



XVIII Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica

SENDI 2008 - 06 a 10 de outubro

Olinda - Pernambuco - Brasil

Sistema Inteligente para Apoio à Gestão da Manutenção em Equipamentos da Rede Elétrica

P.J. Adeodato	G.C. Vasconcelos	A.L. Arnaud
Centro de Informática – UFPE	Centro de Informática – UFPE	NeuroTech
NeuroTech	NeuroTech	
paulo@neurotech.com.br	germano@neurotech.com.br	adrian@neurotech.com.br
R.A. Monteiro Batista	R.J. Fragoso de Sousa	J.M. de Souza Melo
NeuroTech	Companhia Energética de Pernambuco - CELPE	Companhia Energética de Pernambuco - CELPE
rossini@neurotech.com.br	rogeriofragoso@CELPE.com.br	jmarios@CELPE.com.br

Palavras-chave

Ciclo ótimo para manutenção preventiva

Manutenção corretiva

Manutenção preventiva

Mineração de dados

Taxa de falhas

Resumo

Este trabalho apresenta um ambiente computacional baseado em mineração de dados para apoio à decisão na gestão da manutenção de equipamentos da rede elétrica. Uma base histórica de manutenções realizadas na CELPE foi utilizada para extração de conhecimento sobre o funcionamento dos equipamentos de modo a construir uma solução para determinação do ciclo ótimo de manutenção preventiva para famílias de equipamentos. A distribuição do tempo entre falhas consecutivas foi analisada e os parâmetros foram estimados supondo as clássicas distribuições teóricas, exponencial e de Weibull. Depois de validada a hipótese de aderência pelo método do Qui-Quadrado, a distribuição analítica foi utilizada para definir o ponto ótimo de operação com base na relação de custos entre manutenções corretivas e preventivas. Os resultados mostraram que a política de manutenção praticada anteriormente, para algumas famílias de equipamentos, é consistente com a periodicidade ótima calculada pelo método. Contudo, o método também indicou que ajustes precisavam ser realizados no plano de manutenção de algumas outras famílias de equipamentos, para reduzir os custos de manutenção, com base nos resultados apresentados pela solução desenvolvida.

1. Introdução

A melhoria da qualidade do fornecimento de energia tem sido uma das principais exigências do governo brasileiro em relação às empresas que operam no setor elétrico. Da sua parte, as empresas precisam atender às demandas técnicas com o menor custo possível e um dos investimentos importantes nesse sentido é a otimização do plano de manutenção da empresa. O objetivo é minimizar a frequência de manutenção preventiva que permita aos equipamentos operarem em perfeito estado,

reduzindo os riscos de intervenções corretivas mais caras e não planejadas, no futuro.

Nas suas atividades operacionais envolvidas no problema de manutenção de redes elétricas, as empresas concessionárias têm investido na pesquisa de novas tecnologias e métodos com o intuito de melhorar a qualidade dos serviços de distribuição elétrica, reduzindo assim as multas impostas pelas agências controladoras, as reclamações de danos a partir dos consumidores, os gastos com manutenção corretiva e os elevados custos na compra e operação de equipamentos [1] [2] [3] [4]. No que diz respeito à manutenção de equipamentos, as técnicas tradicionais usadas são as manutenções corretivas e preventivas.

A manutenção corretiva é uma atuação efetuada após a ocorrência de uma falha, destinada a colocar um item ou equipamento em um estado no qual pode executar sua função de forma adequada. Enquanto a manutenção preventiva é uma manutenção efetuada a intervalos pré-determinados conforme critérios prescritos, destinada a reduzir a probabilidade de falhas ou a degradação do desempenho de um item. Outra forma de abordar o problema é através da chamada manutenção preditiva que permite reajustar previsões das operações de manutenção a efetuar, estimando-se a tendência evolutiva do funcionamento não adequado do equipamento e o tempo durante o qual é possível continuar a utilizá-lo antes da possível avaria.

Normalmente, o estado dos equipamentos tem sido avaliado através de ensaios, nos quais instrumentações analógicas e, mais recentemente, digitais são utilizadas. Vários destes instrumentos possibilitam a obtenção de informações importantes, mas por outro lado em quantidade limitada. Outros, em contrapartida, fornecem uma massa maior de dados num curto espaço de tempo. Ambos têm em comum o fato de necessitarem de técnicos experientes para interpretar os resultados. Isto se deve a aspectos subjetivos dos métodos de medições empregados, sendo também causado pela própria natureza estocástica de alguns fenômenos medidos [5].

Com os avanços tecnológicos na área de computação, os requisitos dos serviços de fornecimento de energia tornaram-se cada vez mais rigorosos. Porém, existe ainda uma grande defasagem entre a tecnologia desenvolvida nas universidades e aquela utilizada nas empresas do setor elétrico. Esta situação existe também no caso particular da área de proteção elétrica e de gestão dos sistemas de manutenção. As técnicas de mineração de dados e estatística existentes atualmente permitem avanços significativos nos processos de tomada de decisão em problemas complexos envolvendo um grande número de variáveis [6][7].

Neste trabalho, é descrita uma abordagem baseada em mineração de dados e estatística para definição do ciclo ótimo da manutenção preventiva de equipamentos da rede elétrica, em função dos dados das falhas e manutenções realizadas na Companhia Energética de Pernambuco (CELPE). A Seção 2 apresenta a infra-estrutura de informação disponível para extração dos registros de manutenção. A Seção 3 descreve os dados históricos extraídos e analisa sua consistência. A Seção 4 descreve as técnicas aplicadas e a Seção 5 apresenta os resultados obtidos. Finalmente, a Seção 6 apresenta as conclusões.

2. Infra-estrutura de Informação e Fontes de Dados

Dentre os diversos sistemas relacionados com o controle da manutenção na CELPE, o principal é a ferramenta EquipMaint [8], que possui como principal usuário a Unidade de Manutenção da Automação e Proteção (EAMA). O EquipMaint é um sistema com base de dados Oracle utilizado para registro e gerenciamento das atividades operacionais de manutenção dos equipamentos instalados. Dentre outras informações, contêm cadastros dos componentes da equipe de manutenção, registros de equipamentos instalados, requisitos de serviços e das ordens de serviço executadas. Mais detalhadamente, as informações contidas no EquipMaint compreendem:

- Uma base de dados (Oracle) com informações sobre equipamentos mantidos, requisições e ordens de serviços, procedimentos e recursos (humanos e materiais) em cada ação de manutenção;

- Funções para apropriação de custos (embora na CELPE, a apropriação de custos seja realizada exclusivamente pelo sistema SAP);
- Campos e informações sobre número serial, localização física, data de instalação, início de funcionamento, identificação do fornecedor e especificações técnicas dos equipamentos;
- Alterações de campos críticos que fazem parte do registro histórico de equipamentos;
- Informações de hierarquia sobre o equipamento compostas de especificação, família e especialidade.
- Informações de técnicos alocados, materiais e ferramentas utilizadas, tipo e prioridade das tarefas e registro de tempos utilizados para deslocamento das equipes (não utilizado com muita frequência);
- Informações de requisições de serviço, que podem ser executadas por uma ou mais equipes de manutenção e pode ser executada em horas ou em dias.

3. Descrição dos Dados e Análise de Consistência

Após estudo da estrutura da base de dados manipulada pelo EquipMaint, as seguintes Tabelas foram identificadas como as mais relevantes para extração de dados:

- ✓ Tabela de Cadastro de Equipamentos;
- ✓ Tabela de Registro de Requisições de Serviço;
- ✓ Tabela de Registro de Ordens de Serviço Executadas.

A Tabela de cadastro de equipamentos é composta por 37 campos e contém 13.674 registros entre dezembro de 1978 e setembro de 2006. A Tabela de registros de requisições contém 49 campos e é composta por 30.086 registros entre março de 2002 e junho de 2006. Já a Tabela de registros de ordens de serviço executados contém 44 campos e é composta por 39.453 registros entre janeiro de 2001 e setembro de 2006.

Com o intuito de verificar a integridade do relacionamento dos registros entre estas Tabelas, um diagrama de Venn foi construído exibindo as quantidades de registros em comum encontrados. O cruzamento entre os registros das Tabelas foi realizado utilizando o identificador único dos equipamentos como campo chave em comum entre as três Tabelas. O diagrama resultante pode ser conferido na Figura 1.

De acordo com o diagrama de Venn, apenas 19.749 registros (50,01% da quantidade da Tabela de registros de ordens de serviço) estão associados, simultaneamente, a uma requisição, a uma ordem de serviço e a um equipamento (área de intercessão do diagrama). O restante dos registros apresenta alguma falta de informação que impossibilita a construção do relacionamento ternário desejado.

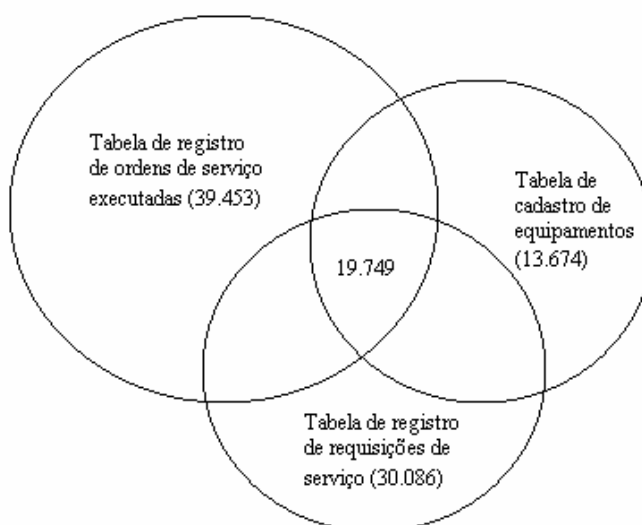


Figura 1 – Diagrama de Venn para os registros das três Tabelas do banco de dados do EquipMaint

que contém informações sobre equipamentos e ações de manutenções.

4. Metodologia para Determinação do Ciclo Ótimo de Manutenção Preventiva

Os dados contidos na interseção do digrama de Venn, exibido na Figura 1, são utilizados como fonte de dados para o cálculo do ciclo ótimo de manutenções preventivas para famílias de equipamentos da CELPE. O cálculo do ciclo ótimo emprega técnicas de mineração de dados para extração e análise de dados e técnicas estatísticas para modelagem do comportamento de falhas para cada família de equipamentos investigada. A seguir estão listados os passos seguidos para efetuar o cálculo do ciclo ótimo:

1. Inicialmente os dados válidos (pertencentes à interseção do diagrama de Venn), para as famílias de equipamentos que apresentaram falhas em um período pré-especificado, são extraídos a partir do banco de dados do EquipMaint;
2. Os registros de falha são utilizados para a geração da distribuição do tempo decorrido entre falhas consecutivas para cada equipamento de cada família de equipamentos;
3. As distribuições dos dados são modeladas pelas clássicas distribuições analíticas para tempo de vida (como a distribuição Exponencial e de Weibull), tendo seus parâmetros estimados a partir da amostra;
4. As distribuições observadas são comparadas com distribuições teóricas clássicas tendo a sua aderência medida pelo teste do Qui-Quadrado;
5. A distribuição analítica que melhor adere à distribuição observada é utilizada para definir o ponto ótimo de operação com base na relação de custos entre manutenções corretivas e preventivas.

As subseções seguintes detalham estes passos até a obtenção do ciclo ótimo de manutenção.

4.1. Construção das distribuições observadas (histogramas)

Após extração dos dados a partir do EquipMaint, a primeira etapa consiste em montar a distribuição de frequência do tempo decorrido entre falhas consecutivas (o histograma). O histograma é construído com o tempo medido em dias (variável “tempo_em_dias”). No histograma, o tempo entre falhas é dividido em 10 intervalos igualmente espaçados. A Figura 2 ilustra o histograma construído para a família de equipamentos 0721 (quadros de aquisição de dados) ao longo de 2061 dias.

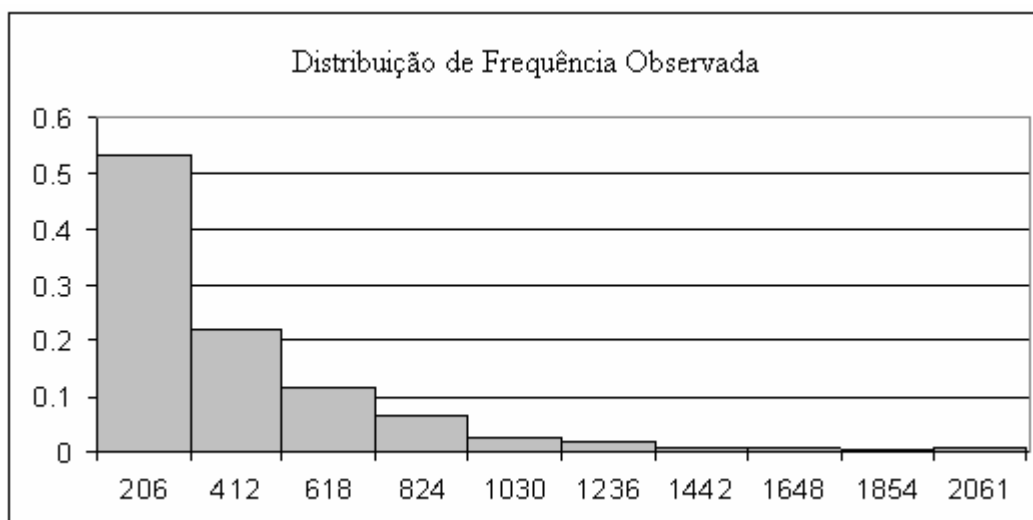


Figura 2 – Histograma do tempo entre falhas consecutivas para a Família 0721 (Quadros de Aquisição de Dados).

4.2. Estimação de parâmetros para as distribuições analíticas

Analisando o comportamento do histograma da Figura 2, pode-se supor que esta curva tem o comportamento de um modelo probabilístico de Weibull com dois parâmetros α e β , ou seja, tem uma função densidade de probabilidade descrita pela Equação 1.

$$f(t) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta} \quad \therefore \quad \alpha > 0, \beta > 0 \text{ e } t \geq 0 \quad t \in \{\text{tempo_em_dias}\} \quad (1)$$

Partindo dessa suposição, é obtida a distribuição de frequência esperada com dois parâmetros α e β adequados ao modelo suposto, sendo seus valores definidos em função dos dados observados para a variável “tempo_em_dias”. Para se obter os parâmetros α e β , utilizamos o método da máxima verossimilhança [9], no qual, buscamos a maximização da derivada parcial da probabilidade conjunta das observações em relação a cada parâmetro da distribuição analítica proposta.

A partir do sistema de equações que maximizam as derivadas parciais ($\partial \ln(L)/\partial \alpha = 0$ e $\partial \ln(L)/\partial \beta = 0$), calculam-se os valores dos parâmetros α e β . De posse dos valores α e β , gera-se o histograma para a distribuição de frequência esperada. A Figura 3 ilustra o histograma para a família 0721, a partir da distribuição analítica, com os parâmetros $\alpha = 269$ e $\beta = 0,86$.

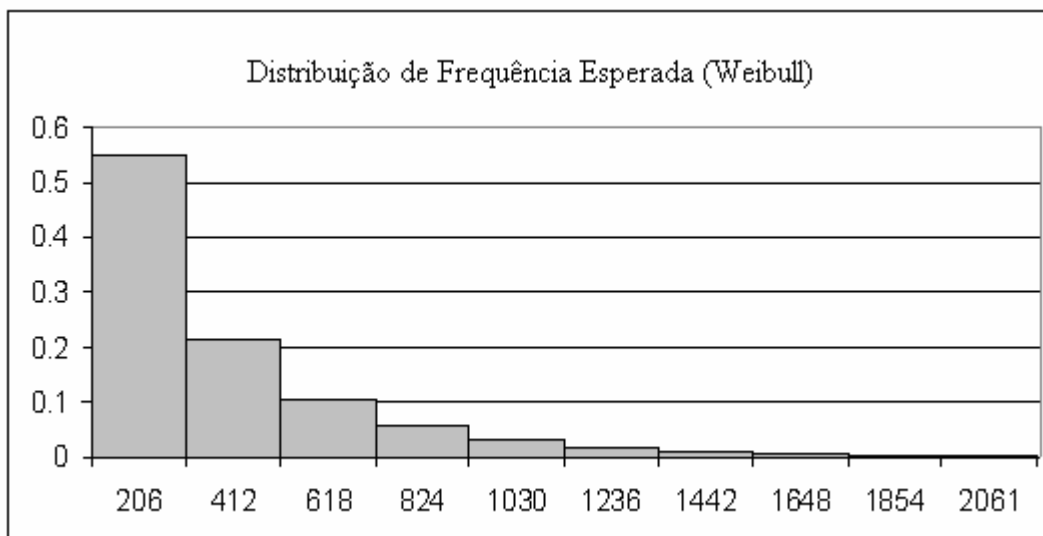


Figura 3 – Histograma da distribuição analítica do tempo entre falhas consecutivas para a Família 0721 (Quadros de Aquisição de Dados).

4.3. Teste de aderência das distribuições analíticas aos dados observados

Uma vez estimados os parâmetros da distribuição analítica, é preciso confirmar se ela modela bem os dados observados. A aderência da distribuição analítica do modelo àquela dos dados é medida pelo teste do Qui-Quadrado (χ^2).

A Tabela 1 mostra os dados das duas distribuições (observada e analítica) divididos em quantis. Na realidade, a divisão da variável “tempo_em_dias” foi feita em decis, para se ter massa crítica no denominador e igual contribuição das diferenças entre as distribuições em cada intervalo.

O teste de aderência é um critério para decidir se o modelo proposto pode ou não ser aceito para representar a distribuição observada. Assim, para verificar se a distribuição de frequência da grandeza aleatória “tempo_em_dias” pode ser modelada pela distribuição de Weibull aplica-se o seguinte teste de aderência:

- H_0 : Tempo_Dias_Ano \sim Weibull ($\alpha = 269$; $\beta = 0,86$) – Hipótese nula
- H_1 : Tempo_Dias_Ano não segue esse modelo – Hipótese alternativa

Tabela 1. Dados dos histogramas das distribuições observada e analítica

Intervalo	No. Observações	Distribuição de Freqüência		Diferença de Freqs. $(fo_i - fe_i)^2 / fe_i$
		Freqüência Observada (fo)	Freqüência Esperada (fe)	
1	257	0.103421	0,1	0.0001130
2	279	0.112274	0,1	0.0013420
3	210	0.084507	0,1	0.0028400
4	241	0.096982	0,1	0.0000939
5	225	0.090543	0,1	0.0009880
6	229	0.092153	0,1	0.0006680
7	265	0.106640	0,1	0.0004130
8	276	0.111066	0,1	0.0011030
9	266	0.107042	0,1	0.0004630
10	237	0.095372	0,1	0.0002250
Teste Qui-Quadrado= $Q^2 = 2485 \cdot \sum_{i=1}^{10} \frac{(fo_i - fe_i)^2}{fe_i}$				20,50

A decisão é baseada no comportamento de Q^2 definido acima. A distribuição de Q^2 tem uma distribuição aproximada de Qui-Quadrado, com graus de liberdade que dependem de quantos intervalos foram estabelecidos para a construção do histograma e do número de parâmetros estimados na amostra. De acordo com o exemplo da Família 0721, o número de graus de liberdade é igual a 7 (=10-1-2). Perde-se um grau pela medição do erro e 2 pela estimação dos parâmetros da distribuição de Weibull, a partir da mesma amostra de dados [10].

A região crítica (RC) é definida pelos valores de Q^2 acima de certo limiar associado à qualidade da aderência; isto é, $RC = \{Q^2 : Q^2 \geq q_c\}$, em que q_c é determinado pelo nível de significância do teste; ou seja, $\alpha = P(Q^2 \geq q_c | H_0 \text{ verdadeiro})$.

Para o nível de significância igual a 0,05, determinamos q_c utilizando a distribuição Qui-Quadrado com 7 graus de liberdade. Consultando a tabela da distribuição de Qui-Quadrado correspondente a 7 graus de liberdade e significância de 0,05, obtém-se o valor crítico $q_c = 22,60$ [11].

$$P(Q^2 \geq q_c | H_0) = \alpha \Rightarrow P(Q^2 \geq q_c | H_0) = 0,05 \quad (8)$$

Como o valor observado $Q^2 = 20,55$ é menor que o valor crítico $q_c = 22,60$, a hipótese nula não é rejeitada; ou seja, o modelo proposto adere aos dados. A Figura 4 ilustra a relação entre o valor medido e o limiar.

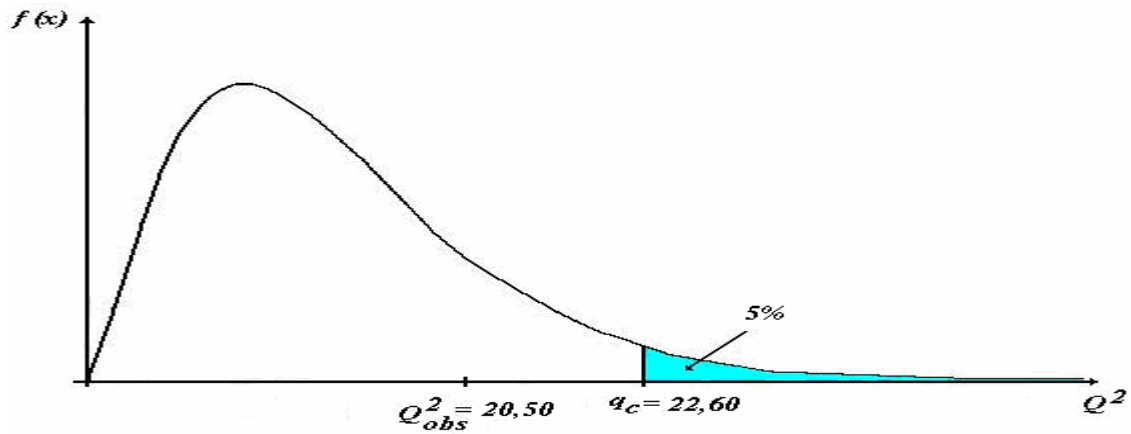


Figura 4 – Gráfico da distribuição do Qui-Quadrado - Q^2 Abaixo da Região Crítica.

De acordo com o exemplo, a distribuição de Weibull proposta modela adequadamente os dados observados para a família 0721 (quadros de aquisição de dados). Contudo, nem sempre a melhor aderência será conseguida por esta distribuição. Outras distribuições probabilísticas, tais como a exponencial e a lognormal, poderão modelar melhor o tempo entre falhas consecutivas de outras famílias de equipamentos.

4.4. Função Custo

Na literatura relacionada [12] [13], é conhecido que o custo da manutenção preventiva na prática é menor do que o custo da manutenção corretiva. Para comportar esta diferença de custos no modelo proposto, foi estabelecida uma função de custo. Esta função é definida pela Equação 9.

$$Custo(t) = K_{corr} \int_0^t P_{corr}(x) dx + \frac{K_{prev}}{t} \int_t^\infty x P_{prev}(x) dx \quad (9)$$

Onde:

$Custo(t)$ é o custo total para realizar a manutenção do equipamento

K_{corr} é o valor do custo para realizar uma manutenção corretiva;

K_{prev} é o valor do custo para realizar uma manutenção preventiva;

$P_{corr}(t)$ é a probabilidade de ocorrer uma ação de manutenção corretiva no instante t ;

$P_{prev}(t)$ é a probabilidade realizar uma ação de manutenção preventiva no instante t .

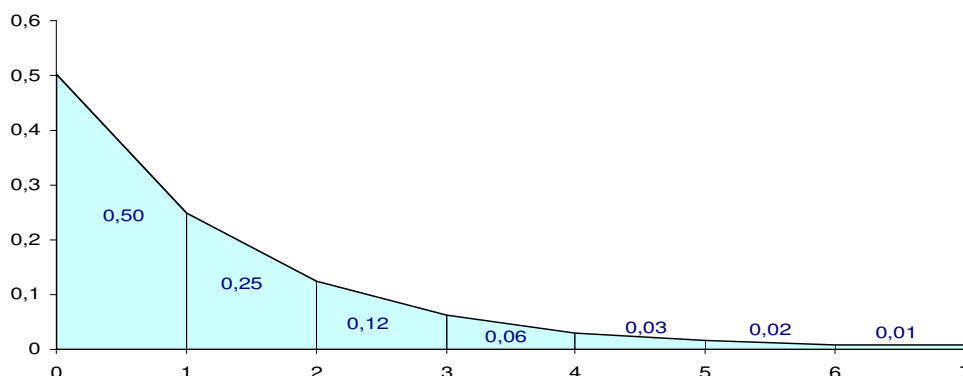


Figura 5 – Distribuição exponencial com parâmetro alfa igual a 0,7.

Para melhor ilustrar a função custo, um exemplo hipotético é considerado para obtenção do ciclo ótimo de manutenção para uma família fictícia de equipamentos. Supondo que a distribuição exponencial analítica com parâmetro α igual a 0,7 ilustrada na Figura 5) modela bem a distribuição do tempo entre falhas consecutivas, o ciclo ótimo para manutenção preventiva é dado pelo valor indicado

no campo “ponto de corte (tempo)” da Tabela 2, na linha onde a função custo total atinge o menor valor (em negrito).

Tabela 2 – Exemplo para obtenção do ciclo ótimo da família de equipamentos para manutenção preventiva a partir da aplicação da função custo

Ponto de Corte (tempo)	Função Custo Corretiva	Função Custo Preventiva	K_{corr}	K_{Prev}	Função Custo Total
0	0.0000	∞	2	1	∞
1	1.0068	0.6949			1.7018
2	1.5068	0.1915			1.6983
3	1.7551	0.0665			1.8216
4	1.8784	0.0251			1.9035
5	1.9396	0.0097			1.9493
6	1.9700	0.0036			1.9736
7	1.9851	0.0011			1.9862
>7	2.0000	0.0000			2.0000

De acordo com os dados da Tabela 2, para a família fictícia de equipamentos, o mínimo da função custo é igual a 1,6983. Deste modo, o ciclo ótimo para o exemplo hipotético é igual a 2 (duas) unidades de tempo (valor correspondente na coluna “ponto de corte”).

5. Resultados Produzidos

A metodologia descrita neste trabalho foi implementada em rotinas escritas em VBA (*Visual Basic for Applications*) para o Microsoft Excel. O sistema computacional produzido foi empregado para a determinação do ciclo ótimo de manutenção preventiva de dez (10) famílias de equipamentos da Companhia Energética de Pernambuco (CELPE).

Os dados sobre os equipamentos da *Família 0211* (reguladores de tensão), por exemplo, geraram uma distribuição de ocorrências de falhas que melhor aderiu a um modelo probabilístico Exponencial com parâmetro λ igual a 0,002. A distribuição Exponencial teórica, dada pela Equação 10, é ilustrada na Figura 6. Seguindo os passos da metodologia descrita, a curva da função custo gerada para este exemplo pode ser verificada na Figura 7. O mínimo desta curva indica que, para a família de reguladores de tensão da CELPE, o ciclo ótimo para efetuar ações de manutenções preventivas é igual a 813 dias.

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (10)$$

Onde:

$f(t)$ é a função densidade de probabilidade de falha;

t é o tempo e $t > 0$;

λ é a taxa de falha (considerada constante) e $\lambda > 0$

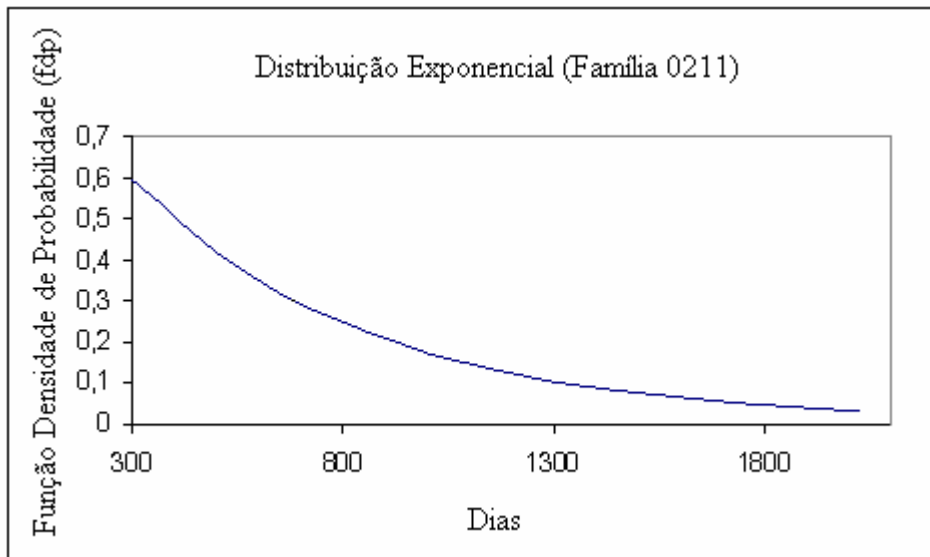


Figura 6 – Distribuição exponencial para as ocorrências de falhas para a Família 0211 (reguladores de tensão).

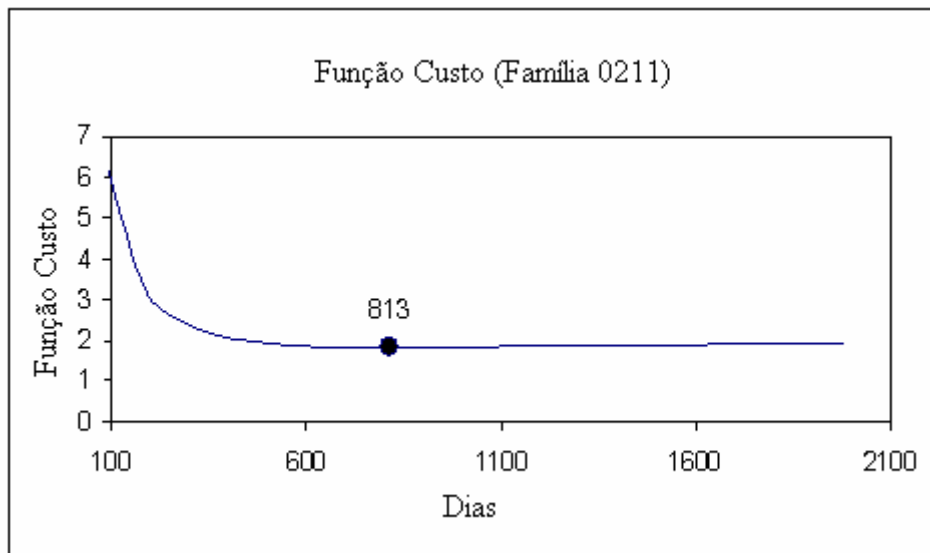


Figura 7 – Função custo de manutenção para a Família 0211 (reguladores de tensão).

De forma diferente ao que ocorre para a Família 0211, as falhas registradas para a Família 0721 (quadros de aquisição de dados) são regidas por uma distribuição de Weibull com os seguintes parâmetros: $\alpha = 269$ e $\beta = 0,86$, como observado na Figura 8.

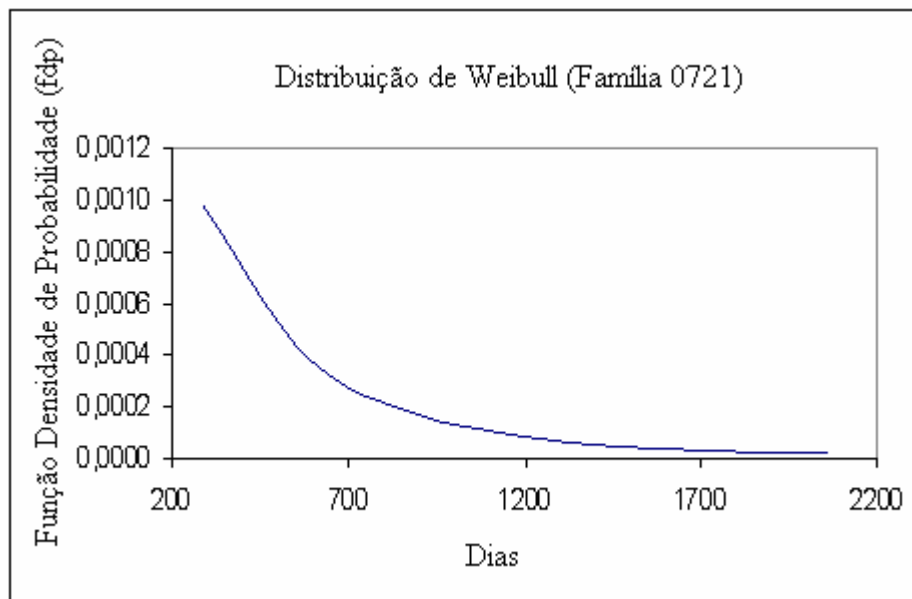


Figura 8 – Distribuição de Weibull para as ocorrências de falhas para a Família 0721 (quadros de aquisição de dados).

O ciclo ótimo obtido para manutenção dessa família foi estimado em 720 dias, como pode ser observado na Figura 9, indicada pelo mínimo da função custo.

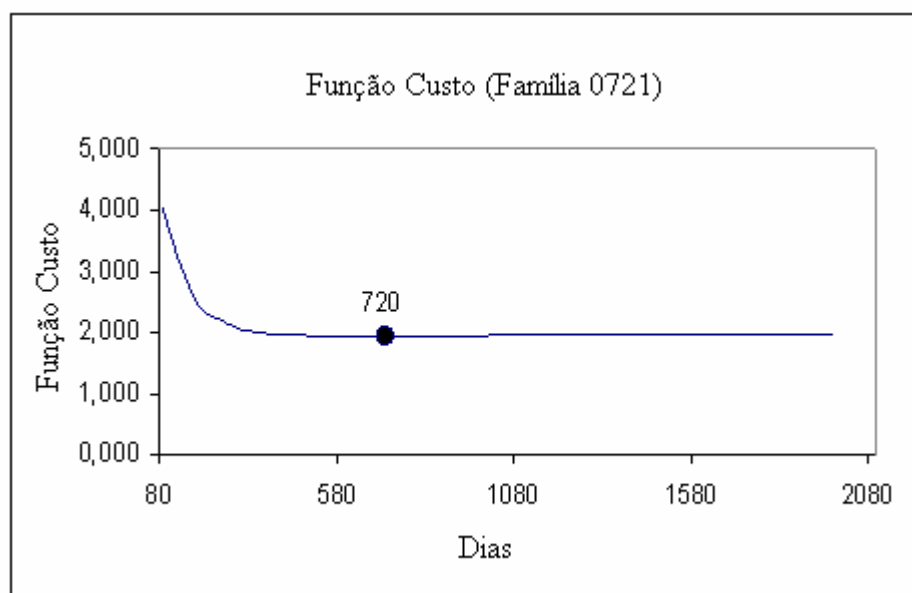


Figura 9 – Função custo de manutenção para a Família de equipamentos 0721 (quadros de aquisição de dados).

Além das Famílias 0211 e 0721, o cálculo do ciclo ótimo para manutenção foi aplicado para outras 8 famílias de equipamentos da CELPE. Abaixo, na Tabela 3, são apresentadas os ciclos ótimos encontradas para cada família.

Tabela 3 – Ciclos Ótimos Calculados para a Manutenção Preventiva de 10 Famílias de Equipamentos da Companhia Energética de Pernambuco (CELPE).

Família de Equipamentos	Ciclo Ótimo Calculado para Manutenção Preventiva
0101 (Banco de Capacitor)	810 Dias
0211 (Regulador de Tensão)	813 Dias

0307 (Disjuntor)	900 Dias
0308 (Religador)	900 Dias
0419 (Banco de Baterias)	Dados insuficientes
0422 (Sist. Alimentação Auxiliar)	Dados insuficientes
0424 (Retificador)	630 Dias
0716 (Sistema de Proteção)	990 Dias
0721 (Quadro Aquisição Dados)	720 Dias
0723 (Unidade Central Controle)	720 Dias

Os valores dos ciclos ótimos para as Famílias 0419 (Banco de Baterias) e 0422 (Sistema de Alimentação Auxiliar) não foram calculados por falta de dados suficientes para determinar o modelo probabilístico que melhor adere às distribuições de falhas observadas.

6. Conclusões

O trabalho apresentado produziu uma solução baseada em mineração de dados e modelos estatísticos para definição do ciclo ótimo da manutenção preventiva para famílias de equipamentos. As análises realizadas e os resultados obtidos demonstraram que a solução elaborada foi capaz de modelar o comportamento de falhas dos equipamentos com dados históricos suficientes, no nível de aderência especificado.

Antes da implantação da solução descrita neste trabalho, a CELPE, e mais especificamente a Unidade de Manutenção da Automação e Proteção (EAMA), assumia um período único e igual a 730 dias para manutenção preventiva de todas as famílias de equipamentos. Este período era revisto anualmente e redefinido pelos especialistas da área, tomando como base suas experiências profissionais anteriores.

Após o estudo realizado, com a aplicação da solução desenvolvida foi verificado que este período continua adequado para famílias de equipamentos como a 0721 (Quadro Aquisição Dados) e 0723 (Unidade Central Controle). Contudo, o período pré-estabelecido pode ser considerado consideravelmente curto para disjuntores, re-ligadores e sistemas de proteção. De acordo com a solução apresentada, estes equipamentos deveriam sofrer ações de manutenções preventivas entre 900 e 990 dias (períodos até 35% maiores do que o pré-estabelecido). Se, por um lado, a adoção de períodos longos demais para efetuar manutenções preventivas pode gerar custos adicionais e indesejáveis em forma de manutenções corretivas, por outro lado, períodos curtos demais geram custos extras causados por manutenções preventivas desnecessárias.

Além de fornecer ciclos otimizados e customizados por família de equipamentos, a solução apresentada, implementada em ambiente computacional, possui o benefício de estar disponível para execução a qualquer momento. Adicionalmente, a solução utiliza os registros mais recentes das ações de manutenções realizadas para os equipamentos, já que usufrui de conexão direta com o banco de dados do sistema de gestão de manutenção da CELPE. Todas estas características permitem que os profissionais da CELPE possam rever sua política de manutenção de equipamentos a qualquer momento do ano, para qualquer família de equipamento e sempre utilizando as informações mais atualizadas.

Agradecimentos

À NeuroTech Ltda pela cessão da sua plataforma de desenvolvimento de soluções, *NeuralDevelopment*, utilizada no treinamento, teste e avaliação dos modelos investigados.

Referências Bibliográficas

- [1] Dabbaghchi, I. & Christie, R. D. & Rosenwald, G. W. & Liu Chen-Ching, "AI Application Areas in Power Systems", IEEE Expert. vol. 12, no. 1, pp. 58-66, 1997.
- [2] Fuller, J. F. & Fuchs, E. F. & Roesler, K. J., "Influence of harmonics on power distribution system protection", IEEE Trans. Power Delivery, vol. 3, pp. 549-557, Apr. 1988.

- [3] Machado, L. A. T. & Vila D. & Laurent H. & Morales C. & Ceballos J. & Mirancos F. & Nosaki S., "Sistema de Previsão Imediata de Ocorrência de Tempestades para Apoio a Tomada de Decisão na Distribuição e Manutenção da Rede Elétrica", trabalho submetido ao II CITENEL, 2003.
- [4] Henriques, H. O. & Falcão, D. M. & Borges, C. L. T. & Taranto, G. N. & A. Manzoni & Andrade, W. S. & Viveros, E. C., "Aplicações de Sistemas Inteligentes e Processamento Distribuído na Previsão, Localização e Minimização de Perdas em Redes de Distribuição", trabalho submetido ao II CITENEL, 2003.
- [5] Relatório Interno, Companhia Energética de Pernambuco (CELPE). Plano de Combate a Perdas 2006.
- [6] Han, J. & Kamber, M., "Data Mining: Concepts and Techniques", Morgan Kaufmann Publishers, 2006.
- [7] Witten, I. H. & Frank, E., "Data Mining: Practical Machine Learning Tools and Techniques with Java Implementations", Morgan Kaufmann Publishers, 2005.
- [8] Brasil. EquipMaint – Sistema de Informação para Manutenção Eficiente. Acesso em 01/04/2008, disponível em: <http://www.informa.com.br/EquipMaint/menu.html>.
- [9] ReliaSoft Corporation, "On-line Reliability Engineering Resources for the Reliability Professional". Acesso em 01/04/2008, disponível em: http://www.weibull.com/AccelTestWeb/calculating_the_parameters_of_the_weibull_distribution.htm.
- [10] Jain, R., "The Art of Computer Systems Performance Analysis: Techniques for Experimental Design, Measurement, Simulation, and Modeling", Wiley- Interscience, New York, NY, April 1991, ISBN:0471503361.
- [11] Meyer, P., "Probabilidade; Aplicações à Estatística", Editora Livros Técnicos e Científicos, 1978.
- [12] Marcorin, W. R. & Lima, C.R.C., "Análise de Custos de Manutenção e de não-Manutenção de Equipamentos Produtivos". Revista de Ciência & Tecnologia, vol.11, no. 22, pp. 35-42.
- [13] Dias, J. M. & Requeijo, J. G. & Leal, R. P. & Pereira, Z. L., "Otimização do Período de Substituição Preventiva de Componentes em Função dos Custos". 8º Congresso Iberoamericano de Engenharia Mecânica, Cusco, 23 al 25 de Outubro de 2007.