do valor do ndc.

Propriedades estatísticas dos sistemas de medição

Um **SM ideal** é aquele que tem aderência aos padrões de referência adotados para o produto/processo, reduzindo a probabilidade de se tomar decisões erradas sobre a conformidade destes em relação a esses padrões. Isso ocorre, idealmente, quando a medida de dispersão (como o desvio padrão: Sigma; ou a amplitude: R) dos resultados obtidos é zero e a medida de posição central (como a média) representa exatamente o valor de referência do padrão ou o valor nominal da especificação de projeto do produto.

A **qualidade de um sistema de medição** é determinada por **propriedades estatísticas** associadas a esse sistema. Outras características desejáveis em um SM são a **facilidade de uso do sistema** e o seu **custo operacional**, ou seja, um adequado sistema de medição também deve ser de operação fácil e ágil e ter baixo custo operacional.

Nesse caso, as propriedades estatísticas são definidas como critérios para análise e seleção de um SM. Algumas propriedades são fundamentais, como a capacidade de discriminação do que está sendo medido, ou seja, a capacidade do SM distinguir, por meio das medições realizadas, as diferenças nos valores das características reais das peças; o sistema ou processo de medição deve estar em estado de controle estatístico; e a variabilidade do SM deve ser pequena ou adequada em relação às especificações de projeto do produto e do processo.

Fontes de variação e efeitos nos sistemas de medição

Como em um processo genérico de produção (fabricação, montagem etc.), os SMs são afetados por **causas aleatórias**, também chamadas de **causas comuns**, inerentes ao processo de medição, e por **causas identificáveis ou especiais**, que surgem e atuam esporadicamente no sistema de medição.

As **causas aleatórias** representam um grande número de pequenas causas, sendo que cada uma tem individualmente um efeito insignificante na variabilidade do processo, mas o conjunto dessas causas tem um efeito significativo. Essas causas individuais são praticamente impossíveis de serem visualizadas na prática. Portanto, o

controle de uma dessas causas não geraria nenhum efeito na variabilidade do processo. Essas causas também são chamadas de comuns, pois o conjunto delas está sempre presente e atuando no processo. São muito difíceis de serem identificadas e controladas. Alguns exemplos são: pequenas e freqüentes oscilações na fonte de energia elétrica de uma máquina operatriz; pequenas variações no método de trabalho específico de um mesmo operador; um pequeno e imperceptível desnível na máquina; etc. Todas essas causas ocorrem aleatoriamente, são difíceis de serem visualizadas e estão sempre presentes. Por exemplo, um pequeno desnível de uma máquina estará presente e afetará (ainda que pouco) todas as peças que forem produzidas por essa máquina. Por isso pode ser chamada de comum, pois é uma causa de variação comum a todas as peças fabricadas nesta máquina.

Já as **causas identificáveis ou especiais** se referem a causas que surgem esporadicamente e que tem individualmente um efeito considerável na variabilidade do processo. Por surgirem esporadicamente são mais facilmente perceptíveis (identificáveis) e de controle relativamente mais fácil. Por exemplo: maiores e mais esporádicas oscilações na fonte de energia da máquina; mudança repentina de operador da máquina com conseqüente mudança significativa no modo de operação da máquina; desgaste maior ou falha de desempenho num componente ou sistema da máquina, etc.

O estado de controle ideal de um processo (seja de manufatura, de medição, etc) é aquele em que as causas especiais (que são controláveis) estão sob controle, só atuando no processo as causas aleatórias, as quais dada uma determinada situação, não se consegue controlar.

Para garantir a qualidade dos SMs, é necessário identificar e eliminar (ou pelo menos reduzir) as fontes de variação que sejam controláveis. Os **diagramas de causa e efeito** (ou diagrama de Ishikawa, Espinha de Peixe, ou, ainda, diagrama 6M) servem como uma ferramenta de raciocínio para analisar as fontes de variação dos sistemas de medição.

A abordagem e solução de forma mais estruturada dos problemas apresentados por um SM pode ser conduzida por meio da aplicação de um método de análise e solução de problemas, como o Método de Análise e Solução de Problemas (MASP), também conhecido como *método PDCA para solução de problemas*. Para problemas de maior complexidade, pode ser utilizada a abordagem e os conhecimentos do Programa Seis Sigma, aplicando-se o método DMAMC (Etapas: Definir, Medir, Analisar, Melhorar e Controlar) com emprego de técnicas estatísticas específicas em cada uma dessas etapas.

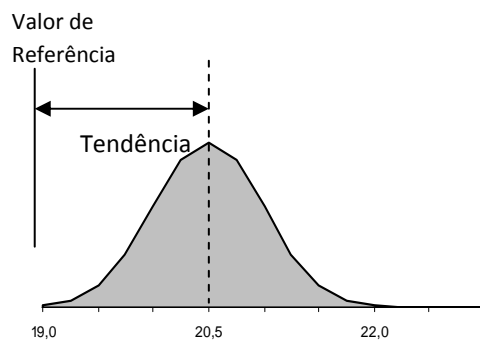
As fontes de variações inerentes aos sistemas de medição podem levar à obtenção de resultados que não correspondem à realidade do valor da característica medida no produto e, conseqüentemente, à tomada de decisões erradas sobre produtos e processos que afetam a eficiência e a eficácia das operações que geram esses produtos. Uma decisão errada sobre a não conformidade de um produto que na verdade está conforme reduz a produtividade e aumenta os custos da não qualidade, podendo gerar atrasos nas entregas.

Conceitos e termos que se aplicam na análise das variações de sistemas de medição

Apresentam-se a seguir os principais termos e conceitos que se aplicam na análise de um sistema de medição, seja na quantificação da variação do SM, na sua interpretação ou no planejamento de melhorias desses sistemas.

- **Tendência (ou erro sistemático)** – É a diferença entre a média observada das medições realizadas e o valor de referência. Este pode ser um padrão ou um valor determinado com base nas medidas obtidas por instrumento de maior precisão que aquele que está sendo avaliado. Um termo usado com frequência para designar a tendência é *exatidão*. A Figura a seguir ilustra o conceito de tendência ou erro sistemático.

Figura 1: Tendência/erro sistemático de um sistema de medição



Fonte: AIAG, 2004.

Nesse exemplo, o valor de referência é 19,0 e a média das medições realizadas é 20,5. Portanto, a tendência ou erro sistemático é de 1,5 unidades.

- **Reprodutibilidade** – Representa a diferença entre a média das medições realizadas por diferentes operadores/inspetores/avaliadores, utilizando o mesmo dispositivo de medição para medir a mesma característica de qualidade. Como exemplo, podemos citar um eixo mecânico: um operador realiza 10 medições do

diâmetro de 10 unidades de peças, e outro operador mede o diâmetro dessas mesmas 10 peças. Calcula-se a média das 10 medições de cada operador. **A reprodutibilidade representa a diferença entre as médias das medições desses dois operadores.** Quanto menor for a diferença entre os dois valores médios significa que o sistema de medição utilizado é capaz de reproduzir os mesmos valores, quando utilizado por diferentes pessoas, considerando que as duas pessoas possuem nível de qualificação equivalente. Ou seja, o sistema de medição teria uma boa reprodutibilidade.

Embora a definição e o exemplo apresentados para reprodutibilidade abordem a diferença entre dois operadores, nessa análise pode ser considerado qualquer fator variável de medição, como o método ou as condições ambientais de realização da medição.

- **Repetitividade:** É a variação das medições realizadas por um mesmo operador utilizando o mesmo dispositivo de medição e medindo a mesma característica de qualidade de uma mesma peça. Por exemplo, o inspetor/operador realiza 10 medições de uma mesma característica de uma peça. A amplitude, que é a diferença entre o maior valor medido e o menor, bem como o desvio padrão desses 10 valores, seriam indicadores da repetitividade. Em princípio, quanto menor o valor da amplitude e do desvio padrão dessas 10 medições, melhor é a repetitividade do sistema de medição.
- **Estabilidade:** É a variação das medições obtidas com um dispositivo de medição medindo a mesma característica de uma mesma peça ou padrão ao longo do tempo. Uma menor variação entre as medições significa maior estabilidade do dispositivo de medição – uma característica desejada dos instrumentos e dos sistemas de medição.
- **Linearidade:** É a diferença nos valores de tendência ao longo do campo de medição do dispositivo de medição. Considere um instrumento de medição, como um paquímetro que mede dimensões lineares de até 150 mm. Se esse campo de medição for dividido em 10 partes, cada parte teria um tamanho de 15 mm. É possível medir o comportamento da tendência desse paquímetro quando este estiver sendo utilizado para medir dimensões ao longo do campo de medição. O ideal é que o paquímetro apresente a mesma tendência, independente da faixa de valores que ele está medindo, dentro de sua capacidade de medição. Com essa análise, podem surgir respostas às seguintes questões : Será que a tendência é a mesma quando o paquímetro está sendo utilizado para medir valores na faixa de 0 a 15 mm, de 15 mm a 30 mm, de 30 a 45 mm e de 135 a 150 mm? Será que a tendência depende e varia

conforme a ordem de grandeza que está sendo medida ao longo do campo de capacidade do instrumento?

Conhecidos os principais termos e conceitos que se aplicam à análise da variação de um SM, a seguir apresentamos o procedimento geral para análise da R&R que é o principal indicador utilizado para análise desse sistema.

Procedimentos para análise da R&R

Como já mencionado, três métodos de análise de sistemas de medição podem ser aplicados no estudo dos erros de R&R:

- 1. Método numérico, fundamentado na média e na amplitude(ou no desvio padrão) do conjunto de valores medidos;
- 2. Método de análise gráfica, após coletados os resultados;
- 3. Método da Análise de Variância (Anova).

Neste texto, serão tratados o método numérico (considerando a média e amplitude) e o método gráfico. O Método Anova requer aplicação de conceitos e técnicas estatísticas de maior complexidade.

Método numérico

Esse método basicamente decompõe a variação do sistema de medição, separando-a em variação devido à repetitividade e à reprodutibilidade.

O procedimento para o **método numérico** é o seguinte:

1. Obter uma amostra representativa, de tamanho **n**, de peças manufaturadas pelo processo de fabricação do produto. Isso é fundamental para que a avaliação da capacidade de detecção de mudanças no processo, pelo SM, seja efetivamente realizada.

2. Identificar cada avaliador (inspetor ou operador) que será considerado e avaliado no sistema de medição, com uma letra (por exemplo: avaliador A, B, C) e as peças com um número (1, 2, 3,..., n), de modo que os números das peças não sejam visíveis aos avaliadores.

3. Obter do avaliador A as medidas das n peças, de modo aleatório, seguindo um procedimento de medição.

4. Obter do avaliador B e C as medidas das n peças, sem que um avaliador conheça as medidas do outro.

5. Repetir o ciclo de medição seguindo uma ordem diferente para as peças. No entanto, como as peças estão de alguma forma identificadas para quem está

coordenando o experimento, será possível registrar os valores de medição de cada operador para cada peça e em cada ciclo de medição da mesma peça.

6. Calcular as estimativas dos desvios padrão.

7. Calcular a variância conjunta (o quadrado do desvio padrão) da R&R.

8. Multiplicar o resultado da variância da R&R pelo fator 5,15 (que representa 99% da área da distribuição normal reduzida) – esse valor representa a faixa de **variação do equipamento**, dentro da qual estariam 99% das medições realizadas sob as mesmas condições.

9. Dividir o resultado obtido na multiplicação pela tolerância da especificação de projeto da peça. Se o resultado for menor que 20% dessa tolerância, o sistema de medição pode ser considerado aprovado.

10. Outro procedimento, complementar ao que está no passo 9, é dividir o valor da variância de R&R pela variação total do processo, que é a soma das variâncias de R&R e do processo. Da mesma forma que o outro método (passo 9), se o resultado for menor que 20%, o sistema de medição é **aprovado**.

Com a aplicação desses passos chega-se a um conjunto de indicadores que permite analisar a adequação de um SM, por meio de sua R&R. A seguir apresentamos o cálculo operacional para se chegar aos valores que indicam a R&R.

Determinação da R&R

Neste tópico/seção apresentamos os procedimentos para cálculos, e exemplos, das estimativas para os valores da repetitividade e da reprodutibilidade.

Repetitividade

A estimativa do desvio padrão do equipamento de medição, representada por S_e , é determinada por \bar{R}/d_2 , em que \bar{R} é a amplitude média das repetições de medições realizadas pelos avaliadores.

Portanto:

$$S_e = \frac{\bar{R}}{d_2}$$

A constante d_2 se refere a um ajuste (correção) a ser feito, de acordo com Duncan (1974), por se estar estimando o desvio padrão por meio da amplitude. Os valores de

d_2 em função de n (tamanho das amostras para as quais se calculou cada amplitude, que geraram o \bar{R}).

A **variação do equipamento (VE)**, é definida (conforme Duncan, 1964 e Aiag, 2008) como sendo $S_e \times 5,15$. A constante d_2 pode ser obtida pela Tabela 1, elaborada em função do:

- **número de amostras utilizados para se calcular o valores de \bar{R}** (que neste caso é o número de peças medidas no experimento de análise do sistema de medição multiplicado pelo número de avaliadores); e

- **do número de repetições das medições.**

A constante 5,15 se refere à consideração teórica de uma faixa(intervalo) que contem 99% dos possíveis valores medidos(no estudo de análise da VE), admitindo que os mesmo seguem uma distribuição Normal. Assim $S_e \times 5,15$ representa uma faixa de variação estimada para os possíveis valores medidos considerando a variação do equipamento.

Tabela 1 – Constante d_2^* para a estimativa do desvio padrão

		Número de repetições (m)								
		2	3	4	5	6	7	8	9	10
Número de amostras (g)	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	1,18	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	1,17	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	1,16	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	1,13	1,69	2,06	2,33	2,53	2,70	2,85	2,97	3,08

Fonte: Duncan, 1974 (Table D₃, Appendix II), p.950.

Exemplo

Considere que três avaliadores mediram três vezes a mesma característica da mesma peça, e que cada avaliador mediu quatro peças (os resultados dessa medição estão na Tabela 2). A amplitude (R), bem como a média (\bar{X}), foram calculadas para todas as peças medidas pelos três avaliadores.

A média das amplitudes é:

$$\bar{R} = \frac{\sum R}{n}, \text{ em que } n \text{ corresponde ao número de estimativas de } R:$$

$$\text{Ou seja: } \sum R = 0,060_1 + 0,020_2 + 0,000_3 + 0,010_4 + 0,020_5 + 0,010_6 + 0,010_7 + 0,010_8 + 0,170_9 + 0,140_{10} + 0,160_{11} + 0,100_{12} = \mathbf{0,710}$$

n = 12 valores de R

$$\bar{R} = \frac{0,710}{12} = \mathbf{0,059}$$

Tabela 2 – Dados de medições para um estudo da R&R

Ciclo de medição	Avaliador A				Avaliador B				Avaliador C			
	Peça 1	Peça 2	Peça 3	Peça 4	Peça 1	Peça 2	Peça 3	Peça 4	Peça 1	Peça 2	Peça 3	Peça 4
1	22,52	22,47	22,51	22,49	22,52	22,46	22,53	22,48	22,50	22,45	22,46	22,44
2	22,55	22,45	22,51	22,50	22,51	22,47	22,52	22,49	22,42	22,35	22,35	22,34
3	22,49	22,46	22,51	22,50	22,50	22,46	22,52	22,48	22,33	22,31	22,30	22,39
R	0,060	0,020	0,000	0,010	0,020	0,010	0,010	0,010	0,170	0,140	0,160	0,100
\bar{X}	22,520	22,460	22,510	22,497	22,510	22,463	22,523	22,483	22,417	22,370	22,370	22,390

Fonte: Adaptado de Aiag, 2004.

Para estimativa do desvio padrão, procede-se do seguinte modo:

A constante d_2 é 1,710, conforme a Tabela 7.1, considerando $g = 12$ (número de amostras utilizadas para se calcular os valores de R e o \bar{R}) e $m = 3$ (número de repetições de uma medição de uma mesma peça).

A estimativa do desvio padrão do erro de repetitividade ou da variação do instrumento de medição é:

$$S_e = \frac{\bar{R}}{d_2} = \frac{0,059}{1,710} = \mathbf{0,0345}$$

A VE é calculada multiplicando-se o valor de S_e , neste caso 0,0345, por 5,15.

Assim, o valor de VE é 0,1776.

Reprodutibilidade

A reprodutibilidade é a variação das medidas entre avaliadores, que é estimada pela **diferença entre as médias gerais** das medições de cada avaliador. O desvio padrão da diferença das medições entre os operadores, definido por S_o , é estimado pela divisão da amplitude R_o , que é obtida pela diferença entre a maior e a menor média, pela constante d_2 que se aplica à especificidade de análise da reprodutibilidade.

Assim, o desvio padrão relativo à diferença entre os avaliadores é calculado do seguinte modo:

$$S_o = \frac{R_o}{d_2}$$

Exemplo

Tendo como base o exemplo apresentado anteriormente, na Tabela 7.2, as médias globais de cada avaliador são:

Tabela 7.3 – Média global por avaliador

Avaliador	Média
A	22,497
B	22,495
C	22,387

Assim, o desvio padrão da diferença entre os avaliadores será:

$$S_o = \frac{22,497 - 22,387}{1,910} = 0,058$$

A constante d_2 , obtida pela Tabela 1, é 1,910. As coordenadas (g e m) para se encontrar o valor de d_2 devem ser definidas na Tabela 3. O g neste caso é 1, pois há uma única amostra (também chamada de subgrupo) de dados de média (3 médias), a qual será utilizada para se calcular o R. Ou seja, o R_o foi obtido de uma única amostra (que são os 3 valores das médias dos s avaliadores). Já o m é 3, pois essa amplitude foi calculada a partir de 3 valores de média.

No entanto, teoricamente considera-se que o valor do desvio padrão da reprodutibilidade está “inflacionado” pelo desvio padrão da repetitividade, ou seja, ele incorpora também a variação inerente ao instrumento de medição. Os valores das medidas têm incorporado neles a variação devida ao instrumento de medição usado para calcular o S_o . Desse modo, o desvio padrão da reprodutibilidade (S_o) pode ser corrigido subtraindo-se dele a influência da variação do equipamento (S_e) dividida pelo produto entre o número de peças e o número de repetições, com forme recomendado por Duncan (1974). Assim o S_o corrigido segue a equação:

$$\sigma_{o \text{ (corrigido)}} = \sqrt{\sigma_o^2 - \frac{\sigma_e^2}{nr}}$$

Em que:

n = número de peças

r = número de repetições

O desvio padrão corrigido do exemplo será:

$$\sigma_o = \sqrt{0,058^2 - \frac{0,0345^2}{4 \times 3}} = \mathbf{0,05714}$$
 (valor corrigido, que neste caso é pouco

diferente de 0,058).

A variação entre os avaliadores (VA) é obtida multiplicando-se S_o por 5,15.

Assim, após a correção, obtém-se que o valor de VA é 0,2943.

A análise numérica indica que o erro de reprodutibilidade (0,2943) é maior que o da repetitividade (0,1776). Ou seja, o SM possui um erro maior devido a variações entre os avaliadores do que devido à variabilidade do instrumento de medição. Isso

indicaria a necessidade de sistematizar e padronizar melhor o processo de medição e homogeneizar a capacitação e a forma de atuação dos avaliadores, pois as diferenças de resultados de medição entre eles estão introduzindo mais variação.

Utilizando-se de métodos gráficos, conforme veremos a seguir, é possível identificar outras informações, complementares à análise numérica, e compreender melhor as causas das fontes de erros do processo de medição.

Análise gráfica dos resultados

A primeira análise gráfica recomendada é verificar se todas as amplitudes dos resultados do experimento estão dentro de um padrão de variação, de forma que possa ser considerada uma variação aleatória. Em outras palavras, significa identificar se o processo de medição está sob controle estatístico. Isso é feito determinando-se os limites de variação aleatória para os valores da amplitude.

Os limites de controle estatístico da amplitude (R), ou seja de variação aleatória da amplitude, são os seguintes:

$$LSC_R = D_4 \times \bar{R}$$

$$LIC_R = D_3 \times \bar{R}$$

Em que:

LSC_R = Limite Superior de Controle de R, e

LIC_R = Limite Inferior de Controle de R.

E \bar{R} é a média dos 12 valores de R que constam na Tabela 2.

D_3 e D_4 são constantes cujos valores podem ser obtidos na Tabela 4.

Com base no exemplo anterior, cujos dados estão na Tabela 2, \bar{R} é igual a 0,059. Conforme a Tabela 7.4, D_3 é igual a zero e D_4 é igual a 2,575. Nesta tabela 7.4 o n se refere ao tamanho de cada amostra que foi utilizada para se calcular cada R. Neste exemplo cada amostra foi de n = 3 valores de dimensão.

Portanto, os limites de controle para os valores de R são os seguintes:

$$LSC_R = 0,1519$$

$$LIC_R = 0$$

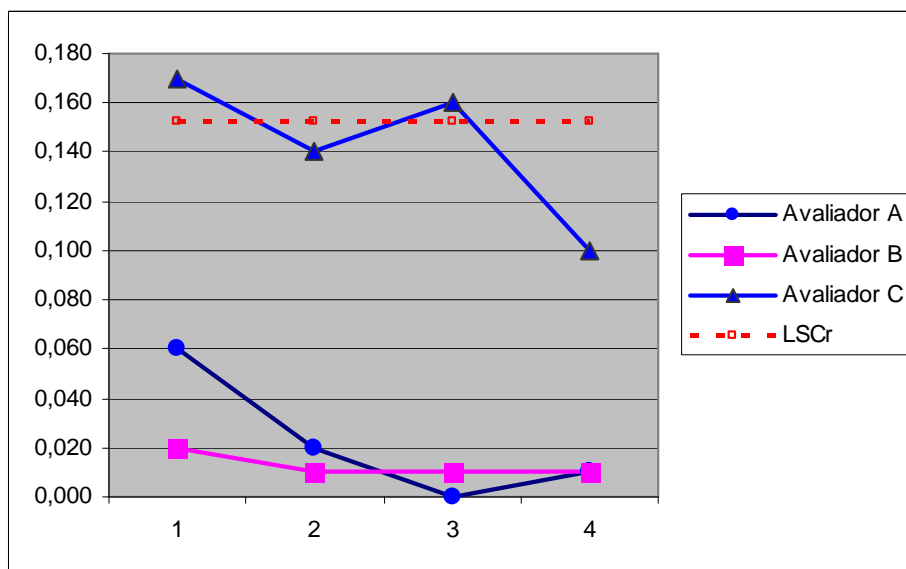
A linha central do gráfico é 0,059.

O Gráfico 2 mostra os limites de controle e os valores das amplitudes de cada um dos três avaliadores (com base nos dados da Tabela 2).

Tabela 4 – Constantes dos gráficos de controle estatístico

Número de observações (n) por subgrupo ou amostra		D ₃	D ₄
2		0	3,267
3		0	2,575
4		0	2,282
5		0	2,115
6		0	2,004
7		0,076	1,924
8		0,136	1,864
9		0,184	1,816
10		0,223	1,777
11		0,256	1,744
12		0,284	1,716
13		0,308	1,692
14		0,329	1,671
15		0,348	1,652

Gráfico 2 – Análise do desempenho do processo de medição dos três avaliadores



Fonte: Elaborado pelo autor.

*OBS.:

Eixo X = Peças medidas (nesse caso, são quatro peças).

Eixo Y = Valores da amplitude de cada peça, medida por meio de cada avaliador.

Analisando o Gráfico 2, observamos que parece significativa a diferença de desempenho do avaliador C em relação aos avaliadores A e B. Para se realizar uma análise quantitativa da significância dessa diferença (se essa diferença é significativa ou se seria uma diferença apenas aleatória), podem ser aplicados testes estatísticos de análise de significância, como o Teste F de Snedecor e teste t de Student.

O avaliador C possui um erro de repetitividade maior que os outros, indicando uma possível falta ou falha de procedimento e treinamento para medir as peças com o dispositivo de medição utilizado no estudo. Por esse critério, o avaliador B é o que apresenta o melhor desempenho na medição, demonstrando os menores valores de amplitude nas medições realizadas e maior estabilidade desses valores quando em avaliação de diferentes peças. Observamos que a curva do avaliador B é a que varia menos (quase uma reta horizontal), quando se mediu as peças de 1 a 4.

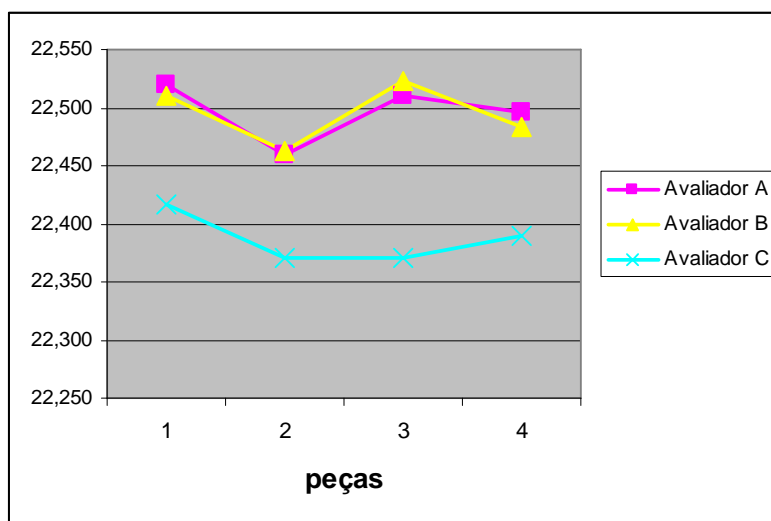
Uma conclusão parcial desse estudo é que o processo de medição não está sob controle. É necessário uma **análise das causas** e planejar ações de melhoria do sistema de medição.

Nesse exemplo, o resultado da **análise numérica** indicou que o erro de reprodutibilidade é maior que o de repetitividade. Para isso, supõe-se que a média da medição de cada peça, obtida individualmente pelos avaliadores, seja

significativamente diferente. O Gráfico 3 apresenta a média das medições das peças de cada avaliador.

Dos gráficos 2 e 3, pode-se concluir que o avaliador C é uma importante fonte de erro tanto para a repetitividade, aumentando a média das amplitudes (\bar{R}), como para a reprodutibilidade, pois é o que apresenta a maior diferença nos resultados médios entre os analistas ($\bar{X}_C = 22,387$) em relação á media geral de todas as peças medidas (média geral = 22,459).

Gráfico 3 – Análise do desempenho do processo de medição dos três avaliadores, considerando a média das medições de cada uma das 4 peças



Fonte: Elaborado pelo autor.

*OBS.:

Eixo X = Peças medidas individualmente pelos avaliadores (quatro peças).

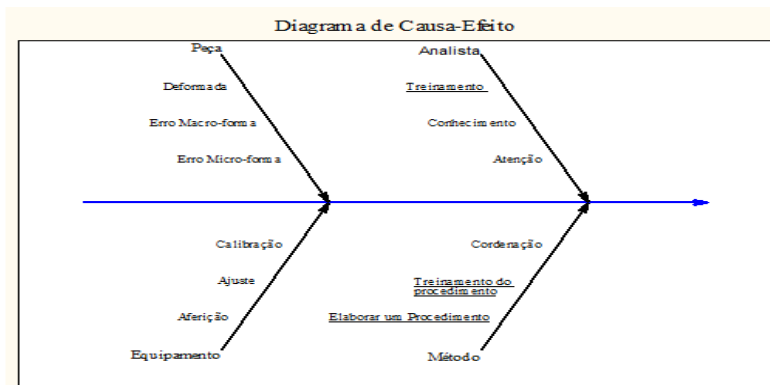
Eixo Y = Média das medições de cada peça para cada avaliador.

Análise das causas

Uma maneira relativamente simples de analisar as causas prováveis dos erros de medição é utilizar o **diagrama de causa e efeito** – uma das ferramentas básicas da qualidade.

O Gráfico 4 mostra a análise dos problemas de medição para o exemplo apresentado anteriormente. As causas sublinhadas são consideradas as mais significativas para melhorar o processo de medição.

Gráfico 4 – Diagrama de causa e efeito aplicado na análise de sistemas de medição



Considerando as causas expostas, poderiam ser propostas as seguintes ações com a finalidade de melhoria:

- Treinar os avaliadores (inspetores) no uso dos instrumentos de medição, tais como: paquímetros, micrometros e relógios comparadores.
- Criar um procedimento de medição de modo a reduzir os erros de reprodutibilidade.
- Planejar e agir para obter a adesão dos avaliadores ao procedimento de medição.

A implantação dessas ações deve planejada e acompanhada para avaliar a efetividade de seus resultados. Após a implantação das ações de melhoria, podem ser realizados novos estudos de análise da R&R para constatar se foram gerados os resultados de melhoria esperados.

Utilizando um *software* de estatística

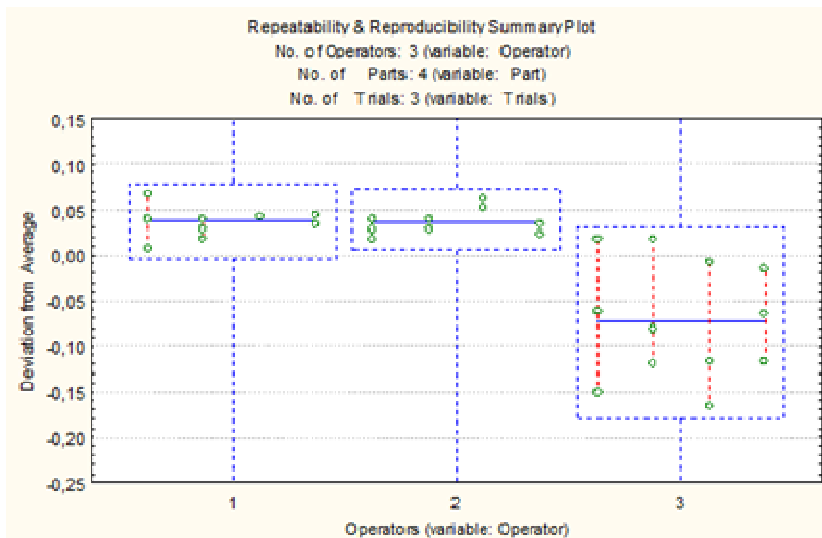
Uma ferramenta de auxílio ao estudo de sistemas de medição é um *software* de estatística, dentre as diversas alternativas que existem disponíveis no mercado. Eles oferecem várias opções de análise, como:

- Análise de variância (Anova);
- Análise descritiva por meio de gráficos;
- Percentual de contribuição de cada fonte de variação;
- Gráficos Boxplot de cada analista;
- Decomposição da variância.

Algumas dessas análises foram aplicadas no exemplo citado e são mostradas nos gráficos 5, 6 e 7.

Os resultados gerados via software, também mostram que o avaliador C apresenta um erro maior na repetitividade (maior \bar{R}) e na reprodutibilidade (menor média), em relação aos outros dois avaliadores.

Gráfico 5 – Diagrama representando a média e o desvio padrão dos erros de repetitividade e reprodutibilidade dos 3 avaliadores



Fonte: Elaborado pelo autor.

O Gráfico 5 mostra que o avaliador A:

- gerou três resultados diferentes quando mediu a primeira peça;
- gerou resultados diferentes, mas bastante próximos quando mediu a segunda peça;
- gerou três resultados iguais quando mediu a terceira peça;
- gerou dois valores iguais e um diferente, mas próximo, quando mediu a quarta peça.

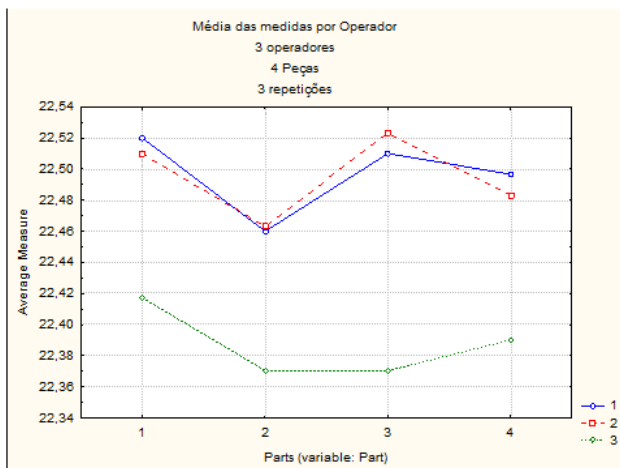
Como se vê no mesmo gráfico, o avaliador B:

- apresentou as menores diferenças nas medições repetidas de uma mesma peça.

Já o avaliador 3 (C):

- apresentou resultados diferentes em todas as medições de todas as peças.

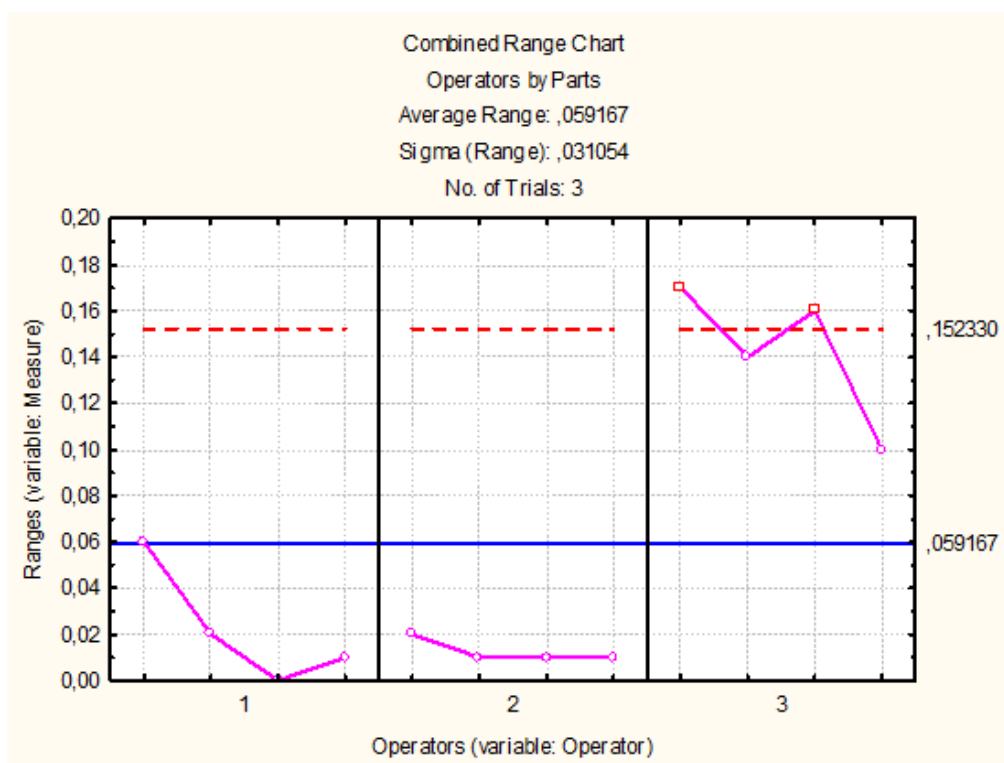
Gráfico 6 – Representação gráfica das médias obtidas individualmente por avaliador



O gráfico 6 evidencia que os avaliadores A e B obtiveram, em média, resultados de medição próximos entre si enquanto os resultados da medição pelo avaliador C estão sistematicamente afastados. Nas 4 peças medidas os resultados de C estão com uma tendência de valores inferiores aos demais avaliadores. Ou seja, o C está obtendo resultados de medição inferiores, em todas as peças e pode-se inferir que essa tendência se mantém ao longo do tempo. Nenhuma das médias das medições das 4 peças, pelo avaliador C, esteve próxima dos resultados de A e B e nem acima.

Essa observação de comportamento de uma tendência pode ajudar a identificar as causas e melhorar o desempenho de C.

Gráfico 7 – Representação gráfica da amplitude para os três analistas



Fonte: Elaborado pelo autor.

Observa-se no gráfico 7.7, gerado por um software padrão na área, que os resultados das medições do avaliador C diferem mais entre si, por isso apresentam maior amplitude, em relação aos resultados de A e B, em todas as medições das quatro peças medidas. Isso significa que mesmo na replicação da medição de uma mesma peça (ou seja, quando ele repete a medição de uma mesma peça) ele gera resultados relativamente diferentes. Já o avaliador B apresenta medições com menor variação, seja replicando a mesma peça ou medindo peças diferentes. Esse gráfico evidencia uma maior estabilidade nos resultados das medições realizadas pelo avaliador B.

Determinação da variação entre as peças e da variação total

O desvio padrão da **variação entre as peças** é estimado pela determinação das médias de cada peça e pelo cálculo da amplitude dessas médias (chamado de R_p).

Assim, o desvio padrão da variação entre as peças é estimado por $\frac{R_p}{d_2}$.

Exemplo

Com base no exemplo anterior, apresentado na tabela 2, observa-se as seguintes médias de cada peça (considerando as análises dos três avaliadores), conforme consta na Tabela 5.

Tabela 5 – Médias das peças

Peça	1	2	3	4
Média	22,482	22,431	22,468	22,457

Por exemplo: a média 22,482 da primeira peça é o resultado da média das 9 medições desta peça, uma vez que ela foi medida 3 vezes por cada um dos 3 avaliadores.

A amplitude R_p é igual a 0,051 (ou seja: 22,482 – 22,431). E d_2 é igual a 2,24, conforme a Tabela 1), considerando que nos dados agora analisados (que estão na Tabela 5) tem-se uma única amostra de quatro valores de média, e é dessa única amostra que se extraiu o valor da amplitude, portanto, as coordenadas para entrada na Tabela 1 são: linha(g): 1; coluna (m): 4.

Assim,

$$S_p = \frac{0,051}{2,24} = 0,023$$

A **variância total** é estimada por (S_T^2) e é a soma das variâncias dos erros de repetitividade (S_e^2), reprodutibilidade (S_o^2) e da variação entre as peças (S_p^2). Portanto, o **desvio padrão total** é determinado como:

$S_T = \sqrt{S_e^2 + S_o^2 + S_p^2}$, sendo que $S_{RR}^2 = S_e^2 + S_o^2$ é a soma das variâncias dos erros de repetitividade e de reprodutibilidade.

Exemplo

Considerando o exemplo anterior, temos:

$$S_T = \sqrt{0,0345^2 + 0,05714^2 + 0,023^2} = 0,07057$$

A soma dos erros de repetitividade e de reprodutibilidade é dada por:

$$S_{RR} = \sqrt{0,05714^2 + 0,0345^2} = 0,06674$$

Critérios para aceitação do sistema de medição

Um SM é considerado adequado para o controle da qualidade de uma peça e do processo quando a variação da R&R é significativamente menor que a variação do processo, que é estimada pelo desvio padrão entre as peças.

Um critério também utilizado consiste na análise das variâncias envolvidas (que matematicamente representa o quadrado do desvio padrão) no SM.

A Tabela 6 apresenta os resultados das variâncias para a R&R e entre as peças do exemplo estudado.

Tabela 6 – Fontes de variação e contribuição para a variação total

Fonte de variação	Medida em desvio padrão	Medida em Variância (o quadrado do desvio padrão)	% de contribuição de cada variância em relação à variância total
Repetitividade	$S_e = 0,0345$	0,00119	23,89%
Reprodutibilidade	$S_o = 0,05714$	0,003265	65,56%
R&R	0,06674	0,004454	89,43%
Entre Peças	$S_p = 0,023$	0,00053	10,64%
Total	$S_T = 0,07057$	0,004980	100%

Fonte: Elaborado pelo autor. OBS: eventuais pequenas diferenças nas somas se devem a arredondamentos dos valores.

Como a porcentagem (%) de contribuição da R&R é maior que 20%, e nesse caso é significativamente maior, pois corresponde a 89,43% do total, conclui-se que, nessas condições, o SM utilizado é inadequado para o controle do processo de manufatura da peça.

Como se vê, a variação total observada nos valores medidos, teria uma parcela muito maior devido à variação inerente ao SM (**89,43%**) do que em relação à variação inerente ao processo de manufatura (**10,64%**).

Assim, quando se mede uma peça por meio desse SM e se constata que a peça está dentro ou fora das especificações de projeto, ou então que há a necessidade de intervenção no processo de manufatura da peça, corre-se um elevado risco de essa constatação estar errada. A variação poderia não estar ocorrendo de fato no processo de produção, mas provavelmente seria resultado de variação devida ao SM.

Uma forma complementar de análise da adequação e capacidade de um sistema de medição é considerar a **tolerância de projeto da peça** como referência para essa análise, conforme veremos no exemplo a seguir.

Exemplo: para uma tolerância de $\pm 0,25$ mm, ou seja, uma faixa de tolerância total de 0,50 mm, para o comprimento de uma determinada peça, a decisão sobre a adequação do SM para inspecionar essa peça pode ser baseada numa análise conforme demonstrado na Tabela 7. Nesta análise considera-se que a faixa de variação da R&R ($5,15 \times R\&R$) deve ser inferior a 20% da tolerância total de projeto.

Tabela 7 – Fontes de variação e participação de cada fonte no intervalo de variação do processo¹

Fonte de variação	Desvio padrão (DP)	DP x 5,15	DP x 5,15/tolerância (0,50)
Repetitividade	0,0345	0,177675	35,53%
Reprodutibilidade	0,05714	0,294271	58,85%
R&R	0,06674	0,343711	68,74%
Peça a peça	0,023	0,11845	23,69%
Total	0,07057	0,363435	72,69%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Como a R&R (representada por DP da R&R vezes 5,15) representa 68,74% da tolerância total de projeto da peça, o SM atual é considerado inadequado para controlar essa característica de qualidade de tolerância de $\pm 0,25$.

¹ Nesse caso, considera-se a referência de 99% da variação total do processo, o que é indicado pela constante 5,15, e compara-se essa faixa de valores com a tolerância total de projeto. O fator 5,15 vem da Tabela da Distribuição Normal (disponível em qualquer livro sobre Estatística), admitindo-se que essa característica (dimensão) da peça segue uma distribuição Normal.

No enfoque de análise do SM, considerando a tolerância total do projeto, o sistema é considerado adequado quando a R&R, medida como sendo $S_{RR} \times 5,15$, for menor ou igual a 20% da tolerância de projeto (nesse caso, a tolerância total de projeto é 0,50

Outras fontes de erros que influenciam no valor da R&R

Os resultados das análises da R&R são afetados por outras fontes de erros que não estão somente relacionadas ao instrumento e aos avaliadores.

Há algumas fontes de variações que, se não forem controladas, podem levar a conclusões erradas sobre o SM. Entre essas fontes, destacam-se as influências dos **erros de macro e microforma** das unidades ou peças medidas:

- Os erros de **macroforma** referem-se aos erros macrogeométricos dos objetos medidos, tais como cilindricidade, planicidade, ovalização etc.
- Os de **microforma** são, por exemplo, os de rugosidade superficial, rebarbas, cantos danificados, e também introduzem erros em uma medição. Esses “erros” nas superfícies das peças podem interferir nas medições obtidas.

Assim, os erros em uma medição podem parcialmente ser atribuídos a características próprias das peças. O empenamento, por exemplo, introduz um erro na medição que pode ocorrer em diversos tipos de peças, tais como: chapas, peças de paredes finas, perfis e eixos de comprimento muito maior que a espessura.

A infraestrutura e o ambiente de uso do SM também afetam os resultados obtidos, como a iluminação, os aspectos ergonômicos (altura, peso, posição, movimentação e disposição dos instrumentos e objetos) e a temperatura (do mensurando/peça, do instrumento e do ambiente).

Em maior ou menor grau, os materiais possuem a propriedade de dilatação térmica, modificando suas dimensões em função das variações de temperatura a que estão sujeitos.

Um sistema de medições lineares também é influenciado pela dilatação térmica. Desse modo, se no ambiente de medição a temperatura for superior a 20° C, por exemplo, as dimensões apresentadas pelo SM também sofrerão alterações e introduzirão erros. A temperatura do ambiente pode alterar e assim dilatar simultaneamente a peça que está sendo medida e o instrumento de medição.

Por mais automatizado e normalizado que seja um SM, em todas as etapas de um processo de medição haverá algum grau de participação de seres humanos, seja no planejamento e condução da medição, seja no registro e na análise dos dados. São diversos os tipos e fontes de erros especificamente associados às pessoas envolvidas.

O Quadro 1 apresenta, com base nos trabalhos de Juran e Gryna (1994) e de Werkema (2008), uma compilação dos tipos de erros humanos e soluções recomendadas para sua minimização.

Quadro 1 – Tipos de erros humanos em medições e possíveis soluções

Tipos de erro	Comentários	Soluções
Má interpretação	Para garantir interpretações uniformes das palavras e números (dados numéricos e dados de linguagem), é necessário prover interpretações precisas, acrescidas de instrumentos auxiliares, como listas de verificação e exemplos. Também devem ser fornecidas informações detalhadas e exemplos de como calcular, resumir, registrar etc. Em medições críticas, deve-se prover treinamento formal, juntamente com exames para verificar a “capacidade” dos candidatos a avaliadores (sensores) em relação às necessidades do processo.	<ul style="list-style-type: none"> • Definição precisa dos dados numéricos e de linguagem • Definir e disponibilizar um glossário de termos • Listas de verificação • Apresentar exemplos sobre o que está sendo medido, registrado, avaliado etc.
Erro inadvertido	O erro inadvertido é não intencional, imprevisível e muitas vezes inconsciente, isto é, a pessoa que comete o erro não está, naquele momento, consciente de tê-lo cometido. A característica imprevisível do erro gera um comportamento aleatório nos dados, que é útil para a identificação de que os erros são do tipo inadvertido. As soluções para esse tipo de erro são limitadas, pois as causas básicas dos erros são deficiências do ser humano, tal como a incapacidade para se manter sempre atento à atividade que está sendo executada..	<ul style="list-style-type: none"> • Testes de aptidão para identificar as pessoas mais adequadas para as tarefas em questão • Reorganização do trabalho para reduzir fadiga e monotonia (períodos de descanso, rotação de tarefas etc.) • Implantar mecanismos à prova de erros (<i>Mistake-Proofing</i> ou <i>Poka-Yoke</i>) • Redundância de controles (controles a mais e repetidos; controle do controle, etc) • Automação e robótica
Falta de conhecimento técnico e experiência	Esse é resultante do conhecimento incompleto por parte do avaliador humano. Algumas pessoas desenvolvem uma forma mais habilidosa (um “truque”), ou seja, uma pequena diferença no método de trabalho que traz também uma diferença nos resultados. Aqueles que conhecem o “truque” obtêm resultados superiores, os outros não. A solução nesse caso é estudar os métodos utilizados por aqueles que têm desempenho superior e pelos que apresentam desempenho	<ul style="list-style-type: none"> • Identificação das formas mais habilidosas (melhores práticas) de condução dos procedimentos adotadas pelos trabalhadores bem sucedidos • Revisão da

	inferior. Esses estudos identificam os “truques” e conhecimentos tácitos, que podem ser transferidos a todos os trabalhadores, por meio de treinamento ou, se possível, incorporados à tecnologia do processo de manufatura ou do sistema de medição.	tecnologia utilizada para incorporar as melhores práticas <ul style="list-style-type: none"> • Retreinamento
Erro consciente: dissimulação, distorção e inutilidade	<p>O erro consciente é intencional. A pessoa que comete esse erro sabe quando o comete e pretende continuar a cometê-lo, muitas vezes, como uma forma de defesa contra injustiças reais ou imaginárias.</p> <p>A dissimulação é uma alteração dos dados coletados, devido a uma variedade de propósitos normalmente pessoais: redução da carga de trabalho, fuga de tarefas desagradáveis, auto engrandecimento, medo de ser punido por ser portador de más notícias etc. A redução da dissimulação pode ser alcançada, em parte, pelo estabelecimento de um ambiente que favoreça a comunicação franca e aberta, o que exige liderança, por meio de exemplos da alta administração.</p> <p>A distorção e a dissimulação são semelhantes, mas existem diferenças sutis. Na dissimulação, o operador conhece os fatos, mas os altera conscientemente. A distorção não é necessariamente consciente, sendo possível a existência de forças interiores que influenciam a resposta do sensor humano (por exemplo, ideias fixas devidas ao hábito). A distorção pode até mesmo ser inerente à estrutura do plano de atuação dos sensores humanos.</p> <p>A sensação de inutilidade é outra fonte de erro consciente. Se os colaboradores descobrem que seus relatórios de dados e informações não levam a nada, eles deixam de fazê-los. A situação é ainda pior se os trabalhadores percebem que sua recompensa por agirem como sensores e controladores de dados é uma possível imposição de culpa, injustificada, pela eventual falha que estiver sendo apontada por um dado.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Revisão do plano de coleta de dados • Remoção da “atmosfera de culpa”, ou seja, abordagem da ocorrência de erros de forma construtiva. Por exemplo: “O que podemos fazer em conjunto para reduzir tais erros no futuro?” • Reduzir o medo desnecessário no ambiente de trabalho • Tomada de decisão com base nas informações apresentadas nos relatórios ou explicação do motivo da ausência de tomada de ação • Despersonalização das ordens de trabalho • Estabelecimento de responsabilidade • Provisão de ênfase equilibrada nas metas • Condução de auditorias da qualidade • Criação de incentivos e recompensas • Realocação do trabalho às pessoas

Fonte: Adaptado de Juran; Gryna, 1994; Werkema, 2008.

Um Exemplo de Dados coletados numa medição

Folha de coleta de dados para a R&R												
Avaliador/Medição o nº	PEÇA										Média	
	2	3	5	7	8	10	11	12	13	14		
Avaliador A	1	19,10	19,20	19,05	19,10	18,80	19,20	19,30	18,50	19,10	19,10	19,05
	2	19,10	19,15	19,00	19,10	18,80	19,10	19,20	18,50	19,00	19,10	19,01
	3	19,15	19,15	19,05	19,15	18,80	19,15	19,20	18,55	19,05	19,10	19,04
Média		19,12	19,17	19,03	19,12	18,80	19,15	19,23	18,52	19,05	19,10	$\bar{X}_A = 19,03$
Amplitude		0,05	0,05	0,05	0,05	0,00	0,10	0,10	0,05	0,10	0,00	$R_A = 0,05$
Avaliador B	1	19,15	19,20	19,10	19,20	18,85	19,10	19,30	18,50	19,10	19,10	19,06
	2	19,10	19,25	19,00	19,15	18,85	19,15	19,30	18,50	19,05	19,15	19,05
	3	19,15	19,20	19,15	19,20	18,85	19,10	19,30	18,50	19,05	19,15	19,07
Média		19,13	19,22	19,08	19,18	18,85	19,12	19,30	18,50	19,07	19,13	$\bar{X}_B = 19,06$
Amplitude		0,05	0,05	0,15	0,05	0,00	0,05	0,00	0,00	0,05	0,05	$R_B = 0,04$
Avaliador C	1	19,15	19,10	18,90	19,05	18,70	19,15	19,35	18,55	18,80	19,15	18,99
	2	19,05	19,15	18,95	19,15	18,70	19,15	19,30	18,50	18,90	19,20	19,01
	3	19,10	19,10	19,00	19,10	18,70	19,15	19,30	18,50	19,00	19,10	19,01
Média		19,10	19,12	18,95	19,10	18,70	19,15	19,32	18,52	18,90	19,15	$\bar{X}_C = 19,00$
Amplitude		0,10	0,05	0,10	0,10	0,00	0,00	0,05	0,05	0,20	0,10	$R_C = 0,07$
Média por peça		19,12	19,17	19,02	19,13	18,78	19,14	19,28	18,51	19,01	19,13	$\bar{X} = 19,03$
												$R_p = 0,77$
$\bar{R} = ([R_A = 0,05] + [R_B = 0,04] + [R_C = 0,07]) / (n^\circ \text{ de avaliadores} = 3)$											$\bar{R} = 0,053$	
$\bar{X}_{DIF} = [X_{Máx} = 19,06] - [X_{Mín} = 19,00]$											$\bar{X}_{DIF} = 0,06$	
$LSC_R = [\bar{R} = 0,053] \times [D_4 = 2,58]$											$LSC_R = \frac{0,1367}{4}$	
*D ₄ = 2,58 (valor aproximado para 3 medições repetidas com base na Tabela 4)												

O LSC_R representa o limite de controle para as amplitudes (R) consideradas individualmente. Aqueles que se situam além desse limite devem ser circulados(assinalados) e a causa deve ser identificada e corrigida. O mesmo avaliador deve repetir as leituras sobre as mesmas peças originalmente usadas ou deve-se descartar tais leituras. Em seguida, todos os cálculos de médias, do R e do LSC_R devem ser refeitos com as leituras restantes.

Nesse caso, nenhum dado foi descartado para o cálculo do LSC_R , pois apenas a amplitude da peça 5 medida pelo avaliador B (0,15) e da peça 13 medida pelo avaliador C (0,20), ficaram acima do limite de controle (0,13674). E esses dois valores têm pouco efeito o conjunto total de dados da Tabela 7.8.

Também é notável que os erros de reprodutibilidade são muito pequenos, visto que as médias dos três avaliadores em cada peça estão muito próximas.

Critérios de aceitação de um sistema de medição

RR	Decisão	Comentários
Abaixo de 10%	Sistema de medição geralmente considerado aceitável	Recomendável, principalmente quando as especificações de projeto são “estreitas” e quando for requerido um controle apertado do processo.
Entre 10% e 30%	Poder ser aceito para algumas aplicações	A decisão deve ser baseada na importância da aplicação da medição que está sendo realizada, no uso e riscos associados à peça que está sendo medida, no custo de um SM de melhor RR, no custo de decisões erradas em função de inadequação do SM.. Neste caso, o sistema de medição adotado pela empresa fornecedora da peça deve ser aprovado pelo cliente.
Acima de 30%	Considerado inaceitável	Deve-se analisar as causas da baixa adequação e melhorar o SM, planejando e implantando as ações necessárias. .

Fonte: Adaptado do Manual de MSA da AIAG (2008).