



**XXI SNPTTE  
SEMINÁRIO NACIONAL  
DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA**

Versão 1.0  
23 a 26 de Outubro de 2011  
Florianópolis - SC

**GRUPO -12**

**GRUPO DE ESTUDOS DE ASPECTOS TÉCNICOS E GERENCIAIS DA MANUTENÇÃO- GMI**

**CALIBRAÇÃO DE DADOS PARA ESTUDOS DE CONFIABILIDADE EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO:  
MODELAGEM DA CONDIÇÃO DOS EQUIPAMENTOS E DOS ÍNDICES DE CONTINUIDADE NODAIS**

**Márcio André Nazareno Ferreira\***  
**CEMAR**

**Anselmo Rodrigues**  
**UFMA**

**Maria da Guia da Silva**  
**UFMA**

**RESUMO**

O objetivo deste artigo é desenvolver uma metodologia de calibração de dados de confiabilidade orientada para os índices nodais FIC e DIC. A originalidade do método proposto é a utilização de modelos de otimização para calibrar as taxas de falha e os tempos de reparo, respectivamente, em uma estrutura desacoplada. A utilização de restrições de igualdade nos modelos de calibração assegura que os valores calculados dos índices FEC e DEC sejam idênticos aos seus valores medidos. Outra vantagem do método proposto é a inclusão de informação da condição na calibração e na análise de confiabilidade preditiva.

**PALAVRAS-CHAVE**

Calibração, Confiabilidade, Manutenção, Redes de Distribuição, Otimização

**1.0 - INTRODUÇÃO**

A Análise de Confiabilidade Preditiva (ACP) estima o desempenho futuro da rede de distribuição, com relação a interrupções no fornecimento de energia, com base nos dados de falha dos componentes e na sua topologia (1), (2). A ACP pode fornecer estimativas para os seguintes indicadores de continuidade estatísticos usados pelas empresas de distribuição (3): Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (FEC), Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (DEC), Frequência de Interrupção Individual por Unidade Consumidora ou por Ponto de Conexão (FIC) e Duração de Interrupção Individual por Unidade Consumidora ou por Ponto de Conexão (DIC). Entretanto, a ACP é raramente usada pelos engenheiros de planejamento das empresas de distribuição. Este fato é devido à existência de discrepâncias entre os índices estimados pela ACP e aqueles apurados pelas empresas de distribuição. Estas discrepâncias são causadas pela falta de dados históricos para estimar os parâmetros de confiabilidade dos componentes, isto é: taxas de falha, tempos de reparo e chaveamento. devido a isto, engenheiros de planejamento têm a impressão de que os modelos de ACP são meramente teóricos e de aplicação duvidosa.

Apesar das empresas de distribuição não possuírem uma grande quantidade de dados históricos associados com as falhas dos seus equipamentos, estas empresas armazenam dados históricos sobre índices de continuidade do sistema (FEC, DEC, DIC e FIC). Esta informação pode ser utilizada para ajustar os dados de falha dos componentes (taxas de falha e os tempos de reparo) tal que os índices calculados pelo modelo de ACP sejam próximos dos índices medidos pelas empresas de distribuição. Este processo de ajuste dos dados de falha dos modelos de ACP é denominado de Calibração de Dados (1). Geralmente, a calibração de dados de confiabilidade é realizada através de técnicas de otimização. A maioria das metodologias existentes desconsidera os índices de confiabilidade nodais (FIC e DIC) na calibração das taxas de falha e tempos de reparo (1), (4). Apenas o índice nodal FIC tem sido considerado na calibração de dados (5). Além disso, não é possível garantir que o índice FEC seja igual ao seu valor apurado quando a calibração considera o índice FIC. Contudo, a ANEEL (Agência Nacional

(\*) ALAMEDA A, QDA. SQS, S/N, LOTEAMENTO QUITANDINHA - ALTOS DO CALHAU – CEP 65000 São Luís, MA – Brasil

Tel: (98) 3217-2364 – Email: marcio.nazareno@cemar-ma.com.br

de Energia Elétrica) estabeleceu penalidades para violações nos índices FIC e DIC. Devido a isto, os modelos de ACP devem estimar precisamente os índices de confiabilidade nodais FIC e DIC. O principal objetivo deste artigo é desenvolver uma metodologia de calibração de dados de confiabilidade orientada para os índices nodais FIC e DIC. A originalidade do método proposto é a utilização de modelos de programação não-linear e quadrática para calibrar as taxas de falha e os tempos de reparo, respectivamente, em uma estrutura desacoplada. Isto é, a calibração das taxas de falha e dos tempos de reparo é realizada separadamente. Adicionalmente, a utilização de restrições de igualdade nos modelos de calibração assegura que os valores calculados dos índices FEC e DEC sejam idênticos aos seus valores medidos. Além disso, o modelo de calibração proposto para as taxas de falha considera a informação de condição dos equipamentos obtida a partir de atividades de inspeção. Os modelos de calibração propostos neste artigo foram testados em um alimentador da Companhia Energética do Maranhão (CEMAR). Os resultados dos testes demonstraram que os modelos de calibração propostos podem reduzir significativamente os erros entre os valores medidos e calculados dos índices FEC/FIC e DEC/DIC. A principal contribuição do método de calibração proposto neste artigo é o resgate da credibilidade dos engenheiros com relação as estimativas de índices nodais e sistêmicos geradas por modelos de ACP. Outra vantagem do método proposto é a inclusão de informação da condição nos modelos de calibração e de ACP. Esta informação permitirá estabelecer um valor ótimo para as frequências de manutenção que minimize simultaneamente as penalidades devido a desligamentos programados e não-programados.

## 2.0 - MODELO DE ACP

Neste artigo os índices de confiabilidade são estimados usando-se o método de enumeração de estados. Este método calcula o impacto de cada contingência sobre os componentes do sistema através da análise do efeito de uma falha e da ponderação deste impacto pela sua probabilidade de ocorrência. Os impactos ponderados são somados para obter índices de confiabilidade anuais esperados. O cálculo destes índices de confiabilidade via métodos analíticos pode ser resumido através do seguinte algoritmo conceitual (1):

- selecionar uma contingência com a sua respectiva probabilidade de ocorrência;
- simular o impacto da contingência e calcular o seu impacto sobre todos os componentes do sistema;
- ponderar o impacto da contingência pela sua probabilidade de ocorrência;
- adicionar o impacto ponderado aos índices de confiabilidade que estão sendo estimados;
- verificar se todas as contingências foram simuladas: se todas as contingências foram selecionadas o algoritmo é finalizado, caso contrário, uma nova contingência é selecionada e retorna-se para o passo (b).

A partir da seqüência de eventos descrita acima e dos fatores de ponderação definidos para índices de frequência e duração acumulada das interrupções, têm-se as seguintes estimativas para os índices FEC/FIC e DEC/DIC:

$$FIC^{est} = W^f \cdot \lambda \quad [1] \quad DIC^{est} = W^r \cdot \Lambda \cdot t^{rep} + t^{sw} \cdot W^s \cdot \lambda \quad [3]$$

$$FEC^{est} = \left( (Nc)^T \cdot FIC^{est} \right) / Nc^{tot} \quad [2] \quad DEC^{est} = \left( (Nc)^T \cdot DIC^{est} \right) / Nc^{tot} \quad [4]$$

onde:

$FIC^{est}$  é um vetor com dimensão igual ao número de pontos de carga que contém os valores do índice FIC para os pontos de carga do sistema.

$W^f$  é uma matriz com dimensão igual ao número de pontos de carga pelo número de componentes, cuja lei de formação é:  $W_{ij}^f = 1$  se o ponto de carga  $i$  é interrompido por uma falha no componente  $j$ , caso contrário  $W_{ij}^f = 0$ .

$\lambda$  é um vetor com dimensão igual ao número de componentes que contém as taxas de falhas de cada componente.

$DIC^{est}$  é um vetor com dimensão igual ao número de pontos de carga que contém os valores do índice DIC para os pontos de carga do sistema.

$W^r$  é uma matriz com dimensão igual ao número de pontos de carga pelo número de componentes, cuja lei de formação é:  $W_{ij}^r = 1$  se o tempo de restauração do ponto de carga  $i$  é igual ao tempo de reparo do componente  $j$  para uma falha neste componente, caso contrário  $W_{ij}^r = 0$ .

$\Lambda = \text{diag}(\lambda)$  é uma matriz diagonal cujos elementos não-nulos são iguais aos respectivos elementos do vetor  $\lambda$ .

$t^{rep}$  é um vetor com dimensão igual ao número de componentes que contém os tempos de reparo de cada componente.

$t^{sw}$  é o tempo de chaveamento.

$W^s$  é uma matriz com dimensão igual ao número de pontos de carga pelo número de componentes, cuja lei de formação é:  $W_{ij}^s = 1$  se o tempo de restauração do ponto de carga  $i$  é igual ao tempo de chaveamento para uma falha no componente  $j$ , caso contrário  $W_{ij}^s = 0$ .

$Nc$  é um vetor com dimensão igual ao número de pontos de carga que contém o número de consumidores de cada ponto de carga do sistema.

$Nc^{tot} = \sum_{i=1}^{Nd} Nc_i$  é o número total de consumidores do sistema em estudo e  $Nc^T$  é a transposto do vetor  $Nc$ .

$FEC^{est}$  e  $DEC^{est}$  são os valores estimados dos índices FEC e DEC, respectivamente, via o modelo de ACP baseado no método analítico.

### 3.0 - MODELOS DE CALIBRAÇÃO DAS TAXAS DE FALHA E DOS TEMPOS DE REPARO

Nesta seção serão apresentados os modelos de calibração propostos para as taxas de falhas e para os tempos de reparo dos equipamentos. Ambos os modelos consideram índices de confiabilidade nodais, isto é: FIC e DIC. A inclusão dos índices FIC e DIC no modelo de calibração é muito importante, pois a ANEEL estabeleceu penalidades para estes indicadores de continuidade. Devido a isto, os modelos de ACP devem gerar estimativas para estes índices com a maior precisão possível.

#### 3.1 Modelo de Taxa de Falha Dependente da Condição

Na referência (1) foi identificado empiricamente que a melhor descrição da relação entre a condição normalizada dos equipamentos e as taxas de falha é realizada pelo modelo exponencial:

$$\lambda_k(x_k) = A_{\theta[k]} \exp\{B_{\theta[k]}x_k\} + C_{\theta[k]} \text{ para } k = 1, \dots, N^{comp} \text{ e } \theta[k] \in \Omega_\theta \quad [5]$$

onde:

$x_k$  é condição do equipamento, onde: 0 (melhor condição),  $\frac{1}{2}$  (condição média) e 1 (pior condição possível).

$\lambda_k(x_k)$  é a taxa de falha em função da condição para o componente k.

$\Omega_\theta$  é o vetor de tipos de equipamentos, isto é:  $\Omega_\theta = \{\text{Seção do tronco, Seção da lateral, Rede secundária, transformadores, Chaves seccionadoras, Fusíveis, Religadores, Capacitores shunt, Reguladores de tensão}\}$ .

A notação  $\theta[k]$  é usada para indicar o tipo de equipamento associado com o componente k.

$A_{\theta[k]}$ ,  $B_{\theta[k]}$  e  $C_{\theta[k]}$  são os parâmetros do modelo exponencial para um equipamento do tipo  $\theta[k]$ . Estes parâmetros são ajustados pelo modelo de calibração para que os valores dos índices estimados pelo modelo de ACP sejam próximos dos seus valores históricos.

$N^{comp}$  é o número total de componentes da rede de distribuição.

É importante enfatizar que os parâmetros  $A_{\theta[k]}$ ,  $B_{\theta[k]}$  e  $C_{\theta[k]}$  são definidos para os tipos de equipamentos. Entretanto, as taxas de falha estão associadas com componentes individualizados, pois cada componente do sistema possui uma condição distinta que é determinada no momento de sua inspeção.

#### 3.2 Modelo Proposto para a Calibração das Taxas de Falha dos Componentes

A principal meta do modelo de calibração proposto neste artigo é ajustar as taxas de falha dos equipamentos de tal forma que os erros entre os valores calculados e medidos do índice FIC sejam os menores possíveis. Além disso, é desejável que os valores medidos e calculados do índice FEC sejam idênticos. Estes dois objetivos são alcançados obtendo-se as taxas de falha dos equipamentos através da solução do seguinte problema de otimização:

$$\text{Minimizar } [FIC^{est}(A, B, C) - FIC^{med}]^T \Phi [FIC^{est}(A, B, C) - FIC^{med}] \quad [6]$$

sujeito a:

$$FEC^{est} = FEC^{med} \quad [7]$$

$$A_m \geq A_m^{\min} \text{ para } m \in \Omega_\theta \quad [8]$$

$$B_m \geq B_m^{\min} \text{ para } m \in \Omega_\theta \quad [9]$$

$$A_m \exp(B_m x_m^{\min}) + C_m \geq \lambda_m^{\min} \text{ para } m \in \Omega_\theta \quad [10]$$

onde:

$A$ ,  $B$  e  $C$  são os vetores de parâmetros do modelo exponencial para os tipos de equipamentos existentes na rede. Desta forma, a dimensão dos vetores  $A$ ,  $B$  e  $C$  é igual ao número de tipos de equipamentos.

$FIC^{est}(A, B, C) = W^f \cdot \lambda(A, B, C)$  é o valor do índice FIC para os pontos de carga calculado através do modelo de ACP.

$\lambda(A, B, C)$  é o vetor das taxas de falha dos componentes, cujos elementos são dados por:

$\lambda_k(A, B, C) = A_{\theta[k]} \exp\{x_k B_{\theta[k]}\} + C_{\theta[k]}$  para  $k = 1, \dots, N^{comp}$  e para  $\theta[k] \in \Omega_\theta$ .

$FIC^{med}$  é o valor apurado do índice FIC para os pontos de carga.

$\Phi$  é uma matriz diagonal, cujo elementos são dados por:  $\Phi_{ii} = N_c / N_c^{tot}$

$$FEC^{est} = ((N_c)^T \cdot FIC^{est}) / N_c^{tot}$$

$FEC^{med}$  é o valor apurado do índice FEC.

$\lambda_m^{\min}$  é o valor mínimo da taxa de falha para um equipamento do tipo  $m$ .

$x_m^{\min} = \min\{x_k | k = 1, \dots, N^{comp} \text{ e } \theta[k] = m\}$  é o valor mínimo das condições obtidas via inspeção para todos os componentes do tipo  $m$ .

$A_m^{\min}$  ( $B_m^{\min}$ ) é o valor mínimo do parâmetro  $A_m$  ( $B_m$ ) do modelo exponencial para um equipamento do tipo  $m$ .

É importante discutir os seguintes aspectos associados com a formulação do modelo de otimização [6]-[10]:

a. A função objetivo [6] tem como finalidade reduzir o erro quadrático ponderado entre os valores calculados e apurados do índice FIC para os pontos de carga. Os pesos definidos na matriz  $\Phi$  são usados para dar mais

importância relativa aos desvios do FIC nos pontos de carga com maior número de consumidores;

b. As variáveis de decisão do problema de otimização [6]-[10] são os vetores  $A$ ,  $B$  e  $C$ . Isto é, a taxa de falha é ajustada de forma implícita no processo de calibração. Consequentemente, a dimensão do problema de otimização [6]-[10] é igual ao triplo do número de tipos de equipamentos.

c. A restrição [7] garante que os valores calculados e medidos do índice FEC serão iguais após o ajuste das taxas de falha.

d. Os pares de restrições [8] e [9] tem como objetivo assegurar que a função da taxa de falha para cada tipo de equipamento seja crescente, isto é, deve-se garantir que a derivada da função da taxa de falha para cada tipo de equipamento, com relação à condição, seja positiva. Isto só ocorre se  $A_m > 0$  e  $B_m > 0$ . Conseqüentemente, devem-se impor limites mínimos positivos para os elementos dos vetores de parâmetros  $A$  e  $B$ .

e. A restrição [10] assegura de forma implícita que as taxas de falha de todos os componentes sejam positivas.

O problema de otimização [6]-[10] é um Problema de Programação Não-Linear (PPNL), isto é, o modelo de otimização contém não-linearidades na função objetivo e/ou nas restrições. Neste artigo, o modelo de otimização associado com o problema de calibração foi resolvido usando-se a função `fmincon` do Optimization Toolbox do MATLAB.

### 3.3 Modelo Proposto para a Calibração dos Tempos de Reparo dos Componentes

Assim como o modelo de calibração das taxas de falha, a calibração dos tempos de reparo tem como objetivo reduzir as diferenças entre os índices de confiabilidade nodais medidos e calculados. Contudo, o índice nodal usado como referência no ajuste dos tempos de reparo é o DIC. Além disso, é desejável que os valores apurado e calculado do índice DEC sejam iguais após a calibração dos tempos de reparo. Os dois aspectos mencionados acima podem ser incluídos na calibração dos tempos de reparo se este processo é realizado através da solução do seguinte problema de otimização:

$$\text{Minimizar } f := [DIC^{est} - DIC^{med}]^T \Phi [DIC^{est} - DIC^{med}] \quad [11]$$

sujeito a:

$$DEC^{est} = DEC^{med} \quad [12]$$

$$\tau_m^{rep} \geq \tau_m^{\min} \text{ para } m \in \Omega_\theta \quad [13]$$

onde:

$DIC^{med}$  é o vetor de valores medidos (apurados) do índice DIC.

$$DIC^{est} = W^{eq} \cdot \tau^{rep} + DIC^{sw}$$

$DIC^{sw} = t^{sw} \cdot W^s \cdot \lambda^*$  é componente do índice DIC associada com tempos de chaveamento.

$\lambda^*$  é o vetor de taxas de falha calibradas.

$\lambda_k^*(x_k) = A_{\theta[k]}^* \exp\{B_{\theta[k]}^* x_k\} + C_{\theta[k]}^*$  é o elemento do vetor  $\lambda^*$  referente ao componente  $k$ .

$A_m^*$ ,  $B_m^*$  e  $C_m^*$  para  $m \in \Omega_\theta$  são os valores calibrados dos parâmetros do modelo exponencial da taxa de falha obtidos através da solução do problema de otimização [6]-[10].

$W^{eq}$  é uma matriz com dimensão igual ao número de pontos de carga pelo número de tipos de componentes. A

lei de formação de  $W^{eq}$  é dada por:  $W_{\bullet m}^{eq} = \sum_{k \in \Theta_m} \lambda_k^*(x^k) \cdot W_{\bullet k}^{rep}$  para  $m \in \Omega_\theta$

$\Theta_m$  é conjunto de componentes do tipo  $m$ .

$W_{\bullet k}^{rep}$  e  $W_{\bullet m}^{eq}$  são as colunas  $k$  e  $m$  das matrizes  $W^{rep}$  e  $W^{eq}$ , respectivamente.

$\tau^{rep}$  é o vetor de tempos de reparo para os tipos de equipamentos.

$\tau_m^{rep}$  para  $m \in \Omega_\theta$  é o elemento do vetor  $\tau^{rep}$  associado com o tipo de equipamento  $m$ .

$$DEC^{est} = \left( (Nc)^T \cdot DIC^{est} \right) / Nc^{tot}$$

$DEC^{med}$  é o valor medido (apurado) do índice DEC.

$\tau_m^{\min}$  para  $m \in \Omega_\theta$  é o tempo de reparo mínimo para um equipamento do tipo  $m$ .

Substituindo-se as expressões do  $DIC^{est}$  (equação [3]) e do  $DEC^{est}$  (equação [4]) na função objetivo [11] e na restrição [12] resulta em:

$$\text{Minimizar } f := \frac{1}{2} (\tau^{rep})^T H \tau^{rep} + c^T \tau^{rep} + f^0 \quad [14]$$

sujeito a:

$$A^{eq} \tau^{rep} = b^{eq} \quad [15]$$

$$\tau_m^{rep} \geq \tau_m^{\min} \text{ para } m \in \Omega_\theta \quad [16]$$

onde:

$$H = 2(W^{eq})^T \Phi W^{eq}$$

$$c = -2(W^{eq})^T \Phi DIC^{eq}$$

$$f^0 = (DIC^{eq})^T \Phi DIC^{eq}$$

$$DIC^{eq} = DIC^{med} - DIC^{sw}$$

$$DEC^{sw} = (1/Nc^{tot})(Nc)^T DIC^{sw}$$

$$A^{eq} = (1/Nc^{tot})(Nc)^T W^{eq}$$

$$b^{eq} = DEC^{med} - DEC^{sw}$$

A partir de [14]-[16], pode-se concluir que as seguintes variáveis são constantes:  $H$ ,  $c$ ,  $f^0$ ,  $A^{eq}$  e  $b^{eq}$ . Devido a isto, o modelo de otimização [14]-[16] está associada com um Problema de Programação Quadrática (PPQ). Ou seja, deve-se obter a solução para um PPQ para realizar a calibração dos tempos de reparo. Neste artigo, o PPQ associado com a calibração dos tempos de reparo é resolvido usando-se a função quadprog do "Optimization Toolbox" do MATLAB. Uma descrição detalhada dos modelos de calibração apresentados nas subseções 3.2 e 3.3 é encontrada na referência [6].

Se a função objetivo [14] e o conjunto de restrições definido por [16] forem ignorados o problema de calibração dos tempos de reparo se reduz a solução do sistema de equações lineares indeterminado [15]. Desta forma, é possível utilizar o método de mínima norma para ajustar os tempos de reparo de forma análoga a calibração das taxas de falha realizada em (4). O método de mínima norma obtém uma solução para um sistema de equações lineares indeterminado resolvendo o seguinte problema de otimização:

$$\text{Minimizar } \|\tau^{rep}\|^2 = (\tau^{rep})^T \tau^{rep} \quad [17]$$

$$\text{sujeito a: } A^{eq} \tau^{rep} = b^{eq} \quad [18]$$

A solução do problema de otimização [17]-[18] é dada por:

$$\tau^{rep} = (A^{eq})^+ b^{eq} \quad [19]$$

onde:  $(A^{eq})^+ = (A^{eq})^T [A^{eq} (A^{eq})^T]^{-1}$  é a matriz inversa generalizada à direita de Moore-Penrose. No caso da calibração dos tempos de reparo, a matriz  $A^{eq}$  possui apenas uma linha. Desta forma, pode-se reescrever [19] da seguinte forma:

$$\tau_m^{rep} = \frac{A_{1m}^{eq} b^{eq}}{\sum_{m \in \Omega_\theta} (A_{1m}^{eq})^2} \text{ para } m \in \Omega_\theta \quad [20]$$

#### 4.0 - RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados dos testes realizados com os modelos propostos para a calibração das taxas de falha e tempos de reparo. Estes modelos de calibração foram testados no alimentador 01C5 da subestação Forquilha pertencente à CEMAR. As principais características deste alimentador são mostradas na Tabela 1.

Tabela 1 – Características do alimentador 01C5 da Subestação Forquilha da CEMAR.

Número Total de Consumidores	3725
Número de Fusíveis	48
Número de Chaves NF	12
Número de Interligações (chaves NA)	3
Comprimento Total (km)	4,6584
Número de Religadores	1
Número de seções do tronco	23
Número de seções das laterais	74
Número de transformadores (pontos de carga)	32
Número total de componentes	193

Nos testes realizados foram usadas médias históricas simuladas para os índices FIC/FEC e DIC/DEC usados na calibração dos dados de confiabilidade. Uma descrição detalhada do processo de obtenção destas médias é apresentada na referência (6). Além disso, as condições dos equipamentos foram sorteadas aleatoriamente devido à indisponibilidade de dados de condição para o alimentador 01C5. Este procedimento também foi usado nos testes com o algoritmo de calibração apresentado em (5). Adicionalmente, os modelos de calibração propostos neste artigo exigem que sejam especificados valores iniciais/mínimos para as seguintes variáveis associadas com os tipos de equipamentos: vetores A, B e C do modelo exponencial, tempos de reparo e taxas de falha. Estes dados foram especificados com base nas informações disponíveis nas referências (1), (5) e (6).

O valor ótimo da função objetivo [6] após a calibração das taxas de falha é  $5,0381 \times 10^{-4}$  enquanto que o valor inicial da função objetivo [6] (função objetivo calculado com o valor inicial das taxas de falha) é 2,0854. Em outras palavras, o algoritmo de calibração causou uma redução de 99,9758% no erro quadrático ponderado entre os valores apurados e calculados do índice FEC. Adicionalmente, é importante avaliar o impacto da calibração no índice FEC. Os valores apurados, inicial (calculado com os valores iniciais das taxas de falha), e calibrado do índice FEC são: 2,4198; 0,9850 e 2,4198. Conseqüentemente, pode-se concluir que existe um erro de 59,2960% no valor inicial do índice FEC com relação ao seu valor apurado. Contudo, o valor calibrado do índice FEC é exatamente igual ao seu valor apurado, isto é, o modelo de calibração conseguiu eliminar o erro no FEC associado com as estimativas iniciais das taxas de falha. Este resultado é devido à utilização da restrição de igualdade (3.10) no modelo de calibração das taxas de falha. Todavia, é importante enfatizar que o principal objetivo deste artigo é a calibração de índices nodais, isto é: FIC e DIC. Desta forma, deve-se avaliar os resultados do modelo de calibração a nível nodal. A Figura 1 mostra os valores especificados (apurados) e otimizados (calibrados) do índice FIC para todos os pontos de carga do alimentador 01C5. Adicionalmente, podem-se visualizar os valores dos erros associados com os valores de FIC inicial e calibrado no gráfico apresentado na Figura 2.

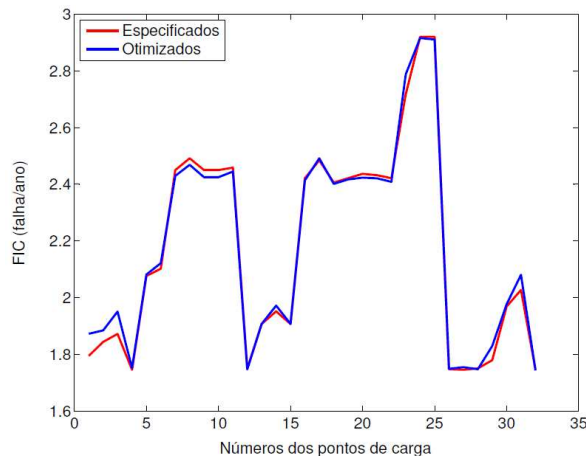


Figura 1 – Valores especificados e otimizados do índice FIC.

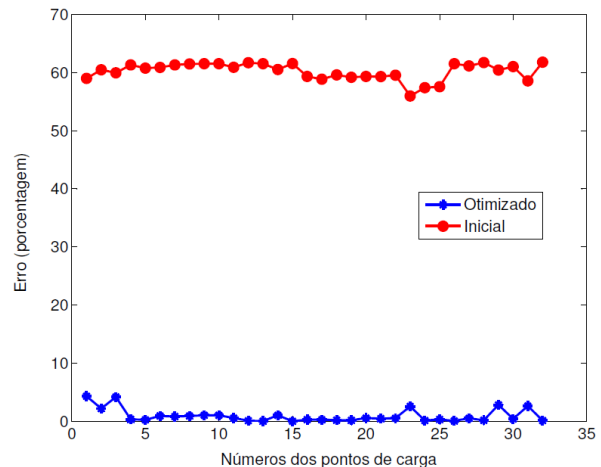


Figura 2 – Erros associados com os valores inicial e otimizado do índice FIC para o alimentador 01C5.

A partir das Figuras 1 e 2, pode-se observar que os erros associados com os valores otimizados do índice FIC são consideravelmente menores do que aqueles referentes aos valores iniciais do índice FIC. Por exemplo, os valores médios dos erros associados com os valores iniciais e ótimos do FIC são iguais a 60,2019% e 0,9425%, respectivamente. Em outras palavras, o algoritmo de calibração das taxas de falha causou uma redução significativa nos erros entre os valores calculados e apurados do índice FIC para os pontos de carga.

Os gráficos das funções das taxas de falha para os fusíveis e para as seções do tronco são mostrados nas Figuras 3 e 4. Cada uma destas figuras mostra dois gráficos: um associado com os valores iniciais dos parâmetros A, B e C e outro referente aos valores ótimos (calibrados) destes parâmetros. A partir destas figuras pode-se observar que todas as funções de taxas de falha calibradas são crescentes. Este resultado demonstra que a obtenção de funções de taxa de falha crescentes a partir das restrições [8] e [9] foi bem sucedida. É importante lembrar que a existência de funções de taxa de falha crescentes, com relação à condição, garante que o impacto das técnicas de mitigação de falhas é coerente. Isto é, se uma técnica de mitigação melhora a condição de um componente, então a taxa de falha deste componente é reduzida. Desta forma, é possível avaliar de forma adequada o impacto das atividades de manutenção nos índices de confiabilidade da rede de distribuição.

O valor ótimo da função objetivo [14] obtido após a calibração dos tempos de reparo é 0,11986 enquanto que o valor inicial da função objetivo [14] (função objetivo calculado com o valor inicial das taxas de falha e tempos de reparo típicos) é 55,284. Em outras palavras, o algoritmo de calibração causou uma redução de 99,7832% no erro quadrático ponderado entre os valores apurados e calculados do índice DIC. Adicionalmente, é importante avaliar o impacto da calibração no índice DEC. Os valores apurados, inicial (calculado com os valores iniciais das taxas de falha e tempos de reparo típicos) e calibrado do índice DEC são: 11,8620; 2,0915 e 11,8620, respectivamente. Adicionalmente, o valor calibrado do DEC gerado pelo método de mínima norma é 11,8620. A partir destes resultados, pode-se concluir que existe um erro de 82,3682% no valor inicial do índice DEC com relação ao seu valor apurado. Contudo, os valores calibrados do índice DEC, via programação quadrática e mínima norma, são exatamente iguais ao seu valor apurado. Isto é, os modelos de calibração do tempo de reparo eliminaram o erro no DEC associado com as estimativas iniciais dos dados de confiabilidade. Este resultado, é devido a presença da restrição de igualdade  $A^{eq} \tau^{ep} = b^{eq}$  tanto no modelo de programação quadrática como no modelo de mínima norma.

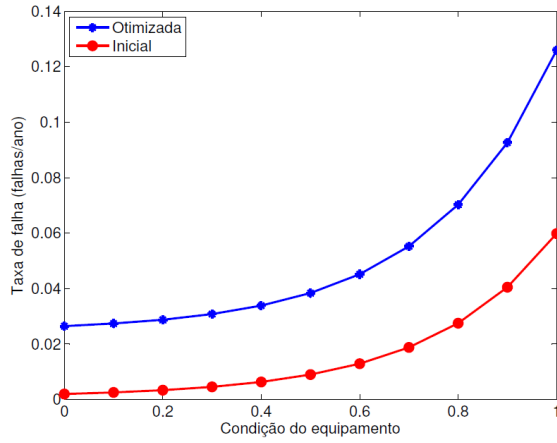


Figura 3 – Gráficos das funções da taxa de falha inicial e otimizada para os fusíveis.

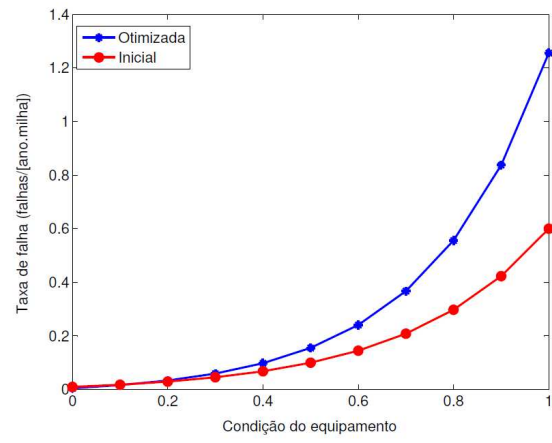


Figura 4 – Gráficos das funções da taxa de falha inicial e otimizada para seções do tronco.

As Figuras 5 e 6 mostram os valores especificados (apurados) e otimizados (calibrados) do índice DIC para todos os pontos de carga do alimentador 01C5 usando as seguintes técnicas: programação quadrática e mínima norma, respectivamente.

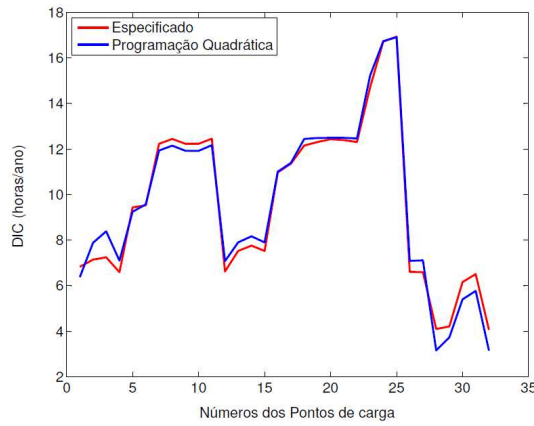


Figura 5 – Valores especificados e calibrados do índice DIC via programação quadrática.

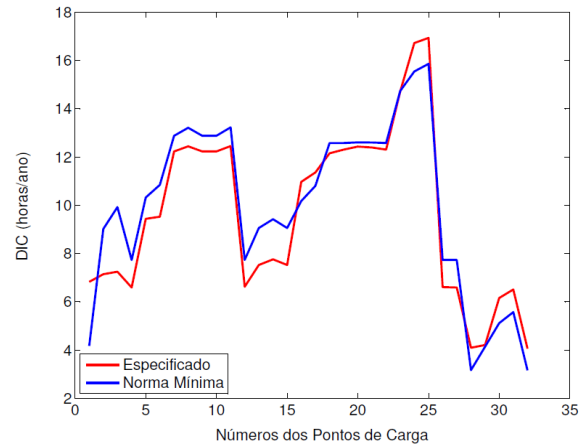


Figura 6 – Valores especificados e calibrados do índice DIC via mínima norma.

A partir das Figuras 5 e 6, pode-se observar que a qualidade do ajuste entre os valores do DIC calibrados via programação quadrática é melhor que aquela obtida com a mínima norma. Este resultado é esperado visto que a função objetivo do método de mínima norma (expressão [17]) desconsidera os valores apurados do índice DIC.

A Tabela 2 mostra os valores dos tempos de reparo associados com os tipos de equipamentos, onde:

- $\tau_m^{\min}$ : é limite inferior para os tempos de reparo dos equipamentos;
- $\tau_m^{\text{norm}}$ : é valor do tempo de reparo calibrado via método de mínima norma;
- $\tau_m^{\text{quad}}$ : é valor do tempo de reparo calibrado via programação quadrática.

A partir da Tabela 2, pode-se observar que os tempos de reparo calibrados, via programação quadrática, dos religadores, seções das laterais e transformadores estão nos seus limites mínimos. Contudo, nenhum tempo de reparo calculado pela programação quadrática é infactível, ou seja, menor do que o tempo de chaveamento (1/2 hora). Entretanto, a solução obtida com o método de mínima norma é infactível, pois o tempo de reparo dos religadores (0.0 horas) é menor do que o tempo de chaveamento. Na verdade, um tempo de reparo nulo não é viável na prática para nenhum tipo de equipamento. A incompatibilidade das soluções obtidas via mínima norma na calibração dos tempos de reparo era esperada, pois o método de mínima norma desconsidera o seguinte conjunto de restrições:  $\tau_m^{\text{rep}} \geq \tau_m^{\min}$ , para  $m \in \Omega_\theta$ . Este resultado demonstra que a qualidade da calibração fornecida pela programação quadrática é também superior aquela associada com a mínima norma com relação à factibilidade das soluções obtidas.

Tabela 2 – Tempos de reparo mínimo, inicial e calibrados via mínima norma e programação quadrática.

Tipo de componente	$\tau^{min}$	$\tau^{norm}$	$\tau^{quad}$
Religador	3.0000	0.0000	3.0000
Fusível	0.5000	11.6291	6.8605
Chave	1.5000	5.8652	12.8142
Seção do Tronco	2.0000	2.6703	7.9109
Seção das Laterais	2.0000	2.0225	2.0000
Transformadores	3.0000	0.2745	3.0000

## 5.0 - CONCLUSÕES

Este artigo apresenta uma técnica de calibração desacoplada para ajustar as taxas de falha e tempos de reparo dos equipamentos. Esta decomposição permitiu que o problema de calibração dos dados de confiabilidade fosse resolvido usando as seguintes técnicas: programação não-linear para a calibração das taxas de falha e programação quadrática para a calibração dos tempos de reparo. As principais contribuições foram: modelagem explícita dos índices de confiabilidade nodais (FIC e DIC) no modelo de calibração; igualdade entre os valores calculados e apurados dos índices FEC e DEC; e o ajuste dos tempos de reparo considerando índices de confiabilidade nodais.

Os modelos de calibração propostos foram testados em um alimentador da CEMAR. As conclusões obtidas são:

- A calibração das taxas de falha via técnicas de programação não-linear reduziu significativamente os erros entre os valores calculados e apurados do índice FIC;
- Os valores ajustados dos parâmetros do modelo exponencial da taxa de falha resultaram em funções crescentes, isto é, equipamentos que estão operando nas piores condições têm as maiores taxas de falha e vice-versa;
- Todos os modelos de otimização usados na calibração geraram soluções nas quais os valores calculados dos índices sistêmicos (FEC e DEC) são iguais aos seus valores medidos (apurados);
- A calibração dos tempos de reparo, via métodos de mínima norma e programação quadrática, obteve uma diminuição significativa nos erros entre os valores calculados e medidos do índice DIC;
- A solução obtida pelo método da mínima norma pode ser incompatível, pois este método não considera limites inferiores para os tempos de reparo;

## 6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) BROWN, R. E., 2002, "Electric Power Distribution Reliability", Marcel Dekker.
- (2) BILLINTON, R. e ALLAN, R. N., 1996, "Reliability Evaluation of Power Systems", Plenum Press, 2ª edição.
- (3) AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL), 2009, "Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica", Disponível em <<http://www.aneel.gov.br>>, Acesso em: 13 maio 2010.
- (4) AQUINO NETO, N. S., RODRIGUES, A. B. e DA SILVA, M. G., 2004, "Avaliação da Confiabilidade em Redes de Distribuição Radiais: Calibração de Parâmetros e Estimação de Incertezas Associadas com Índices de Confiabilidade", XV Congresso Brasileiro de Automática (CBA 2004), Gramado, Brasil, [CD ROM].
- (5) BROWN, R. E., FRIMPONG, G. e LEE WILLIS, H., 2004, "Failure Rate Modeling Using Equipment Inspection Data", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 19, Nº 2, pp. 782-787.
- (6) Márcio André Nazareno Ferreira, "Calibração de Dados para Estudos de Confiabilidade em Redes de Distribuição: Modelagem da Condição dos Equipamentos e dos Índices de Continuidade Nodais", Dissertação de Mestrado, PPGEE, UFMA, 2010.

## 7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

**Márcio André Nazareno Ferreira** possui graduação (2001) e mestrado (2010) em engenharia elétrica pela UFMA. Atualmente é executivo de gestão e controle operacional da Companhia Energética do Maranhão S/A (CEMAR).

**Anselmo Barbosa Rodrigues** possui graduação (1997) e mestrado (2003) em engenharia elétrica pela UFMA e doutorado em engenharia elétrica (2009) pela PUC-Rio. Atualmente é professor da UFMA.

**Maria da Guia da Silva** possui graduação (1979) e mestrado (1983) em engenharia elétrica pela UFPB e Ph.D em engenharia elétrica (1994) pela UMIST-UK. Atualmente é professor da UFMA.