



GRUPO XII

ASPECTOS TÉCNICOS E GERENCIAIS DE MANUTENÇÃO EM INSTALAÇÕES ELÉTRICAS

ANÁLISE DE RISCOS DE ADIAMENTO DE MANUTENÇÃO
EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIAIony Patriota de Siqueira (*)
COMPANHIA HIDRO ELÉTRICA DO SÃO FRANCISCO

RESUMO

O adiamento de manutenções tem sido um recurso freqüente utilizado nas empresas visando aumentar a disponibilidade imediata de equipamentos. Adiar uma manutenção programada pode representar um acréscimo instantâneo de disponibilidade, mas pode também resultar em uma indisponibilidade imprevista, com impactos negativos sobre os objetivos da empresa. Este artigo revisa alguns modelos estatísticos para análise desta questão, como o diagrama de influência, a árvore de decisão e a teoria dos jogos. Para análise do risco envolvido, e seus impactos nos demais resultados da empresa, propõe-se um modelo estocástico e uma metodologia de análise baseada na teoria estatística da decisão. O modelo, além de medir as conseqüências de cada evento, serve para classificar o decisor de manutenção segundo sua propensão ao risco, em situações de conflito e incerteza nas informações.

PALAVRAS-CHAVE: Manutenção - Modelo de Decisão - Risco - Indicadores de Desempenho

1.0 INTRODUÇÃO

Em qualquer empreendimento, um dos objetivos da manutenção é reduzir os riscos do negócio. Para atingi-lo, o mantenedor precisa intervir nos equipamentos, o que, além dos custos diretos, pode ocasionar interrupções no processo, reduzindo a produção e disponibilidade dos equipamentos. Esta dicotomia caracteriza os fins conflitantes da gestão de manutenção, explicando os freqüentes adiamentos das intervenções, pelos gestores do negócio.

Se a manutenção é necessária, seu adiamento pode gerar conseqüências indesejáveis, tais como elevação do desgaste de máquinas, perda de vida útil, ou mesmo desligamentos futuros de porte. Esta possibilidade se contrapõe ao aparente ganho imediato de produção, resultante no adiamento da intervenção. Quantificar estas parcelas, e eliminar a subjetividade das decisões, constitui um dos principais desafios para o gestor de manutenção.

Nas seções seguintes, este artigo revisa inicialmente a modelagem do problema através do diagramas de influência e árvores de decisão. Em seguida, define-se uma analogia com os tradicionais duelos armados, possibilitando aplicar grande parte da teoria dos jogos ao problema. Finalmente, desenvolve-se um modelo estatístico-probabilístico, sob a ótica da teoria da decisão, adequado à quantificação dos riscos e

benefícios do adiamento de manutenção, e seus impactos em indicadores de qualidade e eficiência empresarial.

2.0 CONCEITUAÇÃO

Para os objetivos deste estudo, será útil conceituar os termos *defeito*, *falha* e *risco*, usados no restante do artigo. Os termos *defeito* e *falha* têm definições bem estabelecidas, padronizadas pela ABNT [9]. Correspondem, respectivamente, à “degradação gradual e parcial, podendo ao longo do tempo tornar-se completa”, e ao “término da capacidade de um item desempenhar a função requerida”.

O termo *risco* costuma ser definido como a perda potencial resultante de falhas. Com esta definição, o risco pode ser analisado de forma qualitativa e quantitativa. Quantitativamente, pode ser estimado pelo valor esperado das perdas futuras, para uma determinada política de manutenção:

$$[1] R = \sum P_i C_i$$

onde R = esperança de risco devido a falhas;

P_i = probabilidade de ocorrência da falha i ; e

C_i = conseqüência da falha i .

Esta expressão pode ser aplicada a um conjunto ou individualmente, para cada modo de falha de um equipamento ou processo. A conseqüência da falha C_i pode ser expressa em várias unidades de medida, em função da preferência do decisor. A probabilidade de ocorrência P_i pode ser estudada por vários modelos estatísticos, entre eles o diagrama de influência, a árvore de decisão, a teoria dos jogos e os processos markoviano [2,8].

3.0 DIAGRAMA DE INFLUÊNCIA

O problema de adiamento em Engenharia de Manutenção pode ser visualizado por um diagrama de influência ou bayesiano [10], que ilustre as relações de causalidade entre os diversos eventos. Nestes gráficos, os nós são dispostos da esquerda para direita segundo a seqüência temporal dos eventos (Figura.1). A seqüência ilustrada representa aquela mais significativa para o problema de decisão, ou a que gera maiores conseqüências, ou seja, o defeito interno no equipamento antecede uma falha total no processo. Nestes diagramas, as decisões são representadas por retângulos, os eventos aleatórios por círculos, e os resultados por losangos.

(*) Rua 15 de Março, 50, Bongi, Recife, PE, Fone +55(081)32294141, Email iony@chesf.gov.br

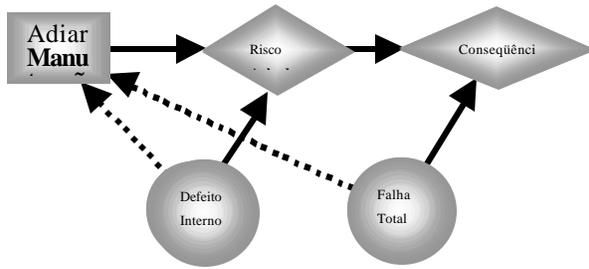


Figura.1 - Diagrama de Influência

As linhas contínuas representam dependências reais entre os resultados, decisões e eventos. Relações de causalidade são pressupostas entre estes eventos, seja de natureza física, ou decorrentes de modelos conceituais sobre a natureza. Assim, o resultado de um adiamento na manutenção será função, além da decisão de adiar, da possibilidade de ocorrência prévia de um defeito interno no sistema. Já os resultados do processo, além do produto da decisão, dependerão da possibilidade de eventos prévios de defeito ou da falha total do processo.

As linhas pontilhadas indicam a possível disponibilidade de informações a priori, sobre as ocorrências de eventos aleatórios. Caso o decisor disponha destas informações, poderá guiar suas decisões e otimizar os resultados esperados. As informações poderão ter a forma de estimativas, baseadas em observações históricas ou distribuições de probabilidade destes eventos.

4.0 ÁRVORE DE DECISÃO

Uma outra forma de visualizai o problema de adiamento da manutenção é através de uma árvore de decisão [2], onde cada nó interno representa um estágio de decisão (Figura 2). O primeiro estágio representa as opções do decisor em adiar ou não, em cada instante, a manutenção. O segundo estágio representa os possíveis estados de normalidade em que pode ser encontrado o sistema. Finalmente, o último estágio representa a situação em que o sistema pode entrar em colapso ou não. Os pontos finais, à direita do diagrama, representam as oito opções possíveis para estas três decisões. Note-se que apenas a primeira decisão está a cargo do decisor humano. As demais dependem de um estado ou evento da natureza, sobre o qual não se tem controle.

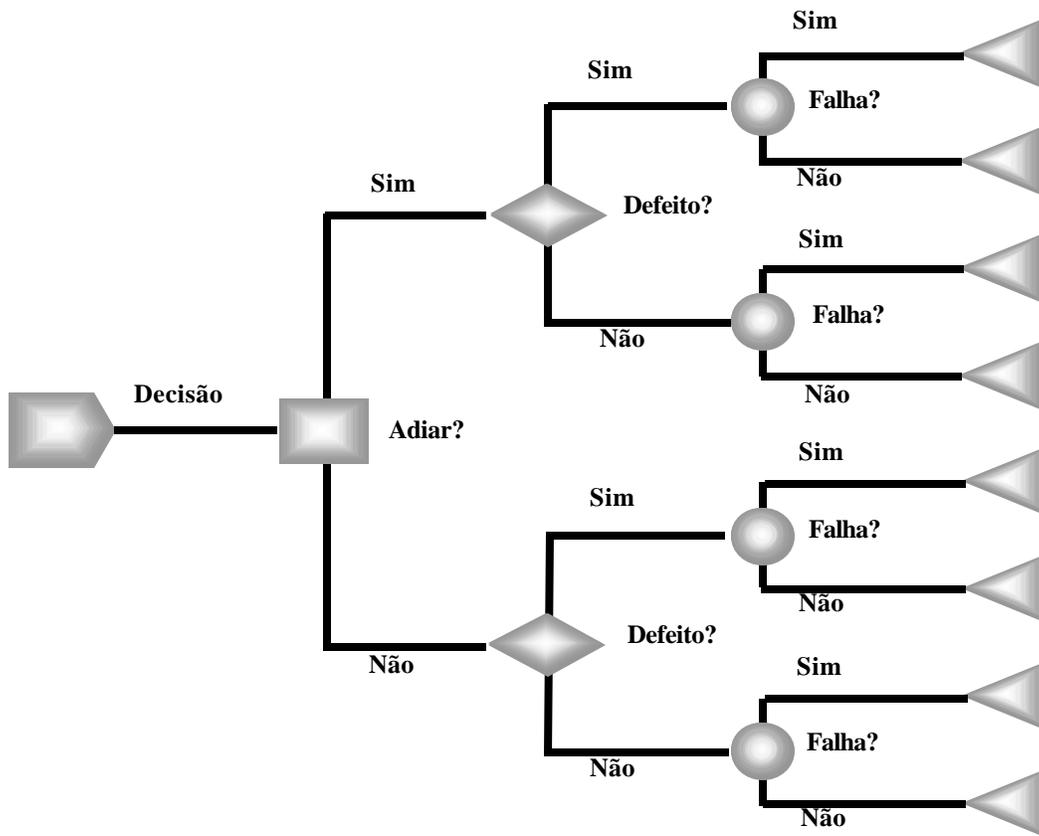


Figura 2 – Árvore de Decisão

Para aplicar esta ferramenta no apoio à decisão, é necessário calcular as probabilidades condicionais de cada um dos oito ramos finais da árvore. Estes, por sua vez, dependem da ocorrência de cada um dos estágios anteriores, até a raiz da árvore. A ausência da representação explícita da variável temporal, reduz a utilidade da árvore de decisão, o que não elimina sua utilidade como ferramenta de análise e visualização. Outras ferramentas permitem incorporar com mais naturalidade o conceito da função objetiva, necessário ao modelo de decisão.

5.0 TEORIA DOS JOGOS

A teoria dos jogos também pode ser utilizada para analisar os riscos de adiamento de manutenção. Um possível método compara esta decisão a um jogo de duelo, onde o gestor de manutenção enfrenta a natureza [11] (Figura 3). Quanto menor a distância entre os oponentes, maior a chance do gestor acertar o oponente (ou seja, encontrar e corrigir um defeito), e maior a probabilidade do oponente atirar primeiro (ou seja, o defeito indisponibilizar o equipamento).



Figura 3 – Jogos de Duelo

A distância que separa os oponentes corresponde ao tempo estimado para a próxima falha total do equipamento. O jogo consiste em se aproximar ao máximo do oponente até que se tenha maior precisão na mira. Por analogia, esta estratégia consiste em adiar ao extremo o instante da manutenção, objetivando aumentar as chances de encontrar um defeito e adiar o dispêndio, ao preço de ser penalizado por uma possível evolução do defeito para uma falha, antes da manutenção, com conseqüências maiores. A diferença principal, em relação ao duelo, é que o oponente, neste caso a natureza, não tem interesse explícito em ganhar o duelo, mas a analogia torna útil o modelo, permitindo desenvolver regras de decisão com a teoria dos jogos [11].

6.0 MODELO DE DECISÃO

Para que seja modelado quantitativamente, o problema de adiamento de manutenção pode ser visualizado como uma escolha do instante “t” em que o equipamento deve

ser mantido, inspecionado ou testado, e sua relação com os instantes em que ocorrem defeitos internos t_G , ou falhas totais, t_P . A Figura 3 a seguir ilustra a seqüência típica destes eventos ao longo do tempo, partindo do instante inicial t_0 da última manutenção.

Os instantes médios t_G e t_P , previstos para defeitos internos ou falhas, podem ser calculados a partir das densidades de probabilidades de ocorrência destes eventos, sendo dados pelo inverso da taxa de falha T_f e de defeito F_d , associados ao modo de falha [2]:

$$[1] t_G = \int \dot{\Phi}(t/G) dt = 1/T_f$$

$$[2] t_P = \int \dot{\Phi}(t/P) dt = 1/F_d$$

Nestas expressões, os intervalos de integração iniciam logo após uma manutenção no equipamento, quando se conhece com certeza seu estado. Conhecidos estes instantes, o nível de segurança do equipamento normalmente pode ser avaliado por um coeficiente de segurança v , definido por:

$$[3] v = t_G/t_P$$

ou pela margem de risco m dada por

$$[4] m = t_P - t_G$$

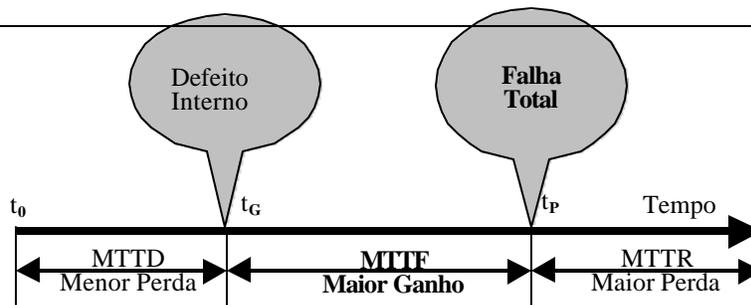


Figura 4 - Escolha do Instante da Manutenção

Uma falha será mais provável quanto menor for o coeficiente de segurança e maior a margem de risco. Esta última também estima o tempo disponível para corrigir um defeito, após detectado, antes de sua evolução para uma falha. A Tabela 1 resume os valores destes indicadores, para os equipamentos da rede elétrica da CHESF, com os dados medidos para F_d e T_f , onde se confirma a fragilidade relativa da proteção de reatores.

Para modelar a decisão, seja G o ganho de oportunidade resultante de uma decisão de manter o equipamento, e P a eventual perda de oportunidade correspondente, com probabilidades $p(G)$ e $p(P)$ respectivamente. Um deles, ambos ou nenhum, podem ocorrer em uma decisão. Se a decisão de manter ocorre antes do defeito interno, ($t < t_G$), a perda será pequena, porque não será encontrado qualquer problema. O decisor terá perdido apenas seu tempo e recursos, já que o processo não corria risco.

Se, entretanto, a decisão ocorre após o defeito interno, mas antes da falha total, ($t_G < t < t_P$), o ganho será máximo, permitindo a prevenção da falha.

Se, ao contrário, a decisão de manter só ocorre após o defeito interno e a falha, ($t > t_P$), a perda será máxima, pois a indisponibilidade do equipamento será inevitável, os danos poderão ser máximos, e a manutenção apenas corretiva.

Tabela 1 – Segurança e Margem de Risco

ITEM	COEFICIENTE	MARGEM
Linha	0,196	923 h
Transformador	0,044	6.676 h
Reator	0,002	53.473 h
Capacitor	0,048	2.128 h
Síncrono	0,011	2.038 h
Barra	0,011	22.264 h

Estes resultados, ganhos ou perdas, podem ser representados em uma matriz de risco, que relacione os instantes de ocorrência de defeitos e falhas, em relação ao instante da manutenção no equipamento. A Tabela 2 a seguir ilustra estes valores, onde RsG e RsP são os ganhos e perdas na decisão, caso a manutenção ocorra depois do defeito e da falha, respectivamente; RnG e RnP são os ganhos e perdas no processo, caso a manutenção ocorra antes do defeito ou da falha no equipamento, respectivamente. Estes valores podem ser positivos ou negativos, dependendo da unidade de medida adotada, segundo a preferência do decisor.

Tabela 2 - Matriz de Riscos

RESULTADOS		EVENTO	
		Defeito	Falha
MANUTENÇÃO	Depois	RsG	RsP
	Antes	RnG	RnP

Tais ganhos dependem de condições aleatórias, definidas pelas densidades de probabilidades condicionais de t_G , no caso do ganho G , $p(t|G)$, e a densidade de probabilidade condicional de t_P , no caso de P , $p(t|P)$, ambas representadas na Figura 5 a seguir. Se elas são deslocadas entre si, então as probabilidades cumulativas de ganhos por inspeção, $P(t|G)$, aumentarão antes que as probabilidades cumulativas de

perdas por falha do equipamento, $P(t|P)$, principalmente em modos de falha progressivos ou defeitos ocultos. O valor esperado do ganho total, $E(R)$, poderá ser obtido pela diferença entre estas duas curvas, ponderadas pelos valores de G e P . Assim, um adiamento diferencial no instante de manutenção dt , caso ocorra após uma falha ou defeito, resultará no incremento de risco dado por

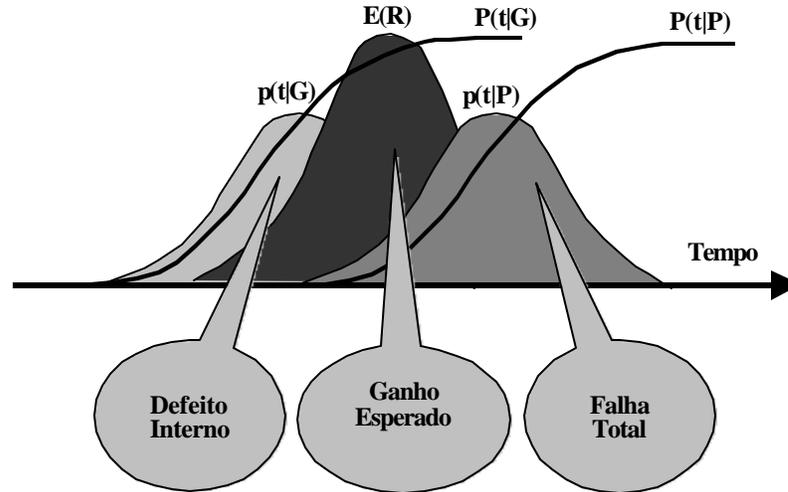


Figura 5 - Probabilidades de Ganhos e Perdas

$$[5] \quad dE(R)/dt = RsG \cdot p(G/t) + RsP \cdot p(P/t), \text{ onde}$$

$$[6] \quad p(G/t) = dP(G)/dt, \quad e \quad p(P/t) = dP(P)/dt$$

Analogamente, se o adiamento não ultrapassar o instante de uma falha ou defeito, o ganho total será reduzido da perda incremental dada por

$$[7] \quad dE(R)/dt = RnG \cdot p(G/t) + RnP \cdot p(P/t)$$

Note que estes ganhos (ou perdas) são condicionais, ou seja, eles pressupõem que o adiamento na manutenção ultrapassará (ou não) o instante de uma falha ou defeito. Como política ótima de decisão, o decisor deveria então adiar a manutenção até quando

$$[8] \quad RsG \cdot p(G/t) + RsP \cdot p(P/t) \stackrel{?}{=} RnG \cdot p(G/t) + RnP \cdot p(P/t)$$

ou exatamente quando

$$[9] \quad p(G/t)/p(P/t) = (RnP - RsP)/(RsG - RnG)$$

Usando o teorema de Bayes, conclui-se que o decisor deve adiar o instante da manutenção até quando se tiver

$$[10] \quad p(t|G)/p(t|P) \stackrel{?}{=} p(P)(RnP - RsP)/[p(G)(RsG - RnG)]$$

Note-se que o lado esquerdo da expressão acima corresponde à razão de verossimilhança $L(t)$ entre as funções de probabilidade, enquanto o lado direito é uma constante b determinada pelas probabilidades a priori $p(G)$ e $p(P)$, e os ganhos e perdas, todos conhecidos a priori.

Usualmente, as probabilidades cumulativas de ganhos e perdas, $P(t|G)$ e $P(t|P)$, podem ser calculadas supondo que as distribuições de tempo para falha e defeito seguem o modelo exponencial negativo, em ambos os fenômenos, ou seja:

$$[11] \quad P(t|G) = 1 - \exp(-\lambda_G t)$$

$$[12] \quad P(t|P) = 1 - \exp(-\lambda_P t)$$

Eliminando-se t nestas expressões tem-se:

$$[13] \quad P(t|P) = 1 - [1 - P(t|G)]^v$$

onde v é o nível de segurança do equipamento, definido na expressão (3). Este resultado pode ser ilustrado no gráfico de $P(t|G)$ e $P(t|P)$ a seguir, tendo o instante do teste t e a razão de verossimilhança como parâmetros. Este gráfico é conhecido como a Característica de Operação Relativa (ROC - *Relative Operating Characteristic*), em Teoria de Reconhecimento de Sinais e diagnósticos médicos [12].

A curva ROC mostra as chances do decisor de auferir ganhos ou perdas significantes, caso as oportunidades ocorram nos instantes de manutenção escolhidos. Sua declividade, para diferentes valores de t , é o valor da verossimilhança $L(t)$, entre as curvas de densidade de probabilidade, enquanto o ponto com declividade b determina o instante ótimo t , para os valores da tabela de riscos. A parte superior esquerda corresponde à região de maior probabilidade de ganho, enquanto a diagonal principal representa a linha de indiferença, na qual as probabilidades de perdas equivalem às probabilidades dos ganhos. O ponto b também serve para separar os decisores de acordo com sua propensão ao risco, conforme estejam abaixo (avessos ao risco), ou acima (propensos ao risco), em relação ao ponto ótimo. Os primeiros tenderão a executar manutenção com maior frequência, enquanto os segundos, preferirão adiar a manutenção. O ponto superior esquerdo da curva ROC corresponde ao ponto ideal de operação, caso não houvesse superposição das curvas de densidade de probabilidade de falha e defeitos, $p(t|G)$ e $p(t|P)$. O afastamento deste ponto cresce com a superposição destas curvas.

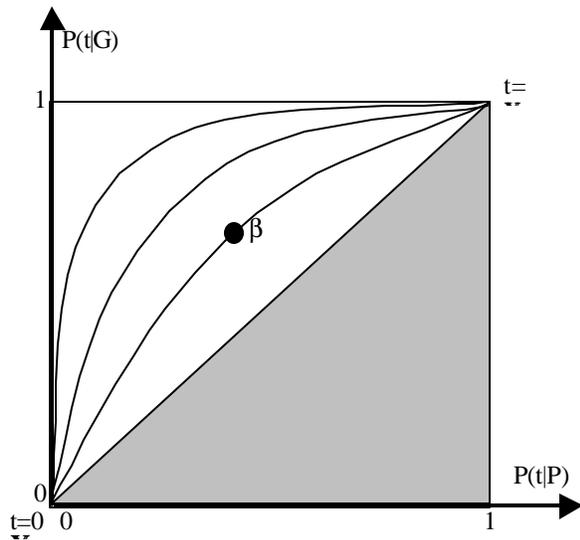


Figura 6 - Característica de Operação Relativa

As probabilidades acima podem ser fornecidas convenientemente por modelos markovianos do equipamento [5]. A curva ROC pode ser construída analiticamente, através da expressão [13], caso se conheça o coeficiente de segurança ν do equipamento ou as taxas de falha e defeito, ou empiricamente, através de um simples processo estatístico:

1. Em uma população de amostra, constroem-se os gráficos relacionando o número de itens encontrados com e sem defeito, em relação ao instante de realização da manutenção (Figura 7).
2. Para cada instante de tempo, calcula-se a probabilidade de encontrar o item normal ou anormal, pela fração da área total sob cada curva, situada à direita do instante considerado.
3. Determina-se a curva ROC relacionando, em um gráfico, as duas probabilidades encontradas.

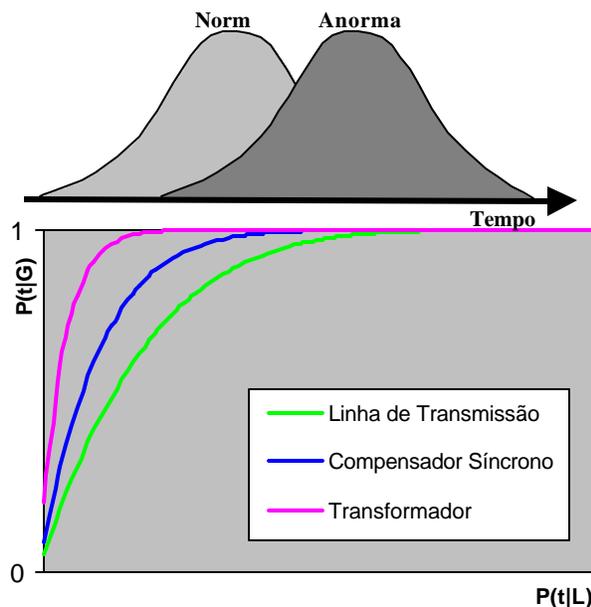


Figura 7 - Histórico de Manutenção

A Figura 7 também ilustra as curvas ROC obtidas em alguns equipamentos do sistema elétrico da Chesf, para defeitos em sistemas de controle. Note-se as diferentes concavidades, em função do tipo de equipamento.

Para estabelecer critérios ótimos de decisão, os ganhos e perdas devem ser definidos através de funções objetivas,

avaliadas sobre o processo, que traduzam as preferências dos decisores.

7.0 CRITÉRIOS DE DECISÃO

O modelo decisório acima comporta diversas preferências do gestor, traduzidas na escolha dos resultados almejados na manutenção, e na matriz de riscos. Os riscos podem ser medidos pelos impactos em vários indicadores de qualidade Q . No setor elétrico brasileiro, costuma-se avaliar os seguintes índices, alguns auditados pela agência regulatória:

<i>FIC</i>	Frequência de interrupção por consumidor;
<i>DIC</i>	Duração de interrupção por consumidor;
<i>FEC</i>	Frequência equivalente por consumidor;
<i>DEC</i>	Duração equivalente por consumidor;
<i>FEQ</i>	Frequência de desligamento do equipamento;
<i>DEQ</i>	Indisponibilidade do equipamento;
<i>LOLF</i>	Frequência média de perda de carga;
<i>LOLP</i>	Probabilidade de perda de carga;
<i>DNS</i>	Demanda média não suprida;
<i>ENS</i>	Energia média não suprida;
<i>FEKS</i>	Frequência equivalente de interrupção;
<i>DEKS</i>	Duração equivalente de interrupção;
<i>IDE</i>	Descontinuidade de energia;
<i>CVE</i>	Custo variável empresarial;
<i>CVS</i>	Custo variável social.

A definição de cada indicador encontra-se documentada em várias publicações [1]. Para o gestor de manutenção, interessa a contribuição das decisões e eventos de manutenção, nos índices de mesmo nome [6] avaliados na empresa. A tabela a seguir ilustra um exemplo de cálculo dos ganhos e perdas em cada indicador provocado por cada evento da Tabela 2. Os símbolos utilizados são descritos no Apêndice.

Tabela 3 – Fatores de Risco

Q	RnP	RnG	RsG	RsP
<i>FIC</i>	$(N_p+K_a N_a)/N_s$	$(N_p+K_a N_a)/N_s$	$(N_p+K_a N_a)/N_s$	N_e/N_s
<i>DIC</i>	$(T_p N_p+T_a K_a N_a)/N_s$	$(T_p N_p+T_a K_a N_a)/N_s$	$(T_p N_p+T_a K_a N_a)/N_s$	$T_e N_e/N_s$
<i>FEC</i>	$N_p+K_a N_a$	$N_p+K_a N_a$	$N_p+K_a N_a$	N_e
<i>DEC</i>	$T_p N_p+T_a K_a N_a$	$T_p N_p+T_a K_a N_a$	$T_p N_p+T_a K_a N_a$	$T_e N_e$
<i>FEQ</i>	$1+K_a$	$1+K_a$	$1+K_a$	1
<i>DEQ</i>	$K_a \cdot T_a+K_i \cdot T_p$	$K_a \cdot T_a+K_i \cdot T_p$	$K_a \cdot T_a+K_i \cdot T_e$	T_e
<i>LOLF</i>	$K_p+K_a \cdot K_e$	$K_p+K_a \cdot K_e$	$K_p+K_a \cdot K_e$	K_e
<i>LOLP</i>	$K_p \cdot T_p+K_a \cdot K_e \cdot T_a$	$K_p \cdot T_p+K_a \cdot K_e \cdot T_a$	$K_p \cdot T_p+K_a \cdot K_e \cdot T_a$	$K_e \cdot T_e$
<i>DNS</i>	$W_p+K_a \cdot W_a$	$W_p+K_a \cdot W_a$	$W_p+K_a \cdot W_a$	W_e
<i>ENS</i>	$(W_p+K_a \cdot W_a)T$	$(W_p+K_a \cdot W_a)T$	$(W_p+K_a \cdot W_a)T$	$W_e \cdot T$
<i>FEKS</i>	$(O_p+K_a \cdot O_a)/Q_s$	$(O_p+K_a \cdot O_a)/Q_s$	$(O_p+K_a \cdot O_a)/Q_s$	O_e/Q_s
<i>DEK</i>	$(W_p+K_a \cdot W_a)T/Q_s$	$(W_p+K_a \cdot W_a)T/Q_s$	$(W_p+K_a \cdot W_a)T/Q_s$	$W_e \cdot T/Q_s$
<i>S</i>				
<i>IDE</i>	$(W_p+K_a \cdot W_a)/Q_s$	$(W_p+K_a \cdot W_a)/Q_s$	$(W_p+K_a \cdot W_a)/Q_s$	W_e/Q_s
<i>CVE</i>	$C_1+K_a \cdot C_a$	$C_1+K_a \cdot C_a$	$C_e+K_a \cdot C_a$	C_e
<i>CVS</i>	$C_{1s}+K_a \cdot C_{as}$	$C_{1s}+K_a \cdot C_{as}$	$C_{es}+K_a \cdot C_{as}$	C_{es}

Cada entrada na tabela estima o acréscimo no indicador, provocado por cada evento da Tabela 2. Esta avaliação decorre da própria definição dos eventos e dos indicadores. Assim, por exemplo, supondo que a manutenção de determinado modo de falha, indisponibilize o equipamento, então estes eventos contribuirão com um fator de $(1+K_a)$ na linha correspondente ao indicador FEQ na tabela, onde K_a representa a taxa de accidentalidade na manutenção. Esta tabela naturalmente tem de ser particularizada para cada modo de falha, e de acordo com a tecnologia e política de manutenção adotada na empresa.

Com estes valores, uma vez definida a preferência do decisor quanto ao indicador de qualidade, e utilizando a

expressão [9], pode-se determinar o melhor instante de realização da manutenção. Gráficamente, isto corresponde a encontrar um ponto com declividade b na curva ROC, e a partir das probabilidades, identificar o instante de manutenção nas curvas de probabilidade cumulativa de cada evento.

Os riscos associados ao adiamento ou antecipação da manutenção, em relação ao instante ótimo, podem ser determinados calculando as probabilidades de ocorrência de defeitos ou falhas neste período, através das equações [11] e [12], multiplicando-as pelos fatores de risco da tabela 3, conforme o indicador de preferência do decisor.

8.0 CONCLUSÕES

Este artigo apresentou uma metodologia de análise de riscos de adiamento de manutenções no setor elétrico, baseada na teoria estatística da decisão. O método oferece uma solução analítica para o cálculo do instante ótimo de realização da manutenção, além de estimar os riscos de antecipação ou adiamento em relação a este valor.

Como alternativa ao método matemático, caso não se disponha de modelos dos mecanismos de falha, foi apresentado um método gráfico, baseado na curva ROC, com valores empíricos obtidos no histórico de desempenho dos equipamentos. Uma seqüência prática de obtenção desta curva foi apresentada, e ilustrada com resultados reais da aplicação no sistema elétrico da Chesf.

APÊNDICE

Este apêndice define a simbologia usada na Tabela 2. Cada símbolo representa uma amostragem estratificada completa, para cada tipo de equipamento da amostra, normalizada para um mesmo período. Na Chesf, alguns itens foram estimados por especialistas, quando não constavam de séries históricas. Dados topológicos foram gerados em estudos de contingência, simulando os fluxos de potência na rede elétrica, para determinar valores esperados da carga interrompida em desligamentos forçados e programados.

Um sistema de informações foi construído para gerar os seguintes parâmetros e médias estatísticas, em cada estrato de interesse, por modo de falha, tipo de equipamento, região geográfica, e nível de tensão:

C_a custo médio de um desligamento acidental;
 C_{as} custo social de um desligamento acidental;
 C_c custo médio de uma manutenção corretiva;
 C_{cs} custo social de uma manutenção corretiva;
 C_e custo médio de um desligamento forçado;
 C_{es} custo social de um desligamento forçado;
 C_t custo médio de uma manutenção preventiva;
 C_{ts} custo social de uma manutenção preventiva;
 F_e frequência de desligamentos forçados;
 K_a taxa de accidentalidade em manutenção;
 K_e fração de eqtps que cortam cargas forçadas;
 K_p fração eqtps que cortam carga em manut;
 K_t fração do tempo programado com desligamento;
 N_a clientes cortados por interrupção acidental;
 N_e clientes cortados por interrupção forçada;
 N_p clientes cortados por interrupção programada;
 N_s clientes atendidos por equipamento;
 Q_a carga cortada em um desligamento acidental;
 Q_e carga cortada em um desligamento forçado;
 Q_p carga cortada em desligamento programado;
 Q_s carga média suprida por equipamento;
 T período de observação da amostra;
 T_a tempo médio de interrupção acidental;
 T_e tempo médio de interrupção forçada;
 T_p tempo médio de interrupção programada;
 W_a energia cortada em um desligamento acidental;
 W_e energia cortada em um desligamento forçado;
 W_p energia cortada em desligamento programado;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) SIQUEIRA, I.P., *Fiabilité des Appareillages de Protection et son Impact sur les Performances des Réseaux*, Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques, CIGRÉ, Paris, 1996.
- (2) SIQUEIRA, I.P., *Processos de Decisão Markovianos em Sistemas de Segurança e Proteção*, Tese de Mestrado em Engenharia de Produção, UFPE, Recife, 1999.
- (3) SIQUEIRA, I.P., *Impact of Protective Apparatus and Maintenance Scheduling on Power System Performance*, 4th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems, Rio de Janeiro, ELETROBRAS, 1994.
- (4) LYONNET, P., *Optimisation d'une Politique de Maintenance*, Technique & Documentation, Paris, 1993
- (5) SIQUEIRA, I.P., *Impactos da Manutenção na Disponibilidade e Performance de Sistemas Elétricos de Potência*, XVI Seminário Nacional de Geração e Transmissão de Energia Elétrica, CIGRÉ, SP, 2001.
- (6) SMITH, A.M., VASUDEVAN, R.V., MATTESON, T.D., GAERTNER, J.P. *Enhancing Plant Preventive Maintenance Via RCM*, IEEE 1986 Annual Reliability and Maintainability Symposium, Las Vegas, Nevada, USA, 1986
- (7) Moubray, J., *Reliability-Centered Maintenance*, Butterworth-Heinemann, London, 1994.
- (8) NORRIS, J.R., *Markov Chains*, Cambridge University Press, Cambridge, 1997.
- (9) ABNT, NBR5462, *Confiabilidade-Terminologia*, Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo
- (10) JENSEN, F.V., *An Introduction to Bayesian Networks*, Springer, New York, 1996
- (11) DRESHER, M., *The Mathematics of Games of Strategy*, Dover, New York, 1961
- (12) MELSA, J.L., COHN, D.L., *Decision and Estimation Theory*, McGraw-Hill, Tokyo, 1978