

Desenvolvimento de Um Sistema Especialista para Gestão da Manutenção Considerando Modelos de Análise de Confiabilidade e Impacto Financeiro

Marcelo A. Pelegrini*, Daniel P. Duarte*, Bruno H. Nakata*, Felipe R. Miranda*, Daniel S. Fonseca*, Ivo O. Cyrillo*, Thales Sousa**, Maurício F. Braga***, Fábio S. Mangile****, Silvio L V. Misse*****, Jorge F. M. Pires*****, Evandro Fernandes*****

*Instituto APTEL - iAPTEL, Rio de Janeiro, RJ, Brasil (e-mail: marcelo.iaptel@aptel.com.br).

**Universidade Federal do ABC, Santo André, SP, Brasil (e-mail: thales.sousa@ufabc.edu.br).

***InForma Software S/A, Recife, PE, Brasil (e-mail: mbraga@informa.com.br).

**** Genus Consultoria, Bauru, SP, Brasil (e-mail: fabio.mangile@genusconsultoria.com.br).

*****Ferreira Gomes Energia S/A - FGE, Alupar Investimentos S/A, São Paulo, SP, Brasil (e-mail: smisse@alupar.com.br).

Abstract: The electric power sector restructuring associated with the technological developments in the scope of automation, information and data analysis has led the agents involved to search solutions that contribute to the asset operation, maintenance and planning. In this sense, the present work, resulting of ANEEL R&D project PD-07469-0002 / 2018, proposed the development of an Expert System (ES) for the maintenance management of a hydraulic power plant, considering models of reliability analysis and financial impact. In this way, the ES was based on the concept of Markovian networks for the calculation of equipment operating probabilities, on the series-parallel method for modeling the equipment and on obtaining reliability curves with Weibull distribution for modeling the risks of each equipment.

Resumo: A reestruturação do setor elétrico associada à evolução tecnológica no âmbito da automação, informação e análise de dados tem feito com que os agentes envolvidos busquem soluções que contribuam com as atividades de operação, manutenção e planejamento de seus ativos. Neste sentido, o presente trabalho, resultado do projeto de P&D ANEEL PD-07469-0002/2018, propôs o desenvolvimento de um Sistema Especialista (SE) para a gestão da manutenção de uma planta de geração hidráulica, considerando modelos de análise de confiabilidade e impacto financeiro. Para tanto, o SE se baseou no conceito de redes markovianas para o cálculo de probabilidades de funcionamento dos equipamentos, no método série-paralelo para modelagem dos equipamentos e na obtenção de curvas de confiabilidade com distribuição *Weibull* para modelagem de riscos de cada equipamento.

Keywords: Expert Systems; Financial Impact; Hydraulic Generation; Maintenance Management; Markovian Networks; Reliability; Series-Parallel Method; Weibull Distribution.

Palavras-chaves: Confiabilidade; Distribuição *Weibull*; Geração Hidráulica; Gestão da Manutenção; Impacto Financeiro; Método Série-Paralelo; Redes Markovianas; Sistemas Especialistas.

1. INTRODUÇÃO

A reestruturação do setor elétrico associada a evolução tecnológica no âmbito da automação, informação e análise de dados têm feito com que os agentes envolvidos (Pereira, 2008), (Assis *et. al.*, 2019), busquem soluções que contribuam com as atividades de operação, manutenção e planejamento de seus ativos, uma vez que a gestão dos mesmos tem impacto direto na confiabilidade e no balanço financeiro.

Neste contexto, o impacto na confiabilidade se dá em função do aumento do risco de um equipamento apresentar defeito quando opera em condições de desgaste, resultando na indisponibilidade do serviço (Lafraia, 2001), (Silva Neto e Cugnasca, 2013). Por sua vez o impacto financeiro se dá em função do custo de se efetuar a manutenção no equipamento, de sua troca, dos efeitos da parada da produção e de outros

danos que eventualmente possam ser causados na falha do equipamento.

De maneira a dirimir esses impactos, a proposição de políticas e modelos aplicados à gestão de ativos têm buscado o equilíbrio entre riscos e ganhos na manutenção dos equipamentos (Kaiser e Gebraeel, 2009), (Fan *et. al.*, 2011), (Ahmad e Kamaruddin, 2012), (Aven e Jensen, 2013), (Walter e Flapper, 2017).

Assim, com o objetivo de contribuir com a evolução de políticas e modelos aplicados à gestão de ativos, o presente trabalho propôs o desenvolvimento de um Sistema Especialista para a gestão da manutenção de uma planta de geração hidráulica, considerando modelos de análise de confiabilidade e impacto financeiro.

Para tanto, o Sistema Especialista se baseou no conceito de redes markovianas para o cálculo de probabilidades de funcionamento dos equipamentos, no método série-paralelo

para modelagem dos equipamentos e na obtenção de curvas de confiabilidade com distribuição *Weibull* para modelagem de riscos de cada equipamento.

Este artigo está organizado da seguinte forma. A seção II apresenta os aspectos mais relevantes sobre os métodos considerados. A Seção III mostra os resultados dos casos de teste e simulações. Finalmente, as conclusões são apresentadas na seção IV.

2. METODOLOGIA PROPOSTA

A seguir são apresentadas as metodologias consideradas no desenvolvimento do Sistema Especialista proposto.

2.1 Modelagem de Equipamentos e Riscos

Para a modelagem das probabilidades de funcionamento dos equipamentos e dos riscos associados empregou-se uma abordagem através de redes markovianas (Brown, 2017). Nesse sentido, a modelagem dos equipamentos que compõem a planta de geração hidráulica foi realizada através do método série paralelo, Item 2.,2, enquanto a modelagem dos riscos baseou-se na obtenção de curvas de confiabilidade com distribuição *Weibull* para cada equipamento.

Os dados de entrada para a modelagem dos equipamentos e riscos foram obtidos a partir dos históricos de ocorrências e manutenções da planta de geração hidráulica, além de dados encontrados na literatura para equipamentos semelhantes. Essa complementação de dados é importante uma vez que para se garantir a regressão correta (*p-value* baixo) para a distribuição *Weibull*, é preciso de cerca de 30 pontos/observações, o que nem sempre é viável. Assim, é possível estimar a curva de confiabilidade de maneira conceitual, seja interpolando os dados disponíveis, seja pelo conhecimento do funcionamento da máquina.

Para tanto, são necessárias informações do tempo decorrido entre paradas, se a parada foi preventiva ou corretiva, além da caracterização do equipamento e seu tipo. Dessa forma, seguindo a base do modelo de *Markov* (Brown, 2017), é importante conhecer o tempo de funcionamento e o tempo de parada, não sendo necessário conhecer os horários de parada, mas sim as durações das mesmas. A Tabela 1 ilustra o modelo de entrada de dados proposto para o método de *Markov*.

Tabela 1. Dados de entrada para modelagem de equipamentos e riscos

Variável	Descrição
ID	Identificação de evento
Equipamento	Identificação do equipamento
Tipo	Tipo de equipamento (ex. motobomba, gerador, transformador)
Horas de funcionamento(h)	Horas de funcionamento entre paradas
Tempo de parada (h)	Tempo no qual o equipamento ficou em manutenção
Motivo (M/F)	Parada por Falha (F) ou Manutenção
Consideração de manual	Caso o valor de horas de funcionamento seja adicionado manualmente

De posse das informações apresentadas na Tabela 1 é possível calcular da curva de confiabilidade por equipamento ou tipo de equipamento, que será utilizada na modelagem do sistema e na simulação de confiabilidade. Adicionalmente, os

valores de *beta* e *lambda* são fatores necessários para a descrição da curva *Weibull* (Assis *et. al.*, 2019). Como exemplo, para uma motobomba com as características apresentadas na Tabela 2, pode-se observar a curva da taxa de falha (*hazard function*) no tempo ilustrada na Figura 1.

Tabela 2. Exemplo de parâmetros da curva com distribuição Weibull

Parâmetros - Weibull	
Beta	0,95
Lambda	0,00033
Média(m)	4.679,24
Variância(σ^2)	4.693.761,25
Desvio padrão	2.166,51



Fig. 1: Curva da taxa de falha (*hazard function*) no tempo.

2.2 Modelagem de Equipamentos em Série e Paralelo

Embora não seja exclusivo do modelo de cadeia de *Markov*, a modelagem de equipamentos em série e paralelo é fundamental para o completo entendimento do modelo de confiabilidade.

Por vezes, o que importa no ambiente produtivo é o fluxo produtivo, que pode ser dependente ou independente do funcionamento de um determinado equipamento. No setor elétrico é comum o uso de expressões como “N-1” para indicar a característica de funcionamento de um sistema, apontando que, caso um determinado equipamento deixe de funcionar corretamente, ele pode ser substituído por outro, assim o sistema pode ficar com “N-1” equipamentos e continuar a funcionar.

Do ponto de vista prático, outras condições são importantes, a saber: se o equipamento está em reserva quente ou fria, se é “*spare part*”, se está conectado ou desconectado, etc. Essas questões podem influenciar o tempo de reparo do sistema, que no caso de reserva quente, conectada e em funcionamento pode ter resultar em tempo de reparo do sistema nulo, embora o tempo de reparo do equipamento possa ser longo, levando dias, como a substituição de um transformador de potência quando não há outro sobressalente no local.

A despeito das complexidades que o sistema possa alcançar, na prática, a modelagem matemática e conceitual é realizada sistemicamente com equipamentos em série e paralelo, tal como apresentado na Figura 2.

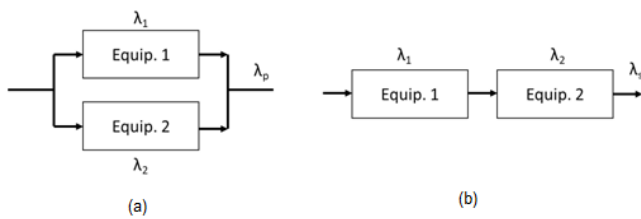


Fig. 2. Sistema em paralelo (a) e em série (b), com taxa de falhas dos equipamentos (λ_1 e λ_2) e do sistema paralelo λ_p e em série λ_s , respectivamente.

Do ponto de vista conceitual, no sistema em paralelo, considerando que ambos os equipamentos 1 e 2 sejam suficientes para atender o funcionamento de todo o sistema e que as taxas de falha do equipamento 1 e 2 sejam independentes, a falha do sistema acontecerá caso ambos os equipamentos estejam em estado de falha, mutuamente. Já no sistema em série, caso um dos equipamentos entre em estado de falha, o sistema todo estará em falha. Matematicamente, pode-se modelar o sistema em paralelo através do modelo de cadeia de *Markov* (Brown, 2017).

2.3 Simulação Temporal de Políticas de Manutenção

De maneira geral, a simulação temporal exige o conhecimento do comportamento da confiabilidade do equipamento ao longo do tempo. Essa modelagem é justamente obtida através das curvas de confiabilidade ajustadas pela estatística *Weibull*. Neste ponto, deve-se destacar que o passo temporal escolhido para o presente trabalho é de uma hora. Os parâmetros necessários para essa simulação são:

- Descrição da curva de confiabilidade;
- Tempo de desde a última parada;
- Tempo de reparo corretiva;
- Tempo de reparo preditiva;
- Tempo entre manutenção preventiva.

A cada passo na escala de tempo, calcula-se a confiabilidade acumulada de cada um dos elementos, assim como a confiabilidade acumulada do sistema, conforme ilustrado na Figura 3.

Ademais, realizam-se sorteios de Monte Carlo, comparando-se os números aleatórios sorteados com o valor de confiabilidade dos equipamentos. Caso o número sorteado seja maior em um dos casos, caracteriza-se uma situação de falta no sistema, iniciando-se o período de manutenção corretiva.

Deve-se destacar que a simulação considera a periodicidade e o intervalo de tempo para manutenção preventiva, de acordo com o histórico de dados cadastrados.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1								
2								
3			EQ1			Disponibilidade		
4			Lambda	0,00020		79%		
5			Beta	0,95000				
6			Tempo de reparo (preventiva)	15				
7			Tempo de reparo (corretiva)	25				
8			Preventiva de qto em qto tempo	1.000				
9			Tempo de uso da última parada (T0)	300				
10			Custo preventiva					
11			Custo corretiva					
12								
13								
14	Hora	Custo de parar nessa hora	TO relativo EQ1	Parado em preventiva? EQ1	Confiabilidade no instante EQ1	Chance de falha EQ1	Parado em corretiva EQ1	Parado? EQ1
15	T0		300	0		72	72	1800
16	1		301	0	95,58%	0	0	0
17	2		302	0	95,56%	0	0	0
18	3		303	0	95,55%	0	0	0
19	4		304	0	95,53%	0	0	0
20	5		305	0	95,52%	0	0	0
21	6		306	0	95,51%	0	0	0

Fig. 3: Simulação temporal de políticas de manutenção.

Assim, ao final da simulação, obtém-se como um dos resultados a disponibilidade acumulada do sistema, definida pela relação entre o total de horas que o sistema funcionou normalmente e o total de horas escolhido para simulação.

Ademais, a condição horária de cada um dos blocos simulados serve como insumo para o cálculo dos custos de manutenção e operação.

2.4 Metodologia para Cálculo de Custos

Após estabelecida a simulação temporal das políticas de manutenção, ou seja, conhecimento do comportamento da confiabilidade do equipamento ao longo do tempo, são considerados os seguintes custos de manutenção e operação:

- Custo de manutenção preventiva (equipamento);
- Custo de manutenção corretiva (equipamento);
- Custo de Operação;
- Custo de produção.

Assim, a partir da consideração de diferentes cenários e diferentes custos de manutenção (preventiva ou corretiva), é verificada a influência do aumento ou diminuição de ações de manutenção na confiabilidade da operação do sistema.

Deve-se destacar que para o sistema proposto o custo de operação foi caracterizado pelo custo inerente à operação da usina, logo esse valor é nulo durante os períodos de manutenção preventiva ou corretiva.

O custo de produção é fundamental para a simulação dos melhores instantes para parada do sistema. No presente trabalho, foram considerados como dados de entrada a energia assegurada da usina, preço de leilão, assim como a geração esperada em cada mês. A Tabela 3 ilustra um exemplo de dados de entrada para o cálculo de custos.

Adicionalmente, o sistema considera a curva de geração horária para realização o cálculo de custos. A Figura 4 ilustra um exemplo de curva de geração horária.

Tabela 3. Exemplo de dados de entrada para o cálculo de custos

Simulação de Manutenção				
DATA	Potência (MW)	Energia (MWh)	Assegurado (MWh)	Preço (R\$/MWh)
1-jan	61,0	44.032	42.706	195
1-fev	61,0	36.985	35.871	195
1-mar	61,0	37.741	36.605	195
1-abr	61,0	27.393	26.568	195
1-mai	61,0	25.161	24.403	195
1-jun	61,0	21.306	20.664	195
1-jul	61,0	20.967	21.353	195
1-ago	61,0	20.967	21.353	195
1-set	61,0	23.190	23.616	195
1-out	61,0	31.409	30.463	195
1-nov	61,0	36.524	35.424	195
1-dez	61,0	40.886	39.655	195
ANO	SubMercado			
2018	SE			

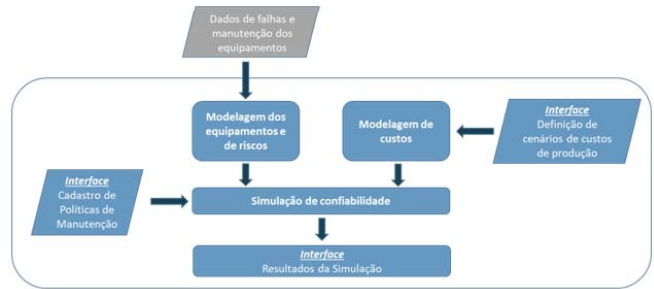


Fig.5. Arquitetura proposta para o Sistema Especialista.

3. TESTES E RESULTADOS

3.1 Cadastro de Informações no Software

Conforme descrito nos itens anteriores, o sistema desenvolvido permite simular políticas de manutenção que fornecem como resultados os valores de disponibilidade de cada componente das unidades geradoras e da usina como um todo, além da valoração econômica de cada política. Através da simulação de diferentes políticas, é possível realizar uma análise comparativa visando otimizar as práticas já adotadas ou a serem adotadas pela empresa.

Para tanto, inicialmente, o usuário deve cadastrar cenários que serão considerados nas simulações, levando-se em conta os seguintes critérios:

- Ano de geração: representa o ano base para o estudo;
- Submercado: representa o submercado onde está a geração, caso o usuário opte por utilizar o PLD (preço de liquidação das diferenças);
- Energia gerada: Caso essa opção seja escolhida, o programa irá considerar as medições hora a hora inseridas pelo usuário. Em caso negativo, o programa realiza uma aproximação com os dados de mercado;
- Preço mês: Caso essa opção seja escolhida, utiliza-se o valor de preço de energia informado pelo usuário. Em caso negativo, utiliza-se o PLD, considerando o ano e o submercado escolhidos previamente;
- Aumenta capacidade: Caso essa opção seja escolhida, o programa considera que, em caso de falha de uma das unidades, a outra consegue gerar toda a energia esperada.

A Figura 6 ilustra a tela do sistema utilizada para cadastro de cenários.

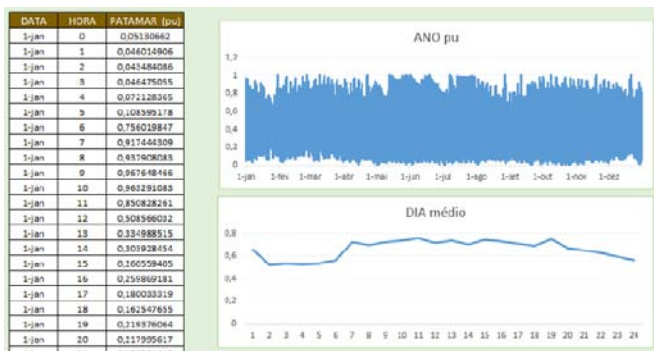


Fig. 4: Exemplo de curva de geração horária.

Como resultado, para cada cenário simulado, o módulo fornece os valores dos custos considerados, assim como o montante de dinheiro acumulado durante o período de simulação. A partir da simulação horária, pode-se prever quais são os meses mais propícios para parada, bem como as horas disponíveis para parada que seja mais vantajoso não despachar a máquina do que despachar (a partir da diferença entre os preços *spot* e contratado).

2.5 Arquitetura Proposta

Para o desenvolvimento do Sistema Especialista proposto foi utilizado o modelo MER (Modelo Entidade Relacionamento), que é um modelo conceitual utilizado na engenharia de *software* para representar a estrutura do banco de dados da aplicação.

De maneira geral, o MER é composto por diversas tabelas (entidades) interligadas entre si, sendo que cada tabela possui um determinado conjunto de dados. Da mesma forma, os cálculos a serem executados pelo sistema geram resultados que também podem retornar valores (preencher) para diversas tabelas.

Com base nas metodologias apresentadas anteriormente, e utilizando-se o modelo MER para o seu desenvolvimento, o sistema foi caracterizado pela arquitetura ilustrada na Figura 5.

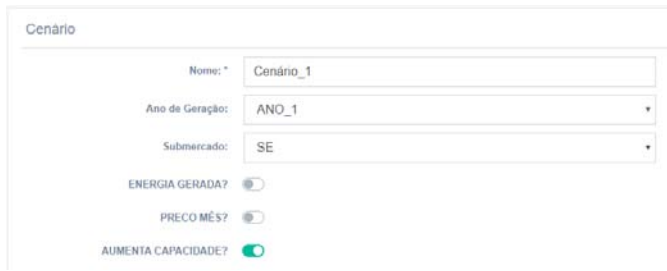


Fig.6: Tela para cadastro de cenários.

O passo seguinte consiste em cadastrar a configuração da usina a ser utilizada nas simulações. O sistema permite o cadastro de múltiplas configurações.

O cadastro da configuração da usina é feito através dos seguintes passos:

- Cadastro de cada equipamento (elemento) que será considerado na simulação;
- Associação de cada elemento a sua respectiva unidade geradora;
- Ligação entre os elementos para gerar o modelo série-paralelo da usina.

Por fim, deve-se cadastrar um estudo para simulação que, além de aplicar um cenário e uma configuração cadastrados previamente (Figura 7), utiliza também parâmetros específicos referentes à política de manutenção e informações para modelagem das curvas de confiabilidade dos elementos (*Weibull*).

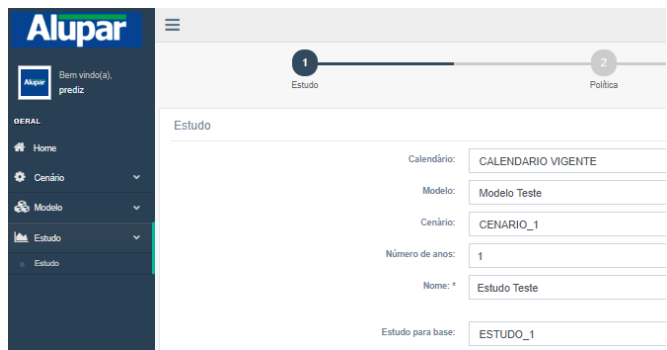


Fig.7: Cenário e configuração selecionadas para o estudo.

Em relação às políticas de manutenção, o *software* permite cadastrar, para cada elemento, os tempos entre manutenções preventivas, além dos custos referentes à manutenção preventiva, corretiva e custos de operação, conforme apresentado na Figura 8.

Em relação à modelagem das curvas de confiabilidade de cada equipamento, Figura 9, são necessárias as seguintes informações:

- Tempo de manutenção preventiva (h);
- Tempo de manutenção corretiva (h);
- Tempo decorrido desde a última manutenção (h);

- *Lambda* e *Beta* (parâmetros para modelagem das curvas).



Fig. 8: Cadastro de informações específicas da política de manutenção.



Fig. 9: Cadastro de informações para modelagem das curvas de confiabilidade de cada um dos elementos.

3.2 Resultados das Simulações

Inicialmente, buscou-se estabelecer um caso base para simulação. Em seguida, foram propostas variações de parâmetros para obtenção de outras políticas de manutenção a fim de compará-las.

A) Caso Base

Em relação ao caso base, para o cálculo do preço da energia, utilizou-se o PLD com ano base de 2018 e submercado Sudeste. A energia gerada foi aproximada com dados de mercado e não foi utilizada a opção de aumento de capacidade.

Conforme apresentado na Figura 10, para as simulações iniciais, considerou-se para a usina uma configuração com 6 elementos em série, conforme segue:

- Distribuidor;
- Acoplamento da turbina;
- Gerador;
- Sistema de Resfriamento;
- Banco de Baterias;
- Retificador.

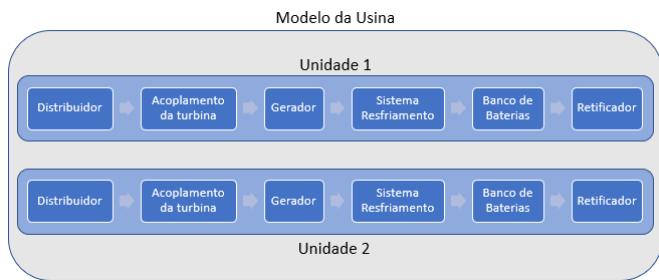


Fig. 10: Modelo série-paralelo considerado.

Em relação aos parâmetros específicos da política de manutenção para cada elemento, para o caso base, foram adotados os valores apresentados na Tabela 4.

Tabela 4. Parâmetros de política de manutenção - Caso Base

	Distribuidor		Acoplamento		Gerador		Resfriamento		Bateria		Disjuntor	
	U1	U2	U1	U2	U1	U2	U1	U2	U1	U2	U1	U2
TM (h)	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000
TP (h)	50	40	50	40	50	40	40	30	40	30	40	30
TC (h)	10	10	10	10	10	10	8	8	8	8	8	8
Cp (R\$/h)	1200	1000	1200	1000	1200	1000	1200	1000	1200	1000	1200	1000
Cc (R\$/h)	3600	3000	3600	3000	3600	3000	3600	3000	3600	3000	3600	3000
Co (R\$/h)	100	80	100	80	100	80	100	80	100	80	100	80

Sendo:

- TM: Intervalo entre manutenções preventivas (h);
- TP: Duração da manutenção preventiva (h);
- TC: Tempo de manutenção corretiva (h);
- Cp: Custo da manutenção preventiva (R\$/h);
- Cc: Custo da manutenção corretiva (R\$/h);
- Co: Custo de operação (R\$/h).

A Tabela 5 apresenta os resultados da simulação para o caso base.

Tabela 5. Resultados da simulação - Caso Base

mês	Geração (MWh)	Preço (R\$/MWh)	Paradas Preventivas (H)	Custo P (R\$/h)	Paradas Corretiva (h)	Custo C (R\$/h)	Operação (R\$/MWh)	Resultado
1	42.706	181.08	0.0	0.00	0.0	0.00	18.82	R\$ 6.929,679
2	35.871	188.14	0.0	0.00	0.0	0.00	20.23	R\$ 6.022,961
3	36.605	224.80	0.0	0.00	0.0	0.00	21.95	R\$ 7.425,345
4	24.610	104.22	90.0	1.111.111	0.0	0.00	29.60	R\$ 1.736,524
5	24.211	320.86	0.0	0.00	0.0	0.00	33.03	R\$ 6.968,769
6	20.664	470.15	0.0	0.00	0.0	0.00	37.63	R\$ 8.937,497
7	20.908	505.18	0.0	0.00	18.0	3.600.00	37.91	R\$ 9.704,863
8	19.765	505.18	110.0	1.109.09	0.0	0.00	37.62	R\$ 9.119,574
9	23.108	477.60	0.0	0.00	0.0	0.00	33.03	R\$ 10.273,452
10	30.463	279.94	0.0	0.00	0.0	0.00	26.38	R\$ 7.724,394
11	33.246	125.53	90.0	1.200.00	0.0	0.00	21.76	R\$ 3.341,804
12	39.640	78.04	1.0	1.000.00	0.0	0.00	20.26	R\$ 2.289,473
Final	351.797	256.22	291.0	1.137.46	18.0	3.600.00	338.22	R\$ 80.474,335

Conforme Tabela 5, para cada mês, são apresentados os resultados de energia gerada e preço, número e custo das paradas preventivas e corretivas, custo de operação, além do resultado que consiste no valor obtido com a geração de energia, subtraindo-se os custos de manutenção preventiva,

corretiva e custo de operação. A apuração anual é contabilizada na última linha da tabela.

Para o caso base, as manutenções preventivas ficaram concentradas em três meses do ano, totalizando 291 horas. Falhas que acarretaram em parada corretiva das unidades totalizaram 18 horas no ano.

Devido à natureza aleatória da aplicação das faltas nos equipamentos da usina, os resultados obtidos para uma mesma política de manutenção podem sofrer variações em cada simulação. Dessa maneira, o sistema desenvolvido permite ao usuário escolher o número de simulações a serem executadas e fornece um resultado agregado dos casos.

B) Análise de Sensibilidade

Para comparação de diferentes políticas de manutenção, além do caso base com tempo entre manutenções de 3000 horas, foram considerados casos com tempo entre manutenções de 1000 e 5000 horas. Cada política foi simulada 10 vezes e os resultados agregados são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6. Resultados das simulações para 3 políticas de manutenção

Caso	Geração (MWh)	Paradas Preventivas (H)	Paradas Corretivas (h)	Resultado	Confiabilidade Usina
TM=3000	349,574	401.2	57.2	R\$ 79,441,707	97.384%
TM=1000	325,931	1,562.0	40.0	R\$ 72,479,357	90.856%
TM=5000	352,279	218.4	90.4	R\$ 79,995,527	98.237%

Em relação ao caso base, observou-se que o caso com tempo entre manutenções de 1000 horas permitiu reduzir o tempo total de parada por falhas, entretanto gerou resultados financeiros piores para a empresa pelo aumento expressivo do número de paradas preventivas, diminuindo a disponibilidade da usina.

Já o caso com tempo entre manutenções de 5000 horas, quando comparado ao caso base, reduziu o tempo por paradas preventivas, porém aumentou o número de paradas por falha da usina. O resultado financeiro e a confiabilidade acumulada da usina, em relação ao caso base, ficaram bastante próximos, com pequena vantagem para o caso com maior tempo entre manutenções.

4. CONCLUSÕES

Com o objetivo de contribuir para a evolução de políticas e modelos aplicados à gestão de ativos, o presente trabalho apresentou as etapas de desenvolvimento de um Sistema Especialista para a gestão da manutenção de uma planta de geração hidráulica, considerando modelos de análise de confiabilidade e impacto financeiro.

Para tanto, foi considerado o conceito de redes markovianas para o cálculo de probabilidades de funcionamento dos equipamentos, o método série-paralelo para modelagem dos equipamentos e a obtenção de curvas de confiabilidade com distribuição Weibull para modelagem de riscos de cada equipamento.

De maneira a validar o sistema proposto, foram consideradas simulações iniciais a partir de uma planta hidráulica com uma configuração de 6 elementos em série. Inicialmente, buscou-se estabelecer um caso base para simulação e em seguida foram propostas variações de parâmetros para obtenção de outras políticas de manutenção a fim de compara-las.

Os resultados obtidos demonstraram que em relação ao caso base (3000 horas entre manutenções), um tempo menor entre manutenções (1000 horas) permitiu uma redução no tempo total de parada por falhas e gerou resultados financeiros piores, em função do aumento expressivo do número de paradas preventivas, diminuindo a disponibilidade da usina.

Por outro lado, um tempo maior entre manutenções (5000 horas), permitiu uma redução do tempo por paradas preventivas e aumentou o número de paradas por falha da usina. Neste caso, o resultado financeiro e a confiabilidade acumulada da usina, em relação ao caso base, ficaram bastante próximos, com pequena vantagem para o caso com maior tempo entre manutenções.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a ANEEL, a FGE e a Alupar pelo apoio financeiro e técnico fornecidos no âmbito do projeto de P&D ANEEL no. PD-07469-0002/2018.

REFERÊNCIAS

- Ahmad, R.; Kamaruddin, S. (2012). An overview of time-based and condition-based maintenance in industrial application. *Computers & Industrial Engineering*, v. 63, n. 1, p. 135-149.
- Assis, E. M.; Lima, G. A. C.; Prestes, A.; Marinho, F; Costa, L. A. N. (2019). *q*-Weibull Applied to Brazilian Hydropower Equipment. *IEEE Transactions on Reliability*, v. 68, n. 1, p. 122-132.
- Aven, T.; Jensen, U. (2013). *Stochastic Models in Reliability*. New York: Springer-Verlag, 2. ed..
- Brown, Kevin (2017). *Markov Models and Reliability*.
- Fan, H.; HU, C.; Chen, M.; Zhou, D. (2011). Cooperative Predictive Maintenance of Repairable Systems with Dependent Failure Modes and Resource Constraint. *IEEE Transactions on Reliability*, v. 60, n. 1, p. 144-157.
- Kaiser, K. A.; Gebraeel, N. Z. (2009). Predictive Maintenance Management Using Sensor Based Degradation Models. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans*, v. 39, n. 4, p. 840-849.
- Lafráia, J. (2001). *Manual de confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade*. Qualitymark, Rio de Janeiro.
- Pereira, F. E. L. (2008). Determinação do Intervalo de Manutenção Programada da Proteção de Linhas de Transmissão Considerando-se Penalidades Associadas à Indisponibilidade. *Tese de Doutorado*. PUC-Rio.
- Silva Neto, A. V.; Cugnasca, P. S. (2013). Utilização de Dados de Histórico na Manutenção Preditiva de Equipamentos Elétricos, Eletrônicos e Programáveis em Aplicações Metroferroviárias. In: *19ª Semana de Tecnologia Metroferroviária*. São Paulo.

- Walter, G.; Flapper, S. D. (2017). Condition-based maintenance for complex systems based on current component status and Bayesian updating of component reliability, *Reliability Engineering & System Safety*, v. 168, p. 227-239.