



**SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

Versão 1.0
XXX.YY
19 a 24 Outubro de 2003
Uberlândia - Minas Gerais

**GRUPO XII
GRUPO DE ESTUDO DE ASPECTOS TÉCNICOS E GERENCIAIS DE MANUTENÇÃO EM INSTALAÇÕES
ELÉTRICAS – GMI**

OTIMIZAÇÃO DA FREQUÊNCIA DA MANUTENÇÃO CENTRADA NA CONFIABILIDADE

**Iony Patriota de Siqueira*
CHESF**

RESUMO

Este trabalho propõe uma metodologia de otimização dos intervalos entre as atividades de manutenção recomendadas na Manutenção Centrada na Confiabilidade (MCC). A primeira parte resume a metodologia MCC, propondo um modelo probabilístico para otimização da periodicidade das atividades. Cada tipo de atividade e modo de falha pode ser simulado através da conveniente parametrização do modelo. Utilizando um conjunto de indicadores de qualidade e produtividade empresariais, monta-se um modelo de otimização matemática padronizado, cuja solução analítica fornece a frequência ótima de manutenção para todas as atividades da MCC. O Apêndice relaciona a simbologia utilizada no trabalho.

PALAVRAS-CHAVE

Manutenção Centrada na Confiabilidade. Otimização da Periodicidade.

1.0 - INTRODUÇÃO

Entre as metodologias contemporâneas de manutenção, a Manutenção Centrada na Confiabilidade (MCC) (7) destaca-se por priorizar o atendimento a estritos critérios de segurança e preservação do meio-ambiente, buscando simultaneamente assegurar sua atratividade econômica. Métodos qualitativos para escolha das atividades de manutenção são bastante sistematizados na MCC, havendo entretanto muito empirismo quando da escolha da frequência de execução.

Este informe propõe um método probabilístico de otimização, adequado à definição da periodicidade ideal de cada atividade. Para isto, a seção 2 revisa a metodologia de Manutenção Centrada na Confiabilidade, propondo, na seção 3, Modelagem, um modelo estatístico probabilístico, adequado aos estudos de otimização da periodicidade das atividades propostas e seus impactos nos resultados empresariais. Uma série de parâmetros característicos de cada população de equipamentos será definida e avaliada no modelo. Finalmente, na seção 4, Otimização, um conjunto de indicadores de qualidade e produtividade será definido e correlacionado com indicadores industriais. Cada indicador poderá ser utilizado como função objetiva em um modelo de otimização matemática padronizado, como suporte à decisão no planejamento da manutenção. O Apêndice relaciona a simbologia utilizada no artigo.

2.0 - METODOLOGIA DE MANUTENÇÃO CENTRADA NA CONFIABILIDADE

A Manutenção Centrada na Confiabilidade (MCC) constitui-se em uma metodologia de identificação de necessidades de manutenção em processos físicos ou industriais (6,7). Originária da indústria aeronáutica na década de 70, a MCC, após adoção pela indústria bélica americana, estendeu-se às áreas nuclear e de energia, atingindo hoje praticamente todos os setores da indústria moderna. Além de recomendar atividades preventivas, a MCC define um modelo consistente para associar cada atividade ao modo de falha subjacente. O processo utilizado consiste na resposta a um conjunto estruturado de questões que identificam, seqüencialmente, os seguintes aspectos do equipamento:

* Rua 15 de Março, 50 – Bongí - CEP XXXXX-XXX - Recife - PE - BRASIL
Tel.: (081) 3229-4141 - Fax: (081) 3299-4099 - E-MAIL: iony@chesf.gov.br

- **Funções principais** – o que o usuário espera;
- **Falhas funcionais** – perdas de funcionalidade;
- **Modos de falhas** – eventos causadores das falhas;
- **Efeitos das falhas** – desdobramento das falhas;
- **Conseqüências das falhas** – impactos resultantes.

Com base nas conseqüências das falhas (no ambiente, segurança, operação e a economia do processo), a metodologia propõe, através de uma lógica estruturada, as tarefas mais aplicáveis e efetivas para combater cada modo de falha, entre as seguintes opções:

- **Serviço Operacional** – suprir, lubrificar, limpar;
- **Inspeção Preditiva** – detectar falhas potenciais;
- **Inspeção Funcional** – localizar falhas ocultas;
- **Restauração Preventiva** – recuperar antes da falha;
- **Substituição Preventiva** – substituir antes da falha;
- **Reparo** – recuperar ou substituir após a falha.

Na impossibilidade técnica-econômica de uma ou mais destas atividades, a MCC recomenda operar até que a falha ocorra e reparar, ou, em casos de ameaça à segurança ou ao meio-ambiente, realizar uma revisão do projeto.

3.0 - MODELAGEM

O desenvolvimento de um modelo matemático que represente a Manutenção Centrada na Confiabilidade deve priorizar a representação dos conceitos de falha potencial e falha funcional, dominantes na metodologia MCC. O primeiro, como evento detectável de início da degradação funcional, corresponde aproximadamente ao conceito de defeito adotado pela ABNT (9), enquanto o segundo corresponde ao conceito de falha (“termino da capacidade de um item desempenhar a função requerida”). Estes estados podem ser melhor visualizados através da curva de degradação da resistência a falhas, ilustrada na Figura a seguir, onde são identificadas as três condições típicas de um modo de falha:

- **Normal** – Antes da Falha Potencial
- **Defeito** – Entre a Falha Potencial e a Funcional
- **Falha** – Após a Falha Funcional.



Figura 1 – Curva de Resistência a Falha

Além destas condições, o equipamento pode se encontrar em manutenção preventiva ou corretiva, segundo a classificação da MCC. Desta forma, pode-se conceituar, a priori, os seguintes estados mais

prováveis de um equipamento:

1. **Normal** - apto a exercer sua função;
2. **Preventivo** - em manutenção preventiva;
3. **Falha** – indisponível, após uma falha funcional;
4. **Defeito** - disponível, mas com falha potencial;
5. **Corretivo** – em manutenção, após falha potencial.

Pode-se listar, a priori, os seguintes eventos que mudam o estado do equipamento:

- **Preventiva**: inspeção ou manutenção programada;
- **Corretiva**: programada para corrigir falha potencial;
- **Reparo**: forçada para corrigir falha funcional;
- **Defeito**: degradação parcial do funcionamento;
- **Falha**: interrupção forçada do funcionamento.

Estes eventos disparam as transições entre os estados do modelo, conforme ilustrado na figura 2.

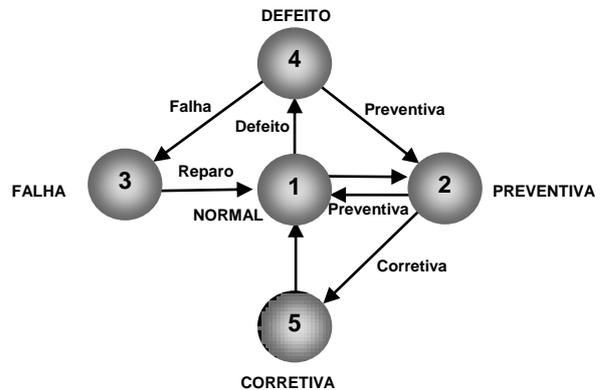


Figura 2 – Modelo de Estados

A Tabela 1 resume as interpretações de cada um destes estados, para cada uma das atividades padronizadas da MCC.

Estabelecido o modelo, pode-se utilizar as equações clássicas de Chapman-Kolmogorov (2,8), para quantificar as probabilidades de cada estado, com a numeração indicada:

$$dP_i/dt = \sum_j (P_j \lambda_{ji}) - P_i \sum_j \lambda_{ij} \quad [1]$$

onde P_i = probabilidade do estado i ; e λ_{ij} = taxa de transição entre os estados i e j .

Para que os modelos sejam utilizados, é necessário determinar os valores dos parâmetros, especialmente as taxas de falha e defeito. O método adotado depende diretamente do tipo de atividade da MCC.

Nas Atividades Operacionais, os parâmetros principais correspondem às taxas de consumo de materiais, para atividades de ressurgimento de consumíveis, ou como atividades preditivas ou preventivas, quando o modo de falha for adequado a este tipo de atividade. Nas Inspeções Preditivas, a parametrização se dará pelos limites de detecção e taxas de falhas potenciais e funcionais. Ou seja, os parâmetros adotados serão função dos limites estabelecidos para caracterização dos estados de falha potencial e funcional. Nas

Inspecões Funcionais os parâmetros dos modelos serão dados pelas taxas de falhas de dispositivos ocultos e pelas taxas de falhas funcionais dos dispositivos protegidos, ou dos eventos que provocam falhas múltiplas. Finalmente, nas Restaurações e

Substituições Preventivas, os parâmetros serão definidos pelos limites de detecção de desgaste, vida segura ou vida econômica, e taxas de falhas potenciais e funcionais dos componentes.

Tabela 1 – Correlação entre Estados e Atividades

ESTADO→ ATIVIDADE↓	NORMAL	PREVENTIVO	REPARO	DEFEITO	CORRETIVO
Serviço Operacional	Nível inicial ou adequado do consumível	Ressuprimento do consumível	Correção de falha por falta de consumível	Consumível abaixo do nível de reposição	Não aplicável
Inspecão Preditiva	Desempenho adequado da função	Medição do nível de desempenho funcional	Correção do defeito após falha funcional	Degradação excede nível p/ falha potencial	Correção da degradação da falha potencial
Restauração Preventiva	Desempenho adequado da função	Recuperação antes do final da vida útil	Correção após falha no final da vida útil	Degradação excede nível de restauração	Não aplicável
Substituição Preventiva	Desempenho adequado da função	Substituição antes do final da vida útil	Correção após falha no final da vida útil	Degradação excede nível de substituição	Não aplicável
Inspecão Funcional	Desempenho adequado, sem falhas ocultas	Realização de ensaio funcional	Correção após falha oculta e outro evento	Falha funcional de uma função oculta	Correção de falha oculta após ensaio
Manutenção Corretiva	Desempenho adequado da função	Não aplicável	Correção após falha funcional aleatória	Não aplicável	Não aplicável

Os dois parâmetros que definem o comportamento do equipamento são traduzidos pelas taxas de defeito e falha generalizadas, assim definidas:

- **Taxa de Defeito** - Densidade de probabilidade de defeito ou falha potencial no intervalo dt, condicionada à ausência de defeito até o instante t.
- **Taxa de Falha** - Densidade de probabilidade de falha funcional no intervalo dt, condicionada à ausência de falha até o instante t e presença de defeito ou falha potencial no instante 0.

A identificação destes parâmetros em cada população de equipamentos é uma atividade complexa nos sistemas industriais modernos, já que grande parte dos defeitos internos é invisível ou progressiva, não revelando os instantes exatos em que ocorrem. Em conseqüência, as taxas de falha funcional ($\lambda_f = \lambda_{43}$), e falha potencial ($\lambda_d = \lambda_{14}$), principais parâmetros do processo, poderão ser deduzidas de outras variáveis observáveis, utilizando o modelo. As variáveis observáveis são ocorrências e durações de eventos visíveis, tais como a:

- freqüência de indisponibilidade forçada ($F_i = F_{43}$),
- freqüência de manutenção preventiva (F_p),
- freqüência de manutenção corretiva ($F_c = 1/T_{42}$),
- tempo médio de manutenção preventiva ($MTTM = T_2$),
- tempo médio de reparo ($MTTR = T_3$), e
- tempo médio de manutenção corretiva ($MTTC = T_5$).

Para um conjunto de equipamentos, estes parâmetros resultam da contribuição ponderada de cada exemplar, conforme sua quantidade no sistema, sendo obtidos por estatísticas e médias amostrais na população. A parametrização final pode ser obtida medindo ou

estimando os dados observáveis no histórico de cada equipamento, em uma janela de tempo na qual foi mantida constante a freqüência e política de manutenção, por um intervalo suficiente para resolver a equação 1 em estado permanente, obtendo-se a taxa de falha funcional ($\lambda_f = \lambda_{43}$) e potencial ($\lambda_d = \lambda_{14}$), para cada modo de falha, conforme detalhado na referência (2):

$$\lambda_f = \frac{F_f F_t}{F_c} = \frac{1}{MTTF} \quad [2]$$

$$\lambda_d = \frac{F_t(F_c + F_t)}{F_t - F_t^2 T_t - F_t F_f T_r - F_c - F_t F_c T_c} = \frac{1}{MTD} \quad [3]$$

Estes são dados característicos de cada equipamento e ambiente operacional, e específicos para cada modo de falha. O tempo médio para defeito ($MTTD$) estima o período de funcionamento do equipamento, sem manutenção preventiva, até a contaminação gradual por um defeito latente, que poderá resultar numa indisponibilidade forçada. O tempo médio para falha ($MTTF$), define o intervalo entre a contaminação e sua evolução para uma indisponibilidade; corresponde ao período de incubação do defeito, antes de se transformar em falha.

4.0 - OTIMIZAÇÃO

Otimizar a manutenção consiste em se determinar valores de periodicidade (T_{21}) e outros parâmetros, tais como os Tempos Médio de Manutenção ($MTTM, MTTC$) e Reparo ($MTTR$), que maximizam ou minimizam uma função objetiva. Além disso, as variáveis controladas ou de controle devem obedecer a

restrições, tais como viabilidades físicas, disponibilidades de recursos ou requisitos de segurança. Sendo os valores de $MTTM$, $MTTC$ e $MTTR$ limitados pelas tecnologias disponíveis, e supondo que já sejam mínimos para a empresa, a otimização se dará principalmente através da periodicidade da manutenção. A função objetiva deverá refletir o resultado final perseguido, tais como o nível de risco e segurança do processo, ou a qualidade do serviço prestado.

A qualidade de um processo estocástico pode ser avaliada por um indicador escalar que calcule o benefício/desperdício das transições de estado do sistema. Cada transição pode ser ponderada por um coeficiente de retorno (K_{ij}) que traduza o ganho/perda do processo na passagem por cada estado da manutenção, ou seja:

$$I = K_p F_p + K_r F_r + K_c F_c \quad [4]$$

Onde K_p = coeficiente de retorno da preventiva;
 K_c = coeficiente de retorno da corretiva;
 K_r = coeficiente de retorno do reparo;
 F_p = frequência de manutenção preventiva;
 F_c = frequência de manutenção corretiva;
 F_r = frequência de reparo;

A generalidade desta expressão permite aplicá-la a muitos indicadores utilizados na indústria (6). Entre estes, os seguintes índices são exemplificados, com os coeficientes listados na Tabela 2 e no Apêndice.

- **FIE** Frequência de indisponibilidade;
- **DIE** Duração da indisponibilidade do equipamento;
- **FPP** Frequência média de perda de produção;
- **PPP** Probabilidade de perda de produção;
- **DNS** Demanda média não suprida;
- **PNS** Produção média não suprida;
- **FEI** Frequência equivalente de interrupção;
- **DEI** Duração equivalente de interrupção;
- **IDP** Índice de descontinuidade de produção;
- **CVE** Custo variável empresarial;
- **CVC** Custo variável do cliente.

Tabela 2 – Coeficientes de Retorno

I	PREVENTIVA (K_p)	REPARO (K_r)	CORRETIVA (K_c)
FIE	$1+K_a$	$1+K_a$	$1+K_a$
DIE	$K_a T_a + K_r T_r$	$K_a T_a + K_r T_r$	$K_a T_a + K_r T_r$
FPP	$K_{pr} + K_a K_e$	$K_e + K_a K_e$	$K_{pr} + K_a K_e$
PPP	$K_{pr} T_p + K_a K_e T_a$	$K_e T_e + K_a K_e T_e$	$K_{pr} T_c + K_a K_e T_a$
DNS	$W_p + K_a W_a$	$W_e + K_a W_a$	$W_c + K_a W_a$
PNS	$(W_p + K_a W_a) T$	$(W_e + K_a W_a) T$	$(W_c + K_a W_a) T$
FEI	$(Q_p + K_a Q_a) / Q_s$	$(Q_e + K_a Q_a) / Q_s$	$(Q_c + K_a Q_a) / Q_s$
DEI	$(W_p + K_a W_a) T / Q_s$	$(W_e + K_a W_a) T / Q_s$	$(W_c + K_a W_a) T / Q_s$
IDP	$(W_p + K_a W_a) / Q_s$	$(W_e + K_a W_a) / Q_s$	$(W_c + K_a W_a) / Q_s$
CVE	$C_r + K_a C_a$	$C_e + K_a C_a$	$C_c + K_a C_a$
CVC	$C_{rs} + K_a C_{as}$	$C_{es} + K_a C_{as}$	$C_{cs} + K_a C_{as}$

Cada indicador representa a contribuição da classe do equipamento nos índices de mesmo nome avaliados na empresa, onde apenas os eventos de manutenção são incluídos. Cada célula na tabela representa a contribuição da transição correspondente no indicador. Definições destes índices podem ser consultadas na referência (6).

A frequência de manutenção ideal, que otimiza qualquer um dos indicadores acima como função objetiva, pode ser obtida expandindo as frequências F_p , F_c e F_r , na expressão [4], a partir das equações do modelo, em estado permanente. Isto permite montar o seguinte sistema de programação não-linear, em forma canônica (4):

Minimizar a função objetiva:

$$I = A F_p + \frac{D(B - F_p)}{C + F_p} + \frac{E(B - F_p) F_p}{C + F_p} \quad [5]$$

sujeito à restrição:

$$\frac{1}{MTTM} \geq F_p \geq 0 \quad [6]$$

onde A , B , C , D e E são parâmetros positivos:

$$A = K_p \quad [7]$$

$$B = \frac{1}{MTTM} \quad [8]$$

$$C = \lambda_d + MTTR \lambda_d \lambda_f + \frac{\lambda_f}{1 + \lambda_d MTTC} \quad [9]$$

$$D = K_r MTTR \lambda_d \lambda_f (1 + \lambda_d MTTC) \quad [10]$$

Nas expressões anteriores, os valores de λ_d e λ_f são funções, respectivamente, das tecnologias utilizadas no equipamento e no ambiente de produção. Os valores de $MTTM$, $MTTC$ e $MTTR$ são indicadores de manutenibilidade, e decorrem das tecnologias de manutenção e reparo disponíveis. O único parâmetro controlável será a frequência de manutenção, a qual poderá ser nula, caso a manutenção se limite a ações de reparo, ou ser diferente de zero, caso se adote a Inspeção Preditiva, Inspeção Funcional, a Restauração ou Substituição Preventivas da MCC. O limite inferior e superior para F_p ($(1/MTTM) \leq F_p \leq 0$), referem-se à viabilidade física, já que a frequência de manutenção não pode ser negativa nem superior ao inverso do tempo médio de manutenção. A figura a seguir ilustra a forma típica destas expressões, em função destes parâmetros, e da frequência de manutenção.

Note-se que a região positiva da curva do indicador I é composta de três parcelas. A primeira, $(A.F_p)$, cresce com o aumento da frequência de manutenção, ponderando o ônus da atividade no objetivo desejado. A segunda, $[D(B-F_p)/(C+F_p)]$ decresce com a frequência de manutenção, ponderando os benefícios da manutenção corretiva. A terceira, $[E(B-F_p)F_p/(C+F_p)]$, pondera os efeitos do reparo no indicador. Esta composição é encontrada tipicamente em problemas de otimização, gerando um valor ótimo no ponto de equilíbrio das parcelas. A figura evidencia também a forma como os três parâmetros controlados pelo decisor ($MTTR$, $MTTM$ e F_p) afetam o indicador de qualidade. Quanto maior $MTTR$, maior o valor de D , e a frequência que minimiza o indicador. O mesmo se aplica a $MTTM$ e o parâmetro B .

energia foi testada e acompanhada por seminários onde os gerentes de manutenção analisaram os resultados descritos e outras simulações de interesse, como suporte do processo decisório.

A disponibilidade de um modelo permite obter-se ganhos adicionais na gestão da manutenção. Na modelagem regional, por exemplo, além das condições ambientais, pode-se comparar (a) o desempenho das equipes de manutenção, pelos tempos de manutenção corretiva, reparo e taxas de acidentalidade; (b) a eficiência operacional, através dos tempos de retomada da produção; (c) as deficiências da rede, pelas perdas de produção; e (d) os custos marginais da manutenção e lucros cessantes. O desempenho de famílias de equipamentos pode ser analisado na modelagem por classe de equipamento, comparando os indicadores com padrões de eficiência estabelecidos no setor industrial. A estrutura uniforme do modelo, independente da classe do equipamento modelado ou modo de falha, facilita o intercâmbio de experiências entre equipes, e a adoção de políticas uniformes pela empresa.

APÊNDICE

Este apêndice relaciona os símbolos e dados usados na Tabela 2, não definidos no texto. Relativos a cada equipamento da empresa e normalizados para um mesmo período, representam uma amostragem estratificada completa, do tipo proporcional. Na ausência de dados históricos, alguns itens podem ser estimados por especialistas. Dados topológicos podem ser gerados em estudos de contingência, simulando os fluxos na rede de transmissão, para determinar a produção interrompida em indisponibilidades forçada e programada de cada equipamento.

Com o período de observação T , preço unitário do produto e o custo (de oportunidade) do mercado por unidade de produção não atendida, um sistema de informações pode gerar as seguintes estatísticas, em cada estrato de amostragem, por modo de falha:

C_a	custo médio de uma indisponibilidade acidental;
C_{as}	custo médio de uma indisponibilidade acidental do cliente;
C_c	custo médio de uma manutenção corretiva;
C_{cs}	custo médio de uma manutenção corretiva para o cliente;
C_e	custo médio de uma interrupção forçada;
C_{es}	custo médio de uma interrupção forçada para o cliente;
C_t	custo médio de uma manutenção preventiva;
C_{ts}	custo médio de uma manutenção preventiva para o cliente;
F_e	freqüência de indisponibilidades forçadas;
K_a	taxa de acidentalidade em manutenção;
K_e	fração de equipamentos que afetam a produção forçados;
K_{pr}	fração equipamentos que afetam a produção na manutenção;
K_t	fração do tempo programado com indisponibilidade;
Q_a	fluxo de produção suspensa em um desligamento acidental;

Q_e	fluxo de produção suspensa em um desligamento forçado;
Q_p	fluxo de produção suspensa em indisponibilidade preventiva;
Q_c	fluxo de produção suspensa em indisponibilidade corretiva;
Q_s	fluxo de produção média suprida por equipamento;
T_a	tempo médio de interrupção acidental na produção;
T_e	tempo médio de interrupção forçada na produção;
T_p	tempo médio de interrupção preventiva na produção;
T_c	tempo médio de interrupção corretiva na produção;
W_a	produção interrompida em um desligamento acidental
W_e	produção interrompida em um desligamento forçado;
W_p	produção interrompida em desligamento preventivo;
W_c	produção interrompida em desligamento corretivo;

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) SIQUEIRA, I.P., *Fiabilité des Appareillages de Protection et son Impact sur lês 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., *Análise de Riscos de Adiamento de Manutenção em Sistemas Elétricos de Potência*, XVI Seminário Nacional de Geração e Transmissão de Energia Elétrica, CIGRÉ, SP, 2001.
- (6) ALMEIDA, A.T., SOUZA, F.M.C., Org., *Gestão da Manutenção – Na Direção da Competitividade*, ISBN 85-7315-273-7, Instituto de Desenvolvimento da Engenharia de Produção – Recife, PE, 2001
- (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, 1981.