

Congresso ABRISCO 2017

Estudo Para Determinar Os Intervalos Ótimos De Manutenção Por Meio De Planejamento De Experimentos Com Simulação De Monte Carlo

Luís Augusto Nagasaki Costa, Gabriel Alves da Costa Lima

Fundação para Desenvolvimento de Bauru

Fernanda Marinho

Brookfield Renováveis

1 RESUMO

O risco de falta de energia elétrica é um problema comum no setor de geração de energia, pois a interrupção do funcionamento do sistema pode resultar em multas e consequente aumento de custo. Assim, a redução do risco está diretamente relacionada ao custo. Por isso, garantir um nível ótimo entre confiabilidade e custo é importante. Uma forma de garantir um nível de confiabilidade é por meio de manutenções preventivas. Porém, determinar qual a melhor frequência dessa atividade de forma a manter um nível de custo aceitável não é simples. Na literatura existem diversos estudos propondo metodologias para otimização de planos de manutenção. Muitos deles propõem algoritmos de otimização, como colônia de formigas e algoritmo genético, porém, para sistemas menores. Em um caso prático, podemos ter milhares de componentes interligados com centenas de planos de manutenção e diversas restrições, e cada simulação de um sistema complexo pode demandar muito tempo, o que torna a aplicação direta de algoritmos de otimização inviável. Além disso, podem existir centenas de variáveis de entrada incertas, e o espaço de busca pode ser grande. Nesse trabalho, vamos mostrar a aplicação do planejamento de experimentos para identificar as variáveis de entrada que mais impactam a resposta e reduzir o espaço de busca. Para tanto, vamos apresentar um caso de um trecho de um sistema de geração de energia elétrica, composto por três manuais, um gerador e uma turbina.

2 INTRODUÇÃO

Em um sistema de geração de energia elétrica, existem milhares de componentes interligados, formando uma rede complexa. Conhecer o impacto das variáveis de entrada sobre as respostas é importante para auxiliar no gerenciamento do sistema, possibilitando otimizar as condições operacionais para reduzir custos e/ou aumentar a disponibilidade. Para esse propósito, utiliza-se a simulação de Monte Carlo para testar diversos cenários e avaliar os impactos das mudanças nas entradas sobre as saídas.

Em um sistema complexo, a quantidade de possíveis cenários pode ser grande. Nesse contexto, o planejamento experimental é utilizado para possibilitar quantificar os efeitos das variações das entradas sobre as saídas com quantidade reduzida de simulações.

O uso de planejamento experimental é bastante difundido na literatura, com livros importantes no assunto, como [1-2]. Na área de manutenção, diversos trabalhos já foram publicados no assunto, como [3-6].

Nesse trabalho, utilizamos o planejamento fracionário em um trecho de um sistema de geração de energia elétrica, com o objetivo de mostrar que é possível identificar as variáveis de entrada que mais impactam as saídas utilizando número reduzido de simulações.

3 DESCRIÇÃO DO TRABALHO REALIZADO

Nesse trabalho, avaliamos o impacto dos planos de manutenção de um sistema composto por um gerador, uma turbina, três mancais e uma unidade hidráulica de lubrificação. Na Figura 1, mostra-se o diagrama de blocos de confiabilidade (RBD – *Reliability Block Diagram*) do sistema.

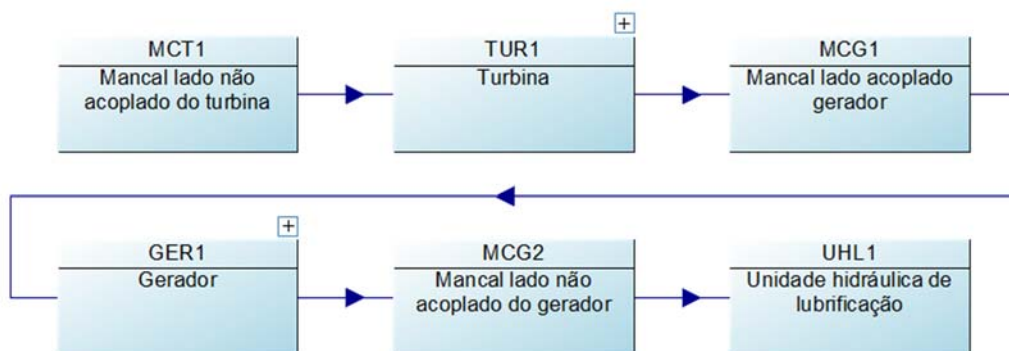


Figura 1 – Diagrama de blocos de confiabilidade do sistema.

Conforme se observa pela Figura 1, cada bloco possui uma identificação única, por exemplo, GER1 e MCG1. Os blocos estão ligados em série, isto é, a indisponibilidade de qualquer sub-sistema torna o sistema indisponível.

O sistema é composto por 6 sub-sistemas:

1. MCT1 - Mancal lado não acoplado da turbina;
2. TUR1 - Turbina;
3. MCG1 – Mancal lado acoplado do gerador;
4. GER1 - Gerador;
5. MCG2 – Mancal lado não acoplado do gerador;
6. UHL1 – Unidade hidráulica de lubrificação.

Cada subsistema pode, ainda, possuir componentes. A existência de componentes é representada pelo sinal de “+” na Figura 1. Na Figura 2, mostra-se os componentes da turbina.

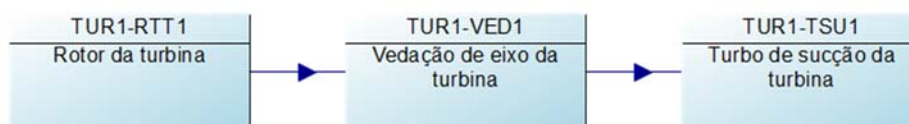


Figura 2 – Diagrama de blocos de confiabilidade dos componentes da turbina.

Conforme se observa pela Figura 2, os componentes da turbina também estão ligados em série, isto é, a indisponibilidade de qualquer um deles ocasiona, também, a indisponibilidade do sistema.

No caso do gerador, existem três componentes, conforme se mostra na Figura 3.

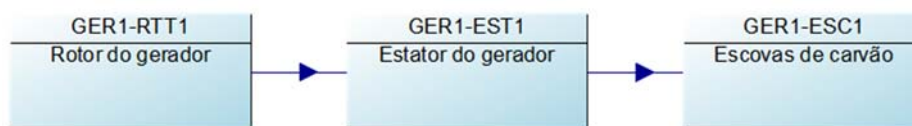


Figura 3 – Diagrama de blocos de confiabilidade dos componentes do gerador.

Conforme se observa na Figura 3, os componentes do gerador também estão ligados em série. No total, o sistema é composto por 10 componentes ligados em série.

Após construir os blocos, para simular o funcionamento do sistema, ainda devemos inserir as seguintes informações no módulo:

- Dados de falha ou distribuição de falha de cada componente;
- Planos de manutenção preventiva;
- Planos de inspeção.

Estas informações são obtidas por meio da análise do banco de dados da empresa. Os dados utilizados nesse trabalho consideram características reais de uma empresa de geração de energia elétrica.

A relação entre os componentes e os planos de manutenção é mostrada na Tabela 1.

Tabela 1 – Relação dos componentes envolvidos nos planos de manutenção. O sinal de “x” indica que o componente está envolvido no plano de manutenção correspondente.

Componente	Inspeção térmica e análise de vibração da planta	Inspeção elétrica, mecânica e civil da planta	Manutenção preventiva da planta	Inspeção nas escovas	Manutenção preventiva da UHL
Escovas do gerador		x		x	
Rotor do gerador					
Estator do gerador			x		
Mancal do gerador - lado não acoplado	x	x			
Mancal do gerador - lado acoplado	x	x			
Mancal da turbina - lado acoplado	x	x			
Rotor da turbina	x		x		
Vedação da turbina		x	x		
Tubo de sucção da turbina	x	x	x		
Unidade hidráulica de lubrificação	x	x	x		x

Conforme se observa pela Tabela 1, alguns componentes são alvo de mais planos e outros de menos. Por exemplo, o estator do gerador está envolvido apenas na manutenção preventiva da planta. Já a unidade hidráulica de lubrificação está envolvida em todos os planos menos a inspeção nas escovas.

Na Tabela 2, mostram-se as informações de tempo até a falha dos componentes.

Componente	Distribuição (parâmetros)
Escovas de carvão do gerador	Normal (média = 39860; desvio padrão = 39580)
Rotor do gerador	Exponencial (MTTF = 157000)
Estator do gerador	Weibull (beta = 1,5; eta = 306600)
Mancal do gerador-lado não acoplado	Normal (média = 39770; desvio padrão = 48330)
Mancal do gerador-lado acoplado	Normal (média = 39770; desvio padrão = 48330)
Mancal da turbina-lado acoplado	Normal (média = 39770; desvio padrão = 48330)
Rotor da turbina	Weibull (beta = 3,986; eta = 54400)
Vedação da turbina	Weibull (beta = 0,5089; eta = 152500)
Tubo da sucção da turbina	Weibull (beta = 0,9544; eta = 40590)
Unidade hidráulica de lubrificação	Exponencial (MTTF = 12800)

As distribuições apresentadas na Tabela 2 indicam o comportamento de falha dos componentes. Por exemplo, o roto da turbina possui valor de beta elevado, o que indica que suas falhas ocorrem devido a fatores ligados ao desgaste. Dessa forma, caracterizamos todos os componentes do sistema.

4 RESULTADOS OBTIDOS

Para avaliar o impacto dos planos de manutenção e selecionar os que mais impactam o tempo indisponível do sistema, nesse trabalho aplicamos o planejamento fracionário 2^{5-1} , conforme sugerido por [7] para o caso com cinco variáveis de entrada. Nesse caso, temos um total de $2^{5-1} = 16$ simulações mais uma simulação no ponto central, totalizando 17 simulações. Com essa estratégia, reduzimos a quantidade de simulações pela metade, considerando o caso de um fatorial completo 2^5 .

Para esse planejamento, as primeiras quatro colunas da matriz de sinais (“+” e “-”) são formadas da mesma forma que no planejamento 2^4 , e a quinta coluna é formada multiplicando-se as quatro primeiras colunas ($5 = 1234$). Esse planejamento é de resolução IV, o que significa que os efeitos principais são somados aos efeitos de terceira ordem e os de primeira ordem são somados com os de segunda ordem. Geralmente, considera-se que os efeitos de ordem superior, como os de terceira ordem, são desprezíveis e, portanto, não interferem nos efeitos principais.

Em estágios iniciais de estudo, é comum adotar a premissa de relação linear, utilizando-se, assim, níveis máximos (1) e mínimos (-1) para avaliar as variáveis de entrada sobre as respostas. Na Tabela 3, mostram-se os níveis e os valores originais das variáveis de entrada.

Variável	Código	Níveis		
		-1	0	1
Inspeção térmica e análise de vibração da planta	x1	3 meses	6 meses	1 ano
Inspeção elétrica, mecânica e civil da planta	x2	3 dias	15 dias	3 meses
Manutenção preventiva da planta	x3	2 anos	3 anos	5 anos
Inspeção nas escovas	x4	2 meses	3 meses	6 meses
Manutenção preventiva - unidade hidráulica de lubrificação	x5	3 meses	6 meses	1 ano

Na Tabela 3, o nível -1 para a inspeção elétrica, mecânica e civil da planta e os demais níveis médios são os planos normalmente aplicados pela empresa na prática. A partir disso, foram definidos os níveis mínimo (-1) e máximo (1). Na Tabela 4, mostra-se o planejamento fatorial 2^{5-1} com um ponto central e os resultados das simulações, que nesse trabalho é o tempo médio indisponível do sistema.

Tabela 4 – Planejamento fracionário 2^{5-1} , e indisponibilidade média para cada cenário.

Simulação	x1	x2	x3	x4	x5 (5=1234)	Indisponibilidade média
1	2190	72	17520	1460	8760	0.0107

2	8760	72	17520	1460	2190	0.01041
3	2190	2190	17520	1460	2190	0.01028
4	8760	2190	17520	1460	8760	0.01085
5	2190	72	43800	1460	2190	0.01136
6	8760	72	43800	1460	8760	0.01123
7	2190	2190	43800	1460	8760	0.01158
8	8760	2190	43800	1460	2190	0.01165
9	2190	72	17520	4380	2190	0.01046
10	8760	72	17520	4380	8760	0.01066
11	2190	2190	17520	4380	8760	0.009651
12	8760	2190	17520	4380	2190	0.01071
13	2190	72	43800	4380	8760	0.01147
14	8760	72	43800	4380	2190	0.01165
15	2190	2190	43800	4380	2190	0.01205
16	8760	2190	43800	4380	8760	0.01206
17	4380	360	26280	2190	4380	0.01128

Pode-se observar pelos resultados apresentados na Tabela 4 que a indisponibilidade média varia entre 0,009651 a 0.01206.

Na Tabela 5, mostram-se os efeitos de cada fator.

Tabela 5 – efeito de cada plano e o teste estatístico para avaliar o seu impacto sobre a indisponibilidade média.

Plano	Fator	Efeito	Erro Padrão	Estatística <i>t</i>	p-valor
	média	1.11E-02	8.16E-05	135.49	4.43E-19
Inspeção térmica e análise de vibração da planta	x1	2.09E-04	1.68E-04	1.24	0.2410
Inspeção elétrica, mecânica e civil da planta	x2	1.11E-04	1.68E-04	0.66	0.5218
Manutenção preventiva da planta	x3	1.17E-03	1.68E-04	6.93	2.49E-05
Inspeção nas escovas	x4	8.14E-05	1.68E-04	0.48	0.6382
Manutenção preventiva - unidade hidráulica de lubrificação	x5	-2.11E-04	1.68E-04	-1.25	0.2357

Pelos resultados apresentados na Tabela 5, o efeito da manutenção preventiva na planta foi estatisticamente significativo a 10% de nível de significância. O aumento do intervalo entre as manutenções preventivas da planta ocasionou aumento da indisponibilidade média, enquanto que a redução no intervalo ocasionou redução na indisponibilidade média, conforme se observa pelos resultados apresentados na Tabela 4.

É comum em planejamentos utilizados para seleção de variáveis, que em estágios iniciais se decida por manter alguma variável, mesmo que não tenha sido estatisticamente significativa. O analista pode entender que essa variável é importante e decidir analisa-la novamente, ou pode-se definir novo intervalo de variação para analisar a variável sobre novas condições. No nosso caso, a manutenção preventiva na unidade hidráulica de lubrificação poderia ser mantida para analisar melhor o seu impacto.

Geralmente, a quantidade de variáveis que mais impactam o comportamento de um sistema é pequena. Assim, após identificação das variáveis mais importantes, torna-se viável a aplicação de um planejamento fatorial completo para construção de uma superfície de resposta e identificação de condições ótimas do sistema. No caso de aplicação apresentado, seria possível realizar um experimento fatorial completo com a manutenção preventiva da planta e da unidade hidráulica de lubrificação, construir uma superfície de resposta e encontrar o intervalo de manutenção para essas duas variáveis que minimizam a indisponibilidade do sistema.

Se fosse realizar o planejamento fatorial completo, seria necessário 2^{5-1} mais um ponto central e 2^2 mais um

ponto central, totalizando 22 simulações. Se fosse realizar o planejamento fatorial completo desde o início, considerando todos os planos, seriam necessárias 33 simulações (2^5 mais um ponto central). Assim, por meio da abordagem apresentada, foi possível economizar 11 simulações. Em um sistema complexo, com dezenas de planos a serem avaliados e centenas a milhares de componentes interligados em uma rede complexa, a economia no número de combinações se torna significativa. Isso demonstra o potencial de aplicação de planejamentos fracionários em casos práticos.

5 CONCLUSÕES

Nesse trabalho apresentamos a aplicação do planejamento fracionário a um trecho de um sistema de geração de energia elétrica. Com apenas 17 simulações conseguimos identificar quais são os planos que mais impactam no tempo médio indisponível do sistema. Em um planejamento fatorial completo, seriam necessárias 33 simulações. Em um caso real, a realização de um planejamento fatorial completo com dezenas de planos se torna inviável. Nesse contexto, a aplicação do planejamento fracionário é importante, pois permite identificar as variáveis principais, reduzindo o tamanho do problema, e realizar otimização para encontrar valores ótimos das respostas de interesse.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e a Brookfield Renováveis pelo suporte financeiro para realização dessa pesquisa.

REFERÊNCIAS

- [1] MONTGOMERY, D. C. *Design And Analysis of Experiments*. John Wiley & Sons. (2013).
- [2] BOX, G. E., HUNTER, W. G., HUNTER, J. S. *Statistics for experimenters: Design, Innovation, and Discovery* (2nd ed.). New Jersey: John Wiley & Sons (2005).
- [3] ANDIJANI, A., DUFFUAA, S. (2002). "Critical Evaluation Of Simulation Studies In Maintenance Systems". *Production Planning & Control*, vol. 13, p. 336, (2002).
- [4] MADU, C. N., KUEI, C. H. "Simulation Analyses Of A Maintenance Float Shop". *International Journal Of Production Economics*, vol. 29, p. 149, (1993).
- [5] GHARBI, A., KENNÉ, J. P. "Production And Preventive Maintenance Rates Control For A Manufacturing System: An Experimental Design Approach". *International Journal of Production Economics*, vol. 65, p. 275, (2000).
- [6] GIANNUZZI, G., MORELLI, P., FRAGASSA, C. "Design Of Experiment For Numerical Simulation Of Maintenance". In *Proceeding of 16th European Maintenance Congress*, Helsinki, Finlandia, (2000).
- [7] RODRIGUES, M. I., LEMMA, A. F. *Experimental Design And Process Optimization*. CRC Press (2014).