

Decisões ótimas de substituição de ativos em sistemas de produção com diferentes configurações

Gabriel A. Costa Lima¹, Alberto M. Teodoro Filho¹, Aniel da Costa Lima¹, Rafael Smith²

¹Fundação para o Desenvolvimento de Bauru e AREMAS

²AES-Tietê

1. INTRODUÇÃO

O problema de substituição de equipamentos aparece na literatura em diversos momentos – Tesborg (1949), Eilon, King e Hutchinson (1966), Sethi e Chand (1979), Fabrick e Blanchard (1991), Hartman e Rogers (2006). Em todos estes trabalhos os autores se preocuparam com a substituição do equipamento de forma isolada, ou seja, problemas de encontrar o momento de substituição de um caminhão numa mineradora, um ônibus numa empresa de transporte público, etc. Mas, o mesmo modelo não pode ser usado como palavra final para encontrar o momento de substituição de um equipamento que esteja dentro de um sistema de produção com configuração complexa. Logo, o momento de substituição deve considerar não somente o equipamento, mas principalmente os impactos em nível de sistema de produção.

A capacidade de produção de uma empresa depende fundamentalmente da estratégia de emprego dos seus ativos, a qual, é composta por confiabilidade, disponibilidade e operação ao longo do tempo. Neste contexto, surge o problema de obter informações para as decisões ótimas de substituição de ativos de modo a minimizar o custo, minimizar o risco de falha, maximizar a disponibilidade ou uma combinação envolvendo ambos com objetivos que podem ser conflitantes. A literatura sobre a solução deste problema aparece de forma limitada dentro da área de pesquisa operacional. Não obstante, os decisores são desafiados a orientar substituições em situações com milhares de ativos, grande espalhamento geográfico e orçamento limitado. Em função da importância do problema, o desenvolvimento de modelos para obter soluções vem sendo fomentado por organismos de certificação de ativos (ISO 55.000).

Os principais objetivos deste artigo são apresentar modelos que podem ser empregados para a solução de problemas reais envolvendo substituições tais como (a) o ativo a ser substituído pode ser analisado isoladamente sem relação com o sistema, (b) o ativo a ser substituído faz parte de um sistema maior, seja em configuração tipo série, paralelo ou misto, (c) a substituição pode ser individual ou em grupo no mesmo instante, (d) a substituição pode ser individual ou em grupos ao longo de um determinado horizonte de tempo.

A metodologia para obter a solução destes problemas envolve (a) modelagem estatística de dados de vida, (b) modelagem probabilística de risco de sistema a partir de seus elementos, (c) previsão de custos de manutenção, valor de revenda, etc, (d) custo de oportunidade do capital, (e) simulação de Monte Carlo. Faz-se uma composição envolvendo modelos analíticos juntamente com aqueles numéricos de

modo que possam representar mais variáveis do problema real. O software utilizado nas simulações foi o Isograph Availability Workbench (AWB)¹.

Após a definição de vida econômica em nível de cada equipamento individualmente, desenvolvem-se modelos com base em programação inteira de modo a incorporar as metas de performance (risco de falha, disponibilidade, custo, etc) em nível de sistema e respeitar as restrições em termos de custo de modo a atender a função-objetivo em nível de sistema.

Uma parte dos modelos apresentados neste artigo vem sendo aplicado a problemas reais encontrados na gestão de ativos empregados em geração de energia elétrica. Concomitantemente, alguns destes foram mostrados como ferramenta para se fazer gestão de ativos como requisito de certificação internacional. Os resultados obtidos mostram que o emprego sistemático destes modelos pode reduzir custos pelo simples fato de se fazer as substituições no momento correto em termos econômicos.

2. OBJETIVOS

Os modelos existentes se referem ao caso de substituição de ativos de forma individual e isolada. No entanto, para o caso de sistemas de produção faz-se necessário uma extensão de modo a considerar:

- O equipamento se encontra dentro de um sistema na configuração em série;
- O equipamento se encontra dentro de um sistema na configuração em paralelo;
- O equipamento se encontra dentro de um sistema com configuração do tipo mista;

Um outro problema interessante consiste em se avaliar a substituição com as flexibilidades gerencias de trocas em base de grupos de equipamentos. No entanto, este problema não será abordado neste artigo.

3. FUNDAMENTOS E METODOLOGIA

3.1 Modelagem estatística de dados de vida

Inicialmente, deve-se reconhecer a natureza estocástica da vida dos equipamentos, ou seja, que as falhas ocorrem de forma imprevisível ao longo do tempo. Logo, não se pode saber exatamente o momento em que ocorrerá uma determinada falha, mas alternativamente pode-se estimar a probabilidade de sua ocorrência ou qualquer outro evento de interesse para o tomador de decisões.

Portanto, a modelagem de vida pode ser feita por meio de alguma distribuição de probabilidade. Segundo Leemis (2009), as mais comuns utilizadas em simulações relacionadas à vida de componentes e equipamentos são Exponencial, Weibull e gama. A distribuição Weibull é particularmente importante devido a sua flexibilidade em modelagem de vida de componentes cuja causa da falha seja oriunda de diferentes modos de falhas. A sua função densidade de probabilidade é representada por:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta} \right)^{\beta}} \quad (1)$$

onde a variável t se refere ao tempo, β , η e γ são parâmetros que devem ser estimados a partir dos dados existentes.

¹ Este software é desenvolvido pela empresa Isograph juntamente com um grande portfólio de ferramentas computacionais na área de confiabilidade, risco e manutenção.

Uma vez selecionada a distribuição, faz-se necessário a estimativa dos seus parâmetros. Esta pode ser realizada empregando-se o método dos momentos, máxima verossimilhança e regressão. Para mais informações, pode-se consultar Montgomery e Runger (2003), Forbes *et al.* (2010), Kececioglu (2002), Spiegel *et al.* (2009) e Myung e McCarl (2013).

Na prática o problema consiste em obter a melhor distribuição de probabilidade para a representar a variabilidade da vida dos equipamentos. Como mencionado por Leemis (2009), o método chi quadrado e Kolmogorov-Smirnov podem ser utilizados para auxiliar a escolha da melhor distribuição.

3.2 Modelagem probabilística de risco de sistema a partir de seus elementos

A probabilidade de sucesso de um sistema depende de (1) probabilidade de sucesso dos componentes individualmente e (2) a configuração dos componentes que formam o sistema.

Em um sistema com configuração de seus elementos em série, a falha de qualquer um de seus componentes é capaz de provocar a falha e consequentemente a indisponibilidade do sistema. Assim a confiabilidade do sistema em série é representada pela multiplicação da confiabilidade de cada um de seus componentes. Este sistema minimiza a necessidade de capital físico, mas o seu risco de falha pode ser elevado.

Em um sistema com configuração redundante a falha do sistema ocorre somente se todos os seus elementos falharem. Desta maneira a indisponibilidade de um sistema redundante exige a combinação de falhas. Neste caso, o custo de capital do sistema é elevado, mas o seu risco de falha pode ser muito baixo.

Um sistema redundante pode ser do tipo paralelo ativo quando os dois equipamentos (ou subsistemas) redundantes operam ao mesmo tempo. Outra possibilidade é aquele denominado paralelo stand-by quando um elemento se encontra em funcionamento e os demais se encontram parados e somente são acionados com a falha daquele ativo. A configuração mista inclui característica de sistema em série em algumas partes e paralela em outras.

Para o desenvolvimento de modelos matemáticos para diferentes configurações de sistemas, podem-se consultar Leemis (2009) e Ebeling (2010). Para um tratamento matemático mais rigoroso consultar Bazovsky (2004).

3.3 Simulação de Monte Carlo

A simulação de Monte Carlo é uma técnica para geração de números composta por duas etapas: (1) geração de número aleatórios e (2) geração de variáveis aleatórias. Os números aleatórios são aqueles compreendidos entre 0 e 1. Já as variáveis aleatórias são aquelas que pertencem a diferentes distribuições de probabilidade. Há vários métodos para se fazer a geração tanto de números aleatórios como de variáveis aleatórias a partir dos números aleatórios – Sobol (1994), Vose (2008).

No tocante à solução de problemas práticos, a simulação das variáveis básicas de um sistema permite compreender o comportamento de sua variável de resposta. Alguns exemplos são a disponibilidade do sistema, custo de manutenção, número de interrupções, confiabilidade e etc.

Os modelos de simulação de Monte Carlo são empregados quando não se conhece uma solução analítica do problema. Isso ocorre, como afirma Salgado (2008), em problema de confiabilidade de sistemas onde técnicas de simulação estocástica são empregadas para que se torne possível o estudo de sistemas complexos em razão da dificuldade em se resolver analiticamente as equações que representam

as variáveis de resposta do no sistema. Para a realização das simulações descritas neste trabalho, emprega-se o software Availability Workbench .

4. APLICAÇÕES NA SOLUÇÃO DE PROBLEMA NO SETOR ELÉTRICO

Os modelos desenvolvidos são aplicados a situações típicas encontradas no setor de geração de energia elétrica.

O objetivo 1 consiste em estudar os modelos de substituição no caso de sistemas em série como o de uma unidade geradora composta pelos elementos mostrados na Figura 1.

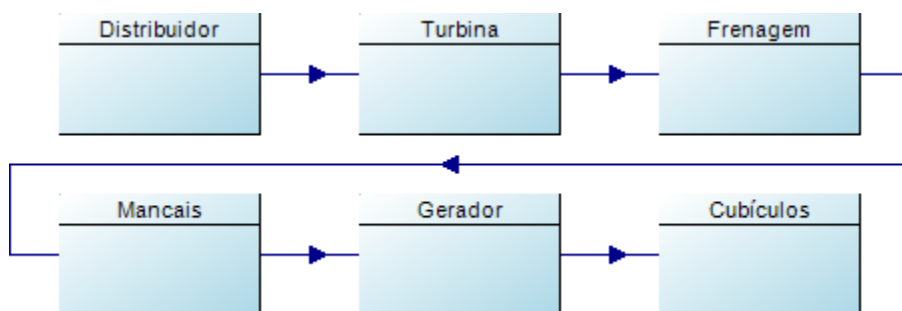


Figura 1 - Diagrama de blocos de confiabilidade simplificado de uma unidade geradora

Nota-se que todos os componentes se encontram em série do ponto de vista da confiabilidade, ou seja, para que o sistema funcione faz-se necessário que todos os elementos funcionem simultaneamente.

O objetivo 2 consiste em estudar modelos de substituição para o caso de equipamento que se encontram em paralelo como o problema de bancos de baterias em sistema de corrente contínua cujo diagrama de blocos de confiabilidade simplificado é mostrado na Figura 2.

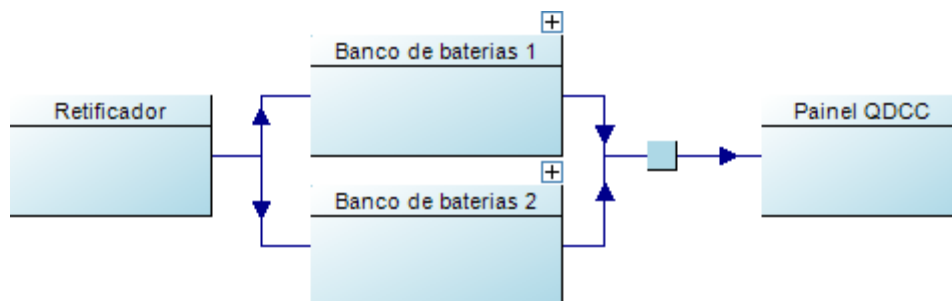


Figura 2 - Diagrama de blocos de confiabilidade simplificado de sistema de corrente contínua

No diagrama da Figura 2, há dois bancos de baterias que se encontram na configuração tipo paralelo. Porém, este conjunto formado pelos dois bancos de baterias está em série com o retificador e Painel QDCC. Além disso, cada banco de baterias possui 10 unidades em série conforme mostrado na Figura 3.

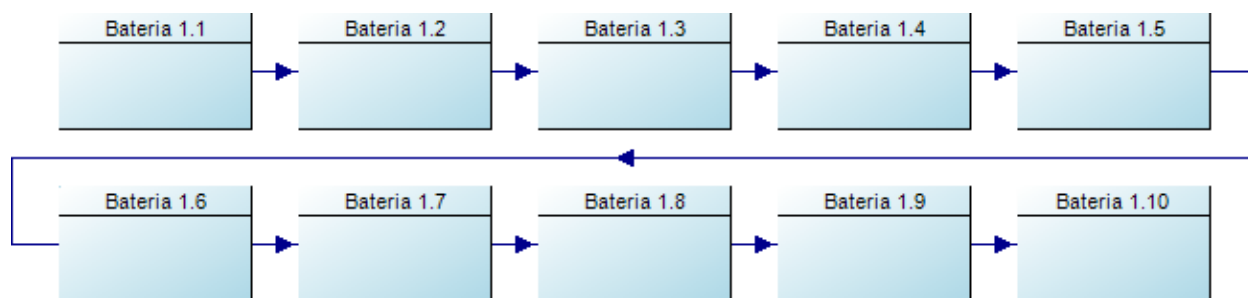


Figura 3 - Diagrama de blocos de confiabilidade do banco de baterias 1

O digrama mostrado na Figura 3 com 10 baterias em série é o mesmo que para os dois bancos de baterias.

O objetivo 3 consiste em estudar modelos de substituição no caso de sistemas que se encontram na configuração do tipo stand-by como o caso de GMG (Grupo moto gerador) em sistema de corrente alternada cujo diagrama de blocos de confiabilidade simplificado é mostrado na Figura 4.

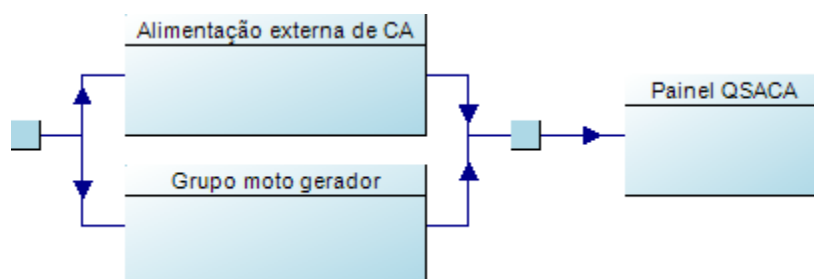


Figura 4 - Diagrama de blocos de confiabilidade simplificado de sistema de corrente alternada

O GMG encontra-se em paralelo stand-by com a alimentação externa de corrente alternada e a resultante se encontra em série com o Painel QSACA.

4.1 Modelagem estatística de dados de vida

Na Tabela 1 encontra-se as informações sobre a modelagem do tempo até a falha, características da manutenção corretiva e substituição preventiva dos equipamentos contidos no diagrama da Figura 1 que representa a Unidade Geradora (UG).

Tabela1 – Informações básicas de vida, duração e custo de manutenções dos elementos da unidade geradora

Item	Modelagem do tempo até a falha (distribuição Weibull)	Custo da corretiva	Duração média da	Custo da substituição	Duração da substituição
------	---	--------------------	------------------	-----------------------	-------------------------

	Eta (horas)	Beta	(R\$)	corretiva (horas)	(R\$)	(horas)
Distribuidor	4.500	1,1	R\$ 2.000	12	-	-
Turbina	12.500	1,6	R\$ 45.000	72	R\$ 200.000	48
Frenagem	5.800	1,4	R\$ 2.000	24	-	-
Mancais	8.000	1,4	R\$ 2.000	24	-	-
Gerador	12.500	1,6	R\$ 30.000	48	R\$ 150.000	48
Cubículos	6.100	1,1	R\$ 2.000	12	-	-

A segunda e terceira coluna representam, respectivamente, o parâmetro eta e beta da distribuição Weibull utilizada para modelagem da variabilidade do tempo até a falha.

As durações de tempos de manutenção preventiva e corretiva são modeladas por meio de distribuição exponencial.

No caso em que se fazer manutenção corretiva nos elementos substituíveis, a condição do equipamento é “as-good-as-old”, ou seja, a condição volta a ser exatamente a mesma de antes da falha sem melhorias de condição (sem rejuvenescimento).

A condição após a substituição do equipamento considerada nas simulações foi a “as-good-as-new” e considera-se que o tempo de substituição seja uma variável determinística.

Por efeito de simplificação, neste modelo não foram consideradas políticas de manutenções preventivas e inspeções.

As informações de vida operacional, custo e substituição de distribuidor, frenagem, mancais e cubículos não são mostradas porque estes não serão analisados.

Na Tabela 2 encontra-se as informações sobre a modelagem do tempo até a falha, características da manutenção corretiva e substituição preventiva dos equipamentos contidos no diagrama da Figura 2 (Sistema de corrente contínua).

Tabela 2 – Informações de vida operacional, custo e duração de corretivas e substituições para o sistema de corrente contínua

Item	Modelagem do tempo até a falha (distribuição Weibull)		Custo da corretiva	Duração média da corretiva (em horas)	Custo da substituição	Duração da substituição (em horas)
	Eta ou média (em horas)	Beta ou desvio padrão (em horas)				

Retificador	21.900	1,3	R\$ 4.500	12	-	-
Bateria	9.980	1610	R\$ 1.000	3	R\$ 800	6
Painel	18.100	1,2	R\$ 1.000	3	-	-

Destaca-se que para o retificador e o painel a distribuição Weibull foi utilizada para modelar o tempo até a falha, ou seja, a segunda coluna representa o parâmetro eta e a terceira o beta. O tempo até a falha da bateria foi modelado por uma distribuição normal, ou seja, a segunda coluna representa a média e a terceira o desvio padrão.

A substituição preventiva do banco de baterias 1 não é feita ao mesmo tempo da substituição do banco de baterias 2 para não indisponibilizar o sistema.

Na Tabela 3 encontra-se as informações sobre os a modelagem do tempo até a falha, características da manutenção corretiva e substituição preventiva dos equipamentos contidos no diagrama da Figura 4 (Sistema de corrente alternada).

Tabela 3 - – Informações de vida operacional, custo e duração de corretivas e substituições para o sistema de corrente alternada

Item	Distribuição Weibull		Custo da corretiva (R\$)	Duração da manutenção corretiva (horas)	Custo da substituição (R\$)	Duração da manutenção preventiva (horas)
	Eta (horas)	Beta				
Retificador	21.900	1,3	R\$ 4.5000	12	-	-
GMG	2.190	1	-	6	R\$ 10.000	6
Painel	18.100	1,2	R\$ 1.000	3	-	-

Como já mencionado, o GMG encontra-se na configuração tipo stand-by. O parâmetro de escala da distribuição Weibull utilizada para modelar o seu tempo até a falha representa o tempo de operação do e não do sistema como um todo (como acontece para a modelagem do tempo até a falha dos outros equipamentos).

Além disso, adota-se a premissa de que a taxa de falha do GMG quando em estado stand-by seja equivalente a 10% daquela taxa de falha em caso de operação.

4.2 *Simulação e análise de resultados da substituição na configuração tipo série*

A opção gerencial a ser avaliada consiste em substituição da turbina e do gerador no início do décimo primeiro ano de operação. O horizonte de previsão é 20 anos (175.000 horas) de operação. São realizadas 10 mil iterações e os resultados são condensados na Tabela 4.

Tabela 4 – Resultados de simulação para média e desvio padrão das horas paradas do sistema e seus elementos (Política de substituição de gerador e turbina no início do décimo primeiro ano).

Item	Média do Tempo total indisponível (em horas)	Desvio padrão do tempo total indisponível (em horas)
Unidade geradora	10.739	625
Distribuidor	667	90
Turbina	3.199	463
Frenagem	2.775	251
Mancais	1.778	206
Gerador	2.171	312
Cubículos	482	76

Nota-se que o total de horas paradas da unidade geradora é superior ao número de horas paradas dos seus elementos. Em termos econômicos, o custo esperado para 20 anos de operação e substituição de turbina e gerador no ano 11 de operação é R\$ 4.218.269.

Uma segunda flexibilidade gerencial a ser avaliada consiste em estimar horas indisponíveis e custo para 20 anos de operação sem fazer a substituição de Turbina e gerador. Os resultados da simulação são sintetizados na Tabela 5.

Tabela 5 - – Resultados de simulação para média e desvio padrão das horas paradas do sistema e seus elementos (Política sem substituição de gerador e turbina no início do décimo primeiro ano).

Item	Média do Tempo total indisponível (em horas)	Desvio padrão do tempo total indisponível (em horas)
Unidade geradora	13.156	732
Distribuidor	666	89
Turbina	4.703	563
Frenagem	2.773	256
Mancais	1.781	205

Gerador	3.189	382
Cubículos	481	75

Novamente, nota-se na Tabela 5 que o total de horas paradas do sistema é superior ao dos seus elementos e o custo estimado para 20 anos de operação é R\$ 5.504.380. Portanto, em termos econômicos, o valor da decisão gerencial de substituição é 1.286.111,00, ou seja, uma economia de custo equivalente a R\$ 145.499,29² em cada ano.

Na Figura 5 mostra-se uma análise dos impactos das substituições sobre a indisponibilidade do sistema e seus elementos.

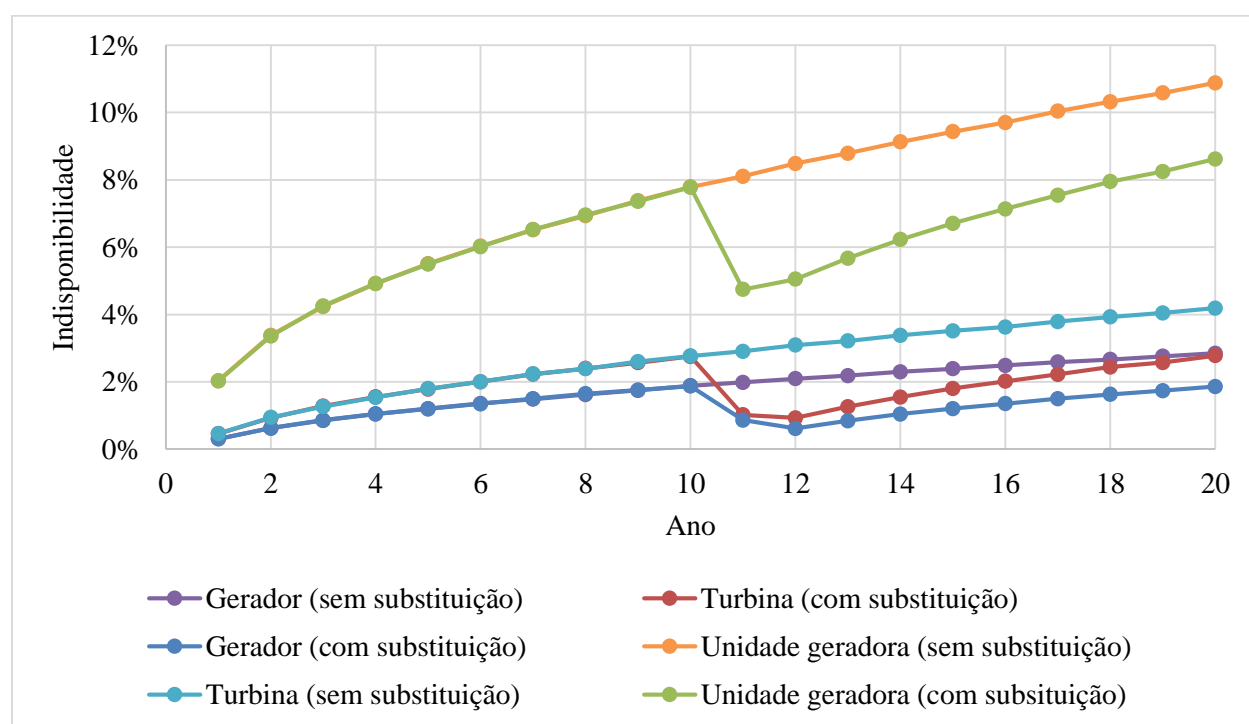


Figura 5 – Sensibilidade da indisponível do sistema e seus elementos em função da flexibilidade gerencial de se fazer substituições

Observa-se na Figura 5 que a substituição melhora a disponibilidade dos elementos e do sistema como um todo. Em nível de sistema, este aumento de disponibilidade permitido pelas substituições implica numa média de 200 horas de aumento nas horas trabalhadas anualmente.

Naturalmente, pode-se analisar a substituição em outros momentos. Ao se testar N alternativas, pode-se construir uma nuvem de pontos de indisponibilidade de modo que o decisor tenha mais informações para as suas escolhas.

² Esta economia de custo considera um custo de oportunidade do capital igual a 11% ao ano.

4.3 *Simulação e análise de resultados da substituição para o sistema de corrente contínua na configuração tipo paralela ativa para os bancos de baterias*

Para analisar as alternativas de substituição associadas aos bancos de bateria, consideremos uma flexibilidade gerencial de trocas com periodicidade anual. O horizonte de planejamento é 20 anos e faz-se 10.000 simulações. Na Tabela 6 mostra-se os resultados da média e desvio padrão da variável indisponibilidade.

Tabela 6 - Resultados de simulação para média e desvio padrão das horas paradas do sistema e seus elementos (substituição das baterias anualmente)

Item	Média do Tempo total indisponível (em horas)	Desvio padrão do tempo total indisponível (em horas)
Sistema de corrente contínua	225	67
Retificador	179	65
Banco de baterias 1 e 2	0	1
Banco de baterias 1	133	26
Banco de baterias 2	133	27
Painel QDCC	46	16

Na Tabela 6, como esperado as horas paradas do sistema são maiores que as dos seus elementos. O valor esperado do custo é R\$ 475.456 para 20 anos de operação. A probabilidade de falha simultânea dos dois bancos de baterias até 20 anos é de 25,9%.

Na Tabela 7 são encontrados os valores de indisponibilidade do mesmo sistema considerando que as baterias do banco de baterias são substituídas apenas após a falha por meio de manutenção corretiva.

Tabela 7 - Indisponibilidade simulada para o sistema de corrente contínua sem a substituição preventiva das baterias

Item	Média do Tempo total indisponível (em horas)	Desvio padrão do tempo total indisponível (em horas)
Sistema de corrente contínua	46	16
Retificador	179	65
Banco de baterias 1 e 2	2	2

2		
Banco de baterias 1	511	39
Banco de baterias 2	510	39
Painel QDCC	46	16

O valor esperado para o custo é R\$ 423.755 e a probabilidade de falha simultânea dos dois bancos de baterias em algum momento até 20 anos é de 67,5%. Note que com a substituição anual dos bancos de bateria a probabilidade de falha para 20 anos de operação é mais baixa e igual a 25,9%.

Na Figura 6 mostra-se as curvas da probabilidade de falha do conjunto redundante formado pelos dois bancos de baterias em função das flexibilidades gerenciais de se fazer ou não a substituição do banco de baterias.

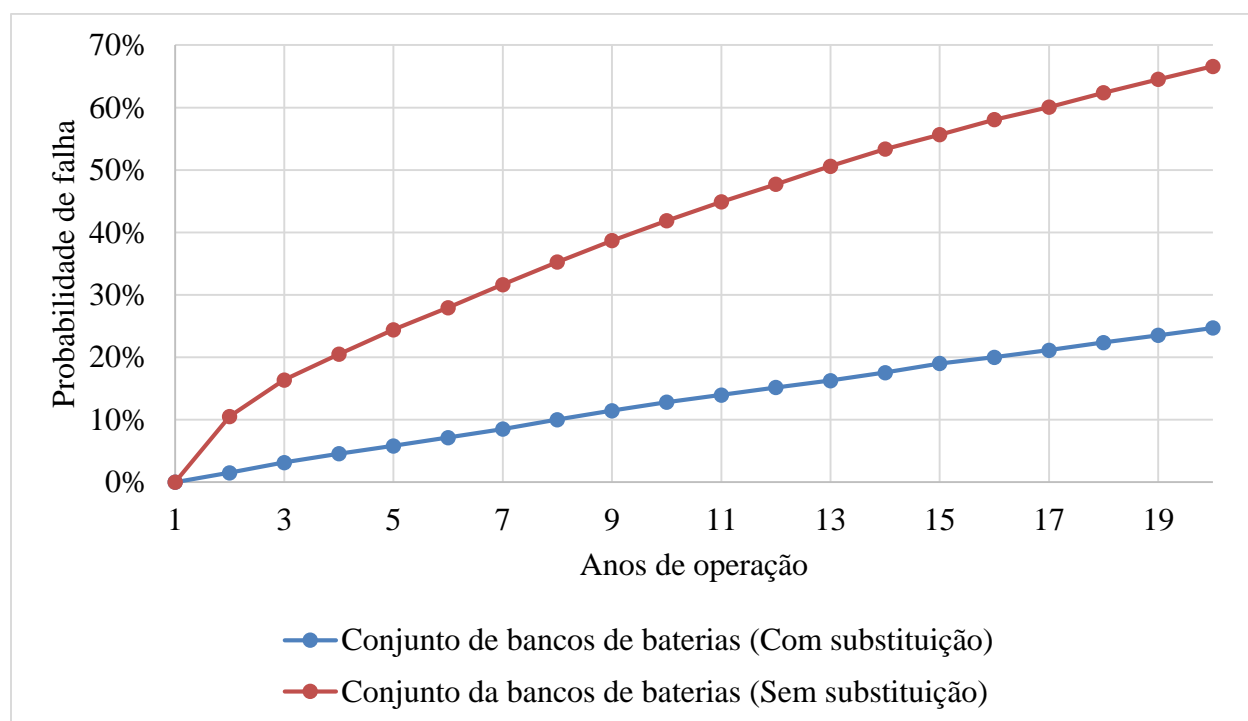


Figura 6 – Sensibilidade da probabilidade de falha do conjunto de bancos de baterias em função das flexibilidades gerenciais de fazer ou não a substituição.

Como mostrado na Figura 6, ao se fazer as substituições nos bancos de baterias a probabilidade de falha é reduzida sistematicamente ao longo dos anos. Uma vez que bancos de baterias são elementos assessórios importantes para um sistema de geração de energia elétrica, então conclui-se que o valor agregado pela flexibilidade gerencial de substituição é reduzir o risco de falha e parada do sistema.

4.4 *Simulação e análise de resultados da substituição para o sistema de corrente alternada com configuração do tipo stand-by*

Este problema consiste em avaliar o impacto das opções gerenciais de substituição do GMG no décimo primeiro ano de operação. O horizonte de previsão é 20 anos (175.000 horas) de operação. São realizadas 10 mil iterações e os resultados são condensados na Tabela 8.

Tabela 8 - Resultados de simulação para média e desvio padrão das horas paradas do sistema e seus elementos (substituição do GMG no décimo primeiro ano)

Item	Média do tempo total indisponível (em horas)	Desvio padrão do tempo total indisponível (em horas)
Sistema de corrente alternada	20,4	11,4
Alimentação externa e GMG	2,1	4,7
Painel QSACA	18,3	10,4
Grupo moto gerador	620,8	498,7

Como mostrado na Tabela 8, o GMC encontra-se na posição stand-by e, por isso, seu tempo fora de operação é grande. Mas, se excluí-lo, o número de horas paradas do sistema se torna maior que o de seus elementos. O valor esperado do custo para 20 anos de operação é R\$ 24.168. A probabilidade de falha simulada do conjunto alimentação externa de energia e GMG ao final dos 20 anos foi de 33,5%.

Uma outra flexibilidade gerencial alternativa consiste em não se fazer a substituição do GMC. Os resultados da simulação da média e desvio padrão das horas indisponíveis são mostrados na Tabela 9.

Tabela 9 - Resultados de simulação para média e desvio padrão das horas paradas do sistema e seus elementos (sem substituição do GMG no décimo primeiro ano)

Item	Média do tempo total indisponível (em horas)	Desvio padrão do tempo total indisponível (em horas)
Sistema de corrente alternada	26,3	14,0
Alimentação externa e GMG	8,0	9,3
Painel QSACA	18,3	10,4

Grupo moto gerador	2217,0	1095,6
--------------------	--------	--------

O valor esperado do custo total é R\$ 30.933 e a probabilidade de falha simulada para o conjunto alimentação externa de energia e GMG para 20 anos de operação é 76,7%. A alternativa de fazer substituição do GMG reduz o custo de R\$ 30.933 para R\$ 24.168 e mostra que esta política agrega valor na forma de economia de custos.

A sensibilidade da probabilidade de falha do conjunto alimentação externa de energia e GMG com base na política de substituição ou não do GMG na posição stand-by pode ser visualizada na Figura 7.

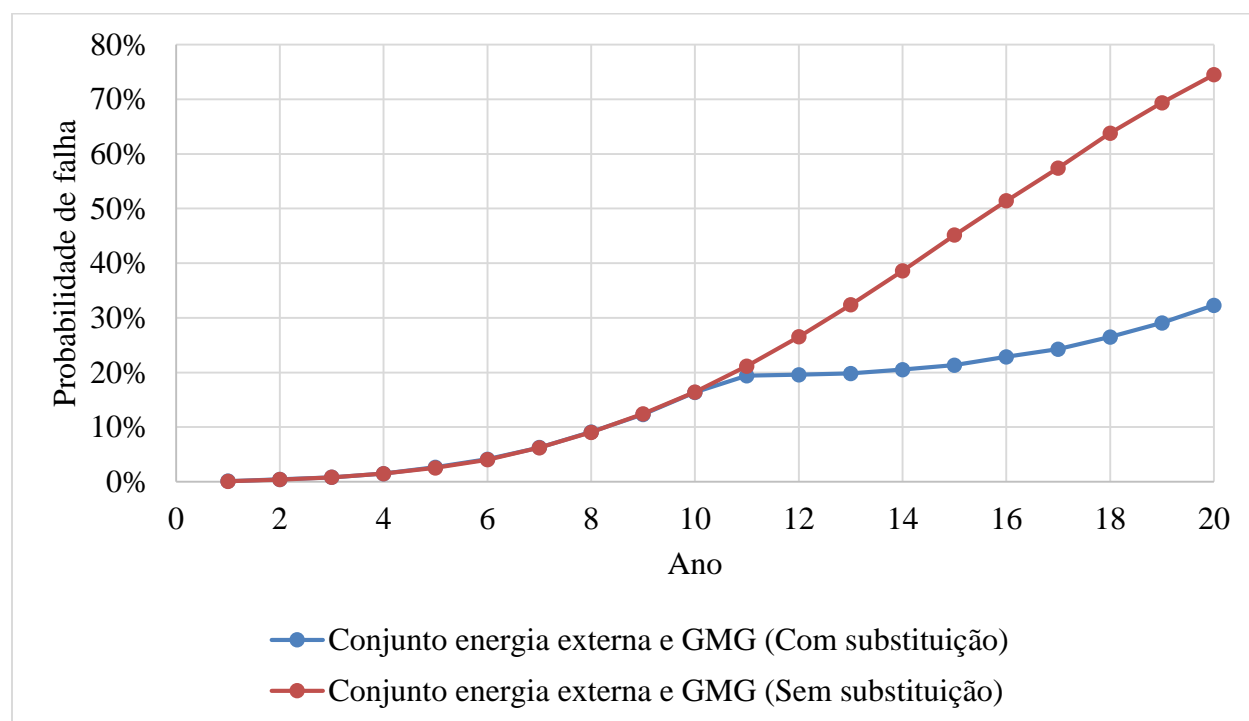


Figura 7 – Sensibilidade da probabilidade de falha do conjunto de alimentação externa de energia e GMG em função de se fazer ou não substituição do GMC

Como mostrado na figura 7, ao se fazer substituição do GMC no ano 11 a probabilidade de falha do sistema reduz-se imediatamente. O ganho de se fazer substituição do GMC no ano 11 é reduzir o risco de falha do sistema de 74% (sem substituição do GMC) para 32 % (com a substituição do GMC).

5. CONCLUSÕES

Devido à complexidade dos sistemas selecionados para este estudo faz-se necessário o emprego de diferentes modelos de confiabilidade para considerar aspectos como diferentes padrões de taxa de falha e condição após o reparo, a simulação é a ferramenta eficiente de avaliação do sistema. Modelos analíticos utilizadas de maneira isolada muitas vezes não são suficientes para compreender as implicações em tomar uma decisão de substituição ao invés de outra. Algumas conclusões mais específicas são:

- A substituição no momento correto pode reduzir custo do ciclo de vida independentemente da configuração do sistema para os exemplos analisados;
- A substituição permite reduzir os indicadores de risco de falha (taxa de falha, probabilidade de falha) dos sistemas estudados;
- Nem sempre o ganho de disponibilidade do sistema é imediato ou diretamente proporcional àquele gerado em nível de elemento.

Destaca-se também que existem, em um cenário produtivo, diversas justificativas para a substituição de equipamentos além de diferentes possíveis intervalos. Este trabalho avaliou apenas algumas possibilidades, não esgotando o assunto. Desta maneira, existe muito espaço para a aplicação de algoritmos de busca de soluções que consideram diferentes combinações pertinentes as variáveis de decisão.

AGRADECIMENTOS

Os autores deste trabalho gostariam de agradecer à Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e à AES-Tietê pelo financiamento desta pesquisa.

6. REFERÊNCIAS

- [1] FORBES, C.; EVANS, M.; HASTINGS, N.; PEACOCK, B. *Statistical Distributions*. 4. ed. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2010.
- [2] MAUNG, T. A., MCCARL, B. A. *Economic factors influencing potential use of cellulosic crop residues for electricity generation*. Energy 56, 2013.
- [3] SPIEGEL, M. R.; SCHILLER, J.; SRINIVASAN, R. A. *Schaum's Outlines Probability and Statistics*. 3. Ed. The McGraw-Hill Companies Inc., 2009.
- [4] KECECIOGLU, D. *Reliability & Life Testing Handbook, Volume 1*. Pennsylvania : DEStech Publications, Inc., USA, 2002.
- [5] MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. *Applied Statistics and Probability for Engineers*. 3. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2003.
- [6] LEEMIS, L. M. *Reliability: Probabilistic models and statistical methods*. Second edition. USA, 2009
- [7] EBELING, C. E. *An introduction to reliability and maintainability engineering*. Second Edition. Waveland Press, Inc. Long Grove, IL, England, 2010.
- [8] SALGADO, M. DE F. P. *Aplicação de técnicas de otimização à engenharia de confiabilidade*. Dissertação de Pós-Graduação, UFMG, 2008.
- [9] VOSE, D. *Risk analysis: A quantitative guide*. Third edition. John Wiley & Sons, Ltd. West Sussex, England, 2008.
- [10] TERBORGH, G. *Dynamic Equipment Policy: A MAPI Study*. , McGraw-Hill Book Co, New York, 1949

- [11] EILON, S., KING, J. R., HUTCHINSON, D. E. A study of equipment replacement. Journal Operational Research Society, 17, 59-71, 1996
- [12] SETHI, S.P. AND CHAND, S. Planning horizon procedures for machine replacement models. Management Science, 25, 140-151, 1979.
- [13] FABRYCK, W. J., BLANCHARD, B. S. Life-cycle cost and economic analysis, Prentice Hall, 384p, 1991
- [14] HARTMAN, J.C. AND ROGERS, J.L. Dynamic programming approaches for equipment replacement with continuous and discontinuous technological change. IMA Journal of Management Mathematics, 17(2), 143-158, 2006.
- [15] BAZOVSKY, I. *Reliability Theory and Practice*. Dover Publications, 2004.
- [15] SOBOL, I. *A primer for the Monte Carlo Method*, CRC Press, 1994