
AHP E ANP COMBINADOS COM MÉTODO DE OTIMIZAÇÃO RESTRITA NA TOMADA DE DECISÃO MULTICRITÉRIO PARA MANUTENÇÃO PREVENTIVA

Lucas de Souza Kort Camp (Universidade Federal Fluminense) E-mail: lucas.kort@outlook.com

Cecília Toledo Hernandez (Universidade Federal Fluminense) E-mail: ctoledo@id.uff.br

Resumo: O presente trabalho propõe a aplicação de metodologia combinada, *Analytic Hierarchy Process* (AHP) e *Analytic Network Process* (ANP) com o método de otimização *Particle Swarm* (PSO) a partir da modelagem de alternativas em funções multiobjetivo, balanceadas por peso de critérios relativos, para otimização do intervalo entre manutenções preventivas (MP), considerando prioridades a confiabilidade, custo e disponibilidade. O texto revisa a teoria de metodologias de tomada de decisão, estrutura do PSO e principais parâmetros da manutenção industrial. Propõem-se então uma função objetiva a ser minimizada e finalmente apresenta os resultados de forma comentada. Os resultados encontrados mostram que o uso do método combinado é uma boa ferramenta e sua aplicação é validada pelos resultados e facilidade de obtenção. Na conclusão são feitas as devidas ponderações.

Palavras chaves: *Analytic Hierarchy Process*, *Analytic Network Process*, Otimização, Funções multiobjetivo, Manutenção preventiva.

AHP AND ANP COMBINED WITH CONSTRAINED OPTIMIZATION METHOD ON MULTICRITERIA DECISION-MAKING FOR PREVENTIVE MAINTENANCE

Abstract: The present work proposes the application of a combined methodology, *Analytic Hierarchy Process* (AHP) and *Analytic Network Process* (ANP) with the *Particle Swarm* (PSO) optimization method from the modeling of alternatives in multiobjective functions, balanced by the weight of relative criteria, to optimize the interval between preventive maintenance (PM), considering reliability, cost and availability priorities. The text reviews the theory of decision-making methodologies, PSO structure, and the main parameters of industrial maintenance.

An objective function is proposed to be minimized, and finally, the results are presents in a commented form. The results show that the combined method is a good tool. Its application is endorsed by the results and simple implementation. At the conclusion, due considerations are made.

Keywords: *Analytic Hierarchy Process*, *Analytic Network Process*, Optimization, Multitarget function, Preventive maintenance.

1. Introdução

Componentes de muitos sistemas degradam com o tempo e eventualmente resultam em falha do sistema (CANFIELD, 1986). Programas de manutenção são usados para tornar esse processo mais lento e evitar custosas paradas não programadas.

Tradicionalmente, modelos de intervenções de MP envolvem minimização do custo total de operação, mas há outros objetivos além de econômicos que podem influenciar os planos de MP (GHOSH, ROY, 2009). Em muitos casos, diversos critérios de importância são levantados por engenheiros e técnicos, com diversas alternativas.

O objetivo desse trabalho é testar a combinação de AHP (item 2.2) e ANP (item 2.3) com método de otimização PSO (item 2.1), de forma a auxiliar na escolha ótima, em um cenário genérico, de um plano de MP que combine os diferentes interesses e prioridades da gerência/equipe de manutenção de forma simulada (item 5).

O modelo proposto constitui de uma única função objetivo (item 3), que combina diversos termos referentes a parâmetros de MP importantes e simulados aqui. Esses termos são balanceados por hiper parâmetros, obtidos por meio dos pesos relativos de critérios, gerados pelo AHP e ANP. A função resultante é minimizada com a escolha do melhor intervalo entre intervenções de manutenção, que apresente o menor resultado para a combinação de parâmetros. Como esses intervalos entre manutenção são constantes (Figura 3), encontra-se, por consequência, o desejável plano de manutenção.

O processo de busca por esse intervalo é feito por meio do método PSO, com diversa combinação de parâmetro de configuração. O melhor resultado é exposto e comentado no item 5.

Com os resultados, testa-se a aplicabilidade, a robustez e assertividade da proposta, por meio da comparação dos resultados encontrados.

As avaliações de critérios utilizadas foram todas extraídas da literatura e/ou gerados de forma sintética. As análises de critério por meio do AHP e ANP foram todas executadas no *software* SuperDecisions. As avaliações por meio dos métodos otimização foram executadas na plataforma Opp, desenvolvida pelo autor. Os valores e custos apresentados não representam valores reais e são usados apenas para demonstração da metodologia. Os tempos de falha foram retirados da literatura e não representam um cenário real (Anexo I).

2. Revisão bibliográfica

2.1. Particle Swarm Optimization (PSO)

O PSO é um método de otimização baseado em vida artificial e na teoria do enxame. Estruturado na técnica de Computacional Evolutiva, explora uma quantidade de possíveis soluções meio por iteração, o chamado população.

De fácil implementação e de baixo custo computacional, o PSO não exige grandes quantidades de memória e velocidade de CPU (ELBERHART, R. & KENNEDY, J, 1995).

Surgiu a partir de estudos dos seus idealizadores do movimento de um rebanho de indivíduos (pássaros, peixes etc.) e do esforço individual para manter uma distância ótima entre os indivíduos vizinhos (ELBERHART, R. & KENNEDY, J, 1995).

O percurso do PSO foi uma simulação do comportamento social, que era usada para visualizar o movimento de um rebanho de pássaros. Diversas versões do modelo de simulação foram desenvolvidas, incorporando conceitos como vizinho mais próximo, velocidade e aceleração por distância (ELBERHART ET AL., 1996; KENNEDY, EBERHART, 1995), até que foi percebido a possibilidade de usar a simulação como otimizador. Diversos parâmetros foram omitidos surgindo a primeira versão do PSO (ELBERHART ET AL., 1996).

O algoritmo é inicializado com uma população de candidatos a solução aleatória. Cada indivíduo, denominado aqui de partícula, é ligado a uma velocidade com termos aleatórios $rand = \{0,1\}$.

$$v_j^k = wv_j^{k-1} + rand[0,1]c_1(\check{x}_j - x_j^{k-1}) + rand[0,1]c_2(\hat{x}^k - x_j^{k-1}) \quad (1)$$

E a cada iteração, desloca-se sobre o espaço do problema, conforme:

$$x_j^k = \hat{x}_j^{k-1} + v_j^k \quad (2)$$

onde \check{x}_j é a posição do melhor valor obtido para aquela partícula específica e \hat{x}^k é o melhor valor obtido ao longo de toda a execução. Os parâmetros w , c_1 e c_2 são constantes e fornecidos ao método.

É importante notar a influência que a configuração dos parâmetros representa à performance do método, definida por Trelea (2002) como uma escolha entre testar várias regiões com o objetivo de encontrar um bom ótimo ou concentrar a busca na região de um candidato promissor. Essas escolhas que alteram a capacidade em encontrar um ótimo global, mas que, apesar de estudos recentes, permanecem empíricas (TRELEA, I., 2002) e baseadas na experiência e prática (IZMAILOV, A. & SOLODOV, M., 2007).

2.2. AHP

O AHP é um modelo de tomada de decisão multiatributo, proposto por Saaty (1980), muito utilizado em tomadas de decisões que envolvam eventos de incerteza e vários critérios de avaliação (SCHOLL ET AL, 2005).

O processo de avaliação do AHP pode ser dividido em 4 passos (WANG AT. AL, 2010).

Estrutura hierárquica: Define-se todas as alternativas e critérios, estabelece a estrutura hierárquica de tomada de decisão baseada em objetivos. O AHP é dividido em 3 níveis: (i) Objetivo, critérios e alternativas, podendo também ter mais níveis. O mecanismo de prioridades é dado pelo uso de alguma escala de comparação. Nesse trabalho foi usada a escala Fundamental de Saaty (1980). A Tabela 1 mostra a intensidade de importância, acompanhada de uma pequena descrição de cada uma delas.

Tabela 1 – Escala Fundamental de Saaty

Intensidade de importância	Explicação
1	Contribui igualmente ao objetivo
3	Favorece levemente um sobre o outro
5	Favorece fortemente um sobre o outro
7	Critério é fortemente favorecido e sua dominância é prática
9	Importância de um sobre outro no mais alto nível
2,4,6,8	Níveis intermediários

Fonte: Saaty, 1980.

Matriz de comparação par-a-par: Seja a matriz A:

$$A = [a_{ij}] = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Onde:

$$a_{ij} = \frac{w_i}{w_j}, a_{ji} = \frac{1}{a_{ij}}, i, j = 1, 2, 3, \dots, n \quad (4)$$

Logo:

$$A = [a_{ij}] = \begin{bmatrix} W_1/W_1 & W_1/W_2 & \dots & W_1/W_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ W_n/W_1 & W_n/W_2 & \dots & W_n/W_n \end{bmatrix} \quad (5)$$

Onde W_i é o peso do i -ésimo critério, W_j é o peso do j -ésimo critério

Taxa de consistência: Do inglês, *consistency ratio* (CR), definido por:

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (6)$$

Onde:

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (7)$$

E ainda:

$$\lambda_{max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{[AW]_i}{w_i} \quad (8)$$

E RI , do inglês, *Radom index* é um valor tabelado, conforme ordem da matriz A . A Figura 1 contém os valores de RI para algumas ordens de matriz.

Level	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
RI	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51	1.53	1.56	1.57	1.59

Figura 1 - RI conforme ordem (Level) da matriz

Cálculo do peso relativo do critério: Calcular o autovetor de cada critério e obter os pesos relativos por meio de:

$$IW_i = \frac{\sum_{j=1}^J PW_{ij}}{J}, i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (9)$$

Onde PW_{ij} , o vetor parcial de critério, é definido por:

$$PW_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^I a_{ij}}, i, j = 1, 2, 3 \dots, n \quad (10)$$

2.3. ANP

AHP e ANP são métodos de medir fatores intangíveis por meio de comparações par-a-par com julgamentos que representam dominância de um elemento sobre outro com respeito a uma propriedade que eles compartilham. O método ANP é uma generalização do AHP, permitindo iterações complexas entre níveis de decisão e atributos (YÜKSEL E DAGDERIREN, 2007). A Figura 2 ilustra a diferença em relação entre critérios de cada metodologia.

O ANP consiste em 4 passos (Saaty, 1996).

Construção do modelo e estrutura do problema: O problema deve ser expresso de forma clara e decomposto em um sistema de redes racional

Comparação para-a-par e vetor prioridades: Como no AHP, no ANP, pares de elementos de decisão a cada grupo são comparados com respeito a sua importância sobre o critério de controle. Em adição, é preciso comparar interdependência entre critérios. A influência de cada elemento sobre outro pode ser representada por autovetores. Como no AHP também, os valores de importância relativa são dados pela escala Fundamental de Saaty (Tabela 1).

Formação da “supermatriz”: Para obter as prioridades globais em um sistema com influências independentes, o vetor de prioridades locais é inserido nas colunas apropriadas da matriz.

Síntese das prioridades dos critérios e alternativas e seleção das melhores alternativas: A normalização da “supermatriz” fornece os pesos das prioridades de critério e alternativa.

A Figura 2 a) ilustra a estrutura do método AHP e a Figura 2 b) ilustra a estrutura do método ANP.

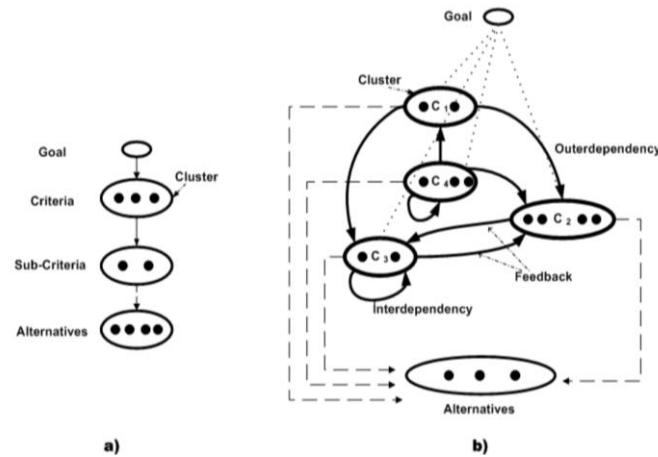


Figura 2 - Diferenças de estrutura entre AHP(a) e ANP(b)

Destaca-se a influência entre elementos de um mesmo nível, possível apenas no método ANP.

2.4. Confiabilidade

A função de confiabilidade (11) informa a probabilidade de a unidade apresentar sucesso na operação no intervalo de tempo $(0, t)$ e ainda estar funcionando no tempo t . Essa função é definida como probabilidade acumulada de sucesso (FOGLIATTO, 2011).

Considerando que um sistema que não falhou para $T \leq t$ falhará em algum T , a função de confiabilidade pode ser expressa por (LEWIS,1994):

$$R(t) = 1 - F(t) \tag{11}$$

Onde $F(t)$ é dado por:

$$F(t) = \int_0^t f(u)du, t > 0 \tag{12}$$

E $f(t)$ é a função densidade da variável t , definida de forma experimentalmente pela curva de ajuste Weibull, uma modelo de falha mais genérico e amplamente usado para análises de vida de equipamentos (HERBARTY, 1990). A taxa de falha (13) e confiabilidade (14) para a distribuição Weibull, são, respectivamente (GHOSH, ROY, 2009):

$$\lambda(t) = \frac{\gamma}{\theta} \left(\frac{t}{\theta}\right)^{\gamma-1} \tag{13}$$

$$R(t) = \exp \left[- \left(\frac{t}{\theta}\right)^\gamma \right] \tag{14}$$

Onde β é o parâmetro de forma e η é a característica da vida do equipamento. Ambos são estimados a partir de dados de campo de tempos até falha. Segundo Abernethy (1993), a grande vantagem de usar Weibull é sua capacidade de fornecer grande exatidão em análises de falha e previsão de riscos, mesmo que com poucos dados experimentais.

Há uma variedade de situações em que o explícito tratamento de falhas precoces ou efeitos da idade ou ambos, requerem o uso de taxa de falha dependentes do tempo. Isso é feito ao considerar a influência de que um tempo de operação acumulado T_0 na probabilidade que um dispositivo possa sobreviver por um tempo adicional t .

Seja $R(t|T_0)$ a confiabilidade de um dispositivo que tenha operado por um tempo T_0 .

$$R(t|T_0) = \frac{R(t+T_0)}{R(T_0)} \tag{15}$$

2.5. Disponibilidade de um equipamento

Disponibilidade é a capacidade de um item desempenhar seu propósito de forma adequada em um determinado instante de tempo ou período predeterminado. Em equipamentos não reparáveis, disponibilidade é equivalente a confiabilidade. Nos equipamentos reparáveis, os possíveis estados são funcionando ou em manutenção (LEWIS, 1994). A disponibilidade é definida por:

$$A = \frac{MTTF}{MTTF+MTTR} \tag{16}$$

Onde A (*availability*) denota disponibilidade média, MTTF (*Mean time to failure*) é o tempo médio entre falhas e MTTR (*Mean time to repair*) é o tempo médio para reparo.

2.6. Custo de produção com e sem MP

O modelo de custo de operação utilizado nesse trabalho é uma adaptação do extraído da obra de Ghosh e Roy (2009). Esse último modelo é uma extensão do trabalho realizado por Lapa et al. (2005), o qual é uma generalização do proposto por Lewis (1996) em seu livro.

Seja C_m o custo de uma ocorrência de MP, C_r um reparo não programado e C_{inc} o custo por paralização e outras perdas financeiras devido quebra da unidade produtiva, o custo total de operação durante um intervalo de tempo, desde o início da operação até e o momento de sua primeira intervenção de manutenção $T_m(1)$, é definido por:

$$C_t^{0 \rightarrow 1} = C_m^{0 \rightarrow 1} R[T_m(1)] + (C_r^{0 \rightarrow 1} + C_{inc}) [1 - R[T_m(1)]] \tag{17}$$

Considerando a equação (15), o custo de operação entre a primeira e segunda intervenção de manutenção é definido por:

$$C_t^{1 \rightarrow 2} = C_m^{1 \rightarrow 2} \left[\frac{R[T_m(2)]}{R[T_m(1)]} \right] + (C_r^{1 \rightarrow 2} + C_{inc}) \left[1 - \frac{R[T_m(2)]}{R[T_m(1)]} \right] \tag{18}$$

Assumindo N como o número total de intervenções de manutenção durante o tempo de serviço T_{ser} , tem-se:

$$C(T) = \sum_{j=1}^N \left[C_m \frac{R(jT)}{R[(j-1)T]} \right] + (C_r + C_{inc}) \left[1 - \frac{R(jT)}{R[(j-1)T]} \right] \tag{19}$$

Onde o intervalo T é dado por:

$$T = \frac{T_{ser}}{N} \tag{20}$$

Nesse trabalho será considerada a simplificação de que a unidade volta a operar em estado “Tão bom quanto novo” (*As good as new*) após cada ocorrência de manutenção e que estas são sempre perfeitas. Também não será considerado quaisquer mudanças em custos de intervenção ou acidente. Logo:

$$C_T = \frac{T_{ser}}{T} \{ C_m R(T) + (C_r + C_{inc}) [1 - R(t)] \} \tag{21}$$

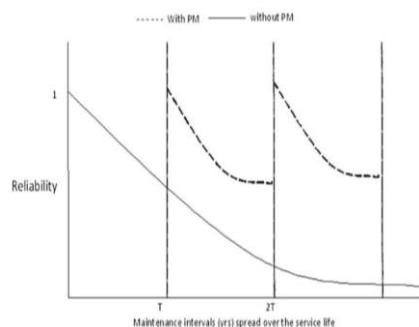


Figura 3 - Confiabilidade vs. Tempo com e sem MP

3. Modelo matemático ótimo para problemas de tempo entre manutenção

Esse estudo trabalhou com estrutura de um único plano de manutenção, com múltiplas alternativas de intervalos entre manutenção, de número de mecânicos e presença ou não de especialistas. O modelo matemático consiste em otimizar a função objetiva (22), de acordo com os hiper parâmetros $w_i, i = 1,2,3$ obtidos pelos métodos AHP e ANP.

$$y = -\eta(t).w_1 - \phi(t).w_2 + \delta(t).w_3 \quad (22)$$

Sendo $\eta(t)$ o termo referente a confiabilidade (14), $\phi(t)$ o termo referente a disponibilidade (16) e $\delta(t)$ o termo referente a custo total de operação (21), normalizados por:

$$w_i = \sum_{j=1}^n \left(\frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}} / n \right) \quad (23)$$

4. Procedimentos para a solução do problema melhor intervalo entre manutenção

Os procedimentos adotados para a resolução do problema seguiram a sequência.

- a) Simulação do levantamento de critério relevantes pela gerência de manutenção de acordo com os objetivos e políticas em vigor.
- b) Cálculo dos pesos de cada critério por AHP e ANP.
- c) Conversão de critérios de diferentes unidades para valores comparáveis por meio de (23). Os dados são armazenados em um banco de dados a ser consultado pelo algoritmo de acordo com o index de cada alternativa.
- d) Otimização da função custo (21) limitada a confiabilidade (15) mínima de 95%. Apenas a equação referente a custo, arramada e limitada pela equação confiabilidade.
- e) Introdução do método de otimização PSO para solução da função objetiva (22). Entrada dos limites do espaço de busca seguindo, $1 \leq x_1 \leq 6 | x_1 \in \mathbb{N}$ representando os índices dos 6 planos, $1 \leq x_2 \leq 4 | x_2 \in \mathbb{N}$ representando os índices das possíveis quantidade de mecânicos (2 a 5) e $x_3 \{1 \text{ para sim}, 0 \text{ para não}$ representando a presença ou não de especialista.
- f) Obtenção do intervalo entre ocorrências de manutenção ideal, considerando apenas a função custo e posteriormente considerando os critérios e prioridades levantados, por meio de teste da função objetiva para cada alternativa.

5. Casos e análises

Esse estudou considerou três casos, todos tendo como meta o intervalo entre manutenção ótimo, considerando uma política de manutenção em que a confiabilidade mínima aceitável é de 95%. No primeiro caso (i), apenas equação de custo total foi otimizada. A Tabela 2 contém os parâmetros de configuração do método PSO utilizado para todos os casos.

Os demais estudos objetivaram também o melhor intervalo entre manutenções restrito a no mínimo 95% de confiabilidade, mas consideraram na função objetiva também, os critérios disponibilidade e confiabilidade, usando pesos relativos para equilibrar os termos. Ambos tiveram as mesmas alternativas: 6 planos com 7 dias entre eles, começando pelo semanal. Cada uma desses planos possui dois subníveis, sendo o primeiro quanto ao número de mecânicos: 2, 3, 4 ou 5 e um nível inferior, a presença ou não de um especialista. Nesses subníveis, cada mecânico adicional acrescenta 10% ao custo inicial de manutenção, mas reduz em 20% o tempo inicial de reparo. A presença do especialista adiciona 5% ao custo de manutenção acumulado, mas reduz em 10% o tempo de reparo acumulado. Foram analisados cenários com 2 a 5 mecânicos, com e sem especialista. Destaca-se a diferença de bonificação entre mecânico adicional e especialista. A Figura 4 ilustra esquematicamente e de forma simplificada árvore de decisão e a relação entre critérios, alternativas e subníveis de alternativas.

Cada caso usou diferentes avaliações para os pesos relativo de critérios, sendo o caso (ii) considerado pesos relativos obtidos pela metodologia AHP e caso (iii), pesos relativos obtidos pela metodologia ANP. Ambos os pesos relativos estão na Tabela 3. O Anexo II contém todos as avaliações de critérios. Os parâmetros de custos considerados e distribuição Weibull são apresentados na Tabela 4 e Tabela 5 respectivamente.

Tabela 2 – Parâmetros do PSO

Número de iterações	100
Tolerância	1e-20
Limite de busca (i)	[1,1100]
Limites de busca (ii) e (iii)	[1,6], [1,4], [1,2]
PSO $w; c_1; c_2$	0,5;2,05;2,05
Número de partículas	100

Os parâmetros de configuração do PSO foram encontrados após extensa tentativa e erro. Com esses parâmetros, o método demonstrou boa capacidade de resolver o problema, de forma rápida e principalmente, genérica. O limite de busca do caso (i) se refere ao número de horas, os limites de buscas dos casos (ii) e (iii) se referem as 6 opções de planos, as 4 opções de quantidade de mecânicos e a presença ou não de especialista.

Tabela 3 – Pesos relativos

Metodologia	Confiabilidade	Disponibilidade	Custo de operação	Inconsistência
AHP	0,08898	0,32339	0,58763	0,00885
ANP	0,46961	0,35359	0,17680	0,00885

Os pesos para os métodos AHP e ANP foram obtidos por meio do software SuperDecisions. As avaliações são fictícias, usadas apenas para construção do problema.

Tabela 4 – Parâmetros de custo

Parâmetro	Descrição	Valor
C_{inc}	Custo por incidente	R\$ 10.000
C_m	Custo por reparo programado	R\$ 1.000
C_r	Custo por reparo não programado	R\$ 2.500
T_{ser}	Tempo total de serviço esperado	10 anos (87600 horas)

Os parâmetros de custo mostrados anteriormente são fictícios e são usados apenas para construção do problema.

Tabela 5 – Parâmetros Weibull

γ	θ
----------	----------

Onde γ é denominado parâmetro de forma e θ parâmetro de escala. Ambos foram ajustados pela curva de máxima semelhança por meio do software ProConf.

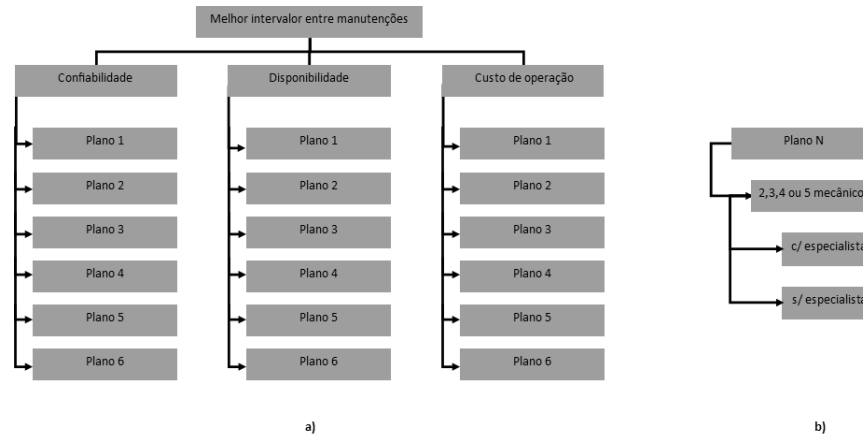


Figura 4 - Árvore de decisões

Na Figura 4 a) está ilustrado a árvore de decisões para os critérios e planos. A Figura 4 b) expande as opções secundárias de cada um dos 6 planos.

As otimizações foram executadas no aplicativo Opp versão RC 0.1, desenvolvido pelo autor, em ambiente Windows® 10 Pro, processador Intel® Core™ i7-1065G7, com memória RAM e armazenamento suficiente.

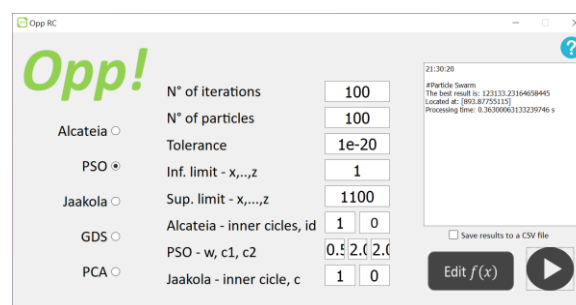


Figura 5 - Ferramenta Opp com os dados do primeiro caso

6. Resultados

No primeiro caso estudado, a otimização da equação custo total (19), o método PSO foi executado 5 vezes, não divergindo o valor final em nenhuma delas. O tempo de execução médio foi de 1,2576s. Nos casos (ii) e (iii), otimização da função (22) para AHP e ANP respectivamente, o método PSO foi executado 10 vezes, não divergindo o valor final em nenhuma delas. O tempo de execução médio foi de 1,2402s e 1,2476s. Não houve diferença prática entre o tempo de execução entre os estudos, apesar da maior complexidade da função objetiva desses últimos. Isso se deve principalmente porque esses dados já tinham sido calculados anteriormente e o PSO apenas buscou a combinação de *indexes* que apresentasse melhor resultado. A Figura 5 ilustra os gráficos de melhor valor para cada uma das 100 iterações na primeira execução de cada um dos casos. A Tabela 6 contém os resultados encontrados.

Os resultados expostos na Tabela 6 mostram uma grande semelhança entre os resultados. O caso (i), que apenas considera o custo total de produção, mas estando este amarrado a

confiabilidade dos equipamentos, tem como resultado o tempo entre manutenção ótimo para menor custo. Esse resultado não avalia por exemplo capacidade e aplicabilidade do resultado.

Tabela 6 – Resultados

N	Resultado	Intervalo	Confiabilidade	Disponibilidade	Custo
(i)	123133,2316,	893,8775h	97,6573%	97,3873%	R\$ 123133,2316
(ii)	-0,0239, Plano 5 2 mecânicos	840 h	98,2569%	97,2222%	R\$ 124847,2026
(iii)	-0,0785, Plano 4, 2 mecânicos	672h	99,4000%	96,5517%	R\$138970,2003

Os resultados expostos na Tabela 6 mostram uma grande semelhança entre os resultados. O caso (i), que apenas considera o custo total de produção, mas estando este amarrado a confiabilidade dos equipamentos, tem como resultado o tempo entre manutenção ótimo para menor custo. Esse resultado não avalia por exemplo capacidade e aplicabilidade do resultado.

O caso (ii) e (iii) simulam diversos planos possíveis para uma planta simulada. Pode-se ver no caso (ii) a grande proximidade do intervalo e custo ótimo. De fato, não há a opção encontra por (i), 893h, entre os planos, sendo o encontrado pelo método o mais próximo. Os planos imediatamente anterior e posterior são 672h e 1008h. O resultado apresentado é o menor custo entre os planos disponíveis. Nesse caso, considera-se a disponibilidade de planos adequada e o uso do algoritmo PSO para a solução eficiente, mas com ressalvas.

O caso (iii) apresentou um resultado mais afastado do ótimo, 672h, sendo o terceiro menor custo total entre os planos, mas terceira maior confiabilidade, maior que o resultado do caso (ii) Atribui-se a essa diferença aos pesos relativos resultantes do método ANP. Definiu-se uma interferência da confiabilidade ao custo e a disponibilidade, resultado em um aumento do peso relativo desta. Isso fez com que a função objetiva invertesse o efeito em minimizar confiabilidade e custo entre o AHP e ANP (Tabela 3), fato que demonstra a importância do cuidado ao definir a interação entre critérios no método ANP. O peso da disponibilidade permaneceu muito próximo entre as duas metodologias.

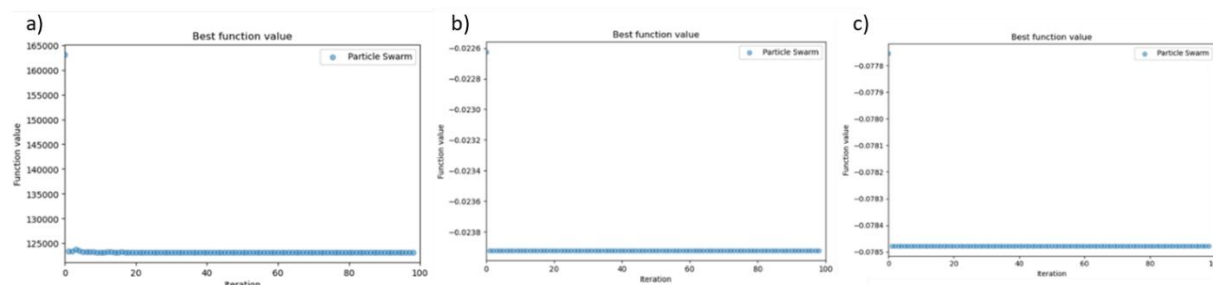


Figura 4 - Gráfico melhor valor por iteração a) caso (i), b) caso (ii), c) caso (iii)

Deve-se destacar que apenas do método PSO ter sido configurado com 100 iterações para cada um dos casos, essa quantidade de iterações não se mostrou necessária. Em todos os casos analisados, o mínimo foi obtido nas primeiras 20 iterações, no caso (i) e nas primeiras iterações, nos casos (ii) e (iii), sem qualquer oscilação. Isso se deve principalmente ao grande número de partículas, 100.

7. Conclusão

Políticas eficientes de manutenção são fundamentais em processos de engenharia de sistemas devido ao impacto em segurança e custo operacional da planta industrial. Esse trabalho apresenta um modelo de custo de operação baseado em um modelo de tomada de decisão multicritério e com restrição, em extensão à obra de Ghosh, 2008.

Uma extensa pesquisa de artigos públicos não revelou grande disponibilidade de trabalhos na área. O estudo segue as linhas apresentadas na obra Wang et. al., 2010, completando e fazendo as mudanças julgas necessárias. Em principal, a validação da função objetiva a cada iteração, sendo usado a busca por *index* nessa obra, em detrimento de multiplicações matriciais. Essa mudança pode em parte, ser a maior contribuição para velocidade de execução. No entanto, os autores não consideram o custo computacional prioridade, devido aos avanços na computação. Os autores veem como prioridade elaborar modelos mais exatos, com elevado número de considerações e a facilidade de aplicação no dia a dia industrial.

O modelo aqui estudo, de acordo com os resultados encontrados, pode ser considerado com uma excelente ferramenta em estudos de tomada de decisão, desde que ressalvas sejam levantadas. Devido ao código necessário para modelar o estudo, não se justifica a utilização para estudos simples, sem subníveis de alternativas. No entanto, para situações e em que as alternativas têm várias opções, a modelagem construída pode ser escalada para qualquer quantidade de critérios, alternativas e subníveis, sem adições complexas ao modelo, mas apenas ajustes aos limites de busca. Essas vantagens também se restringem a critérios quantitativos, pois esses são automaticamente calculados e expandidos com o acréscimo de alternativas e critérios.

Destaca-se também a atenção necessária ao definir as relações entre critérios no método ANP. Apenas uma interferência entre critérios alterou consideravelmente os pesos relativos, invertendo os hiper parâmetros de otimização e acarretando a indicação de uma outra alternativa.

Feitas as devidas considerações, foi possível testar grande quantidade de alternativas, fazer ajustes e mudanças no banco de dados sem mudanças ao modelo. Os resultados encontrados apresentam uma boa sugestão de tomada de decisão, de acordo com os critérios previamente definido. Um outro destaque ao modelo é a possibilidade de reutilização para outros métodos e/ ou dos pesos de prioridade sem nenhuma alteração da estrutura do estudo.

Referências

- CANFIELD, R. V. *Cost optimization of Periodic Preventive Maintenance*. IEEE Transaction on Reliability. V 35, N 1, 1986.
- EBERHART, R., & KENNEDY, J. *A new optimizer using particle swarm theory*. MHS'95. Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science, 1995.
- EBERHART RC, SIMPSON P AND DOBBINS R. *Computational Intelligence PC Tools*. Academic Press, 1996.
- GHOSH, D., ROY, S. *Maintenance optimization using probabilistic cost-benefit analysis*. Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 22. 403-407, 2009.
- HERBATY, F. *Handbook of maintenance management: Cost effective practices*. NJ, USA: Noyes Publications, 1990.
- IZMAILOV, A., SOLODOV, M. *Otimização – Volume 2: Métodos Computacionais*. IMPA, Rio de Janeiro, 2007.
- LEWIS, E.E. *Introduction to Reliability Engineering*. 7.ed. Illinois: John Wiley & Sons, Inc., 1994.
- SAATY, T. L. *The analytic hierarchy process*. New York: McGraw-Hill, 1980.

SCHOLL, A., MANTHEY, L., HELM R., STEINNER, M. *Solving multi-attribute design problems with analytic hierarchy process and conjoint analysis: an empirical comparison*. European Journal of Operational Research, 164, 760-777, 2005.

SRDJEVIC, B. *Combining different prioritization methods in the analytic hierarchy process synthesis*. Computer & Operations Research, 32, 1897-1919, 2005.

TRELEA, I. C. *The particle swarm optimization algorithm: convergence analysis and parameter selection*. Information Processing Letters, 85(6), 317-325, 2003.

WANG, H., CHE, Z., WU, C. *Using analytic hierarchy process and particle swarm optimization algorithm for evaluating product plans*. Expert Systems with Application, 37, 1023-1034, 2010.

YÜKSEL, İ. AND DAĞDEVİREN, M. *Using the analytic network process (ANP) in a SWOT analysis-A case study for a textile firm*. Information Sciences, Vol. 177, No. 16, pp. 3364-3382, 2007

Anexo I

Número	TTF	16	2082.2	32	1449.85	48	2178.8
1	2093.73	17	2227.16	33	1927.47	49	1621.76
2	1586.86	18	2623.12	34	1458.53	50	2137
3	1660.66	19	1224.26	35	1678.58	51	1650.41
4	1959.33	20	1111.02	36	1506.32	52	1959.75
5	1557.93	21	1807.67	37	2061.72	53	1864.64
6	1552.57	22	2130.05	38	1278.63	54	1862.77
7	2013.06	23	1955.87	39	2073.95	55	1863.14
8	2070.35	24	1357.26	40	2613.85	56	1195.07
9	1584.58	25	979.7	41	1661.88	57	1600.37
10	2090.08	26	1585.45	42	1567.25	58	1978.28
11	1929.57	27	1734.27	43	1948.5	59	1743.18
12	1945.58	28	2206.83	44	2581.43	60	1430.12
13	1586.42	29	2217.96	45	1672.48		
14	2704.66	30	2346.96	46	838.493		
15	1910.13	31	1055.01	47	1232.82		

Anexo II

Caso (ii) – AHP

Matriz de comparação paritária

	C	R	A
C	1	2	6
R	1/2	1	4
A	1/6	1/4	1

Caso (iii) - ANP

Matriz de comparação paritária

	C	R	A
C	1	2	6
R	1/2	1	4
A	1/6	1/4	1

Matriz de julgamentos

	C	R	A
C	0	1	0
R	0	0	1
A	0	1	0

Matriz de julgamentos para Confiabilidade

	C	A
C	1	1/2
A	2	1