

ANÁLISE DO SISTEMA DE MEDIÇÃO APLICADOS A ELEMENTOS DE VEDAÇÃO – UM ESTUDO DE CASO

Esdras Weber Soares de Melo (Instituto Federal de Pernambuco) E-mail: ewsm@discente.ifpe.edu.br

José Eduardo Ferreira de Oliveira (Instituto Federal de Pernambuco) E-mail:
joseferreira@recife.ifpe.edu.br

Fernando Jose Pereira de Melo Neto (Instituto Federal de Pernambuco) E-mail:
fjpmn@discente.ifpe.edu.br

Luiz Roberto Oliveira da Silva (Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca) E-mail: lr_silva@yahoo.com.br

Resumo: Neste estudo, os autores apresentam os princípios teóricos utilizados na Análise de Sistema de Medição (MSA), detalhando as diferentes abordagens utilizadas na determinação da repetitividade e da reprodutibilidade de um sistema de medição. A Repetitividade e Reprodutibilidade no contexto da análise de sistemas de medição é são parâmetros que avaliam a capacidade do método de medição em produzir resultados com confiabilidade. As abordagens estudadas são: o método de média e amplitude (abordagem do Automotive Industry Action Group), o método repetitividade e reprodutibilidade honesto (abordagem descrita em Evaluating the Measurement Process) e o método de análise de variância, também conhecido como ANOVA. É feita uma descrição de como é realizada a utilização de cada um desses métodos com aplicação na medição da altura de uma peça de vedação de um tubo. Os resultados das três avaliações foram comparados entre si, sendo apresentadas as principais vantagens e desvantagens de cada estratégia. **Palavras-chave:** Estudo R&R, incerteza de medição, repetibilidade, reprodutibilidade.

MEASUREMENT SYSTEMS ANALYSIS (MSA) APPLIED TO SEALING ELEMENTS – A CASE STUDY

Abstract: In this study, the authors present the theoretical principles used in Measurement System Analysis (MSA), detailing the different approaches used in determining the repeatability and reproducibility of a measurement system. Repeatability and reproducibility in the context of measurement systems analysis science is one of the parameters that evaluate the ability of the measurement method to produce results reliably. The approaches studied are the mean and range method (Automotive Industry Action Group approach), the honest repeatability and reproducibility method (approach described in Evaluating the Measurement Process) and the analysis of variance method, also known as ANOVA. A description is made of how each of these methods is used for measuring the height of a pipe laying part. The results of the three evaluations were compared with each other, and the main advantages and disadvantages of each strategy were presented.

Keywords: Measurement uncertainty, repetitiveness, reproducibility, R&R study.

1. Introdução

Para a realização de uma medição confiável são considerados diversos fatores, entre esses está a seleção de um sistema de medição apto para a aplicação desejada. O uso de um sistema de medição inapto torna difícil o monitoramento, o controle e a melhoria de um processo (Senvar, 2010). Mesmo se realizando a seleção do sistema de medição para um dado processo de medição, não há garantias de que a medição é confiável, uma vez que há outros fatores que exercem influência no resultado de uma medição (Oliveira, 2008). Assim, há a necessidade de se verificar a aptidão do processo de medição como um todo. Para tal, uma das formas utilizadas é a análise do sistema de medição (*Measurement System Analysis - MSA*). No estudo de MSA são observados, dentre outros, fatores como tendência, linearidade, estabilidade, repetitividade e reprodutibilidade.

Repetibilidade é a variação causada pela instrumentação ou a variação observada quando o mesmo operador mede a mesma peça mais vezes com a mesma instrumentação. Reprodutibilidade é a

variação causada pelo sistema de medição ou a variação observada quando diferentes operadores medem a mesma peça com a mesma instrumentação. (Zanobini *et al.*, 2016)

Quando combinados, a repetibilidade e a reprodutibilidade formam o parâmetro repetitividade/ reprodutibilidade (R&R), que é frequentemente interpretado como a variabilidade total da medição, excluindo-se a variação da própria peça e a tendência do processo. (Albertazzi *et al.*, 2008).

Há uma variedade de estratégias utilizadas para se determinar o parâmetro R&R. Dentre elas, destacam-se três principais: o método média e amplitude, o método honesto e o método de análise de variância (ANOVA). Esse trabalho descreve um estudo R&R, através da aplicação das três metodologias, em um componente de vedação, apresentando as variações entre eles.

2 Referencial teórico

Com relação à Análise do Sistema de Medição, no tocante à variabilidade das medições, a análise é realizada através da decomposição da variabilidade total, geralmente em duas fontes: as peças e o sistema de medição (Garcia and Del Rio, 2013). O parâmetro R&R mede a quantidade de variação em medições causada pelo próprio sistema de medição. Essa variação é comparada com a variação total observada para determinar a viabilidade do processo de medição. O uso de R&R é útil quando ocorrem mudanças significativas ao processo e sem essa prática é mais difícil confiar nos resultados produzidos.

Das diversas abordagens usadas para se determinar o parâmetro R&R, a que encontra maior uso na indústria é o método da média e amplitude (Cepova *et al.*, 2018). Isso se deve ao fato de ser o método recomendado pelo *Automotive Industry Action Group* -AIAG, além de ser o método mais fácil de ser calculado. Desde sua primeira versão em 1990, o método passou por algumas revisões. A versão mais recente, e a que é discutida aqui, encontra-se na quarta edição do manual de referência *Análise dos Sistemas de Medição*.

Apesar de seu amplo uso a abordagem AIAG não é livre de críticas. O dano causado pelo erro de medição é superestimado enquanto diretrizes usadas são excessivamente conservadoras (Wheeler, 2006). Visando corrigir esses problemas o método honesto, também chamado de abordagem EMP foi desenvolvido.

O método ANOVA é o mais antigo dos métodos discutidos e é comumente encontrado em softwares estatísticos. Seus resultados podem ser facilmente interpretados e é o único a considerar a interação entre o avaliador e a peça medida como uma fonte de variação. O método da média e amplitude possui amplo uso, principalmente quando programas estatísticos não estão disponíveis (Jamula, 2023).

Vijaykumar *et al.* (2007) apresentam um estudo com aplicação do MSA com dados para atributos, aplicados a um linha de montagem da indústria automobilística, observando que alguns produtos de boa qualidade foram rejeitados, e produtos ruins foram aprovados em função de instrumentos de medição defeituosos ou inapropriados e avaliadores não qualificados.

D'Aucelli *et al.* (2016) utilizou a Análise de variâncias (ANOVA) no fluxo de trabalho do MSA, de acordo com as recomendações da norma ISO/TR 22971 (2005), criando uma estrutura MATLAB, sugerindo a análise unidirecional entre grupos.

Yeh and Sun (2013) utilizaram a Simulação de Monte Carlo e um estudo de R&R na análise do sistema de medição de um fabricante de peças automotivas com o objetivo de verificar a capacidade da medição, a qualidade da estrutura de medição e melhorar e manter continuamente o processo de verificação. O método utilizado pode avaliar uma faixa possível para o R&R, de modo a estabelecer um modelo de predição para avaliação da capacidade de medição de um sistema de medição.

Zhang et al. (2008) realizou um estudo de R&R em um sistema de medição por ultrassom, utilizando 5 peças com 3 repetições. No estudo realizado, eles concluíram que no processo de medição prático, o inspetor presta atenção apenas na precisão do próprio instrumento de medição, de modo que a descrição estatística do sistema de medição raramente é analisada.

Jain (2017) apresentou um estudo de caso para análise do sistema de medição com o intuito de descobrir as diversas variações no sistema de medição e os fatores geradores de tais variações. No estudo, tanto um paquímetro quanto um micrômetro foram utilizados como instrumentos de medição e ambos os processos foram aceitáveis, porém, necessitando de melhorias. Após as implementações de tais melhorias (treinamento dos avaliadores e ergonomia no ambiente de trabalho), houve uma redução de 50% no valor do %R&R

Kamil e Pawel (2017) propuseram uma alteração na fórmula para determinação do %R&R considerando-se apenas o limite inferior de especificação na tolerância, sendo a mesma válida quando a média de todas as medições é maior que o limite inferior de especificação. A fórmula também leva em consideração um fator de abrangência

Foster (2006) propôs procedimentos para o cálculo de diferentes índices de MSA, enquanto Al-Rafaie and Bata (2010) apresentaram uma avaliação de medições e capacidade de processos por %R&R com 4 medidas de qualidade.

Oliveira et al. (2023) apresentam um estudo de R&R aplicado ao acabamento superficial, comparando os valores obtidos no tocante à aceitação do processo de medição, com um coeficiente de capacidade específico para verificação de aptidão de sistemas de medição.

3 Método de Pesquisa

Todo estudo R&R começa com a coleta de dados. Para esse fim é selecionado um número “*o*” de operadores ou avaliadores e um conjunto de “*p*” peças. Cada operador medirá cada peça *n* vezes.

No caso aqui estudado, a dimensão medida foi a altura de uma peça usada na vedação de tubulações, conforme ilustrada na Figura 1. Para isso utilizou-se um relógio comparador analógico com faixa nominal de 0 – 10 mm, menor divisão de 0,01 mm, como mostrado na Figura 2. A Figura 3 apresenta as curvas de erros de indicação, obtidas diretamente do certificado de calibração do instrumentos. Nesse experimento foram utilizados dois operadores e dez peças, sendo cada uma delas medida cinco vezes.

Ambos os métodos de média e amplitude e honesto fazem uso de um valor chamado de fator de correção de tendência (d_2) (IQA, 2010). Para os propósitos deste trabalho, deve-se saber que d_2 é uma função do número de subgrupos analisados (*m*) e do tamanho desses subgrupos (*g*).



Fonte: arquivo dos autores

Figura 1 – Exemplo de peça utilizada nas medições



Fonte: arquivo dos autores

Figura 2 – Relógio comparador em sua base, durante a realização de uma medição.



Fonte: arquivo dos autores com dados obtidos do certificado de calibração do instrumento

Figura 3 – Curvas de erros de indicação do instrumento

3.1 Média e amplitude

Cada operador irá evidenciar uma amplitude para cada peça. Calcula-se a média desses 20 valores de amplitude, esse valor é chamado de \bar{R} . Multiplicando \bar{R} por D_4 , fator comum em Controle Estatístico de Processo, se obtém o Limite Superior de Controle. Então, é averiguado se alguma das amplitudes registradas excede esse limite. Também é possível determinar um limite inferior de controle multiplicando-se \bar{R} por D_3 . Porém, o uso desse limite é incomum, já que D_3 e D_4 são funções do número de medições por peça n e D_3 é igual a zero para valores de n menores que sete. Dividindo \bar{R} pelo valor d_2 apropriado ($m = n, g = o^*p$) obtém-se a variação do equipamento (VE), também chamada de repetibilidade, conforme Equação 1.

$$VE = \frac{\bar{R}}{d_2} \tag{1}$$

Para estimar a variação entre avaliadores (VA), ou reprodutibilidade, deve-se computar a média de cada operador. Em seguida, calcula-se a amplitude dessas médias. Esse valor é chamado de R_o . A variação entre avaliadores está contaminada pela

variação do equipamento, devendo, portanto, ser corrigida pela subtração de uma fração da variação do equipamento (IQA, 2010). Dessa forma VA é representada pela Equação 2. Caso a subtração resulte em um número negativo, adota-se VA igual a zero.

$$VA = \sqrt{\left[\frac{R_p}{d_2}\right]^2 - \frac{VE^2}{np}} \quad (2)$$

Onde p é o número de peças e n é o número de vezes que cada peça foi medida por cada avaliador.

O valor de repetitividade e reprodutibilidade ($R\&R$) é determinado pela raiz quadrada da soma dos quadrados de VE e VA , conforme Equação 3.

$$R\&R = \sqrt{VE^2 + VA^2} \quad (3)$$

Para o cálculo da variação peça a peça (VP), ou variação do processo, é determinada a média de p peças. Novamente a amplitude dessas médias (R_p) é dividida por d_2 , com $m = n$ e $g = 1$. O valor de VP é apresentado na Equação 4.

$$VP = \frac{R_p}{d_2} \quad (4)$$

Finalmente, a variação total (VT) é calculada pela raiz quadrada da soma dos quadrados de VP e $R\&R$, conforme Equação 5.

$$VT = \sqrt{R\&R^2 + VP^2} \quad (5)$$

Deseja-se saber qual a proporção de VT que cada fonte de variância consome. Isso é feito dividindo-se os valores de VE , VA , $R\&R$ e VP por VT e multiplicando por 100 para que o resultado seja expresso em porcentagem. Assim, determina-se $\%VE$, $\%VA$, $\%R\&R$ e $\%VP$, de acordo com as Equações 6, 7, 8 e 9, respectivamente.

$$\%VE = \frac{VE}{VT} 100 \quad (6)$$

$$\%VA = \frac{VA}{VT} 100 \quad (7)$$

$$\%R\&R = \frac{R\&R}{VT} 100 \quad (8)$$

$$\%VP = \frac{VP}{VT} 100 \quad (9)$$

Uma forma alternativa de obter esses percentuais é substituindo-se a variação total pela tolerância. Se essa abordagem for adotada deve-se multiplicar o resultado 6, conforme apresentado pelas Equações 10, 11, 12 e 13, onde LSE é o limite superior de especificação e LIE é o limite inferior de especificação.

$$\%VE = \frac{6 VE}{LSE - LIE} 100 \quad (10)$$

$$\%VA = \frac{6 VA}{LSE - LIE} 100 \quad (11)$$

$$\%R\&R = \frac{6 R\&R}{LSE - LIE} 100 \quad (12)$$

$$\%VP = \frac{6 VP}{LSE - LIE} 100 \quad (13)$$

O último passo do estudo de R&R é determinar o número de distintas categorias (*ndc*), dado pela Equação 14.

$$ndc = 1,41 \frac{VP}{R\&R} \quad (14)$$

Para a avaliação dos resultados pelo método de média e amplitude, avalia-se o valor $\%R\&R$. Se esse for maior que 30%, o processo de medição é considerado inaceitável. Caso $\%R\&R$ esteja entre 10% e 30%, o resultado é dito marginalmente aceitável, podendo ser aprovado em algumas aplicações. Se $\%R\&R < 10\%$, o processo de medição é aprovado. Outro critério a ser observado é *ndc* que deve ser maior ou igual a cinco para que o processo de medição seja aceitável. O processo de medição não deve ser aceito com base em um único conjunto de índices, deve-se observá-lo continuamente, usando análise gráfica, verificando a performance a longo prazo (Pandiripalli, 2010).

3.2 Método honesto

Inicia-se esse estudo de modo análogo ao método da média e amplitude, verificando se as amplitudes se encontram abaixo do Limite Superior de Controle. Esse limite é obtido, multiplicando-se \bar{R} por D_4 . Em seguida, são estimadas as variações provenientes de diferentes fontes, começando pela repetibilidade. A variação do equipamento é dado pela Equação 15, onde \bar{R} é a média de todas as amplitudes de cada peça registrada por cada avaliador e d_2 é o fator de correção de tendência ($m = n$, $g = o * p$).

$$VE^2 = \left[\frac{\bar{R}}{d_2} \right]^2 \quad (15)$$

Através da amplitude das médias de todos os valores medidos por cada operador (R_o), calcula-se a reprodutibilidade, conforme Equação 16, onde n é o número de medições em cada peça por avaliador e p é o número de peças. Com d_2 para $m=0$ e $g = 1$.

$$VA^2 = \left[\frac{R_o}{d_2} \right]^2 - \frac{VE^2}{n p} \quad (16)$$

Somando os dois componentes anteriores, obtém-se o valor de R&R, conforme Equação 17.

$$R\&R^2 = VE^2 + VA^2 \tag{17}$$

Para a determinação da variação do processo, utiliza-se a amplitude das médias de todas as medições realizadas em cada peça (R_P), conforme Equação 18. Adota-se d_2 para $m = n$ e $g = 1$.

$$VP^2 = \left[\frac{R_P}{d_2} \right]^2 \tag{18}$$

Calcula-se a variação total somando a variação R&R combinada com a variação peça a peça, de acordo com a Equação 19.

$$VT^2 = R\&R^2 + VP^2 \tag{19}$$

Determina-se o quanto cada componente da variação colabora para VT , dividindo-se cada componente por VT e multiplicando o valor por 100 para que o resultado seja expresso em porcentagem, de acordo com as Equações 20, 21, 22 e 23. O parâmetro $\%VP$ também pode ser chamado de coeficiente de correlação intraclasse (Wheeler, 2006).

$$\%VE = \frac{VE^2}{VT^2} 100 \tag{20}$$

$$\%VA = \frac{VA^2}{VT^2} 100 \tag{21}$$

$$\%R\&R = \frac{R\&R^2}{VT^2} 100 \tag{22}$$

$$\%VP = \frac{VP^2}{VT^2} 100 \tag{23}$$

O valor de $\%VP$ é usado para classificar o sistema de medição como uma ferramenta de monitoramento do processo. A classe de monitoramento descreve o enfraquecimento dos sinais do processo. A Tabela 1 apresenta as classes de monitoramento (Wheeler, 2006).

Tabela 1 - Classe de monitoramento dos sistemas de medição

Correlação intraclasse	Classe de monitoramento	Enfraquecimento dos sinais do processo
De 0,80 a 1,00	Primeira	Menor que 10%
De 0,50 a 0,80	Segunda	Entre 10% e 30%
De 0,20 a 0,50	Terceira	Entre 30% e 55%
De 0,00 a 0,20	Quarta	Maior que 55%

Fonte: Adaptado de Wheeler (2006)

3.3 Análise de variâncias - ANOVA

Nessa forma de se calcular o parâmetro R&R é construída uma tabela cujas colunas representam as seguintes características: A fonte de variação; os graus de

liberdade associados à fonte; A soma dos quadrados apresentando o desvio em torno da média da fonte e o quadrado médio que é igual à soma dos quadrados dividida pelos graus de liberdade. Para a utilização desse teste é necessário se testar a independência e normalidade dos dados, além da homogeneidade da variância (Plura, 2022).

Para a variação causada pelo operador, a soma dos quadrados (SQ_O) é igual ao produto de $p.n$ pela soma das diferenças quadradas entre a média das medições de cada operador e a média total. Já o número de graus de liberdade é igual ao número de avaliadores menos um.

A soma quadrada para variação das peças (SQ_P) é a multiplicação entre $o.n$ e a soma das diferenças quadradas entre a média de todas as medidas de uma peça e a média total. O número de graus de liberdade dessa variação é número de peças menos um.

A soma dos quadrados referente a variação do equipamento (SQ_E) é calculada determinando-se o valor médio para cada peça usando todas as medições de cada operador, encontrando-se então, a diferença quadrada entre cada medida e a média que essa produziu. A soma dessas diferenças é igual a SQ_E . O número de graus de liberdade é determinado pelo produto $p.o.(n-1)$.

Calculando-se a diferença quadrada entre a média total e cada medida realizada, e somando-se esses valores, obtém-se a soma dos quadrados total (SQT). O valor de SQT deve ser igual à adição das demais somas de quadrados. A Tabela 2 exemplifica a estrutura de uma tabela ANOVA padrão.

Tabela 2 - Composição de uma tabela de Análise de Variâncias

Fonte de Variância	Graus de Liberdade	Soma dos Quadrados	Quadrado Médio
Operador	$o - 1$	SQ_O	QM_O
Peças	$p - 1$	SQ_P	QM_P
Interação	$(p - 1)(o - 1)$	SQ_{OP}	QM_{OP}
Equipamento	$po(n - 1)$	SQ_E	QM_E
Total	pon	SQT	-

Fonte: Pan (2006)

4 Resultados e discussões

A Tabela 3 apresenta os dados de medição obtidos por cada um dos dois operadores para uma amostra de dez peças distintas, medidas aleatoriamente.

Ao se utilizar o método de média e amplitude, obtém-se os resultados apresentados na Tabela 4. O limite inferior de especificação de peça (LIE) é igual a 9,6 mm e o limite superior de especificação (LSE) vale 9,9 mm. Analisando-se a referida tabela, constata-se que o processo de medição foi reprovado, uma vez que o valor de %R&R foi superior a 30% e o valor do ndc foi inferior a 5.

Utilizando-se o método honesto, obtém-se os resultados mostrados na Tabela 5. Uma avaliação desses resultados revela que para essa aplicação, o sistema de medição é um monitor de segunda classe. Isso significa que, em geral, o processo de produção pode ser acompanhado, sendo necessário se observar o comportamento do processo de medição com o tempo.

Um estudo R&R usando a metodologia ANOVA foi realizado com o auxílio do programa estatístico Minitab. O software produziu a Tabela 6. Nesta tabela, a coluna desvio padrão representa os valores numéricos das variações, a coluna valor do estudo é seis vezes o valor de desvio padrão e a coluna percentual do total, como o nome sugere, é construída pelos percentuais do valor de estudo total. Neste caso, o %R&R foi aproximadamente igual a 47%, muito próximo ao método da média e amplitude.

Tabela 3 - Altura das peças de vedação em milímetros

Operador 1										
Peça	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
X1 (mm)	9,73	9,76	9,65	9,81	9,76	9,795	9,81	9,73	9,68	9,77
X2 (mm)	9,72	9,73	9,64	9,80	9,74	9,77	9,815	9,74	9,71	9,79
X3 (mm)	9,72	9,725	9,66	9,82	9,74	9,77	9,805	9,695	9,74	9,75
X4 (mm)	9,73	9,74	9,675	9,825	9,71	9,82	9,76	9,70	9,72	9,75
X5 (mm)	9,71	9,74	9,66	9,83	9,74	9,775	9,745	9,72	9,70	9,78
Média (mm)	9,722	9,739	9,657	9,817	9,738	9,786	9,787	9,717	9,71	9,768
Amplitude (mm)	0,02	0,035	0,035	0,03	0,05	0,05	0,07	0,045	0,06	0,04

Operador 2										
Peça	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
X1 (mm)	9,67	9,68	9,62	9,75	9,78	9,77	9,82	9,71	9,65	9,75
X2 (mm)	9,71	9,74	9,68	9,76	9,78	9,77	9,78	9,73	9,71	9,81
X3 (mm)	9,73	9,76	9,64	9,82	9,775	9,79	9,83	9,77	9,71	9,80
X4 (mm)	9,69	9,74	9,70	9,80	9,74	9,79	9,82	9,73	9,73	9,79
X5 (mm)	9,75	9,71	9,67	9,80	9,72	9,78	9,78	9,73	9,66	9,77
Média (mm)	9,71	9,726	9,662	9,786	9,759	9,78	9,806	9,734	9,692	9,784
Amplitude (mm)	0,08	0,08	0,08	0,07	0,06	0,02	0,05	0,06	0,08	0,06

Fonte: dados da pesquisa

Tabela 4 - Resultados obtidos pelo método de média e amplitude

Fonte de variação	Valor numérico	Percentual da variação total
Repetitividade	0,023109	45,95%
Reprodutibilidade	0	0,00%
R&R combinada	0,023109	45,95%
Peça a peça	0,044667	88,82%
Total	0,050291	100%
<i>ndc</i>	2,73	-

Fonte: Elaborado pelos autores com auxílio de Minitab®.

Tabela 5- Resultados obtidos pelo método honesto

Fonte de variação	Valor numérico	Percentual da variação total
Repetitividade	0,000534	21,11%
Reprodutibilidade	0	0,00%
R&R combinada	0,000534	21,11%
Processo	0,001995	78,89%
Total	0,002529	100%

Fonte: Elaborado pelos autores.

Tabela 6 - Resultados obtidos pelo método ANOVA

Fonte de variação	Desvio padrão (mm)	Valor do estudo (mm)	Percentual do total
Repetitividade	0,0242167	0,145300	47,27%
Reprodutibilidade	0	0	0,00%
R&R combinada	0,0242167	0,145300	47,27%
Peça a peça	0,0451512	0,270907	88,12%
Total	0,0512356	0,307413	100,00%

Fonte: Elaborado pelos autores com auxílio de Minitab®.

Complementando-se o estudo, a Figura 4 apresenta o gráfico da média com a interação entre os operadores, gerados através do método ANOVA. Analisando-se o referido gráfico, constata-se um comportamento semelhante entre os valores obtidos

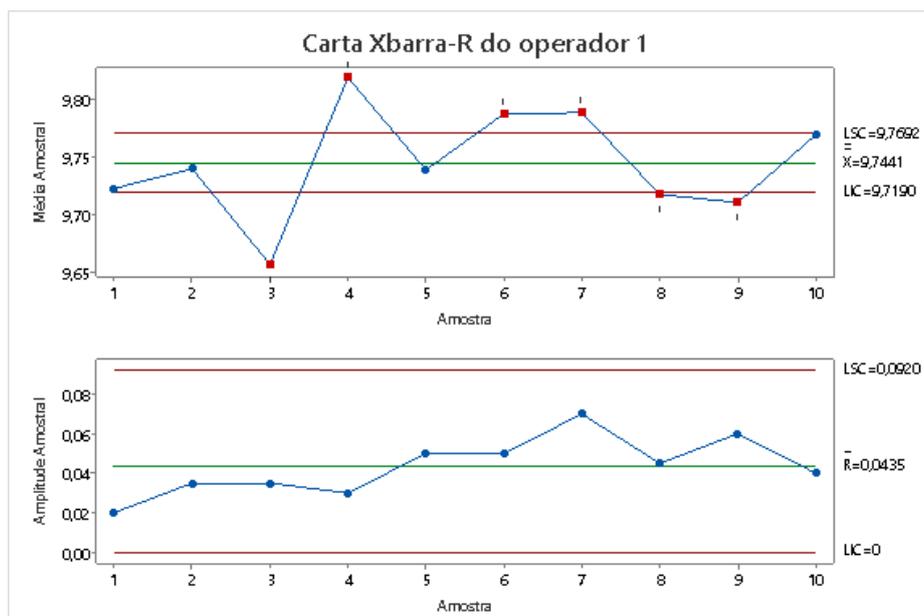
pelos dois operadores, com valores de média muito próximos em todas as 10 peças medidas, corroborando com o valor zero no erro de reprodutibilidade. Neste sentido, é importante salientar que os dois operadores apresentam a mesma formação em metrologia.



Fonte: Elaborado pelos autores com auxílio de Minitab®.

Figura 4 - Variação da média para cada operador em cada peça

Como a contribuição total no %R&R foi dado pela repetibilidade, há a necessidade de se verificar, através das variáveis de influência na medição, onde pode-se encontrar tal variação. Neste contexto, os operadores foram treinados para as medições; o método utilizado foi o mesmo adotado nos dois processos de medição; as condições ambientais foram semelhantes; o instrumento utilizado foi o mesmo, inclusive com uma montagem rígida para a fixação do relógio comparador e o relógio se encontra devidamente calibrado. Assim, o possível motivo pelo qual o valor do %R&R apresentou resultados acima dos 40% em dois dos três métodos utilizados, se encontra nas peças. Analisando-se a Figuras 5 que apresenta a carta de controle estatístico de processo da amplitude e a carta da média com os dados obtidos pelo operador 1, verifica-se que o processo se encontra sob controle estatístico em relação à variabilidade, mas não está sob controle no tocante à tendência central, inclusive com seis pontos fora dos limites de controle. Situação análoga ocorre com os dados do operador 2, em relação às cartas da amplitude e da média, conforme Figura 6.



Fonte: Elaborado pelos autores com auxílio de Minitab®.

Figura 5 – Cartas da média e da amplitude obtida com os dados do operador 1

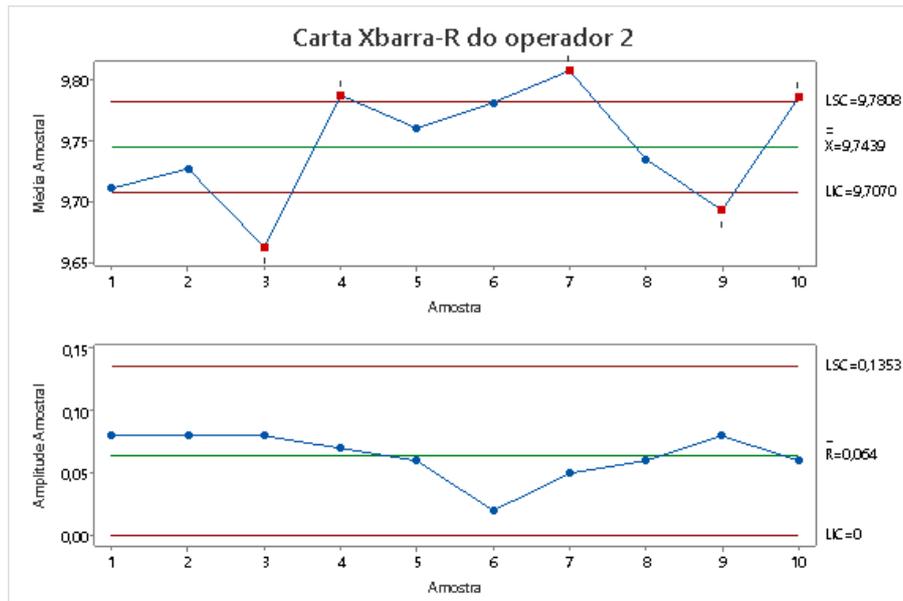


Figura 6 – Cartas da média e da amplitude obtida com os dados do operador 2

5 Conclusões

No estudo apresentado, pode-se observar que a reprodutibilidade é nula. Isto indica que o %R&R foi oriundo da repetibilidade, que para este estudo, fica constatado, por dois métodos distintos, que o processo de medição não é aceitável, ou seja, ele se apresenta inapto. Com relação ao método honesto, com seu critério mais permissível, o mesmo admite que o processo de medição é aceitável, exceto para as aplicações mais restritivas.

Com relação à repetibilidade, um dos parâmetros que mais exercem influência dentro do estudo de R&R é o instrumentos de medição, neste caso, juntamente com a montagem realizada. Logo, a calibração, manutenção ou substituição do instrumento de medição são soluções que reduzirão a variação da medida (Sennaroglu, 2018). No entanto, através deste estudo, verificou-se que o problema em se ter um valor do %R&R acima do valor de 10% se deve às variações em torno do valor médio, mesmo o processo se apresentando sob controle estatístico nas medições geradas pelos dois operadores, no tocante à sua variabilidade.

Como visto, diferentes metodologias de análise podem chegar a diferentes conclusões para um mesmo processo de medição. Surgi, então, a necessidade de conhecer e entender melhor as possíveis estratégias para o estudo em questão, a fim de que se possa adotar aquela que melhor corresponde às necessidades específicas de cada aplicação. No entanto, é importante, na medida do possível, se utilizar três diferentes métodos para a tomada de decisão em relação a se aprovar ou não um determinado processo de medição. Neste estudo é mostrado que mesmo se utilizando um sistema de medição previamente selecionado com base nos critérios supracitados, utilizando-se metrologistas capacitados para a medição, e mesmo com um dos métodos apresentando resultados viáveis para o processo de medição, o mesmo foi considerado inapto.

Referências

- ALBERTAZZI, A.; SOUSA, A. R.** Fundamentos de metrologia científica e industrial. Editora Manole, Barueri, 2008.
- AL-RAFAIE, A.; BATA, N.** Evaluating Measurement and Process Capabilities by GR&R with Four Quality Measures. *Measurement*, 43, 842–851 (2010).
- ČEPOVÁ, L.; KOVACIKOVA, A.; CEP, R.; KLAPUT, P.; MIZERA, O.** Measurement System Analyses - Gauge Repeatability and Reproducibility Methods. *Measurement Science Review*, v. 18, n. 1, p. 20-27, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1515/msr-2018-0004>.
- D'AUCELLI, G. M.; GIAQUITO, N.; MANNATRIZIO, S.; SAVINO, M.** A MATLAB Framework for Measurement System Analysis Based on ISO 5725 Standard. 14th IMEKO TC10 Workshop Technical Diagnostics New Perspectives in Measurements, Tools and Techniques for system's reliability, maintainability and safety Milan, Italy, June 27-28, 2016.
- FOSTER, S.T.** (2006), *Managing Quality: An Integrated Approach*. Third Edition, Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall
- GARCIA, A. C.; DEL RIO, AM. G.** (2013). Number of distinct data categories and gage repeatability and reproducibility. A double (but single) requirement. *Measurement*. 46(8):2514-2518. doi:10.1016/j.measurement.2013.04.065.
- IQA.** Análise de sistemas de medição – MSA, Manual de referência Instituto da Qualidade Automotiva, 4. ed., São Paulo, 2010.
- ISO/TR 22971:2005.** Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results — Practical guidance for the use of ISO 5725-2:1994 in designing, implementing and statistically analysing interlaboratory repeatability and reproducibility results. International Organization for Standardization, 2005.
- JAIN, A.** A Case Study on Measurement System Analysis (MSA) at Pump Company. *International Research Journal of Engineering and Technology*, vol. 04, may, 2017.
- JAMULA, B.; BAZAN, A.; MAGDZIAK, M.** Gage Repeatability and Reproducibility Analysis of Coordinate Measurements of a Cutting Tool. *Advances in Science and Tecnology Research Jornal*, v. 17, n. 3, p. 133-144, 2023. DOI: <https://doi.org/10.12913/22998624/165881>.
- KAMIL, S.; PAWEL, B.** Measurement system analysis for one-sided tolerance. *ITM Web of Conferences* 15, 05011 (2017).
- OLIVEIRA, J. E. F.** A metrologia aplicada aos setores industrial e de serviços – principais aspectos a serem compreendidos e praticados no ambiente organizacional. SEBRAE, Brasília, 2008.
- OLIVEIRA, J. E. F.; NETO, F. R. A.; OLIVEIRA, S. T.** Suitability verification of a roughness measurement process using the MSA and the Cdl* capability coefficient. *Congresso Internacional de Metrologia Mecânica – CIMMEC*, 2023.
- PAN, J.-N.** Evaluating the Gauge Repeatability and Reproducibility for Different Industries. *Quality and Quantity*, v. 40, n. 4. p. 499-518, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11135-005-1100-y>
- PANDIRIPALLI, B.** Repeatability and reproducibility studies: a comparison of techniques. 2010. Tese (Mestrado em Ciência) – Faculdade de Pós-Graduação, Universidade Estadual de Wichita, Wichita, 2010. Disponível em: <https://soar.wichita.edu/items/64b31e30-8238-4931-9ee8-3646f04bc6>. Acesso em: mai. 2024.
- PLURA, J.; VYKYDAL, D.; TOŠENOVSKÝ, F.; KLAPUT, P.** Graphical Tools for Increasing the Effectiveness of Gage Repeatability and Reproducibility Analysis. *Processes*, 2023, n. 11, p. 1-16, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr11010001>.

SENNAROGLU, B.; YURTSEVER, O. Evaluating Measurement System by Gauge Repeatability and Reproducibility. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRIAL ENGINEERING AND OPERATIONS MANAGEMENT, 2., 2018, Paris. Anais [...]. Paris: Industrial Engineering and Operations Management Society, 2018. Disponível em: <http://www.ieomsociety.org/paris2018/papers/308.pdf>. Acesso em: 11 maio 2020.*

SENVAR, O.; FIRAT, S. U. O. An overview of capability evaluation of Measurement Systems and Gauge Repeatability and Reproducibility Studies. *International Journal of Metrology and Quality Engineering, v. 1, n. 2, p. 121-127, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1051/ijmqe/2010022>*

VIJAYKUMAR, K.N.; MANTHA, S.S.; ARUN, K. Measurement System Analysis with Attribute Data. *9th INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON MEASUREMENT AND QUALITY CONTROL (9th ISMQC) November 21 – 24, 2007, IIT Madras*

WHEELER, D. J. *EMP III: Using Imperfect Data. Knoxville: SPC Press, 2006.*

YEH, T. M.; SUN, J. J. Using the Monte Carlo Simulation Methods in Gauge Repeatability and Reproducibility of Measurement System Analysis. *Journal of Applied Research and Technology. Elsevier, vol. 11, october, 2013.*

ZANOBINI, A.; SERENI, B.; CATELANI, M.; CIANI, L. Repeatability and Reproducibility techniques for the analysis of measurement systems. *Measurement, v. 86, p. 125-132, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.02.041>.*

ZHANG, X.; CHEN, B.; ZHU, Y. Application of Measurement System R&R Analysis in Ultrasonic Testing. *17th World Conference on Nondestructive Testing, 25-28 Oct 2008, Shanghai, China.*