

# OTIMIZAÇÃO DE INTERVALOS DE CALIBRAÇÃO DE DISPOSITIVOS DE SEGURANÇA UTILIZANDO ALGORITMO GENÉTICO E MÉTODO MULTICRITÉRIO DE APOIO À DECISÃO

Marcello Dantas Gomes Júnior<sup>1</sup>

João Marcos Pereira Silva<sup>2</sup>; Tainá da Silva Rocha Paz<sup>3</sup>; Pauli Adriano de Almada Garcia<sup>4</sup>

## RESUMO

O presente trabalho apresenta uma abordagem simplificada para encontrar intervalos ideais para testes e calibrações de equipamentos ou itens sujeitos a falhas ocultas, mais especificamente perda de calibração. A proposta aplica-se a válvulas de segurança, detectores de fogo e gás e instrumentos de campo, tais como transmissores de pressão e temperatura. A partir de técnicas de análise de dados de vida para a estimação dos parâmetros dos modelos probabilísticos, otimiza-se por meio de um algoritmo genético a função confiabilidade. Por meio de variações na solução proposta são construídos cenários de decisão. Para a seleção do cenário mais favorável utilizam-se métodos multicritério de apoio à decisão. Para mostrar a aplicabilidade da proposta, apresenta-se um estudo de caso simplificado, cujos resultados demonstram a eficácia da abordagem proposta para lidar com este tipo de problema.

## ABSTRACT

This paper presents a simplified approach to find ideal intervals for testing and calibrating equipment or items subject to hidden failures, more specifically calibration loss. The proposal applies to safety valves, fire and gas detectors and field instruments such as pressure and temperature transmitters. From life data analysis techniques to estimate the parameters of probabilistic models, it is optimized using genetic algorithms with a reliable function. Through variations in the proposed solution, decision scenarios are built. To select the most favorable scenario, use a multicriteria decision support method. To show an applicability of the proposal, a simplified case study is presented, splitting results demonstrate the applicability of the proposed approach to deal with this type of problem.

## 1. INTRODUÇÃO

Muitas decisões no planejamento e programação da manutenção industrial ainda são tomadas com base em critérios subjetivos ou seguindo estritamente recomendações dos fabricantes, seja nas manutenções preventivas ou nos testes de detecção de falhas ocultas e calibrações, conforme [1] e [2]. O fato de ser conservador e executar tais atividades com uma pequena periodicidade passa a sensação de segurança, de uma boa gestão dos ativos físicos e de garantia de disponibilidade e confiabilidade dos sistemas, de acordo com [3]. Na realidade, as quantidades elevadas de intervenções não redundam necessariamente no melhor desempenho dos ativos e, frequentemente, surtem o efeito contrário ou indesejado, como afirma [9]. Excesso de intervenções podem introduzir falhas nos equipamentos ou reduzir a disponibilidade devido o *downtime* necessário para as manutenções, testes e calibrações, reforça [4]. Diante do exposto, o presente trabalho apresenta uma abordagem baseada num hibridismo entre computação evolucionária, prospecção de cenários e métodos multicritério de apoio a decisões. A proposta busca estabelecer um *tradeoff* para as intervenções programadas buscando uma melhor relação custo-benefício a partir de cenários prospectados com base numa solução ótima.

## 2. DESCRIÇÃO

### 2.1 Metodologia

A partir de dados históricos de perda de calibração de equipamentos de segurança são feitas estimativas para os parâmetros dos modelos probabilísticos a serem considerados. Em seguida, considerando-se a configuração do sistema, é modelada a disponibilidade para o estado estacionário do sistema em função das periodicidades e duração de testes e calibrações. Posteriormente busca-se a melhor solução para os intervalos de calibração para cada dispositivo de segurança. A busca se dá por meio de um algoritmo genético (AG), onde o objetivo é maximizar a disponibilidade da função protetora do arranjo de dispositivos. Por fim, a partir

<sup>1</sup> Engenheiro Eletricista – Petrobras

<sup>2</sup> Doutorando - UFF

<sup>3</sup> Doutorando – UFF

<sup>4</sup> DSc, Professor Associado - UFF

da solução fornecida pelo AG, são feitas variações percentuais nas periodicidades de testes e calibrações ao redor da solução encontrada. Essas variações acarretam diferentes valores de disponibilidade, custo, mão de obra e materiais necessários. Para selecionar a variação mais adequada para o problema, combinam-se os métodos Processo Hierárquico de Análise (*Analytic Hierarchical Process - AHP*) e *Technique for Order Preference by Similarity of Ideal Solution – TOPSIS*.

## 2.2 Tratamento dos Dados

O tratamento dos dados está diretamente relacionado à forma pela qual são feitos os testes e calibrações nos dispositivos de segurança. Tais itens estão sujeitos a variados modos de falha. No entanto, o foco deste trabalho é na perda de calibração. Em [5] há a definição dos conceitos de falha segura e falha em perigo. O presente trabalho voltou-se para as falhas em perigo em termos de perda de calibração.

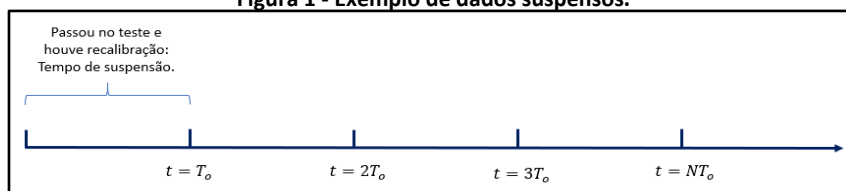
Na construção de uma análise de dados de vida é fundamental separar tempos de falha e tempos de sobrevivência. Esta análise depende do que se considera como falha e restauração total da condição do item. Levando-se em conta apenas a perda de calibração para ocorrência de falha em perigo como modo de falha dos itens, a recalibração é considerada uma restauração total e o item é levado à condição de tão bom quanto novo (*as good as new*). As calibrações são periódicas cujos intervalos, em muitos casos, são determinados por normas ou pelo fabricante. Em alguns casos são apenas sugeridas e em outros ficam completamente a cargo da empresa operadora. É uma boa prática auferir a calibração sempre antes de recalibrar, sobretudo para se ter um histórico do comportamento daquele item e poder analisar influências externas na faixa de calibração. São comuns os casos de calibração periódica compulsória, isto é, mesmo que ao fim de um intervalo para o teste o item ainda esteja dentro do range de calibração aceitável, ele é recalibrado. Nesta situação não é possível afirmar quando o item perderia sua calibração, uma vez que foi devolvido à condição de tão bom quanto novo. Este é um típico dado de sobrevivência e é importante para a análise de dados de vida. Tais dados são classificados como dados censurados à direita, doravante, suspensões.

Pode ocorrer da calibração não ser executada, caso o item esteja dentro da faixa de calibração aceitável. Neste caso, não havendo mais informações a posteriori para este item, a informação do teste sem recalibração é descartada na análise.

Em algumas situações, ao testar o item verifica-se que ele perdeu a calibração e ficou sujeito a uma falha perigosa. Por se tratar de uma falha oculta, não se sabe exatamente quando ocorreu a perda de calibração. O que se pode afirmar é o intervalo de tempo dentro do qual aconteceu a perda de calibração. Este intervalo de tempo é limitado pelas datas do teste atual e do teste anterior, no qual atestou-se a calibração correta e/ou ocorreu a recalibração. Este é um dado de falha e é classificado como dado censurado no intervalo. Esta informação é importante para o tratamento estatístico posterior.

Alguns itens estão sujeitos a outros modos de falha que não apenas a perda de calibração. Caso estes modos de falha sejam sintomas de uma falha evidente, tais itens sofrerão manutenção corretiva. Uma vez que o item seja retirado do processo, aproveita-se a oportunidade e verifica-se a calibração e, até mesmo, pode ser recalibrado por oportunidade. Esta informação pode entrar como suspensão, caso não tenha havido perda de calibração e tenha ocorrido recalibração, bem como pode entrar como uma censura no intervalo, caso tenha sido constatada perda de calibração. Neste último caso, o intervalo para ocorrência da falha oculta é mais estreito.

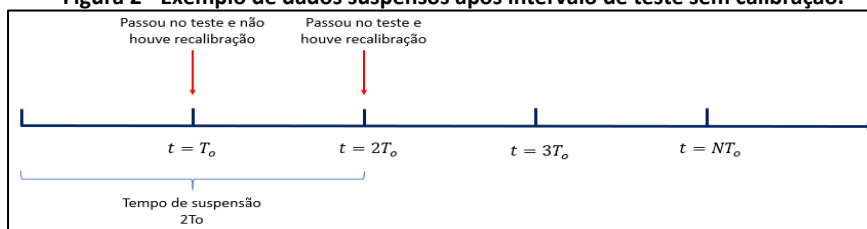
**Figura 1 - Exemplo de dados suspensos.**



Fonte: Produzido pelos autores.

A Figura 1 mostra um exemplo de dado suspenso. Foi feito o teste no período  $T_o$  e o item passou no teste, mesmo assim foi calibrado. Então não seria possível saber em que tempo ele perderia sua calibração. De qualquer forma, o tempo  $T_o$  é um tempo de sobrevivência e deve ser levado em conta na estimativa dos parâmetros.

**Figura 2 - Exemplo de dados suspensos após intervalo de teste sem calibração.**



Fonte: Produzido pelos autores.

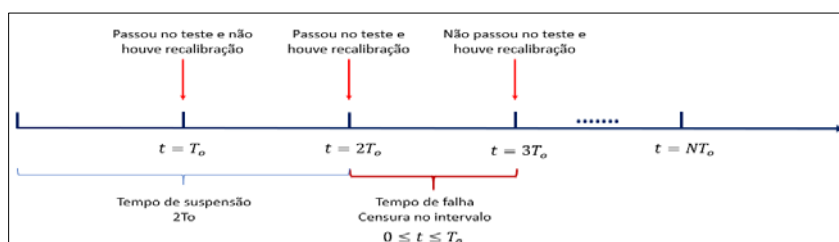
A Figura 2 mostra outro exemplo de dado em suspensão. Neste caso, a suspensão ocorre após um teste em que o item passou, mas não foi recalibrado. Considerando que ele tenha sido recalibrado em  $t = 0$  no gráfico da Figura 2, e que sempre que o item é recalibrado o tempo de vida é zerado, então sua calibração adequada sobreviveu por um tempo  $2T_0$ . Como não é possível saber o tempo que o item perderia sua calibração, então este tempo  $2T_0$  entra na análise como suspensão.



Fonte: Produzido pelos autores.

A Figura 3 mostra um exemplo de dado suspenso e dado de falha, isto, perda de calibração. O primeiro dado é o mesmo caso da Figura 1, onde o item foi testado num tempo  $T_0$  após sua última recalibração e passou no teste, sendo ainda recalibrado. Trata-se de uma suspensão. O segundo dado, na Figura 3, já aponta uma falha. O tempo de vida foi zerado na recalibração em  $T_0$  e no teste no tempo  $2T_0$  verificou-se que o item estava operando fora do range de calibração para falha perigosa. Então trata-se de um dado de falha ocorrida no intervalo  $0 \leq t \leq T_0$ . Por ser uma falha oculta não se sabe quando ela aconteceu exatamente, mas sabe-se que foi entre os dois testes.

**Figura 4 - Exemplo de dados suspensos e dados de falha censurados.**



Fonte: Produzido pelos autores.

A Figura 4 mostra um caso que o item foi testado num tempo  $T_0$  após a última recalibração. Neste teste ele foi aprovado, mas não recalibrado. Assim seu tempo de vida não foi zerado em  $T_0$  e ele continuou operando. No tempo  $2T_0$  ele foi testado, aprovado e recalibrado. Então o tempo de suspensão foi de  $2T_0$ . No teste seguinte ele foi reprovado e recalibrado, assim, o dado de falha está no intervalo  $0 \leq t \leq T_0$ .

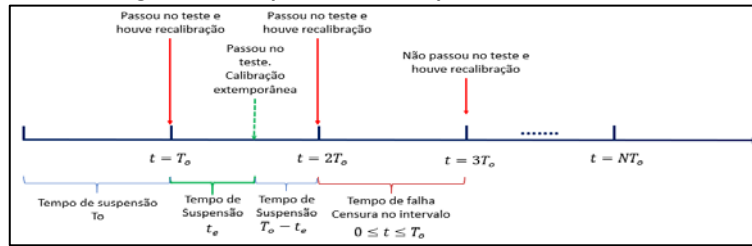
**Figura 5 - Outro exemplo de dados suspensos e dados de falha censurados no intervalo, onde houve teste sem calibração.**



Fonte: Produzido pelos autores.

A Figura 5 mostra um exemplo de dado suspenso no tempo  $T_0$ . No teste seguinte o item estava com a calibração correta e não foi recalibrado, seu tempo de vida não foi zerado. Em mais um teste foi detectada a falha. Neste caso, o intervalo de ocorrência da perda de calibração fica em  $T_0 \leq t \leq 2T_0$ . Esta informação é importante pois considera o comportamento de perda de calibração para intervalo de mesmo comprimento, porém com limites diferentes. O intervalo é este porque o item operado durante um tempo  $T_0$  após a última recalibração até o teste feito antes da perda de calibração. Então a falha ocorreu entre o tempo  $T_0$  e o tempo no qual ocorreu a detecção da falha,  $2T_0$ .

Figura 6 - Exemplo de dados suspensos e dados de falha.



Fonte: Produzido pelos autores.

A Figura 6 mostra um caso de calibração extemporânea. A calibração pode ocorrer no intervalo entre os testes quando o item apresenta uma falha evidente que demande a retirada dele do processo. Ao ser retirado para corrigir uma falha evidente, aproveita-se a oportunidade para testar e, possivelmente, calibrar o item. Esta situação é mais comum em caso de instrumento de campo e detector de fogo e gás. Outra possibilidade é a substituição do item por um novo, por algum motivo. Pode ocorrer por exemplo em *upgrade* de tecnologia. O tratamento do dado para esta ocorrência é a suspensão, conforme apontado na Figura 6 entre os tempos  $T_o$  e  $2T_o$ . A suspensão ocorre no tempo  $t_e$ , o qual está no intervalo  $T_o \leq t_e \leq 2T_o$ . Se no próximo teste o detector passar e for recalibrado, o tempo de suspensão será  $T_o - t_e$ . Caso fosse detectada perda de calibração, o tempo de falha seria censurado no intervalo  $t_e \leq t \leq T_o$ .

As seis combinações, mostradas nas seis figuras anteriores mostram os casos mais típicos no tratamento dos dados. Existem outras combinações. Para aplicá-las basta seguir os preceitos adotados no presente trabalho.

### 2.3 Estimativa dos Parâmetros da Distribuição de Probabilidades

Conforme esperado, na massa de dados tratados não há dados completos, isto é, sempre que houver uma perda de calibração jamais se saberá exatamente o tempo em que ocorreu, uma vez que se trata de uma falha oculta. Outro ponto é a quantidade muito grande de suspensões, pois os itens permanecem na faixa de calibração aceitável na maioria dos testes, bem como nos testes e calibrações extemporâneos.

Devido à característica da massa de dados, a estimativa dos parâmetros da distribuição de probabilidades será feita através do método da máxima verossimilhança. A função de verossimilhança logaritmizada é composta de duas parcelas, a primeira é referente aos dados de falha censurados no intervalo e a segunda é referente aos dados suspensos. A Equação 1 mostra a função. Para este trabalho, sem perda de generalidade, será usada a distribuição Weibull.

$$\ln(L) = \Lambda = \sum_{i=1}^{FI} \ln \left[ e^{\left(\frac{T_{Li}}{\eta}\right)^{\beta}} - e^{\left(\frac{T_{Ri}}{\eta}\right)^{\beta}} \right] - \sum_{j=1}^S \left(\frac{T_j}{\eta}\right)^{\beta} \quad (1)$$

Onde:

$\beta$  é o parâmetro de forma a ser estimado.

$\eta$  é o parâmetro de escala a ser estimado.

$FI$  é o número de dados de falha censurados no intervalo.

$T_{Ri}$  é o tempo quando foi executado o teste que detectou a  $i$ ésima perda de calibração.

$T_{Li}$  é o tempo quando foi executado o último teste antes da detecção da  $i$ ésima perda de calibração.

$S$  é o número de dados suspensos.

$T_j$  é o tempo em que o teste foi executado e o item estava com a calibração correta.

Para encontrar os valores de  $\beta$  e  $\eta$  que maximizem a função verossimilhança é necessário minimizar o negativo da função verossimilhança logaritmizada, em relação a ambos os parâmetros.

### 2.4 Modelagem da Disponibilidade do Sistema

Após a obtenção da distribuição, deverá ser calculada a disponibilidade, levando em conta o tempo necessário para realização do teste e calibração. De acordo com [1], a disponibilidade de um item sujeito a testes com periodicidade  $T_o$  é dada pela integral na Equação 2, dentro de um intervalo de teste e

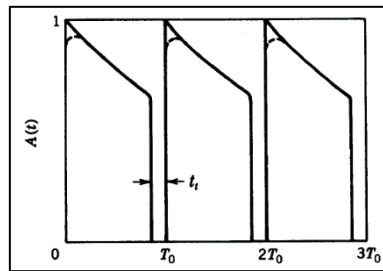
(2)

calibração, para um número grande de intervalos, de forma a alcançar a disponibilidade de estado estacionário.

$$A(\infty) = \frac{1}{T_0} \cdot \int_0^{T_0} R(t) dt$$

Em uma análise simplificada, esta formulação pode levar ao entendimento de que quanto menor o intervalo de teste e calibração, maior a disponibilidade. Então faz-se necessário descontar da disponibilidade a fração correspondente ao tempo de teste e calibração, durante o qual o item fica indisponível, como pode ser visto na Figura 7. Na formulação proposta por [1] ainda existe um terceiro termo adicional à Equação 3, que leva em conta a taxa de falhas e a manutenibilidade. Como no presente trabalho a recalibração, isto é restauração perfeita do *set point* de calibração, é compulsória, este terceiro termo não se faz necessário. O tempo gasto para o teste e recalibração é representado por  $t_{off}$ .

**Figura 7 - Disponibilidade considerando o tempo de teste e calibração.**



Fonte: Lewis (1994).

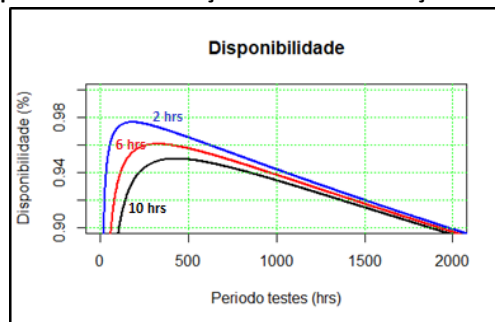
$$A(\infty) = \frac{1}{T_0} \cdot \int_0^{T_0} R(t) dt - \frac{t_{off}}{T_0} \quad (3)$$

Sem perda de generalidade, a disponibilidade do item segundo a distribuição Weibull de dois parâmetros é dada pela Equação 4:

$$A(\infty) = \frac{1}{T_0} \cdot \int_0^{T_0} e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} dt - \frac{t_{off}}{T_0} \quad (4)$$

Quanto maior o tempo de teste e calibração,  $t_{off}$ , menor a disponibilidade. Em relação à periodicidade de teste e calibração  $T_0$ , há um valor em que maximiza a disponibilidade, como pode ser visto na Figura 8, em um gráfico gerado pelos autores deste trabalho, utilizando linguagem R:

**Figura 8 - Influência da periodicidade e duração de teste e calibração na disponibilidade de um item.**



Fonte: Produzido pelos autores.

Cada curva representa a disponibilidade de acordo com o tempo de duração do teste e calibração. À medida que o tempo de duração do teste e calibração aumenta, o valor de disponibilidade máxima é alcançado numa periodicidade  $T_0$  mais alongada para teste e calibração. Quanto mais rápida for a tarefa de teste e calibração, maior a disponibilidade do item. Deve-se ressaltar que há um *tradeoff* entre o tempo parado para manutenção e a melhoria trazida por ela.

Com a disponibilidade de cada item, modela-se então a disponibilidade do sistema composto pelos itens. O caso mais simples é quando todos os itens são iguais. Conforme [1], para itens em série, a disponibilidade máxima é alcançada quando se realiza os testes simultaneamente nos itens. A limitação é a capacidade da equipe de instrumentação, caso um ou mais técnicos tenham que intervir em cada item. Para casos em que há redundância, o ideal é realizar testes escalonados, de forma que apenas um item fique indisponível de cada vez. No ambiente industrial este último caso é o mais comum. Aqui será obtida apenas um valor  $T_o$  de periodicidade, conforme generalização dada pela binomial na Equação 5.

$$A(\infty) = \sum_k \frac{N!}{k! \cdot (N-k)!} \cdot \left( \frac{1}{T_o} \int_0^{T_o} e^{-\left(\frac{t}{T_o}\right)^\beta} dt \right)^k \cdot \left( 1 - \frac{1}{T_o} \int_0^{T_o} e^{-\left(\frac{t}{T_o}\right)^\beta} dt \right)^{N-k} \quad (5)$$

Caso  $k = 1$  e  $N = 1$ , trata-se de um item apenas. Se  $k = 1$  e  $N > 1$ , trata-se de um paralelo simples. Para casos em que  $k = N$  trata-se de um sistema em série. Pode-se ainda ter casos em que  $1 < k < N$ , onde precisa-se de  $k$  itens bons em  $N$  para o sistema estar disponível. Esta configuração é bastante comum quando se trabalha com laços de detectores que atuam em votação.

Há situações em que num mesmo sistema há itens de modelos ou fabricantes diferentes, tradicionalmente para mitigar riscos de falha de modo comum. Em tais situações, não é possível simplificar aplicando a binomial, como foi feito na Equação 5. Pode ser usado o método do espaço de eventos, conforme [4]. Neste método, todas as combinações operacionais possíveis são levadas em consideração no cálculo da confiabilidade do sistema e, consequentemente, no cálculo da disponibilidade do sistema. Esta é a abordagem aplicada no presente trabalho. Existe também o método de espaço de estados usando cadeias de Markov e solução de equações diferenciais. Tal abordagem foge do escopo deste trabalho, mas pode ser observada em [1] e [12].

## 2.5 Algoritmo Genético

O funcionamento dos AGs é inspirado nas regras da seleção natural e possui uma linguagem com muitos termos emprestados da biologia, que precisam ser redefinidos para o contexto algorítmico. Assim, quando se diz que o AG opera sobre um conjunto de cromossomos (artificiais) ou indivíduos, estes devem ser entendidos como cadeias ( *strings*) de números, geralmente bits (0 e 1) ou, também, valores reais. Se a função objetivo tem muitos argumentos, cada *string* é particionada em *substrings* com comprimentos atribuídos, uma para cada argumento e, correspondentemente, dizemos que cada cromossomo é particionado analogamente em genes (artificiais). Os genes constituem o chamado genótipo do cromossomo e as *substrings*, quando decodificadas em números reais, chamados de fatores de controle, constituem seu fenótipo. Quando a função objetivo é avaliada em correspondência aos valores dos fatores de controle de um cromossomo, seu valor é chamado de adequação (ou *fitness*) desse cromossomo. Assim, cada cromossomo dá origem a uma solução para o problema de otimização [26].

Um algoritmo genético (AG) é usado para determinar a periodicidade de inspeção de cada componente, com objetivo de otimizar a disponibilidade do sistema durante seu tempo de missão. Nesse caso, assumimos que a periodicidade de inspeção será constante durante todo o tempo de missão. O benefício dessa abordagem é limitar o universo de soluções a serem consideradas, eliminando aquelas que não fazem sentido prático, de acordo com [11]. Assim, o processo de busca é mais eficiente e leva menos tempo computacional.

Para cada componente é determinado sua periodicidade de inspeção,  $p_i$ . O conjunto de parâmetros é chamado de fenótipo e representa uma possibilidade de solução. Na abordagem usada neste trabalho, os cromossomos são compostos por números com valor real em vez de sequências de *bits*. Nesse caso, as estruturas chamadas genótipos, que codificam as soluções encontradas pelo algoritmo, são diretamente iguais aos fenótipos.

## 2.6 Métodos Multicritério para Tomada de Decisão

Os métodos multicritério de apoio à decisão são amplamente utilizados em diversos estudos com o objetivo de apoiar os tomadores de decisão em suas ações, quando existem critérios qualitativos ou quantitativos conflitantes [15]. Nesse sentido, verificou-se a aplicação dos métodos *Analytic Hierarchy Process (AHP)* e *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solutions (TOPSIS)* em estudos recentes relacionados ao tema de confiabilidade [14], [15] e [17]. Para o atual estudo, utilizou-se o método



AHP para atribuir pesos aos critérios e o método TOPSIS para ordenar as alternativas com base nos critérios. Os detalhes dos métodos estão descritos a seguir.

**Método AHP:** O método AHP foi proposto por [20] e possibilita a aplicação de julgamentos de especialistas e tomadores de decisão, sendo um dos métodos multicritério mais aplicados nos estudos [15]. Esse método utiliza comparações de pares para calcular os pesos dos critérios e uma das vantagens de utilizar o AHP é que ele tem seu próprio procedimento de derivação de pesos e é de fácil aplicação [17]. Essa comparação de pares é realizada com base na escala fundamental de [20], avaliando o grau de importância dos critérios em uma escala de 1 a 9, ou seja, de igualmente importante a extremamente mais importante. As etapas para a aplicação do método AHP, para calcular os pesos dos critérios, estão descritas abaixo [17] e [20]:

*Etapa 1:* Comparação de pares entre os critérios realizada pelos especialistas com base na escala de importância de 1 a 9.

*Etapa 2:* Elaboração da matriz com os resultados da comparação normalizados. A Equação 6 apresenta o cálculo para realizar a normalização, onde  $c_{ij}$  representa a classificação de importância do critério  $i$  em relação ao critério  $j$  e  $t$  representa a quantidade de critérios.

$$n_{ij} = \frac{c_{ij}}{\sum_{l=1}^t c_{lj}} \quad (6)$$

*Etapa 3:* Cálculo dos pesos dos critérios ( $p_j$ ). A Equação 7 apresenta o cálculo para se obter o peso.

$$p_i = \frac{\sum_{l=1}^t n_{il}}{t} \quad (7)$$

*Etapa 4:* Cálculo da razão de consistência (RC) do julgamento realizado pelos especialistas. Para que o julgamento seja considerado consistente, a RC deve ser menor ou igual a 0,1 [20]. Seguem as Equações 8, 9, 10 e 11 para o cálculo da RC.

$$r_i = \frac{\sum_{l=1}^t p_l c_{il}}{p_i} \quad (8)$$

$$\lambda = \frac{\sum_{i=1}^t r_i}{t} \quad (9)$$

$$CI = \frac{\lambda - t}{t - 1} \quad (10)$$

$$RC = \frac{CI}{RI} \quad (11)$$

Onde, CI é o índice de consistência e o RI é o índice de consistência de uma matriz aleatório atribuído por [20]. A Tabela 1 apresenta os valores de RI para o número de critérios de 1 até 15.

**Tabela 1 - Valores de RI gerado para matrizes com ordens diferentes.**

Ordem matriz	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
RI	0	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49	1,51	1,48	1,56	1,57	1,59

Fonte: Saaty (1980).

**Método TOPSIS:** O método TOPSIS foi proposto por [18] e utiliza a lógica da distância das alternativas em relação a solução ideal positiva ( $A^+$ ) e a solução ideal negativa ( $A^-$ ). Ou seja, quanto mais próxima a alternativa estiver de  $A^+$  e mais distante de  $A^-$ , melhor será o desempenho da alternativa [16]. A solução ideal positiva maximiza os critérios de benefício (quanto maior, melhor) e minimiza os critérios de custo (quanto menor, melhor), enquanto a solução ideal negativa realiza o oposto (PAZ et al., 2021). A seguir estão descritas as etapas do método [18] e [19].

*Etapa 1:* Elaboração da matriz de decisão com as alternativas e critérios.

$$R = [r_{11} \cdots r_{1n} \vdots \vdots r_{m1} \cdots r_{mn}] \quad (12)$$

*Etapa 2:* Elaboração da matriz normalizada e ponderada (com os pesos obtidos do método AHP). Onde  $b$  representa as alternativas e  $j$  os critérios.

$$s_{bj} = p_j r_{bj} / \sqrt{\sum_{b=1}^m p_j r_{bj}^2}, \text{ onde } b = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n. \quad (13)$$

Etapa 3: Cálculo da solução ideal positiva ( $A^+$ ) e da solução ideal negativa ( $A^-$ ).

$$A^+ = \{MAX_j s_{bj} | j = 1, \dots, n\} = \{s_1^+, s_2^+, \dots, s_n^+\} \quad (14)$$

$$A^- = \{MIN_j s_{ij} | j = 1, \dots, n\} = \{s_1^-, s_2^-, \dots, s_n^-\} \quad (15)$$

Etapa 4: Cálculo da distância de cada alternativa em relação a  $A^+$  e  $A^-$ .

$$D_b^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (s_{bj} - s_j^+)^2} \quad (16) \quad ; \quad D_b^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (s_{bj} - s_j^-)^2} \quad (17)$$

Etapa 5: Cálculo do coeficiente de aproximação ( $C_b$ ) para cada alternativa.

$$C_b = D_b^- / (D_b^+ + D_b^-) \quad (18)$$

Etapa 6: Ordenação das alternativas.

### 3. ESTUDO DE CASO E RESULTADOS OBTIDOS

Para aplicar a metodologia proposta no presente trabalho, foi coletada uma amostra de dados disponíveis. Os dados foram tratados conforme ilustrado nas figuras de 1 a 6. A Tabela 2 mostra os parâmetros estimados pelo método da máxima verossimilhança, utilizando a distribuição de Weibull.

**Tabela 2 - Parâmetros estimados para a distribuição de Weibull com base nos dados tratados.**

Parâmetros Estimados		
Detector de gás	Forma	Escala (hrs)
Detector modelo 1	0,797071	2003800
Detector modelo 2	0,893666	444413
Detector modelo 3	0,849393	268050

Fonte: Produzido pelos autores.

Os tempos de teste e calibração são mostrados na Tabela 3.

**Tabela 3 - Tempo de indisponibilidade de cada detector devido o teste e calibração.**

Tempos de teste e calibração	
Detector de gás	Tempo de teste e calibração (hrs)
Detector modelo 1	$t_{off1} = 12$
Detector modelo 2	$t_{off2} = 10$
Detector modelo 3	$t_{off3} = 10$

Fonte: Produzido pelos autores.

Desta forma, o objetivo é maximizar a disponibilidade de estado estacionário,  $A(\infty)$ , encontrando os intervalos de calibração ótimos,  $T_{o1}$ ,  $T_{o2}$  e  $T_{o3}$ .

O arranjo considerado leva em conta três detectores diferentes, onde são necessários no mínimo dois corretamente calibrados para garantir a segurança da área que cobrem. Em outras palavras, é uma configuração de 2 bons em 3. Esta abordagem pode ser aplicada para válvulas de segurança e instrumentos de campo. Por serem detectores de modelo diferente, não é possível aplicar a binomial neste caso. Será usado o método do espaço de eventos. A formulação para a disponibilidade equivalente para estado estacionário é dada por:

$$A_{sist}(\infty) = [A_1(T_{o1}) \cdot A_2(T_{o2}) + A_1(T_{o1}) \cdot A_3(T_{o3}) - (A_1(T_{o1}))^2 \cdot A_2(T_{o2}) \cdot A_3(T_{o3})] + A_2(T_{o2}) \cdot A_3(T_{o3}) \\ - [A_1(T_{o1}) \cdot A_2(T_{o2}) + A_1(T_{o1}) \cdot A_3(T_{o3}) - (A_1(T_{o1}))^2 \cdot A_2(T_{o2}) \cdot A_3(T_{o3})] \cdot [A_2(T_{o2}) \cdot A_3(T_{o3})] + A_1(T_{o1}) \\ \cdot A_2(T_{o2}) \cdot A_3(T_{o3}) - [A_1(T_{o1}) \cdot A_2(T_{o2}) + A_1(T_{o1}) \cdot A_3(T_{o3}) - (A_1(T_{o1}))^2 \cdot A_2(T_{o2}) \cdot A_3(T_{o3})] + A_2(T_{o2}) \\ \cdot A_3(T_{o3}) - [A_1(T_{o1}) \cdot A_2(T_{o2}) + A_1(T_{o1}) \cdot A_3(T_{o3}) - (A_1(T_{o1}))^2 \cdot A_2(T_{o2}) \cdot A_3(T_{o3})] \cdot [A_2(T_{o2}) \cdot A_3(T_{o3})] \\ \cdot [A_1(T_{o1}) \cdot A_2(T_{o2}) \cdot A_3(T_{o3})]$$

Onde:



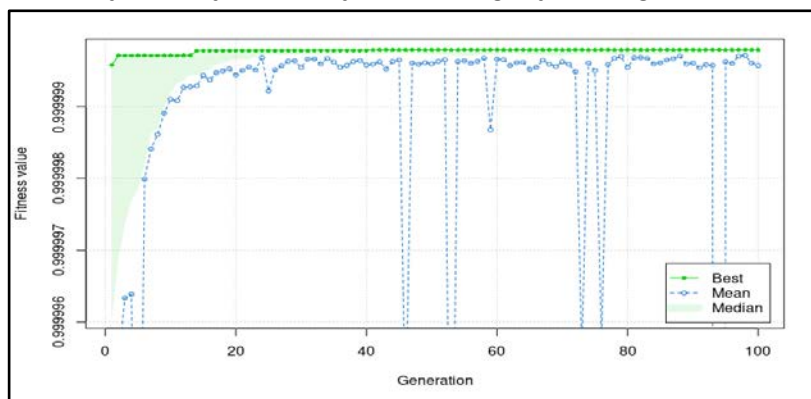
$$A_1(T_{o1}) = A_1(\infty) = \frac{1}{T_{o1}} \cdot \int_0^{T_{o1}} e^{-\left(\frac{t}{\eta_1}\right)^{\beta_1}} dt - \frac{t_{off1}}{T_{o1}}$$

$$A_2(T_{o2}) = A_2(\infty) = \frac{1}{T_{o2}} \cdot \int_0^{T_{o2}} e^{-\left(\frac{t}{\eta_2}\right)^{\beta_2}} dt - \frac{t_{off2}}{T_{o2}}$$

$$A_3(T_{o3}) = A_3(\infty) = \frac{1}{T_{o3}} \cdot \int_0^{T_{o3}} e^{-\left(\frac{t}{\eta_3}\right)^{\beta_3}} dt - \frac{t_{off3}}{T_{o3}}$$

A Figura 10 mostra a evolução dos valores da função de avaliação durante as gerações do algoritmo genético. Para cada geração são reportados a solução com a melhor avaliação, representados pela linha contínua com pontos em verde; em azul o valor médio do valor da função de avaliação de todos os indivíduos; e a região verde delimita a região de soluções com valores da função de avaliação maiores que a mediana.

**Figura 9 - Evolução da função de avaliação durante as gerações do Algoritmo Genético (AG).**



Fonte: Produzido pelos autores.

Na primeira geração a melhor solução possui valor de disponibilidade igual a 0,9999996, enquanto entre as gerações 2 e 13 esse valor passa a ser 0,9999997. A melhor solução é encontrada na geração 14 com valor de avaliação igual a 0,9999998. A partir desse ponto o algoritmo estabiliza, pois as gerações posteriores não conseguem encontrar uma solução de melhor valor. A maior variação entre os valores das soluções, em cada geração, ocorre nas 25 gerações iniciais. Nesse período é perceptível, através da média e mediana, uma maior discrepância entre os valores de avaliação dos indivíduos. A partir da geração 26, a mediana permanece praticamente constante mesmo ocorrendo 6 casos de gerações com valores médios bem abaixo dos valores médios das demais gerações.

A periodicidade de inspeção de cada componente é mostrada na Tabela 4. A solução indica que o componente 1 deve ser inspecionado a cada 4173 horas ( $\approx 173$  dias); o componente 2 a cada 2675 horas ( $\approx 111$  dias); e o componente 3 a cada 1751 horas ( $\approx 73$  dias). Seguindo essa periodicidade de inspeção, o sistema terá uma disponibilidade igual a 0,9999998.

**Tabela 4 - Periodicidade de cada componente obtido pela execução do AG.**

Componente	1	2	3
Periodicidade	4173 horas	2675 horas	1751 horas

Fonte: Produzido pelos autores.

Para efeitos práticos de planejamento e programação dos testes e calibrações, adota-se para o detector modelo 1 uma periodicidade de  $T_{o1} = 6$  meses, para o detector modelo 2  $T_{o2} = 3$  meses e para o detector modelo 3  $T_{o3} = 2$  meses. O valor recomendado pelos fabricantes era de 60 ou 90 dias, a critério da empresa usuária. Na otimização já foi possível ver que a melhor disponibilidade é alcançada a intervalos diferentes dos recomendados pelos fabricantes. Periodicidade esta praticada desde a instalação dos detectores.

No entanto, há outros critérios além da disponibilidade a serem levados em consideração na determinação das periodicidades de teste e calibração. No presente trabalho, foram considerados os custos de teste e calibração para cada tipo de detector. A carga de trabalho em homem-hora (Hh) para cada tipo de

detector. Ainda foi considerado o uso de ferramental como equipamentos de escalada e andaime, cada um com um peso de dificuldade para mensuração. O critério de disponibilidade deve ser maximizado. Os critérios de custo, homem-hora e recursos/materiais/ferramental devem ser minimizados. Para estimar o homem-hora e recursos/materiais/ferramental considerou-se que o detector do modelo 1 pode ser testado e calibrado com instrumentista “pé no chão”, ou seja, não se configura num trabalho em altura. O detector do modelo 2 demanda equipe de escaladores com um supervisor, bem como materiais e ferramental de escalada, assim o homem-hora e o uso de recursos ficaram em nível intermediário. Por fim, o detector modelo 3 é acessado para teste e calibração com andaime. Neste caso o uso de homem-hora e recursos/materiais/ferramental tem o maior nível. Os custos foram estimados com base no histórico de dados.

As alternativas a serem avaliadas são compostas por 27 combinações de periodicidades de teste e calibração entre os três tipos de detectores, conforme Tabela 5 a seguir. A primeira alternativa, A1, é a melhor solução para  $T_{01}$ ,  $T_{02}$  e  $T_{03}$  encontrada pelo algoritmo genético. Em torno desta solução orbitarão as alternativas de periodicidade de teste e calibração de cada modelo de detector.

**Tabela 5 - Alternativas de periodicidades de teste e calibração dos detectores.**

PERIODICIDADE DE TESTE E CALIBRAÇÃO (meses)							
Alternativas	Detector 1	Detector 2	Detector 3	Alternativas	Detector 1	Detector 2	Detector 3
A1	6	3	2	A15	9	2	1
A2	6	3	3	A16	9	6	2
A3	6	3	1	A17	9	6	3
A4	6	2	2	A18	9	6	1
A5	6	2	3	A19	3	3	2
A6	6	2	1	A20	3	3	3
A7	6	6	2	A21	3	3	1
A8	6	6	3	A22	3	2	2
A9	6	6	1	A23	3	2	3
A10	9	3	2	A24	3	2	1
A11	9	3	3	A25	3	6	2
A12	9	3	1	A26	3	6	3
A13	9	2	2	A27	3	6	1
A14	9	2	3				

Fonte: Produzido pelos autores.

A comparação de pares dos critérios foi realizada por três especialistas, com base na escala de importância de 1 a 9, e está representada na Tabela 6.

**Tabela 6 - Matriz de comparação de pares dos critérios.**

	Disponibilidade	Custo/ano	Hh/ano	Material/ano
Disponibilidade	1	7	5	7
Custo/ano	0,143	1	0,33	3
Hh/ano	0,2	3	1	5
Material/ano	0,143	0,33	0,2	1

Fonte: Produzido pelos autores.

A Tabela 7 apresenta a matriz normalizada e os pesos dos critérios que foram calculados aplicado as equações 1 e 2.

**Tabela 7 - Matriz normalizada e os pesos dos critérios.**

	Disponibilidade	Custo/ano	Hh/ano	Material/ano	Pesos
Disponibilidade	0,673	0,617	0,765	0,437	0,623
Custo/ano	0,096	0,088	0,051	0,187	0,106
Hh/ano	0,134	0,265	0,153	0,312	0,216
Material/ano	0,096	0,029	0,030	0,062	0,055

Fonte: Produzido pelos autores.

Após o cálculo dos pesos dos critérios, foi realizada a análise de consistência. Para isso, aplicou-se as equações 8, 9, 10 e 11. A Tabela 8 apresenta o resultado desses cálculos.

**Tabela 8 - Análise de consistência do julgamento dos especialistas.**

$\lambda$	4,25
RI (4 critérios)	0,90
CI	0,082
CR	0,091

Fonte: Produzido pelos autores.

Como pode ser observado na **Tabela 8**, a razão de consistência (CR) do julgamento dos especialistas é inferior a 0,1. Dessa forma, o julgamento é considerado consistente.

**Aplicação do método TOPSIS:** Após o cálculo dos pesos, a partir do método AHP, aplicou-se o método TOPSIS com o objetivo de realizar um *ranking* das alternativas com base nos critérios. A **Tabela 9** apresenta a matriz de decisão com 27 alternativas e 4 critérios.

**Tabela 9 - Matriz de decisão.**

Critérios					Critérios				
Alternativas	Disponibilidade	Custo/ano	Hh/ano	Material/ano	Alternativas	Disponibilidade	Custo/ano	Hh/ano	Material/ano
A1	0,9999998	17.800	308	28,0	A15	0,9999996	27.600	512	49,3
A2	0,9999998	15.200	248	22,0	A16	0,9999997	13.400	252	23,3
A3	0,9999997	25.600	488	46,0	A17	0,9999997	10.800	192	17,3
A4	0,9999998	21.000	348	32,0	A18	0,9999996	21.200	432	41,3
A5	0,9999998	18.400	288	26,0	A19	0,9999998	21.400	356	30,0
A6	0,9999996	28.800	528	50,0	A20	0,9999997	18.800	296	24,0
A7	0,9999997	14.600	268	24,0	A21	0,9999996	29.200	536	48,0
A8	0,9999997	12.000	208	18,0	A22	0,9999997	24.600	396	34,0
A9	0,9999996	22.400	448	42,0	A23	0,9999997	22.000	336	28,0
A10	0,9999998	16.600	292	27,3	A24	0,9999996	32.400	576	52,0
A11	0,9999998	14.000	232	21,3	A25	0,9999997	18.200	316	26,0
A12	0,9999996	24.400	472	45,3	A26	0,9999997	15.600	256	20,0
A13	0,9999997	19.800	332	31,3	A27	0,9999995	26.000	496	44,0
A14	0,9999997	17.200	272	25,3					

Fonte: Produzido pelos autores.

Em seguida, a Tabela 10 apresenta a matriz de decisão normalizada e ponderada, que foi calculada a partir da equação 13.

**Tabela 10 - Matriz normalizada e ponderada.**

Critérios					Critérios				
Alternativas	Disponibilidade	Custo/ano	Hh/ano	Material/ano	Alternativas	Disponibilidade	Custo/ano	Hh/ano	Material/ano
A1	0,1200	0,0172	0,0341	0,0086	A15	0,1200	0,0267	0,0568	0,0152
A2	0,1200	0,0147	0,0275	0,0068	A16	0,1200	0,0129	0,0279	0,0072
A3	0,1200	0,0247	0,0541	0,0142	A17	0,1200	0,0104	0,0213	0,0053
A4	0,1200	0,0203	0,0386	0,0098	A18	0,1200	0,0205	0,0479	0,0127
A5	0,1200	0,0178	0,0319	0,0080	A19	0,1200	0,0207	0,0395	0,0092
A6	0,1200	0,0278	0,0585	0,0154	A20	0,1200	0,0182	0,0328	0,0074
A7	0,1200	0,0141	0,0297	0,0074	A21	0,1200	0,0282	0,0594	0,0148
A8	0,1200	0,0116	0,0231	0,0055	A22	0,1200	0,0238	0,0439	0,0105
A9	0,1200	0,0216	0,0497	0,0129	A23	0,1200	0,0212	0,0373	0,0086
A10	0,1200	0,0160	0,0324	0,0084	A24	0,1200	0,0313	0,0639	0,0160
A11	0,1200	0,0135	0,0257	0,0066	A25	0,1200	0,0176	0,0350	0,0080
A12	0,1200	0,0236	0,0523	0,0140	A26	0,1200	0,0151	0,0284	0,0062

A13	0,1200	0,0191	0,0368	0,0096	A27	0,1200	0,0251	0,0550	0,0135
A14	0,1200	0,0166	0,0302	0,0078					

Fonte: Produzido pelos autores.

A terceira etapa do método consiste em calcular solução ideal positiva ( $A^+$ ) e da solução ideal negativa ( $A^-$ ), a partir das equações 14 e 15. A Tabela 11 apresenta o resultado desse cálculo.

**Tabela 11 - Solução ideal positiva e solução ideal negativa.**

	$A^+$	$A^-$
Disponibilidade	0,119970036	0,11997
Custo/ano	0,010429355	0,031288065
Hh/ano	0,021288307	0,06386492
Material/ano	0,005334742	0,016004227

Fonte: Produzido pelos autores.

A quarta etapa do método consiste em calcular a distância de cada alternativa em relação a  $A^+$  e  $A^-$ . Para isso, aplicou-se as equações 16 e 17 e a Tabela 12 apresenta o resultado.

**Tabela 12 - Distâncias euclidianas.**

Alternativas	D+	D-	Alternativas	D+	D-	Alternativas	D+	D-
A1	0,01490	0,03371	A10	0,01280	0,03580	A19	0,02123	0,02745
A2	0,00766	0,04103	A11	0,00554	0,04312	A20	0,01403	0,03479
A3	0,03687	0,01191	A12	0,03479	0,01403	A21	0,04312	0,00554
A4	0,02041	0,02825	A13	0,01830	0,03034	A22	0,02675	0,02204
A5	0,01320	0,03559	A14	0,01109	0,03767	A23	0,01956	0,02939
A6	0,04232	0,00639	A15	0,04024	0,00852	A24	0,04860	0,00000
A7	0,00942	0,03919	A16	0,00735	0,04129	A25	0,01572	0,03291
A8	0,00213	0,04650	A17	0,00000	0,04860	A26	0,00852	0,04024
A9	0,03145	0,01744	A18	0,02939	0,01956	A27	0,03767	0,01109

Fonte: Produzido pelos autores.

Por fim, calculou-se o coeficiente de aproximação ( $C_b$ ), a partir da equação 18, e realizou a ordenação das alternativas. A Tabela 13 apresenta esses resultados.

**Tabela 13 - Ordenação das alternativas.**

Ordem	Alternativas	$C_b$	Ordem	Alternativas	$C_b$	Ordem	Alternativas	$C_b$
1	A17	0,9999998	10	A5	0,7294201	19	A18	0,3996498
2	A8	0,9562238	11	A20	0,7126265	20	A9	0,3567520
3	A11	0,8860849	12	A1	0,6935295	21	A12	0,2873735
4	A16	0,8489569	13	A25	0,6767086	22	A3	0,2440940
5	A2	0,8426955	14	A13	0,6236960	23	A27	0,2274104
6	A26	0,8253340	15	A23	0,6003502	24	A15	0,1746660
7	A7	0,8062639	16	A4	0,5805709	25	A6	0,1311200
8	A14	0,7725896	17	A19	0,5639414	26	A21	0,1139151
9	A10	0,7366878	18	A22	0,4517343	27	A24	0,0000002

Fonte: Produzido pelos autores.

## 4. DISCUSSÃO

Pela ordenação obtida na combinação dos métodos AHP e TOPSIS, verifica-se que a alternativa vencedora é aquela onde as periodicidades de teste e calibração para os detectores do modelo 1, modelo 2 e modelo 3 são, respectivamente,  $T_{01} = 9 \text{ meses}$ ,  $T_{02} = 6 \text{ meses}$  e  $T_{03} = 3 \text{ meses}$ . Os testes e calibrações estavam sendo realizados a cada dois meses em todos os modelos de detector. O que conferia uma disponibilidade em estado estacionário de  $A(\infty) = 0,9999721$ . Na solução encontrada pelo algoritmo genético a disponibilidade fica em  $A(\infty) = 0,9999998$ . Para a solução obtida após a variação em torno da solução do algoritmo genético, usando AHP e TOPSIS, a disponibilidade ficou em  $A(\infty) = 0,9999997$ . Uma queda imperceptível na disponibilidade. Vale ressaltar que, para a ocorrência da falha múltipla, é necessário que haja vazamento de gás simultaneamente com a indisponibilidade de dois ou três sensores. O vazamento

de gás também tem uma probabilidade de ocorrer. Conforme [10], combinando-se a indisponibilidade dos detectores a probabilidade de vazamento de gás, chega-se a um valor muito pequeno de chance de falha múltipla. Este raciocínio aplica-se também a válvulas de segurança, por exemplo. Onde a falha da função protegida seria o correspondente ao vazamento de gás para o sistema de detectores de fogo e gás. Não foi encontrado em normas ou na literatura um limite aceitável seguro para a probabilidade de ocorrência de falha múltipla. O que pode ser objeto de pesquisas futuras.

A solução indicada pelos métodos AHP e TOPSIS, a partir da melhor solução encontrada pelo algoritmo genético, desonera consideravelmente os custos, a mão de obra e os demais recursos utilizados. A prática atual é testar e calibrar todos os três tipos de detectores bimestralmente. A Tabela 14 mostra a redução nos custos em relação à prática atual, mão de obra e demais recursos alterando as periodicidades de teste e calibração.

**Tabela 14 - Redução de custos, mão de obra e recursos variando as periodicidades de teste e calibração.**

Método	Periodicidades (meses)	Disponibilidade	Redução dos custos	Redução do Hh da mão de obra	Redução dos demais recursos
Atual	$T_{o1} = 2; T_{o2} = 2; T_{o3} = 2$	0,9999721	-	-	-
G.A.	$T_{o1} = 6; T_{o2} = 3; T_{o3} = 2$	0,9999998	37%	31%	22%
G.A./AHP/TOPSIS	$T_{o1} = 9; T_{o2} = 6; T_{o3} = 3$	0,9999997	62%	57%	52%

Fonte: Produzido pelos autores.

Utilizando os métodos multicritérios de apoio à decisão após a melhor solução encontrada pelo algoritmo genético proporcionou uma considerável flexibilidade no planejamento dos testes e calibrações. Nota-se que periodicidades mais alongadas poderiam proporcionar ainda mais desoneração para a manutenção e manter a disponibilidade em patamares ainda elevados. No entanto, entende-se que fazer inferências com tempos muito superiores a intervalos de 2, 4 ou 6 meses pode ser pouco representativo. A grande maioria dos dados coletados encaixam-se nestes intervalos de tempo. Uma saída poderia ser o uso de intervalo de confiança, o que se mostrou pouco efetivo do ponto de vista de custo-benefício. A extensão das periodicidades deve ser feita paulatinamente num ciclo PDCA (*plan, do, check, action*). Em outras palavras, trabalhando-se com ciclos mais espaçados de testes e calibrações, é possível conhecer o comportamento da perda de calibração dos itens em intervalos maiores de tempo, o que possibilita o ajuste das curvas de confiabilidade para periodicidades maiores. Esta abordagem é factível, uma vez que em três ou quatro campanhas de testes e calibrações vão gerar uma boa base de dados. Isto porque, tradicionalmente, numa planta de processo da mineração, siderurgia ou óleo e gás pode haver milhares de detectores de fogo e gás, válvulas de segurança e instrumentos de campo. Este avanço gradual na extensão das periodicidades de teste e calibração pode ser feito até se chegar em um *trade-off* entre a segurança, proporcionada pela disponibilidade, e os custos, mão de obra e demais recursos empregados.

## 5. CONCLUSÕES

Os resultados do trabalho reforçam a necessidade de registros de falhas, manutenções, testes e calibrações. Todo e qualquer estudo de confiabilidade que envolva análise de dados de vida dos ativos físicos é alimentado por estes dados. Esta qualidade nos dados perpassa mudança de cultura das equipes de manutenção e da liderança, treinamento e conscientização.

Outro ponto que se pode concluir é que o nível de conservadorismo de alguns fabricantes na determinação dos intervalos de teste e calibração dos detectores de fogo e gás, das válvulas de segurança e instrumentos de campo, é consideravelmente alto. As análises feitas mostraram a flexibilidade possível para alargar os ciclos de teste e calibração. Entretanto o limite para este alargamento está no perfil dos dados e na rotina de teste e calibração. À medida que o comportamento de falha, mais especificamente perda de calibração, vai sendo conhecido para intervalos cada vez maiores de tempo, o nível de confiança das inferências feitas aumenta. Após implementar as novas periodicidades de teste e calibração, os parâmetros de Weibull serão recalculados, pois espera-se um maior número de dados de falha e menor número de suspensões. Uma oportunidade de pesquisa nesta metodologia seria usar abordagem bayesiana na modelagem de confiabilidade. O que permitiria conhecer as distribuições de probabilidades para maiores intervalos de tempo conhecendo, *a priori*, as distribuições obtidas para menores intervalos de tempo.

Em termos da busca pela melhor solução utilizando algoritmos genéticos, dado a quantidade de variáveis a serem varridas e a complexidade do problema não ser grande, foram necessárias apenas 100 gerações para uma solução satisfatória. Uma possibilidade de avanço na metodologia proposta por este trabalho

seria adotar um modelo mais sofisticado para o cálculo dos custos, agregando a probabilidade de falha múltipla (indisponibilidade da proteção e falha da função protegida), e inserindo na função objetivo, transformando o problema de otimização em multiobjetivo. Possivelmente seria necessário utilizar de técnicas de normalização para trabalhar com disponibilidade e custos simultaneamente através do algoritmo genético.

Por fim, o grau de subjetividade interfere na definição dos pesos dos critérios no AHP. Mas esta subjetividade dá aos especialistas a liberdade de adequação à filosofia e política de segurança e manutenção da empresa. A aplicação de métodos multicritérios após os resultados do algoritmo genético deu à metodologia uma excelente flexibilidade para o planejamento dos testes e calibrações, sem comprometer a segurança das instalações guarnecidas e a disponibilidade da função de proteção.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] LEWIS, E.E.. **Introduction to Reliability Engineering**. 2<sup>nd</sup> ed. Evanston, Illinois: John Wiley & Sons Inc, 1994.
- [2] EBELING, C.E.. **An Introduction to Reliability and Maintainability Engineering**. 2<sup>nd</sup> ed. Long Grove, Illinois: Waveland Pres Inc, 1997.
- [3] MEYER, P. L. **Probabilidade: Aplicações à Estatística**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora, 1983.[4] Kapur, K.C. and L.R. Lamberson, *Reliability in Engineering Design*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1977.
- [5] KABACOFF, R. I. **R in Action: Data analysis and graphics with R**. 2<sup>nd</sup> ed. Shelter Island, NY: Manning Publications Co, 2015.
- [6] DAMASO, V. C.; GARCIA P. A. A.. **Testing and preventive maintenance scheduling Optimization for aging systems modeled by generalized Renewal process**. *Pesquisa Operacional*, v. 29, n. 3, p. 563-576. 2009.
- [7] LONGHI, A. E. B.; PESSOA, A.A.; GARCIA P. A. A.. **Multiobjective optimization of strategies for operation and testing of low-demand safety instrumented systems using a genetic algorithm and fault trees**. *Reliability Engineering and System Safety*, 142, 525-538. Elsevier, 2015.
- [8] GARCIA, P. A. A.; FRUTUOSO E MELO, P. F. F.; SANT'ANA, M.C.; DAMASO, V. C. **Multiobjective optimization of test policies for GRP-modeled aging systems**. *European Safety and Reliability Conference*, 2009, Praga. *European Safety and Reliability*. London: CRC Press, 2009.
- [9] CHAREONSUK, C.; NAGARUR, N; TABUCANON, M. T.. **A multicriteria approach to the selection of preventive maintenance intervals**. *International Journal of Production Economics*, v. 49, p. 55-64. Elsevier, 1997.
- [10] MOUBRAY, J.. **Reliability Centered Maintenance – RCM II**. United Kingdom: Aladon Ltd, 1997. Second edition.
- [11] SCRULLA, Luca. **GA: A Package for Genetic Algorithms in R**. *Journal of Statistical Software*, ed. 53 (4), p. 1-37. 2013. Disponível em: <https://www.jstatsoft.org/v53/i04/>
- [12] WANG, N.; HU, J.; MA, L.; XIAO, B.; LIAO, H.. **Availability Analysis and Preventive Maintenance Planning for Systems with General Time Distributions**. *Reliability Engineering and System Safety* 201. Elsevier, 2020.
- [13] SHARIFI, M.; TAGHIPOUR, S.. **Optimal inspection interval for a k-out-of-n system with non-identical componentes**. *Journal of Manufacturing Systems*, v. 55, p. 233-247. Elsevier, 2020.



- [14] BONA, G. D. FALCONE, D., FORCINA, A. AHP-TOPSIS model to evaluate maintenance strategy using RAMS and production parameters. **International Journal of Operations and Quantitative Management**, v. 25, n.3, p. 175-201, 2019.
- [15] BULUT, M.; ÖZCAN, E. A new approach to determine maintenance periods of the most critical hydroelectric power plant equipment. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 205, p. 107238, jan. 2021.
- [16] CAMPOS, P. C. DE O. et al. Multi-Criteria Decision Method for Sustainable Watercourse Management in Urban Areas. **Sustainability**, v. 12, n. 16, p. 6493, 12 ago. 2020.
- [17] GUNER, G. G.; SAKAR, C. T.; YET, B. A Multicriteria Method to Form Optional Preventive Maintenance Plans: A Case Study of a Large Fleet of Vehicles. **IEEE Transactions on Engineering Management**, p. 1–12, 2021.
- [18] HWANG, C.-L.; YOON, K. Methods for Multiple Attribute Decision Making. **Springer**, p. 58–191, 1981.
- [19] PAZ, T. DA S. R. et al. Assessment of sustainable development through a multi-criteria approach: Application in brazilian municipalities. **Journal of Environmental Management**, v. 282, p. 111954, mar. 2021.
- [20] SAATY, T L. The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation. New York, NY: McGraw-Hill, 1980.