



Análise de risco para avaliação de inspeções de retificação: Uma ferramenta quantitativa para gestão da qualidade industrial

Risk analysis for assessment of rectifying inspections: A quantitative tool for industrial quality management

Ricardo Luís d'Ávila Villela

Laboratório de Ensaios Acústicos, Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e
Tecnologia – Inmetro, Duque de Caxias/RJ, CEP: 25250-020, Brasil

rlvillela@inmetro.gov.br

Resumo. A riqueza de informação contida num resultado de medição completo, expresso pela distribuição de probabilidade do mensurando, é comumente negligenciada em inspeções de recebimento por amostragem e inspeções retificadoras. Dessa forma, a desconsideração da incerteza de medição nas inspeções impossibilita a otimização da configuração de uma inspeção segundo as perspectivas da gestão da qualidade e da produção. Este trabalho propõe o uso e ilustra a aplicação da análise de risco na avaliação da conformidade como ferramenta quantitativa para delineamento da configuração de inspeções retificadoras, considerando, conjuntamente, a incerteza de medição e outros fatores que impactam a eficácia da inspeção retificadora e a produção de itens inspecionados.

Abstract. The wealth of information contained in a complete measurement result, expressed by the probability distribution of the measurand, is commonly neglected in acceptance sampling inspections and rectifying inspections. Thus, disregarding measurement uncertainty in inspections makes it impossible to optimize the configuration of an inspection according to quality and production management perspectives. This paper proposes the use and illustrates the application of risk analysis in conformity assessment as a quantitative tool for designing the configuration of rectifying inspections, considering jointly measurement uncertainty and other factors that impact the effectiveness of the rectifying inspection and the production of inspected items.

1. Introdução

A globalização dos mercados, a procura de produtos com maior qualidade e o estabelecimento de requisitos técnicos cada vez mais restritivos, sob a forma de regulamentos e normas técnicas, demandam ferramentas cada vez mais sofisticadas para apoio à gestão da qualidade industrial. Dentre essas ferramentas, destaca-se o controle estatístico da qualidade que, aplicado à avaliação de produtos e processos de fabricação, faz uso exaustivo da metrologia para fundamentar decisões, atendendo o

princípio de gestão da qualidade da ISO 9000 [1] relativo à tomada de decisão com base em evidência. Dessa forma, a metrologia apoia decisões na indústria relacionadas a: inspeções de recebimento para aceitação de matéria-prima e componentes, intervenções para controle de parâmetros do processo de fabricação, avaliações da capacidade do processo de fabricação e avaliações da conformidade do produto final.

No entanto, apesar da validade de resultados de medição ser devidamente valorizada no setor industrial [2], a informação sobre o grau de qualidade de um resultado de medição, que é inversamente proporcional à incerteza de medição, não recebe, algumas vezes, a devida atenção nos processos de tomada de decisão que requerem dados de medição. Um dos possíveis motivos é a dificuldade em se estabelecer uma relação quantitativa entre a incerteza de medição de um resultado e seu desdobramento na gestão da qualidade, por exemplo, na eficácia da inspeção de retificação de um lote que foi reprovado na inspeção de recebimento por amostragem. Assim, a qualidade de uma tomada de decisão, que faz uso de dados de medição, depende da incerteza do resultado de medição utilizado, de forma que um resultado de medição com grande incerteza gera um considerável risco quanto à identificação da melhor decisão a ser tomada. Em geral, caso a incerteza de medição seja desconhecida ou não exista um modelo de análise de risco com previsão dos impactos da decisão, não há meios para identificação da melhor alternativa e, provavelmente, esta não será selecionada dentre as diversas opções existentes, gerando prejuízos e custos adicionais ao empreendimento.

Para avaliar se a incerteza de medição é adequada ao propósito da medição, por exemplo, para avaliar um produto ou um processo de fabricação, é comum, na indústria, a realização de análises de capacidade de processos de medição, a fim de verificar se um determinado processo de medição tem condições para atender os requisitos de uma tarefa de medição específica. Com esse intuito, existem procedimentos e métricas para análise de capacidade de medição tais como o %GRR, descrito no manual Análise de Sistemas de Medição (MSA) [3], e o índice de capacidade de medição (C_m), especificado no guia JCGM 106:2012 [4]. Apesar de existirem regras gerais quanto aos valores recomendados para essas métricas, estas não revelam um desdobramento sensível para a gestão da qualidade, como, por exemplo, a eficácia da inspeção de recebimento, ou para a produção, como, por exemplo, a eficácia da produção, relacionada ao excedente que deve ser produzido para substituição dos itens rejeitados do lote na inspeção retificadora. Além disso, para um determinado valor de %GRR ou de C_m , dependendo da qualidade do processo de fabricação (variabilidade) e do intervalo de aceitação que especifica os valores de resultados para aceitação de itens, serão obtidos diferentes valores para a eficácia da inspeção retificadora. Portanto, uma abordagem integrada de análise de risco, contemplando simultaneamente todos os fatores envolvidos, ou seja: qualidade do processo de produção, qualidade do processo de medição, intervalo de tolerância e intervalo de aceitação, apresenta a vantagem de avaliar os impactos destes fatores em pontos sensíveis para a gestão da qualidade e para a produção.

Este trabalho ilustra uma aplicação de um método de análise de risco para avaliação da eficácia de uma inspeção retificadora, contemplando simultaneamente a variabilidade do processo de fabricação, a incerteza de medição do resultado das inspeções e os limites dos intervalos de tolerância e de aceitação empregados na inspeção. A análise de risco proposta neste trabalho [4] se aplica à inspeção retificadora, ou seja, quando 100% dos itens do lote rejeitado na inspeção por amostragem são inspecionados e os itens rejeitados são substituídos pelos aceitos formando um novo lote.

2. Riscos do consumidor e do produtor

A norma ISO 9001:2015 [2] declara a importância da mentalidade de risco para assegurar a eficácia de um sistema de gestão da qualidade. Segundo a norma NBR ISO 31000:2018 [5], risco é o efeito da incerteza nos objetivos, e um efeito é um desvio em relação ao esperado, podendo ser positivo ou negativo, resultando em oportunidades ou ameaças. Como a fonte de risco é o elemento que, individualmente ou combinado, tem o potencial para dar origem ao risco [5], o processo de amostragem na inspeção de recebimento por amostragem é uma fonte de risco devido à incerteza amostral, por ser estimado o valor de um parâmetro da população (lote) a partir de um subconjunto da população. Outra

fonte de risco quando a inspeção se utiliza de medições, e que geralmente é desconsiderada na análise de risco na inspeção por amostragem, é o processo de medição, cujo resultado está sujeito à incerteza de medição. Assim, as incertezas amostral e de medição, numa inspeção por amostragem que emprega medições em suas avaliações, originam o risco de falsa aceitação e falsa rejeição de um lote. Enquanto isso, na inspeção de um único item ou de 100% dos itens de um lote, somente a incerteza de medição produz os riscos de falsa aceitação e de falsa rejeição do item ou do lote, conforme o caso.

Pelo fato da falsa aceitação impactar diretamente o consumidor e da falsa rejeição o produtor, os riscos de falsa aceitação e de falsa rejeição são denominados, respectivamente, tanto no controle estatístico da qualidade como na avaliação da conformidade, de risco do consumidor e risco do produtor. O Guia JCGM 106:2012 [4] propõe uma abordagem quantitativa de risco para inspeção de um único item ou de 100% de itens de um lote, quando a inspeção é realizada por meio de medições de uma grandeza escalar e a regra de decisão conduz a apenas duas possibilidades: aceitação ou rejeição do item inspecionado a partir de um resultado de medição. Esse guia fornece subsídios para análise de risco de uma inspeção retificadora, contemplando simultaneamente todos fatores envolvidos na determinação da taxa de falsa aceitação, falsa rejeição, verdadeira aceitação e verdadeira rejeição de um lote e o cálculo de métricas que traduzem ao gestor da qualidade se a inspeção foi satisfatória.

2.1. Classificação e cálculo de riscos

Há dois tipos fundamentais de risco na avaliação da conformidade, tanto para o consumidor como para o produtor, o risco específico e o risco global. As definições abaixo foram extraídas de [4]:

- risco específico do consumidor (R_C^*): probabilidade de que um determinado item aceito seja não conforme (probabilidade de falsa aceitação do item);
- risco específico do produtor (R_P^*): probabilidade de que um determinado item rejeitado seja conforme (probabilidade de falsa rejeição do item);
- risco global do consumidor (R_C): probabilidade de que um item não conforme será aceito com base em um resultado de medição futuro, ou seja, probabilidade de ocorrência de falsa aceitação (p_{FA}) do processo de avaliação da conformidade em questão;
- risco global do produtor (R_P): probabilidade de que um item conforme será rejeitado com base em um resultado de medição futuro, ou seja, probabilidade de ocorrência de falsa rejeição (p_{FR}) do processo de avaliação da conformidade em questão.

Portanto, o risco específico é atribuído a um item particular inspecionado que tem um resultado de medição já determinado, de forma que o risco é calculado considerando qual decisão em relação ao item foi tomada (aceitação ou rejeição), o intervalo de tolerância especificado e a distribuição de probabilidade atribuída ao mensurando Y , com seus parâmetros, expressando o resultado de medição. A referência [6] apresenta o procedimento de cálculo do risco específico, ilustra um exemplo e propõe um critério de aceitação baseado no risco econômico mínimo para tomada de decisão na avaliação da conformidade.

Por sua vez, o risco global é atribuído a um processo de avaliação da conformidade aplicado a um conjunto de itens, e corresponde à chance de ser tomada uma decisão equivocada quando um item qualquer do conjunto é selecionado aleatoriamente. O risco global é tão menor quanto melhor for a qualidade do processo de avaliação da conformidade, ou seja, com baixa ocorrência de decisões equivocadas quanto à aceitação ou rejeição de itens. Os valores dos riscos globais do consumidor e do produtor, de um processo de avaliação da conformidade, dependem dos seguintes fatores:

- $g_0(\eta)$ – função densidade de probabilidade do mensurando Y relativo aos itens do lote, caracterizando o processo de produção independentemente do processo de medição;
- $h(\eta_m|\eta)$ – função densidade de probabilidade dos possíveis valores medidos Y_m , antes de ser realizada a medição, de um item particular do lote com valor do mensurando igual a η ($Y = \eta$),

caracterizando o processo de medição empregado na avaliação da conformidade/inspeção retificadora;

- intervalo de tolerância - intervalo dos valores do mensurando (Y) admissíveis, com pelo menos um limite para especificação do intervalo;
- intervalo de aceitação - intervalo de valores medidos da grandeza (Y_m) admissíveis, especificando a regra de decisão para aceitação ou rejeição de um item a partir da estimativa da grandeza η_m obtida com a medição.

O valor do risco global do consumidor e do produtor são calculados a partir das expressões abaixo [4]:

$$R_C = p_{FA} = \Pr(Y \notin \mathcal{C} \text{ e } Y_m \in \mathcal{A}) = \int_{\tilde{\mathcal{C}}} \int_{\mathcal{A}} f(\eta, \eta_m) d\eta_m d\eta \quad (1)$$

$$R_P = p_{FR} = \Pr(Y \in \mathcal{C} \text{ e } Y_m \notin \mathcal{A}) = \int_{\mathcal{C}} \int_{\tilde{\mathcal{A}}} f(\eta, \eta_m) d\eta_m d\eta \quad (2)$$

$$p_{VA} = \Pr(Y \in \mathcal{C} \text{ e } Y_m \in \mathcal{A}) = \int_{\mathcal{C}} \int_{\mathcal{A}} f(\eta, \eta_m) d\eta_m d\eta \quad (3)$$

$$p_{VR} = \Pr(Y \notin \mathcal{C} \text{ e } Y_m \notin \mathcal{A}) = \int_{\tilde{\mathcal{C}}} \int_{\tilde{\mathcal{A}}} f(\eta, \eta_m) d\eta_m d\eta \quad (4)$$

$$p_{FA} + p_{FR} + p_{VA} + p_{VR} = 1 \quad (5)$$

onde:

p_{VA} denota a probabilidade de verdadeira aceitação;

p_{VR} denota a probabilidade de verdadeira rejeição;

\mathcal{C} denota o conjunto de valores admissíveis para o mensurando Y , especificado pelo intervalo de tolerância;

$\tilde{\mathcal{C}}$ denota o conjunto de valores inadmissíveis para o mensurando Y , especificado pelo(s) intervalo(s) que se encontra(m) fora do intervalo de tolerância;

\mathcal{A} denota o conjunto de valores medidos Y_m para aceitação do item, especificado pelo intervalo de aceitação;

$\tilde{\mathcal{A}}$ denota o conjunto de valores medidos Y_m para rejeição do item, especificado pelo(s) intervalo(s) que se encontra(m) fora do intervalo de aceitação;

$f(\eta, \eta_m)$ é a função densidade de probabilidade conjunta para Y e Y_m calculada pela expressão:

$$f(\eta, \eta_m) = g_0(\eta) h(\eta_m|\eta) \quad (6)$$

A função densidade de probabilidade conjunta $f(\eta, \eta_m)$ conjuga as informações sobre a qualidade do processo de produção e do processo de medição para cálculo dos riscos, fornecidos o intervalo de tolerância e a regra de decisão binária expressa pelo intervalo de aceitação.

O risco global do consumidor é a probabilidade de falsa aceitação do processo de avaliação da conformidade para uma dada configuração de: $g_0(\eta)$, $h(\eta_m|\eta)$, intervalo de tolerância e intervalo de aceitação, caracterizando a qualidade do processo de avaliação da conformidade sob a perspectiva do consumidor. Analogamente, o risco global do produtor é a probabilidade de falsa rejeição do processo de avaliação da conformidade para a mesma configuração, caracterizando a qualidade do processo de avaliação da conformidade sob o ponto de vista do produtor.

3. Eficácia da inspeção retificadora e eficácia da produção

Neste estudo, são definidas duas métricas relativas aos efeitos da inspeção retificadora, ou seja, da avaliação da conformidade de 100% dos itens de um lote que foi rejeitado na inspeção de recebimento por amostragem, quando todos os itens rejeitados são substituídos por aceitos. Geralmente, na literatura técnica de controle estatístico da qualidade, é considerado que após uma inspeção retificadora todos os itens do novo lote formado estão em conformidade com a especificação. Tal consideração ignora que resultados de medição estão sujeitos à incerteza de medição e superestima a qualidade de resultados de medição, assumindo a inexistência de falsa aceitação e falsa rejeição na inspeção retificadora, de forma que investimentos em metrologia para redução da incerteza de medição dos resultados podem, a princípio, ser percebidos como um custo desnecessário e preciosismo técnico.

Neste trabalho, são propostos dois indicadores sensíveis às limitações descritas da inspeção retificadora, a eficácia da inspeção retificadora (E_{IR}) e a eficácia da produção do novo lote após a inspeção retificadora (E_P), definidos por:

$$E_{IR} = 1 - \frac{p_{FA}}{p_{FA} + p_{VR}} \quad \text{quando } p_{FA} + p_{VR} \neq 0 \quad (7)$$

$$E_P = p_{VA} + p_{FA} \quad (8)$$

Os limites dos possíveis valores de E_{IR} são:

- $E_{IR} = 0$, quando $p_{VR} = 0$ e $p_{FA} > 0$, significando que nenhuma verdadeira rejeição ocorre na inspeção retificadora;
- $E_{IR} = 1$, quando $p_{VR} > 0$ e $p_{FA} = 0$, significando que nenhuma falsa aceitação ocorre na inspeção retificadora, apenas verdadeira rejeição.

Quando p_{VR} e p_{FA} são iguais a zero, então $p_{FA} + p_{VR} = 0$ e E_{IR} não está definido segundo a equação (7). Isto não é um problema, já que se $p_{FA} + p_{VR} = 0$, então a probabilidade de um item se encontrar fora do intervalo de tolerância é igual a zero, de forma que não é necessária a realização da inspeção retificadora.

Os limites dos possíveis valores de E_P são:

- $E_P = 0$, quando $p_{VA} + p_{FA} = 0$, significando que para o intervalo de aceitação estabelecido na inspeção retificadora, não há chance de um item ser aceito;
- $E_P = 1$, quando $p_{VA} + p_{FA} = 1$, significando que $p_{VR} + p_{FR} = 0$ e portanto, nenhum item do lote original será rejeitado para formação do novo lote.

Quando o lote original não é aprovado na inspeção de recebimento por amostragem, sem a inspeção retificadora, todos os itens do lote seriam reprovados, mas, após a inspeção retificadora, uma parcela do que foi produzido originalmente é aproveitada, expressa por E_P . Dessa forma, considerando que o lote original que foi submetido à inspeção retificadora é representativo da qualidade do processo de produção, a média da quantidade total de itens que deve ser produzida (q_P) para atender a quantidade de itens estabelecida para o lote (q_L) é:

$$q_P = \frac{q_L}{E_P} \quad \text{quando } E_P \neq 0 \quad (9)$$

4. Aplicação da análise de risco

Para ilustrar a aplicação da análise de risco, empregando os indicadores E_{IR} e E_P para avaliação de uma inspeção retificadora, e como os fatores $g_0(\eta)$, $h(\eta_m|\eta)$ e o intervalo de aceitação influenciam essas métricas, foi desenvolvido um programa computacional para simular diferentes condições desses fatores a partir do exemplo da pág. 27 do Guia JCGM 106:2012 [4] (fabricação de resistores de precisão).

Considere que um fornecedor de componentes elétricos produz resistores de precisão de fio enrolado com resistência nominal de 1500 Ω . Para cada resistor (o item), a resistência Y (a propriedade de

interesse) é especificada para se situar em um intervalo de tolerância definido pelos limites $T_L = 1499,8 \Omega$ e $T_U = 1500,2 \Omega$. Um grande lote produzido pelo fornecedor é submetido à inspeção de recebimento por amostragem utilizando um ohmímetro de alta exatidão com incerteza de medição desprezável. Um histograma dos valores medidos tem aparência de uma curva normal, centrada no valor nominal, com um desvio-padrão $\sigma = 0,12 \Omega$. Com base nessas informações, uma função densidade de probabilidade normal $g_0(\eta) = \varphi(\eta; y_0, u_0^2)$ é atribuída para modelar o processo de produção, com $y_0 = 1500 \Omega$ e $u_0 = \sigma = 0,12 \Omega$. Para aceitação do lote, tanto na inspeção por amostragem como na inspeção retificadora, é estabelecido que 1% é a probabilidade máxima admissível de um item selecionado aleatoriamente do lote se encontrar fora do intervalo de tolerância ($p_{nca} = 0,01$). Quando o lote é rejeitado na inspeção por amostragem é realizada a inspeção retificadora, onde todos resistores do lote são inspecionados quanto à conformidade com as especificações usando um ohmímetro de alta velocidade calibrado. Este processo de medição é caracterizado por uma função densidade de probabilidade normal $h(\eta_m|\eta) = \varphi(\eta_m; \eta, u_m^2)$, com $u_m = 0,04 \Omega$, designada para representar e comunicar a confiança no intervalo de valores medidos que poderiam ser observados ao medir uma resistência conhecida $Y = \eta$. Os resultados do processo de medição na inspeção retificadora são corrigidos para todos os erros sistemáticos significativos reconhecidos.

- Calcule a probabilidade de um item selecionado aleatoriamente do lote original se encontrar fora do intervalo de tolerância (p_{nc}) a partir das informações da inspeção de recebimento por amostragem ($g_0(\eta)$).
- Verifique se o lote original deve ser aceito ou rejeitado na inspeção de recebimento por amostragem.
- Caso o lote deva ser rejeitado na inspeção por amostragem, verifique para quais valores de $w = 0, 0,1$ e $-0,1$ (faixas de segurança para o intervalo de aceitação) a inspeção retificadora será satisfatória.
- Para os valores de w acima, calcule R_C , R_P , E_{IR} e E_P .

4.1. Dados do problema

O problema está delineado pelas informações:

- $g_0(\eta) = \varphi(\eta; y_0, u_0^2)$, $y_0 = 1500 \Omega$ e $u_0 = 0,12 \Omega$ (distribuição de probabilidade normal)
- $T_L = 1499,8 \Omega$, $T_U = 1500,2 \Omega$ (limites inferior e superior do intervalo de tolerância)
- $h(\eta_m|\eta) = \varphi(\eta_m; \eta, u_m^2)$, $u_m = 0,04 \Omega$ (distribuição de probabilidade normal e correção do erro sistemático aplicado no resultado η_m)
- $A_L = T_L + w$, $A_U = T_U - w$ (limites inferior e superior do intervalo de aceitação)
- $p_{nca} = 0,01$ (condição aplicada à inspeção por amostragem e à inspeção retificadora)

4.2. Solução

- Calcular $p_{nc} = \Pr(Y \notin \mathcal{C}) = \int_{\bar{c}} g_0(\eta) d\eta$, para o lote original.

$$p_{nc} = 1 - \int_{T_L}^{T_U} g_0(\eta) d\eta \cong 9,56\%$$

- $p_{nc} = 9,56\% > p_{nca} = 1\%$, portanto o lote original deve ser rejeitado segundo o critério da inspeção por amostragem e deve ser submetido à inspeção retificadora.
- Resultados da inspeção retificadora em função da faixa de segurança utilizada.
 - $w = 0 \Rightarrow A_L = T_L = 1499,8 \Omega$, $A_U = T_U = 1500,2 \Omega$

A partir dos dados do problema, foi obtida numericamente $f(\eta, \eta_m)$ pelo programa desenvolvido em LabVIEW® pelo autor para análise de risco em avaliação da conformidade.

A figura 1 ilustra a saída do programa, apresentando: $g_0(\eta)$, $f(\eta, \eta_m)$, os limites dos intervalos de tolerância e de aceitação e as regiões de verdadeira aceitação (VA), verdadeira rejeição (VR), falsa aceitação (FA) e falsa rejeição (FR).

$$p_{nc} = \frac{p_{FA}}{p_{FA} + p_{VA}} \quad , \quad \text{após a inspeção retificadora}$$

$$p_{FA} = \int_{\tilde{c}} \int_{\mathcal{A}} f(\eta, \eta_m) d\eta_m d\eta = 0,0189422$$

$$p_{VA} = \int_{\mathcal{C}} \int_{\mathcal{A}} f(\eta, \eta_m) d\eta_m d\eta = 0,867212$$

$$p_{nc} = \frac{0,0189422}{0,0189422 + 0,867212} \cong 2,138\%$$

Como $p_{nc} > p_{nca} = 1\%$, então esta configuração da inspeção retificadora é insatisfatória e uma outra configuração desta inspeção deverá ser usada, por exemplo, reduzindo o intervalo de aceitação através de uma faixa de segurança $w > 0$.

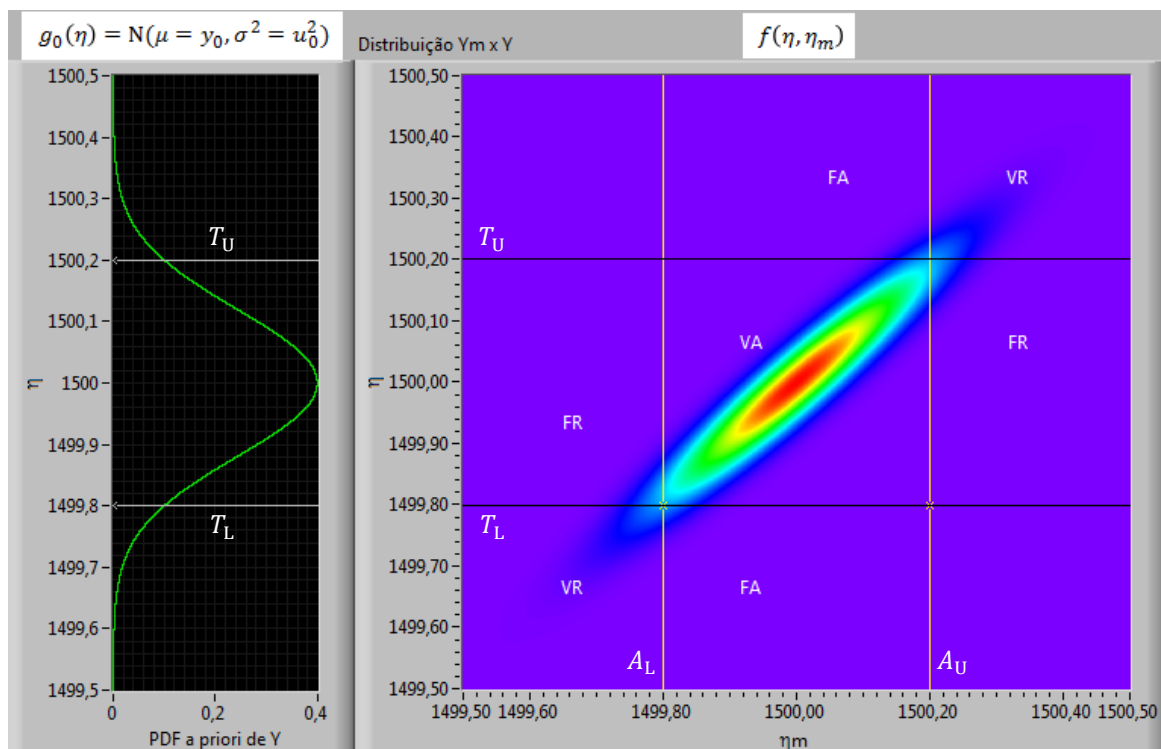


Figura 1. Gráficos de $g_0(\eta)$ e $f(\eta, \eta_m)$ para as condições dos dados do problema em 4.1 e $w = 0$.

$$\bullet \quad w = 0,1 \Rightarrow A_L = T_L + w = 1499,9 \Omega \quad , \quad A_U = T_U - w = 1500,1 \Omega$$

$$p_{nc} = \frac{p_{FA}}{p_{FA} + p_{VA}} \quad , \quad \text{após a inspeção retificadora}$$

$$p_{FA} = 0,000113015 \quad , \quad p_{VA} = 0,570693$$

$$p_{nc} \cong 0,0198\%$$

Como $p_{nc} < p_{nca} = 1\%$, então esta configuração de inspeção retificadora é satisfatória e atenderá o requisito da probabilidade de um item selecionado aleatoriamente do novo lote se encontrar fora do intervalo de tolerância ser menor ou igual a 1%.

$$\bullet \quad w = -0,1 \Rightarrow A_L = T_L + w = 1499,7 \Omega \quad , \quad A_U = T_U - w = 1500,3 \Omega$$

$$p_{nc} = \frac{p_{FA}}{p_{FA} + p_{VA}} \quad , \quad \text{após a inspeção retificadora}$$

$$p_{FA} = 0,0780319 \quad , \quad p_{VA} = 0,904262$$

$$p_{nc} \cong 7,944\%$$

Como $p_{nc} > p_{nca} = 1\%$, então, esta configuração de inspeção retificadora é insatisfatória e uma outra configuração desta inspeção deverá ser usada ($w > 0$). Isso era esperado, uma vez que para $w = 0$ a inspeção retificadora já foi constatada como insatisfatória.

d) Cálculo de R_C , R_P , E_{IR} e E_P para o novo lote após a inspeção retificadora.

$$R_C = p_{FA} = \int_{\tilde{c}} \int_{\mathcal{A}} f(\eta, \eta_m) d\eta_m d\eta \quad \quad R_P = p_{FR} = \int_{\tilde{c}} \int_{\tilde{\mathcal{A}}} f(\eta, \eta_m) d\eta_m d\eta$$

$$E_{IR} = 1 - \frac{p_{FA}}{p_{FA} + p_{VR}}$$

$$E_P = p_{VA} + p_{FA}$$

A tabela 1 apresenta os valores obtidos para as métricas da inspeção retificadora, a partir dos dados em 4.1.

Tabela 1. Valores aproximados de p_{nc} , R_C , R_P , E_{IR} e E_P , relativos ao novo lote após a inspeção retificadora, para os dados do problema em 4.1 (p_{nc} do lote original $\cong 9,56\%$).

w [Ω]	p_{nc} [%]	R_C [%]	R_P [%]	E_{IR} [%]	E_P [%]
0	2,14	1,89	3,72	80,18	88,62
0,1	0,0198	0,0113	33,4	99,88	57,08
-0,1	7,94	7,80	0,0157	18,36	98,23

4.3. Análise dos resultados

A partir dos resultados apresentados na tabela 1, verificou-se que, para um dado processo de produção caracterizado por $g_0(\eta)$ e um processo de medição utilizado na inspeção retificadora caracterizado por $h(\eta_m|\eta)$ e definido um intervalo de tolerância para a grandeza de interesse, o aumento de w proporciona os efeitos positivos de redução do p_{nc} , redução do R_C e aumento da E_{IR} , e os efeitos negativos de aumento do R_P e redução da E_P . Dessa forma, a simples modificação do intervalo de aceitação melhora, por um lado, os valores das métricas relacionadas aos interesses de uma parte (consumidor ou produtor), porém piora os valores de outras métricas relativas aos interesses da outra parte. Considerando que existe um ponto de equilíbrio que otimiza a conjunção dos dois interesses, existe, portanto, para cada processo de avaliação da conformidade, um valor de w ótimo que deve ser determinado e aplicado na regra de decisão da inspeção retificadora.

4.4. Impactos da alteração de $g_0(\eta)$ e $h(\eta_m|\eta)$ na inspeção retificadora

Mantendo-se os mesmos limites de tolerância e para $w = 0$, no caso de melhoria no processo de produção (redução de u_0) ou de melhoria no processo de medição da inspeção retificadora (redução de u_m), caracterizados os novos processos por:

- $g_0(\eta) = \varphi(\eta; y_0, u_0^2)$, $y_0 = 1500 \Omega$ e $u_0 = 0,08 \Omega$ (distribuição de probabilidade normal) e
- $h(\eta_m|\eta) = \varphi(\eta_m; \eta, u_m^2)$, $u_m = 0,02 \Omega$ (distribuição de probabilidade normal e correção do erro sistemático aplicado no resultado η_m);

obtém-se novos valores para as métricas relacionadas à inspeção. A tabela 2 apresenta os novos valores das métricas para essas duas novas condições, mantidas as demais condições em 4.1 e $w = 0$.

Tabela 2. Valores aproximados de p_{nc} antes e após a inspeção retificadora e de R_C , R_P , E_{IR} e E_P , após a inspeção retificadora, para os dados do problema em 4.4 (mesmo intervalo de tolerância de 4.1 e $w = 0$).

Melhoria	p_{nc} antes da IR [%]	p_{nc} após IR [%]	R_C [%]	R_P [%]	E_{IR} [%]	E_P [%]
1) Nenhuma (condições de 4.1)	9,56	2,14	1,89	3,72	80,18	88,62
2) Apenas $u_0 = 0,08 \Omega$	1,24	0,375	0,365	1,66	70,59	97,47
3) Apenas $u_m = 0,02 \Omega$	9,56	1,24	1,11	1,57	88,34	89,98

Fixado o intervalo de aceitação ($w = 0$) e mantidas todas as condições em 4.1 exceto uma, verificou-se que a redução da variabilidade do processo de produção, expressa pela diminuição de u_0 , reduz o valor de p_{nc} antes mesmo da inspeção retificadora e, evidentemente, também após a inspeção. Nessa condição, R_C e R_P diminuíram sensivelmente, E_P aumentou significativamente, como esperado, mas curiosamente E_{IR} reduziu. Uma explicação para essa redução de E_{IR} é a maior dificuldade em evitar uma falsa aceitação na região mais próxima aos limites do intervalo de tolerância, quando mantida a mesma incerteza de medição dos resultados.

Quando a melhoria consiste em apenas reduzir a incerteza de medição da inspeção retificadora, obviamente, p_{nc} antes da inspeção retificadora não sofre alteração, porém, os valores de todas as demais métricas melhoram. Nessa condição, pelo fato de p_{nc} após a inspeção retificadora não atingir o critério de $p_{nc} \leq p_{nca} = 1 \%$, uma possível solução seria escolher um valor de $w > 0$ que tornasse o novo valor de $p_{nc} \leq 1 \%$.

5. Conclusão

Apesar dos valores das métricas %GRR e C_m , empregadas na análise de capacidade de medição [3, 4], dependerem da incerteza de medição dos resultados utilizados num processo de avaliação da conformidade, indicando a qualidade do processo de medição, essas métricas não expressam diretamente a eficácia da inspeção realizada e nem a eficácia da produção após a inspeção retificadora. Um determinado valor de %GRR ou de C_m pode, dependendo da variabilidade do processo de produção e do intervalo de aceitação, gerar diferentes valores para a eficácia da inspeção retificadora e diferentes valores para a eficácia da produção, de forma que parece ser mais razoável considerar, caso a caso, se uma determinada configuração de inspeção retificadora é satisfatória ou não, em função dos valores de eficácia ou de outros indicadores de interesse para a gestão da qualidade e produção.

Este trabalho propõe a aplicação da análise de risco em avaliação da conformidade como ferramenta de avaliação de inspeções retificadoras, e, considerando a incerteza de medição nos resultados e a avaliação das métricas: p_{nc} , R_C , R_P , E_{IR} e E_P , retrata aspectos relevantes para a gestão da qualidade e produção.

Uma aplicação da ferramenta foi apresentada para ilustrar a realização da avaliação de uma inspeção retificadora e quais fatores devem ser considerados conjuntamente nesta avaliação. Os fatores de influência: variabilidade da produção, incerteza de medição e intervalo de aceitação foram alterados para retratar como tais fatores impactam as métricas de avaliação da inspeção retificadora. Verificou-se



que a simples alteração do intervalo de aceitação não reduz, simultaneamente, ambos riscos do consumidor e do produtor, mas a redução da variabilidade da produção (diminuição de u_0) e melhoria do processo de medição (redução de u_m) permitem tal benefício. Dessa forma, através da análise de risco, é possível a otimização de processos de medição para inspeções retificadoras, atendendo simultaneamente as demandas de qualidade do consumidor e de redução de custos do produtor, destacando a metrologia como indutora da competitividade industrial.

Referências

- [1] ABNT NBR ISO 9000:2015, Sistemas de gestão da qualidade - Fundamentos e vocabulário.
- [2] ABNT NBR ISO 9001:2015, Sistemas de gestão da qualidade - Requisitos.
- [3] Automotive Industry Action Group (2010). *Measurement Systems Analysis*, 4th ed. Detroit, MI.
- [4] BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP, and OIML. Evaluation of measurement data - The role of measurement uncertainty in conformity assessment. Joint Committee for Guides in Metrology, JCGM 106:2012.
- [5] ABNT NBR ISO 31000:2018, Gestão de riscos - Diretrizes.
- [6] Villela, R L A. Análise de risco econômico para tomada de decisão em programas de avaliação da conformidade. *Anais do Congresso Metrologia 2021 – CBM* (18 a 21/10/2021). ISBN: 978-65-994975-8-2.