

**Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP**  
**Departamento de Engenharia de Energia e**  
**Automação Elétricas**

ISSN 1413-2214  
BT/PEA/0008

---

**Metodologia para Avaliação do  
Comportamento e Vida Útil de  
Motores Alimentados por Fontes  
Assimétricas de Tensão**

---

**José Luiz Antunes de Almeida  
Eduardo Mário Dias**

O presente trabalho é um resumo da tese de doutorado apresentada por José Luiz Antunes de Almeida, sob orientação do Prof. Dr. Eduardo Mário Dias: "Metodologia para Avaliação do Comportamento e Vida Útil de Motores Alimentados por Fontes Assimétricas de Tensão", defendida em 20/12/99, na EPUSP.

A íntegra da tese encontra-se à disposição com o autor e na biblioteca de Engenharia de Eletricidade da Escola Politécnica da USP.

#### FICHA CATALOGRÁFICA

Almeida, José Luiz Antunes de

Metodologia para avaliação do comportamento e vida útil de motores alimentados por fontes assimétricas de tensão / J.L.A. de Almeida, E.M. Dias. — São Paulo : EPUSP, 2000.

21 p. — (Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas, BT/PEA/0008)

1. Motores de indução - Desequilíbrio de tensão I. Dias, Eduardo Mário II. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas III. Título IV. Série

ISSN 1413-2214

CDD 621.46

JOSÉ LUIZ ANTUNES DE ALMEIDA

**METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO  
E VIDA ÚTIL DE MOTORES ALIMENTADOS POR  
FONTES ASSIMÉTRICAS DE TENSÃO**

Artigo técnico apresentado à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, como parte dos pré-requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia.



## **Metodologia para avaliação do comportamento e vida útil de motores alimentados por fontes assimétricas de tensão**

### **1. Introdução**

O desequilíbrio de tensão é um dos vários índices utilizados para avaliar a qualidade do fornecimento de energia elétrica. É caracterizado pela relação entre valores eficazes de tensão ou corrente das componentes simétricas de seqüência positiva e negativa.

As maiores vítimas dos sistemas desequilibrados são os motores de indução, pois na presença de tensões assimétricas, há sobreaquecimento localizado dos enrolamentos do estator, comprometendo o rendimento e a vida útil da isolação.

Este trabalho analisa o problema do desequilíbrio de tensão em motores de indução, através de um modelo térmico, que permite levantar uma curva de elevação de temperatura, em função do fator de desequilíbrio.

De posse dessa curva e da hipótese de existência de uma determinada distribuição probabilística do desequilíbrio, é desenvolvido um procedimento estatístico que possibilita avaliar o grau de comprometimento da vida útil da isolação do motor.

### **2. O circuito elétrico equivalente**

Normalmente, a análise elétrica do fenômeno do desequilíbrio de tensão é conduzida através dos circuitos equivalentes de seqüência positiva e negativa da Fig. 1.

O desequilíbrio de tensão é definido por:

$$d = \frac{V_2}{V_1} \quad (1)$$

onde  $V_2$  e  $V_1$  são, respectivamente, os valores eficazes das tensões de seqüência negativa e positiva.

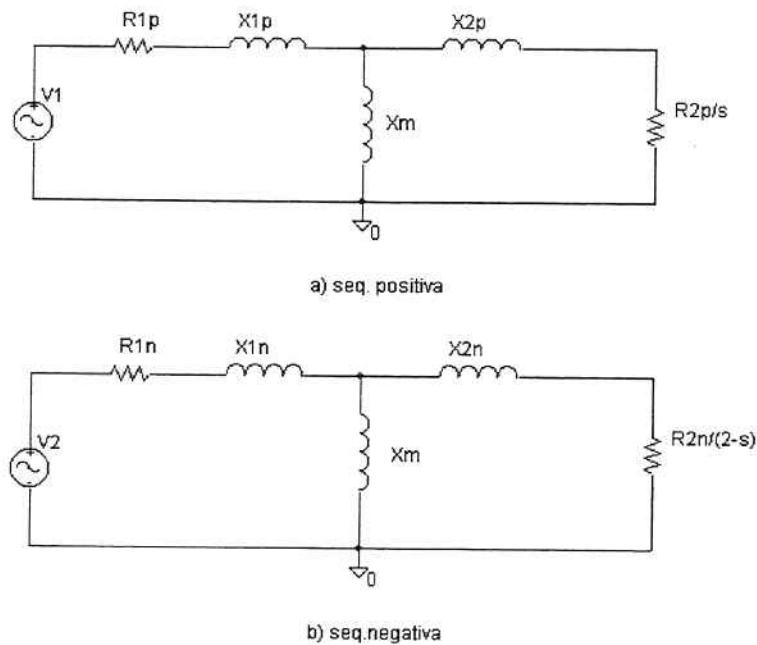


Fig. 1 Circuitos equivalentes para análise com tensões desequilibradas.

Em relação ao circuito equivalente tradicional, foi suprimida a resistência de perdas no núcleo  $R_p$ , uma vez que tais perdas permanecem essencialmente constantes e independentes de desequilíbrios de tensão menores que 15%.

Os componentes do circuito equivalente podem ser calculados pelos métodos conhecidos dos textos de máquinas elétricas [1].

Na presença de tensões desequilibradas, o escorregamento aumenta, o mesmo ocorrendo com a corrente do circuito de seqüência positiva  $I_{1p}$ , que também aumenta. Isso é necessário para compensar as perdas adicionais do circuito de seqüência negativa e para vencer o conjugado contrário, que é produzido pela corrente de seqüência negativa  $I_{1n}$ .

O balanço energético, em cada situação de desequilíbrio, permite calcular o novo valor de escorregamento, o acréscimo da correntes e, consequentemente, o fator de desequilíbrio de corrente.

Com o valor de  $I_{lp}$  e o fator de desequilíbrio de corrente, é possível calcular a elevação de temperatura dos enrolamentos, através do circuito térmico que será aqui apresentado.

### 3. O circuito térmico equivalente

É bem conhecido o uso da analogia de circuitos elétricos com processos de transmissão de calor. A Fig. 2 mostra o modelo proposto para análise do desequilíbrio.

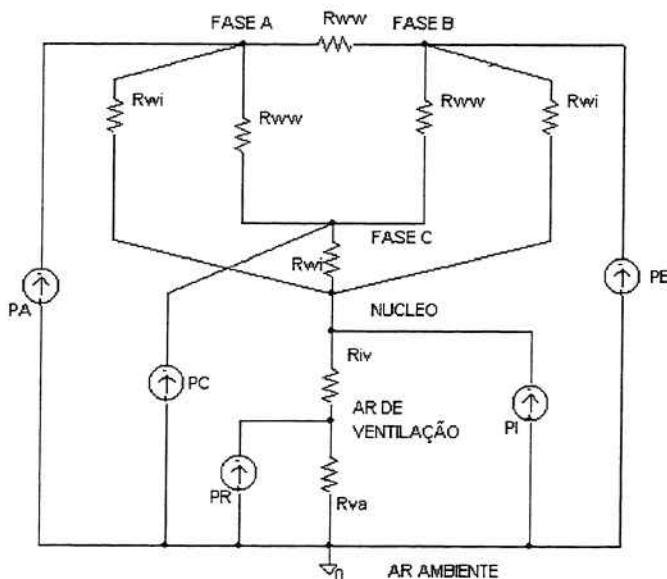


Fig. 2 Circuito térmico equivalente.

As premissas básicas do modelo são:

- Todo o calor gerado no motor é retirado pelo ar de ventilação.
- As lâminas do núcleo possuem a mesma temperatura ao longo de uma dada seção transversal.

- Todos os condutores pertencentes a uma dada fase do estator possuem a mesma temperatura, ao longo de uma dada seção transversal do motor.
- O rotor só troca calor com o ar de ventilação.
- O calor gerado em uma bobina do estator não flui diretamente para o ar de ventilação: uma bobina só troca calor ou com o núcleo do estator ou com a bobina de uma outra fase ou com ambos.
- No estator, apenas o núcleo transmite calor para o ar de ventilação.

No circuito térmico, as variáveis de interesse são:

- $P_A, P_B, P_C$  - potências dissipadas nas fases A, B e C
- $P_I$  - potência de perdas no núcleo
- $P_R$  - potência dissipada no rotor
- $\theta_A$  - elevação da temperatura do enrolamento da fase A, em relação ao ambiente.
- $\theta_{Av}$  - elevação da temperatura do enrolamento da fase A, em relação ao ar de ventilação.
- $\theta_{iv}$  - elevação da temperatura do núcleo do estator, em relação ao ar de ventilação.
- $\theta_{va}$  - elevação da temperatura do ar de ventilação, em relação ao ambiente.
- $\theta_{Ai}$  - elevação da temperatura do enrolamento da fase A, em relação ao núcleo do estator
- $R_{ww}$  - resistência térmica entre os enrolamentos de duas fases do estator
- $R_{wi}$  - resistência térmica entre um enrolamento do estator e o núcleo

- $R_{iv}$  - resistência térmica entre o núcleo do estator e o ar de ventilação
- $R_{va}$  - resistência térmica entre o ar de ventilação e o ambiente.

Na analogia, a elevação de temperatura  $\theta$  é análoga à diferença de potencial. A resistência térmica é análoga à resistência elétrica e as potências dissipadas nos enrolamentos, no núcleo e no rotor, são representadas por fontes de corrente.

A elevação de temperatura do enrolamento da fase A, por exemplo, pode se dada por:

$$\theta_A = \theta_{Ai} + \theta_{iv} + \theta_{va} \quad (2)$$

onde:

$$\theta_{Ai} = R_{wi} \cdot P_A \quad (3)$$

$$\theta_{iv} = R_{iv} \cdot (P_A + P_B + P_C + P_I) \quad (4)$$

$$\theta_{va} = R_{va} \cdot (P_A + P_B + P_C + P_I + P_R) \quad (5)$$

#### 4. Determinação experimental das resistências térmicas

A determinação experimental das condutâncias é feita através dos ensaios descritos a seguir.

1) *Ensaio em vazio*: Alimentando-se o motor com tensão nominal e operando-o em vazio, o motor tem as perdas nominais no núcleo. As perdas no rotor podem ser desprezadas. O circuito térmico equivalente pode ser simplificado, como se vê na Fig. 3. A partir do circuito, consideradas as perdas em vazio (determinadas em ensaio de rotina) e medidas as correntes nas fases, pode-se calcular  $P_T$ , dado por:

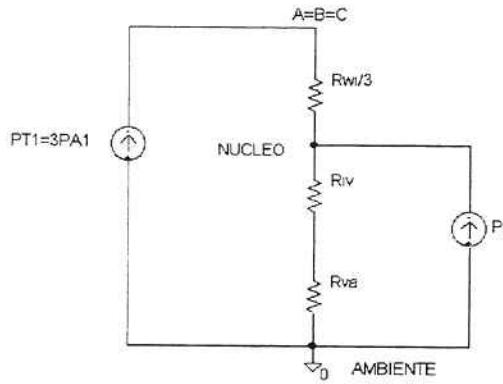


Fig. 3 Circuito equivalente simplificado para o ensaio em vazio.

$$P_T = 3 I_A^2 R_1 \quad (6)$$

onde  $R_1$  é a resistência do enrolamento do estator.

A análise do circuito da Fig. 3 resulta em :

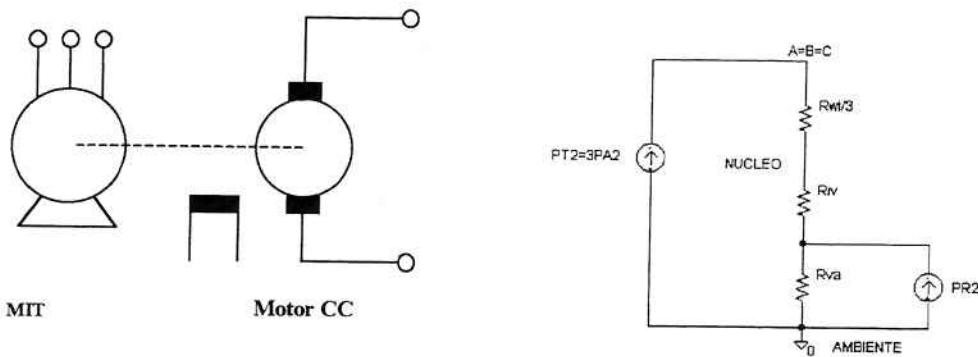
$$\theta_{11} = \frac{R_{wi}}{3} P_{T1} + (R_{iv} + R_{va})(P_I + P_{T1}) \quad (7)$$

$\theta_{11}$  é a elevação da temperatura do enrolamento do estator no ensaio em vazio. No índice 11, o primeiro 1 refere-se ao enrolamento do estator e o segundo 1 ao primeiro ensaio.

2) *Ensaio em tensão reversa:* Este ensaio é semelhante a um ensaio em curto-círcuito, em que o motor é acionado em um sentido, enquanto se aplicam tensões com seqüência invertida de fases ao estator. Mais claramente, o motor é forçado a girar (através de um outro motor, CC, por exemplo) em um sentido contrário ao que seria normal, pela aplicação das tensões trifásicas. A Fig. 4 a) mostra o arranjo.

Desta forma, com um valor relativamente baixo de tensão (10 a 15% do valor nominal), é possível estabelecer correntes próximas ao valor nominal, tanto no estator quanto no rotor. Sendo baixa a tensão aplicada, as perdas no núcleo podem ser desprezadas.

A Fig. 4 b) resume como fica o circuito equivalente nesta condição.



a) Acionamento forçado do motor de indução por um motor CC

b) Circuito equivalente

Fig. 4 Ensaio em tensão reversa

A análise do circuito da Fig. 4 produz:

$$\theta_{12} = \left( \frac{R_{wi}}{3} + R_{iv} \right) P_{T2} + R_{va} (P_{T2} + P_{R2}) \quad (8)$$

Nesta equação, o valor de  $P_{T2}$  pode ser calculado como anteriormente, utilizando-se a expressão (6), após serem medidas as correntes de fase.

O valor de  $P_{R2}$  tem duas parcelas:  $P'_{R2}$  e  $P''_{R2}$ . A primeira,  $P'_{R2}$ , é devida à potência elétrica transmitida através do entreferro. Essa parcela é obtida subtraindo-se as perdas no estator ( $P_{T2}$ ) da potência elétrica de entrada ( $P_1$ ).

$$P_{R2} = P'_{R2} + P''_{R2} \quad (9)$$

$$P'_{R2} = P_1 - P_{T2} \quad (10)$$

A segunda parcela,  $P''_{R2}$ , é a potência transmitida pelo motor CC, para fazer o motor girar no sentido contrário ao do campo principal. Ela é igual à potência fornecida ao motor CC ( $P_{CC2}$ ), menos a potência necessária para o motor CC girar em vazio ( $P_{CCv}$ ), menos o acréscimo das perdas Joule, no motor CC. Isso resulta em:

$$P''_{R2} = P_{CC2} - P_{CCv} - P_{Joule} \quad (11)$$

$$P''_{R2} = V_a (I_a - I_{a0}) - r_a (I_a^2 - I_{a0}^2) \quad (12)$$

$V_a$  e  $I_a$  são, respectivamente, a tensão e a corrente de armadura do motor CC. Os valores com índice “0”, referem-se à condição do motor CC em vazio e  $r_a$  é a resistência de armadura.

3) *Ensaio com corrente contínua:* Neste ensaio, o motor de indução tem as três fases ligadas em série e alimentadas com corrente contínua, de valor próximo ao nominal. Desta forma, as perdas no estator serão mantidas próximas ao valor de plena carga. O motor de indução também é acionado, através de um motor externo, para manter as condições de ventilação. Como o campo principal está ausente nesse caso, as perdas no núcleo são desprezíveis. A Fig. 5 ilustra como ficou o circuito equivalente nesse ensaio.

A análise do circuito da Fig. 5 conduz a:

$$\theta_{13} = \left( \frac{R_{wi}}{3} + R_{iv} \right) P_{T3} + R_{va} (P_{T3} + P_{R3}) \quad (13)$$

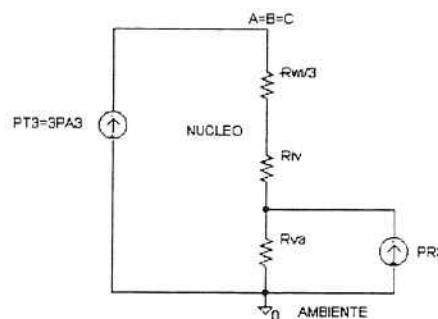


Fig. 5 Circuito equivalente para o ensaio em corrente contínua.

Nesta equação, o valor de  $P_{T3}$  é calculado como anteriormente, utilizando-se a expressão (6), após serem medidas as correntes de fase.

O valor de  $P_{R3}$  é calculado através da potência adicional que o motor CC tem de fornecer, além daquela que seria necessária para girá-lo em vazio. Este valor é dado por:

$$P_{R3} = V_a (I_a - I_{a0}) - r_a (I_a^2 - I_{a0}^2) \quad (14)$$

A expressões (7), (8) e (13) formam um sistema de equações lineares, que pode ser resolvido para obter os valores de  $R_{wi}$ ,  $R_{iv}$  e  $R_{va}$ . Em todos os ensaios,  $\theta_1$  deve ser medido pelo método da resistência, segundo previsto pela norma NBR 7094 [2].

## 5. A elevação da temperatura

Como o desequilíbrio é uma relação entre duas tensões, pode ser entendido como uma grandeza fasorial, com módulo e fase. É possível provar que apenas a amplitude do desequilíbrio não é suficiente para caracterizar seus efeitos, pois, dependendo de seu ângulo de fase, o aquecimento pode apresentar variações [4] significativas.

Também pode ser mostrado, como em [7], que a diferença de fase entre as correntes de seqüência positiva e negativa influencia a elevação de temperatura. Ela é máxima, quando as correntes estão alinhadas ( $\theta=0^\circ$ ) e mínima, quando as correntes estão em oposição de fase ( $180^\circ$ ).

Simulando-se o circuito térmico, na condição de  $I_{1p}$  e  $I_{1n}$  alinhadas, é possível variar o desequilíbrio para obter a curva de elevação da temperatura da Fig. 6.

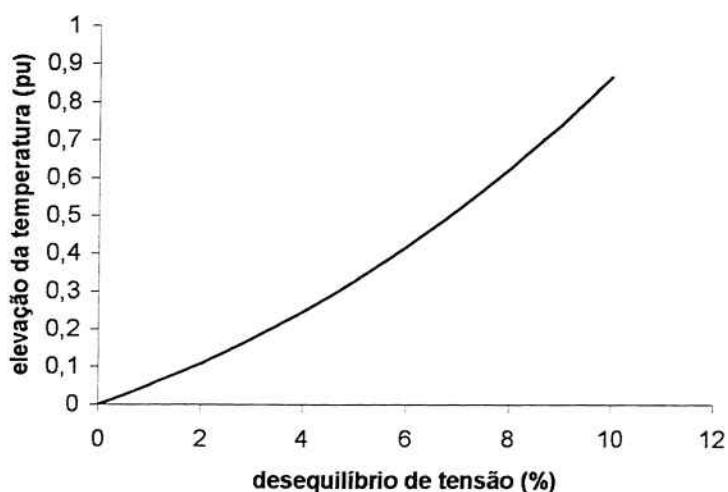


Fig. 6 Elevação da temperatura, em função do desequilíbrio de tensão para um motor de 150CV, simulado com o modelo térmico proposto.

Em [6] é mencionada a referência 13, um relatório de uma discussão de um grupo de trabalho (WG 36) do CIGRE (“Motor sensitivity due to voltage asymmetry”), do qual foi possível obter uma cópia parcial. Neste trabalho, é apresentada uma equação para o sobreaquecimento relativo do estator, repetida na expressão (15).

$$1 + \Delta\theta = \left(\frac{1+\rho}{2}\right)(i_1+i_2)^2 + \left(\frac{1-\rho}{2}\right)(i_1-i_2)^2 \quad (15)$$

onde:

$i_1$  = valor em pu da corrente de seqüência positiva

$i_2$  = valor em pu da corrente de seqüência negativa

$\Delta\theta$  = sobreaquecimento relativo

$\rho$  = coeficiente de correlação

O coeficiente de correlação permite desacoplar as duas variáveis aleatórias dos sistemas de seqüência positiva ( $i_1$ ) e negativa ( $i_2$ ).

Fazendo-se  $i_1=1\text{pu}$ , obtém-se:

$$\Delta\theta = i_2^2 + 2\rho i_2 \quad (16)$$

A Fig. 7 mostra o traçado da curva prevista pela expressão (16). Foi utilizado na Fig. 7, um valor de  $\rho$ , ajustado em 0,2688, para que as curvas sejam coincidentes.

No relatório apresentado a CIGRE, já mencionado, propõe-se que o coeficiente de correlação seja dividido em um produto de dois fatores ( $\rho=\rho' \cdot \rho''$ ), cada um com origem distinta.

O fator  $\rho'$  é chamado coeficiente de correlação funcional e pode ser expresso por:

$$\rho' = \cos\theta \quad (17)$$

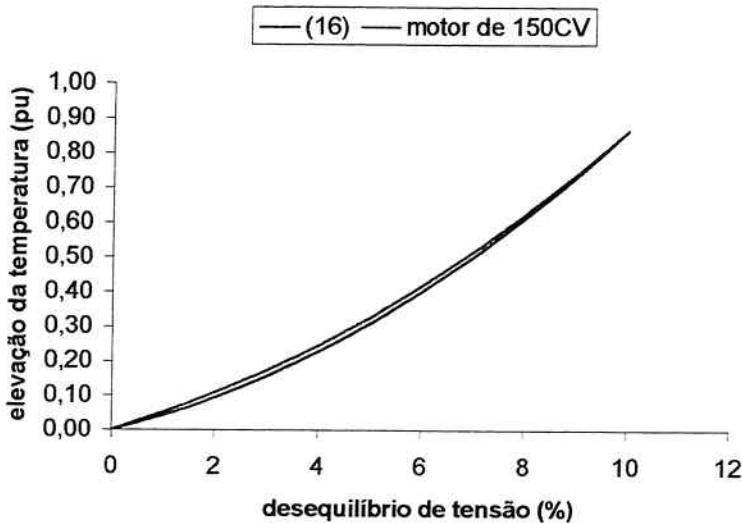


Fig. 7 Apresentação das curvas de temperatura do modelo térmico e a prevista por (16).

e relaciona a elevação da temperatura, com a defasagem entre as correntes de seqüência positiva e negativa.

O fator de correlação dimensional ( $\rho''$ ) engloba o aspecto físico de distribuição dos enrolamentos de fase. Não é razoável supor que cada enrolamento de fase esteja isolado dos demais. O acoplamento térmico entre os enrolamentos, que influí no valor de  $\rho''$ , depende de uma série de fatores construtivos do motor, tais como tipo de enrolamento, isolação da ranhura, polaridade, potência nominal, fator de encurtamento de passo, etc. Esse coeficiente apresenta extremos de variação entre 0 e 1, que correspondem a duas situações hipotéticas de isolamento perfeito ( $\rho''=1$ ) e o acoplamento perfeito ( $\rho''=0$ ).

Admitindo-se que a fase entre  $I_{lp}$  e  $I_{ln}$  varie, de forma equiprovável, entre 0 e  $2\pi$  radianos, o valor médio de  $\rho'$  seria dado por:

$$\bar{\rho}' = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} \approx 0,827 \quad (18)$$

Este é o valor médio da amplitude de elevação da temperatura.

Para o coeficiente  $\rho''$  é proposta uma faixa de variação de

$$\frac{1}{4} \leq \rho'' \leq \frac{3}{4} \quad (19)$$

compatível, segundo o mesmo estudo, com o dimensionamento de motores industriais de baixa tensão, de 1 a 50kW.

Finalmente, é proposto um valor global para o coeficiente de correlação:

$$\bar{\rho} = \bar{\rho}' \cdot \bar{\rho}'' \approx \frac{1}{2} \quad (20)$$

Apesar de estar relacionado à presença da componente de corrente de seqüência negativa, o desequilíbrio é mais facilmente analisado através da tensão de seqüência negativa. A partir das características do motor, é possível relacionar  $i_2$  e  $v_2$  através da impedância de seqüência negativa.

$$i_2 = \frac{v_2}{Z_n} \quad (21)$$

O sobreaquecimento pode, então, ser expresso através de:

$$\Delta\theta = \left( \frac{v_2}{z_n} \right)^2 + 2\bar{\rho} \left( \frac{v_2}{z_n} \right) \approx 25v_2^2 + 5v_2 \quad (22)$$

onde

$v_2$  = tensão de seqüência negativa (em pu)

$z_n$  = impedância de seqüência negativa

$\bar{\rho}$  = valor médio do coeficiente de correlação

## 6. Análise estatística

Em [6] é proposto um modelo probabilístico para o desequilíbrio, em que a origem do fenômeno é atribuída a causas estruturais (ligadas à topologia da rede) e funcionais (cargas dos consumidores). Se o desequilíbrio estrutural tender a zero, a

distribuição deste tenderá a uma distribuição de Rayleigh, onde a fase tem uma fdp (função densidade de probabilidade) uniforme, entre 0 e  $2\pi$ , e a amplitude tem uma distribuição com fdp dada por:

$$f(\tau) = \left( \frac{\tau}{s^2} \right) \exp\left[-\frac{\tau^2}{2s^2}\right] \quad (23)$$

onde:

$\tau$  = desequilíbrio

$s$  = desvio padrão

Assumindo o valor médio do coeficiente de correlação igual a 1/2, e o valor de  $z_n$  igual a 1/5, conforme [6], pressupondo-se que a média do desequilíbrio seja de 3%, o desvio padrão pode ser calculado com sendo  $s=2,394\%$ .

Supondo que a elevação de temperatura se relacione com o desequilíbrio por uma função com parte linear e quadrática:

$$g(\tau) = a\tau^2 + b\tau \quad (24)$$

pode-se obter a distribuição da elevação da temperatura, a partir da distribuição do desequilíbrio, utilizando a expressão abaixo, dada em [5]

$$f_\theta(\theta) = \frac{f_\theta(\tau_1)}{|g'(\tau_1)|} + \dots + \frac{f_\theta(\tau_n)}{|g'(\tau_n)|} \quad (25)$$

onde:

$$g'(\tau) = 2a\tau + b \quad (26)$$

e

$$\tau_1 = \frac{-b + \sqrt{b^2 + 4a\theta}}{2a} \quad (27)$$

Substituindo-se os valores dados por (26) e (27) em (25), resulta:

$$f_{\theta}(\theta) = \left( \frac{-b + \sqrt{b^2 + 4a\theta}}{2a} \right) \cdot \frac{1}{s^2} \cdot \frac{1}{\sqrt{b^2 + 4a\theta}} \cdot \exp\left[ -\frac{\left( \frac{-b + \sqrt{b^2 + 4a\theta}}{2a} \right)^2}{2s^2} \right] \quad (28)$$

Através da planilha eletrônica, é possível calcular a média da elevação da temperatura e encontrar uma distribuição de Rayleigh, que pode ser utilizada no lugar de (28). Para definir o parâmetro  $s_R$  (desvio-padrão) dessa distribuição, impõe-se:

$$\bar{\theta} = s_R \sqrt{\frac{\pi}{2}} \quad (29)$$

resultando, para a função de densidade de probabilidade da elevação da temperatura:

$$f_{\theta}(\theta) = \left( \frac{\theta}{s_R^2} \right) \exp\left[ -\frac{\theta^2}{2s_R^2} \right] \quad (30)$$

A partir da fdp da elevação da temperatura, é possível encontrar, por integração, a função de distribuição da temperatura, resultando:

$$F(\theta) = 1 - \exp\left[ -\frac{\theta^2}{2s_R^2} \right] \quad (31)$$

A Fig. 8 mostra como fica a curva de distribuição de probabilidade para a temperatura, quando verificadas as premissas de desequilíbrio.

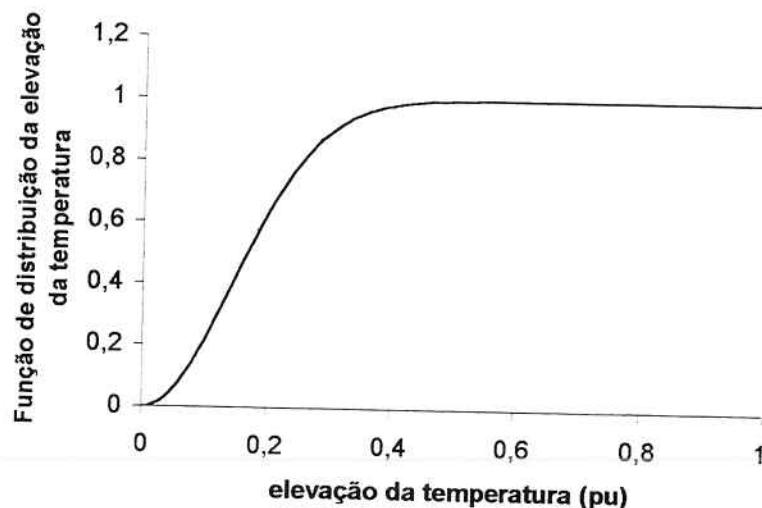


Fig. 8 Função de distribuição para a elevação da temperatura.

## 7. A distribuição da vida útil

O resultado final de interesse é obter o efeito do desequilíbrio na vida útil do motor. Sabe-se, por exemplo, que a vida útil da isolação cai à metade, para cada aumento de cerca de 10 °C de temperatura, acima da máxima temperatura da classe de isolação.

A curva de diminuição da vida útil é mencionada em [3], como constante da norma IEEE 275. No caso de isolação classe F, ela pode ser expressa por:

$$\vartheta = 20.000 \cdot 2^{\frac{\theta_N - \theta}{\Delta\theta}} \quad (32)$$

onde:

- $\vartheta$  = vida útil
- $\theta_N$  = temperatura máxima da classe de isolação (155 °C, no caso de classe F)
- $\Delta\theta$  = temperatura para reduzir à metade a vida útil da isolação (11 °C para classe F)
- $\theta$  = temperatura
- 20.000 horas é o tempo de vida útil da isolação (aproximadamente 2 anos)

Substituindo os valores típicos para classe F e, considerando que o motor trabalhe no limiar da classe de isolação, a diminuição da vida útil, em função da elevação da temperatura, resulta na curva mostrada na Fig. 9

Utilizando-se uma planilha eletrônica, é possível obter a função de distribuição para a variável aleatória da vida útil, diretamente da função de distribuição de  $\theta$ . O conceito de  $F_\vartheta(\vartheta)$  é:

$$F_\vartheta(V) = P\{\vartheta \leq V\} \quad (33)$$

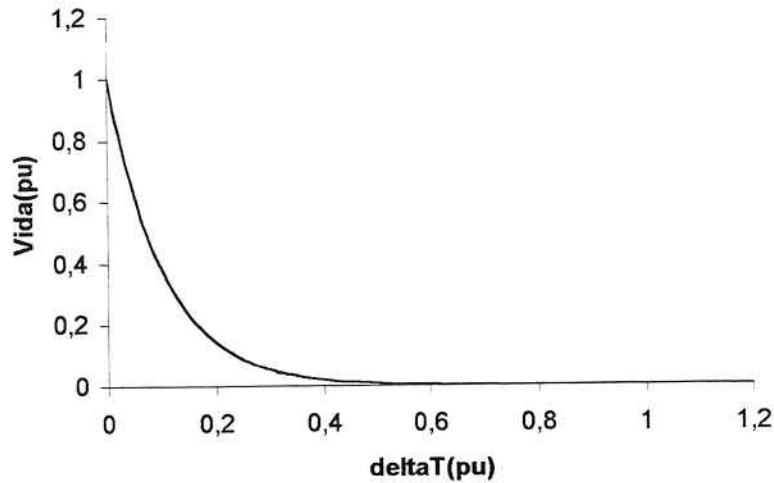


Fig.9 Variação da vida útil em função de  $\theta$ .

Ou seja, o valor de  $F_{\theta}(9)$ , no ponto  $9=V$ , é igual à probabilidade da vida útil ser menor do que  $V$ . Como a função que relaciona  $9$  e  $\theta$  é decrescente, dizer que  $9 \leq V$ , significa dizer que  $\theta > \theta_1$ , onde  $\theta_1$  é o valor de abcissa correspondente a  $V$ . Desta forma, pode-se escrever:

$$F_{\theta}(V) = P\{9 \leq V\} = P\{\theta > \theta_1\} = 1 - F_{\theta}(\theta_1) \quad (34)$$

Utilizando-se (34), pode-se traçar a curva de  $F_{\theta}(9)$ , como se vê na Fig. 10.

Apesar de fornecer informações estatísticas sobre a vida útil do motor, a Fig. 10 não relaciona, diretamente, a vida útil com o desequilíbrio existente. Para uma descrição mais detalhada da dependência do desequilíbrio, será levantada uma curva de  $9_{\text{média}} \times \tau_{\text{médio}}$ , que é a esperança de vida útil (a média da vida útil), em função da média do desequilíbrio.

Para obter a função de densidade de probabilidade da vida útil, é necessário derivar a curva da Fig. 10.

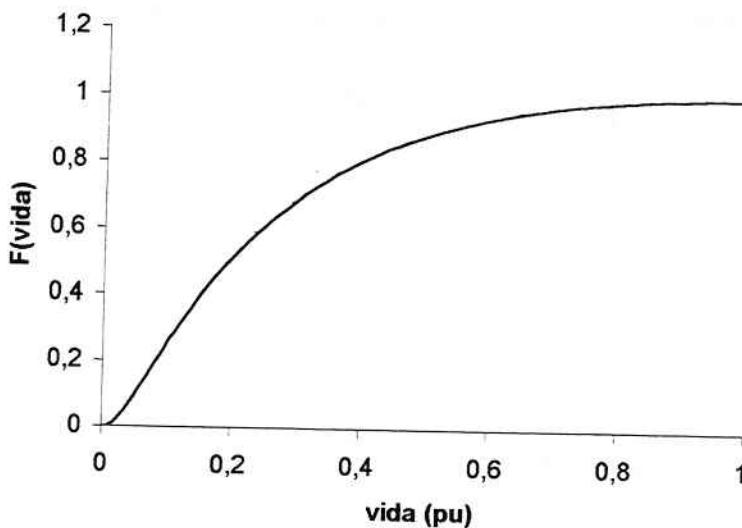


Fig. 10 Função de distribuição da vida útil.

$$f_g(g) = \frac{dF(g)}{dg} \quad (35)$$

Entretanto, como  $F(g)$  foi obtida através de uma planilha eletrônica, a sua expressão não é conhecida. Para obter  $f_g(g)$ , será necessário retomar a expressão (32), para a vida útil, em pu:

$$g = 2^{-\frac{\theta+155}{11}} \quad (36)$$

Aplicando logaritmo neperiano, em ambos os lados de (36), obtém-se:

$$\ln g = -\frac{\theta+155}{11} \ln 2 \quad (37)$$

$$\theta = -\ln g \cdot \frac{11}{155 \cdot \ln 2} \quad (38)$$

A expressão (38) pode ser utilizada para preencher uma coluna de planilha eletrônica, com os valores de  $\theta$ , em função da vida útil. Isso parece repetitivo, mas é absolutamente imprescindível para confirmar, posteriormente, se a distribuição obtida é uma fdp. Ademais, será necessário esse expediente, também para o cálculo da média da vida útil.

Retomando a expressão (38), vê-se que, em vista de (31), pode-se escrever:

$$F_g(\theta) = 1 - \{1 - \exp[-\frac{\theta^2}{2s^2}]\} \quad (39)$$

$$F_g(\theta) = \exp[-\frac{\theta^2}{2s^2}] \quad (40)$$

Derivando-se (40), obtém-se  $f_g(\theta)$ :

$$f_g(\theta) = \exp[-\frac{\theta^2}{2s^2}] \cdot \left(-\frac{\theta}{s^2}\right) \frac{d\theta}{d\theta} \quad (41)$$

O primeiro termo de (41) é  $F_g(\theta)$ , já disponível em uma coluna de planilha. O mesmo ocorre com o segundo termo, onde  $s_R$  é o desvio padrão da função de densidade de probabilidade da temperatura, que foi aproximada por uma distribuição de Rayleigh. O valor de  $s_R$ , quando a média do desequilíbrio é 3%, já foi calculado por (29), resultando 0,14256.

Derivando-se (6-46), em relação a  $\theta$ , chega-se a:

$$\frac{d\theta}{d\theta} = -\frac{1}{\theta} \cdot \frac{11}{155 \ln 2} \quad (42)$$

Substituindo-se (42) em (41), esta fica completa:

$$f_g(\theta) = F_g(\theta) \cdot \frac{\theta}{s_R^2} \cdot \frac{1}{\theta} \cdot \frac{11}{155 \ln 2} \quad (6-48)$$

Agora, a curva de  $f_g(\theta)$  pode ser obtida da planilha eletrônica, sendo traçada na Fig. 11.

A média da vida útil  $\bar{\theta}$  pode ser calculada, pela planilha, para cada valor da média de desequilíbrio. Foram considerados desequilíbrios de até 5%, por já serem suficientes para caracterizar a curva de vida média, em função da média do desequilíbrio, mostrada na Fig. 12.

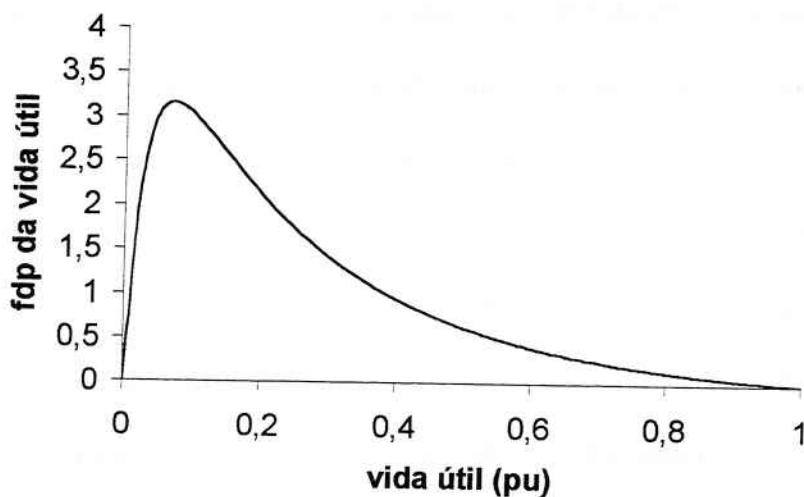


Fig. 11 Função de densidade de probabilidade da vida útil.

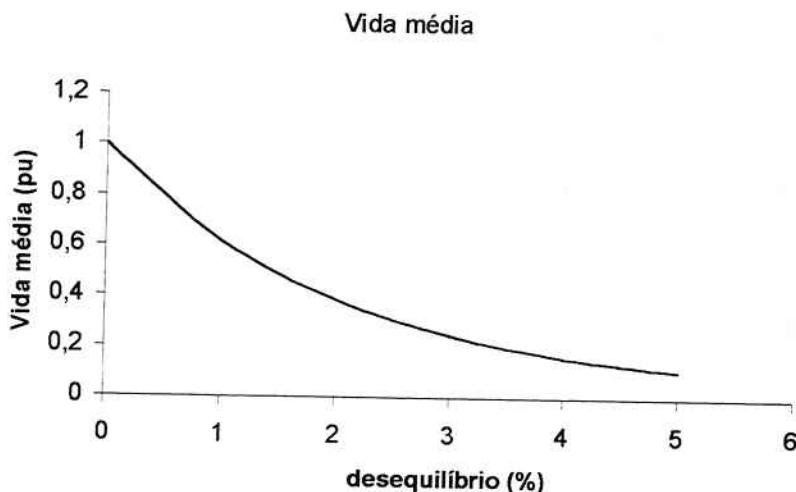


Fig. 12 Variação da vida útil, em função do valor médio do desequilíbrio de tensão

## 8. Conclusão

O modelo térmico e toda a metodologia proposta permitem analisar detalhes do problema do desequilíbrio. A dependência da elevação da temperatura, em relação ao ângulo de fase entre  $I_{lp}$  e  $I_{ln}$ , pode ser caracterizada.

Adicionalmente ao que normalmente é feito em estudos sobre o efeito do desequilíbrio, foi dado um tratamento probabilístico ao problema. A partir de uma

distribuição de probabilidade do desequilíbrio, proveniente de estudos estatísticos das redes elétricas, é possível obter uma função de distribuição da elevação da temperatura. Com esse resultado, conhecida a dependência não linear entre a elevação de temperatura e o tempo de vida da isolação, é possível determinar uma função de distribuição de probabilidade para o tempo de vida.

Concluindo, foi estruturada neste artigo, uma metodologia para guiar , passo-a-passo, no estabelecimento de uma curva de vida média versus média do desequilíbrio, que assegura ao usuário de motores elétricos, principalmente os de maior potência, um roteiro para determinar os efeitos deletérios do desequilíbrio de tensão, sobre a vida útil dos motores de indução.

## 9 Referências Bibliográficas

- 1- ALGER, P.L. **The nature of polyphase induction machines**, New York. Jonh Wiley, 1951.
- 2- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Máquinas elétricas girantes – Máquinas de indução – Especificação**, NBR 7094. Rio de Janeiro, 1996.
- 3- COSTA, P.F., BOREL, J.E.. Comportamento térmico dos motores elétricos de indução trifásicos. **Eletricidade Moderna**, São Paulo, v. 27, n. 301, abr. 1999.
- 4- LEE, C., CHEN, B., LEE, J., HSU, Y. Effects of various unbalanced voltages on the operation performance of an induction motor under the same voltage unbalance factor condition. **IEEE Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference**, 1997.

- 5- PAPOULIS, A. **Probability, random variables, and stochastic processes.** New York, McGraw-Hill, 1991.
- 6- PIERRAT, L., MORRISON, R.E. Probabilistic modeling of voltage assymetry. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 10, n. 3, july 1995.
- 7- RAO, N.R., RAO, P.A.D. Rerating factors of polyphase induction motors under unbalanced line voltage conditions. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, Piscataway, v. PAS-87, n. 1, jan. 1968.



## BOLETINS TÉCNICOS - TEXTOS PUBLICADOS

- BT/PEA/9301 - Alguns Aspectos do Problema de Planejamento de Sistemas de Transmissão sob Incertezas - CARLOS MARCIO VIEIRA TAHAN, ERNESTO JOÃO ROBBA
- BT/PEA/9302 - Vibrações em Motores Elétricos Provocadas por Forças Magnéticas - ORLANDO SILVIO LOBOSCO , HENRIQUE PRADO ALVAREZ
- BT/PEA/9303 - Corrente Contínua em Alta Tensão: Aplicação de Equipamentos Elétricos e Modelos para Análises de Confabilidade - LINEU BELICO DOS REIS
- BT/PEA/9504 - Automação e Informatização Aplicadas a Controle e Supervisão de Processos de Pesagem - EVALDO ARAGÃO FARQUI, EDUARDO MÁRIO DIAS
- BT/PEA/9505 - Modernização e Reabilitação de Usinas Hidrelétricas - DJALMA CASELATO, ADERBAL DE ARRUDA PENTEADO JR.
- BT/PEA/9506 - Estudo do Campo Elétrico Provocado por Linhas de Transmissão em Corrente Alternada - CELSO PEREIRA BRAZ, JOSÉ ANTONIO JARDINI
- BT/PEA/9507 - Aspectos Sobre Processos Automatizados de Pesagem Rodoviária: Uma Proposta de Modernização de Postos em Operação - SERGIO LUIZ PEREIRA, CÍCERO COUTO DE MORAES
- BT/PEA/9508 - Usinas Hidrelétricas em Rotação Ajustável: Novas Premissas para o Planejamento Energético - MARCO ANTONIO SAIDEL, LINEU BELICO DOS REIS
- BT/PEA/9509 - Desenvolvimento de um Sistema de Automação de Subestações pela integração de Módulos de Software e Hardware Existentes no Mercado Brasileiro - L. C. MAGRINI, J. A. JARDINI, S. COPELOVITCH, N. KABA FILHO
- BT/PEA/9510 - Proposta de um Modelo para Estudos de Aplicação de Compensadores Estáticos em Sistemas de Potência - JOSÉ TOSHIYUKI HONDA, LUIS CERA ZANETTA JÚNIOR
- BT/PEA/9511 - Metodologia e Testes para Redução das Distâncias Elétricas entre Fases de Barramentos de Subestações de 138kV Abrigadas, ANDRÉ NUNES SOUZA, ORLANDO SILVIO LOBOSCO
- BT/PEA/9512 - Avaliação da Severidade da Poluição para o Dimensionamento da Isolação das Redes Elétricas - ARNALDO G. KANASHIRO, GERALDO F. BURANI
- BT/PEA/9513 - Processos Auto-Adaptativos para Cálculo de Campos Eletromagnéticos pelo Método dos Elementos Finitos - LUIZ LEBENSZTAJN, JOSÉ ROBERTO CARDOSO
- BT/PEA/9514 - Investigação Experimental sobre os Arcos Sustentados em Sistemas Elétricos de Baixa Tensão - FRANCISCO H. KAMEYAMA, GERALDO F. BURANI
- BT/PEA/9515 - Fast Voltage Compensation: A Mean to Improve the Quality of Energy Supply - H. ARANGO, JOSÉ ANTONIO JARDINI
- BT/PEA/9516 - Modelo Avançado para Planejamento de Sistemas Energéticos Integrados Usando Recursos Renováveis - LUIZ ANTONIO ROSSI, LINEU BELICO DOS REIS
- BT/PEA/9601 - Metodologias para Planejamento de Sistemas de Distribuição: Estado-da-Arte e Aplicações - PAULO ROBERTO NJAIM, CARLOS MARCIO VIEIRA TAHAN
- BT/PEA/9602 - Integração de Relés Digitais em Sistemas de Automação de Subestação - JERÔNIMO CAMILO SOARES JR., JOSÉ A. JARDINI, LUIZ C. MAGRINI
- BT/PEA/9603 - Paradigma de Planejamento sob Incertezas - Aplicação ao Planejamento dos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica - ALBERTO BIANCHI JUNIOR, LINEU BELICO DOS REIS
- BT/PEA/9604 - Um Sistema de Controle de Velocidade para Motor de Indução Trifásico - CELSO KAZUMI NAKAHARADA, ADERBAL DE ARRUDA PENTEADO JR.
- BT/PEA/9605 - Controle Vetorial de Motores de Indução, Independente das Alterações de Parâmetros da Máquina - NERY DE OLIVEIRA JÚNIOR, WALDIR PÓ
- BT/PEA/9606 - Compactação de Subestações de 145 kV Através da Redução das Distâncias entre Fases - GERVASIO LUIZ DE CASTRO NETO, ORLANDO SILVIO LOBOSCO
- BT/PEA/9607 - Curvas de Carga de Consumidores Industriais - Agregação com Outras Cargas - RONALDO PEDRO CASOLARI, JOSÉ ANTONIO JARDINI
- BT/PEA/9608 - Utilização de Curvas de Carga de Consumidores Residenciais Medidas para Determinação de Diversidade de Carga, e Carregamento de Transformadores de Distribuição - EDUARDO LUIZ FERRARI, JOSÉ ANTONIO JARDINI
- BT/PEA/9609 - Comportamento Elétrico de Cabos Cobertos e Pré-Reunidos pelo Método dos Elementos Finitos - JOÃO JOSÉ DOS SANTOS OLIVEIRA, JOSÉ ROBERTO CARDOSO
- BT/PEA/9701 - Repotenciação de Hidrogeradores: Uma Proposta de Metodologia de Análise e Implantação - FÁBIO SALOMÃO FERNANDES SÁ, ADERBAL DE ARRUDA PENTEADO JR.

- BT/PEA/9702 - Desenvolvimento de um Sistema de Automação para um Sistema de Automação para um Centro de Operação da Distribuição - PAULO SÉRGIO MIGUEL SURUR, JOSÉ ANTONIO JARDINI
- BT/PEA/9703 - Planejamento da Expansão do Sistema de Distribuição Utilizando Programação Matemática Probabilística - MARIÂNGELA DE CARVALHO BOVOLATO, NELSON KAGAN
- BT/PEA/9704 - Técnicas de Inteligência Artificial Aplicadas ao Problema de Planejamento da Expansão do Sistema de Distribuição de Energia Elétrica - SALETE MARIA FRÓES, NELSON KAGAN
- BT/PEA/9705 - Aproveitamento Funcional de Sistemas de Controle e Proteção Digitais em Subestações de Distribuição - JOSÉ LUIZ PEREIRA BRITTES, JOSÉ ANTONIO JARDINI
- BT/PEA/9706 - Avaliação de Algoritmo para Proteção Diferencial de Transformadores - LUÍS SÉRGIO PIOVESAN, EDUARDO CÉSAR SENGER
- BT/PEA/9707 - Sistema de Proteção para Faltas de Alta Impedância - CAIUS VINICIUS SAMPAIO MALAGODI, EDUARDO CÉSAR SENGER
- BT/PEA/9708 - Um Ambiente para Planejamento da Operação de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica - KLEBER HASHIMOTO, NELSON KAGAN
- BT/PEA/9709 - Análise do Custo - Benefício da Instalação de Equipamentos de Proteção em Redes Aéreas de Distribuição - ANTONIO CLAUDINEI SIMÕES, JOSÉ ANTONIO JARDINI
- BT/PEA/9710 - Planejamento Integrado de Recursos Energéticos - PIR - para o Setor Elétrico - MIGUEL EDGAR MORALES UDAETA, LINEU BELICO DOS REIS
- BT/PEA/9711 - Análise de Defeitos no Motor de Indução Trifásico para Predição de Falhas Incipientes - JOSÉ ANTONIO URCIA MISARI, CÍCERO COUTO DE MORAES
- BT/PEA/9712 - Gerenciamento de Transformadores de Distribuição com Análise na Perda de Vida - CARLOS MÁRCIO VIEIRA TAHA, VLADIMIR DUARTE BELCHIOR
- BT/PEA/9713 - Uma Nova Metodologia para a Avaliação de Sistemas de Aterramento Metro-Ferroviários - JOSÉ AUGUSTO PEREIRA DA SILVA, JOSÉ ROBERTO CARDOSO
- BT/PEA/9714 - Um Exemplo de Decomposição de Fluxos em Transformadores - NICOLAU IVANOV, LUIZ CERA ZANETTA JR.
- BT/PEA/9715 - Custos de Transporte de Energia Elétrica - Análise de Metodologias - DÁRIO TAKAHATA, CARLOS MÁRCIO VIEIRA TAHA
- BT/PEA/9716 - Bancada de Ensaios para a Avaliar o Comportamento de Acionamentos Controlados por Inversores PWM - JOSÉ ANTONIO CORTEZ, ADERBAL DE ARRUDA PENTEADO JR.
- BT/PEA/9717 - Integração de Técnicas de Diagnóstico de Falhas em Motores de Indução Trifásicos ao Sistema de Gerenciamento da Manutenção Industrial - JOSÉ A. URCIA MISARI, CÍCERO COUTO DE MORAES
- BT/PEA/9801 - Análise de Confiabilidade para Gerenciamento Operacional de Sistemas Automatizados de Pesagem Rodoviária - RUBENS LOPES ROLIM, CÍCERO COUTO DE MORAES
- BT/PEA/9802 - Projeto de um Ondulador Híbrido e Estudo de Onduladores Derivados de Solenóide, para Utilização em Laser a Elétrons Livres - FRANCISCO SIRCILLI NETO
- BT/PEA/9803 - Configuração de Redes de Distribuição de Energia Elétrica com Múltiplos Objetivos e Incertezas através de Procedimentos Heurísticos - CARLOS C. BARIONI DE OLIVEIRA, NELSON KAGAN
- BT/PEA/9804 - Conceituação e Aplicação de Metodologia de Gerenciamento pelo Lado da Demanda em uma Empresa Distribuidora de Energia Elétrica - FERNANDO MONTEIRO DE FIGUEIREDO, JOSÉ ANTÔNIO JARDINI
- BT/PEA/9805 - Acoplamento Circuito Elétrico - Método dos Elementos Finitos em Regime Transitório Utilizando a Metodologia de Dommel - NANCY MIEKO ABE, JOSÉ ROBERTO CARDOSO
- BT/PEA/9806 - Modelo de Arco Elétrico Aplicado ao Estudo da Interrupção da Corrente em Disjuntores de Média Tensão - LUCILIUS CARLOS PINTO, LUIZ CERA ZANETTA JR.
- BT/PEA/9807 - Proteção para Falta de Alta Impedância Utilizando o Sistema de Rádio Troncalizado - MARCO ANTONIO BRITO, EDUARDO CESAR SENGER
- BT/PEA/9808 - Contribuição ao Estudo e Projeto dos Motores Síncronos de Relutância - IVAN EDUARDO CHABU, JOSÉ ROBERTO CARDOSO
- BT/PEA/9809 - Cabos Cobertos: Metodologia para a Determinação da Espessura da Cobertura - ANTONIO PAULO DA CUNHA, JOSÉ ANTÔNIO JARDINI
- BT/PEA/9810 - Eletrificação Rural - Avaliações em São Paulo - MARCELO APARECIDO PELEGRINI, FERNANDO SELLES RIBEIRO
- BT/PEA/9811 - Política de Eletrificação Rural em São Paulo - LUIZ HENRIQUE ALVES PAZZINI, FERNANDO SELLES RIBEIRO
- BT/PEA/9812 - Uso Racional e Eficiente de Energia Elétrica: Metodologia para a Determinação dos Potenciais de Conservação dos Usos Finais em Instalações de Ensino e Similares - ANDRÉ LUIZ MONTEIRO ALVAREZ, MARCO ANTONIO SAIDEL
- BT/PEA/9813 - Diretrizes para a Regulação da Distribuição de Energia Elétrica - JAMES S. S. CORREIA, LINEU BELLICO DOS REIS

- BT/PEA/9814 - Distribuição da Tensão de Impulso em Enrolamentos de Transformadores de Distribuição - PEDRO LUÍS SANTUCCI DE MENDONÇA, AUGUSTO FERREIRA BRANDÃO JÚNIOR
- BT/PEA/9815 - Estudo Comparativo entre os Diversos Métodos de Determinação do Rendimento de Motores de Indução - FRANCISCO ANTONIO MARINO SALOTTI, ORLANDO SILVIO LOBOSCO
- BT/PEA/9816 - A Nodal Analysis Approach Applied to Electric Circuits Coupling in Magnetodynamic 2D FEM - MAURÍCIO CALDORA COSTA, JOSÉ ROBERTO CARDOSO
- BT/PEA/9817 - Informatização e Automação dos Órgãos Gestores de Mão de Obra - EDUARDO MARIO DIAS, CÍCERO COUTO DE MORAES
- BT/PEA/9818 - Frequência de Ocorrência de Sobretensões Originárias de Descargas Atmosféricas em Linhas de Distribuição - NELSON MASSAKAZU MATSUO, LUIZ CERA ZANETTA JR.
- BT/PEA/9819 - Um Método de Imposição de Pólos no Estudo da Estabilidade de Redes Elétricas a Pequenas Perturbações - PERCIVAL BUENO DE ARAUJO, LUIZ CERA ZANETTA JR.
- BT/PEA/9820 - Inter-Relação do Planejamento Agregado de Investimentos com o Planejamento Localizado de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica - JUCEMAR SALVADOR SIMÕES, NELSON KAGAN
- BT/PEA/9821 - A Produção de Energia Através das Células de Combustível - JOSÉ LUIZ PIMENTA PINHEIRO, LINEU BELICO DOS REIS
- BT/PEA/9822 - Automação de Processos - Revisão e Tendências - SERGIO LUIZ PEREIRA
- BT/PEA/9823 - Metodologia para Seleção e Gerenciamento de Transformadores e Distribuição, Aplicando Técnicas de Redes Neutrais Artificiais - SE UN AHN, JOSÉ ANTONIO JARDINI
- BT/PEA/9901 - Contribuição ao Modelamento e Simulação de Motores em Ímãs Permanentes e Comutação Eletrônica de Alta Rotação - WANDERLEI MARINHO DA SILVA, CLOVIS GOLDEMBERG
- BT/PEA/9902 - Estudos de Sistemas de Potência e Automação: Plantas Industriais de Grande Porte - MAURÍCIO G. M. JARDINI, JOSÉ A. JARDINI
- BT/PEA/9903 - Synchronous Machines Parameters Identification Using Load Rejection Test Data - E. C. BORTONI, J. A. JARDINI
- BT/PEA/9904 - Identificação de Locais e Opções Tecnológicas para Implantação de Termoelétricas no Sistema Elétrico Brasileiro: Contribuição ao Estado da Arte e Aplicação ao Caso do Gás Natural - ELIANA APARECIDA FARIA AMARAL FADIGAS, LINEU BELICO DOS REIS
- BT/PEA/9905 - Sistema de Manutenção Preventiva de Subestações: Uma Abordagem Semântica para o Monitoramento Integrado - ELIAS ROMA NETO, ADERBAL DE ARRUDA PENTEADO JR.
- BT/PEA/9906 - Previsão das Perdas Magnéticas na Presença de Harmônicos - MARCELO S. LANCAROTTE, ADERBAL DE ARRUDA PENTEADO JR.
- BT/PEA/9907 - Comportamento do Aterramento de Sistemas e Equipamentos de Distribuição sob Impulso - CLEVERSON LUIZ DA SILVA PINTO, ADERBAL DE ARRUDA PENTEADO JR.
- BT/PEA/9908 - Modelo de Sistema de Supervisão e Controle Operacional de Terminais de Contêineres - LEVI SALVI, EDUARDO MARIO DIAS
- BT/PEA/9909 - Medição de Altas Correntes em Frequência Industrial: Instrumentação, Dispositivos de Medição e Calibrações - HÉLIO EIJI SUETA, GERALDO FRANCISCO BURANI
- BT/PEA/9910 - Conversores Auto-Comutados Aplicados em Derivações de Sistemas de Transmissão de Corrente Contínua e Alta Tensão - WILSON KOMATSU, WALTER KAISER
- BT/PEA/9911 - Análise de Desempenho de Sistemas de Aterramento em Alta Frequência pelo Método dos Elementos Finitos - ANGELO PASSARO, JOSÉ ROBERTO CARDOSO, VIVIANE CRISTINE SILVA
- BT/PEA/9912 - Simulação de Motores "Shaded Pole": Uma Nova Abordagem Analítico-Numérica - PASCHOAL SPINA NETO, SÍLVIO IKUO NABETA, JOSÉ ROBERTO CARDOSO
- BT/PEA/9913 - Estimadores de Estado para Sistemas de Potência: Análise do Estado da Arte - CLEBER ROBERTO GUIRELLI, JOSÉ ANTONIO JARDINI
- BT/PEA/9914 - Análise sobre o Comportamento de Sistemas de Proteção Contra Descargas Atmosféricas Utilizando o Método dos Elementos Finitos - SEBASTIÃO C. GUIMARÃES JR., LUCIANO MARTINS NETO, JOSÉ ROBERTO CARDOSO
- BT/PEA/9915 - Automatização do Atendimento a Reclamações de Interrupção de Energia Elétrica - H. K. Kiyohara, L. C. Magrini, E. P. PARENTE, JOSÉ ANTONIO JARDINI
- BT/PEA/9916 - Controle Digital de Tensão e Reativos - PAULA S. D. KAYANO, LUIZ CARLOS MAGRINI, LINEU BELICO DOS REIS, ANTONIO JOSÉ GOMES CARMO, ELIAS DE SOUZA NETO
- BT/PEA/9917 - Localizadores Digitais de Faltas em Linhas de Transmissão - CARLOS EDUARDO DE MORAIS PEREIRA, LUIZ CERA ZANETTA JR.
- BT/PEA/9918 - Religamento Monopolar em Linhas de Transmissão - Propostas de Uma Ferramenta para Investigações Paramétricas - IVANIL POMPEU, LUIZ CERA ZANETTA JR.
- BT/PEA/9919 - Viabilidade Técnica de Abertura Monopolar Permanente em Linhas de Transmissão Extra Alta Tensão - FABIANA AP. DE TOLEDO SILVA, JOSÉ ANTONIO JARDINI

- BT/PEA/9920 – Avaliação do U-Net em Custers com Rede My com Rede Myrinet – PAULO A. GEROMEL, SERGIO T. KOFUJI
- BT/PEA/9921 – SAG – Sistema de Apoio Gerencial via Internet – ADRIANO GALINDO LEAL, JOSÉ ANTONIO JARDINI
- BT/PEA/9922 – Desequilíbrio de Tensão em Redes Secundárias de Distribuição – PAULO VINÍCIUS SANTOS VALOIS, CARLOS MÁRCIO VIEIRA TAHLAN
- BT/PEA/9923 – Sistema Não Lineares Controlados pela Lógica Difusa: Uma Aplicação em Acionamentos Constituídos por Motores Assíncronos – WERNER W. PACHECO LUJAN, CÍCERO COUTO MORAES
- BT/PEA/9924 – Arborescência em Cabos Elétricos de Média e Alta Tensão – JOÃO JOSÉ ALVES DE PAULA, ADERBAL DE ARRUDA PENTEADO JÚNIOR
- BT/PEA/9925 – Estudo para Otimização de Desempenho de Plantas Industriais Automatizadas – ANTONIO ORLANDO UGULINO, SERGIO LUIZ PEREIRA
- BT/PEA/9926 – Simulação e Análise de Desempenho de Processos Visando a Otimização de Sistemas Integrados de Produção – CÍCERO COUTO DE MORAES, SERGIO LUIZ PEREIRA, JOSÉ ROBERTO R. DE GODOY
- BT/PEA/9927 – Automação Moderna de Processos: Análise de Necessidade, Viabilidade e Tendências Tecnológicas – SERGIO LUIZ PEREIRA
- BT/PEA/9928 – Modelo de Compensação Série Controlada Aplicado ao Estudo do Amortecimento de Oscilações em Sistemas de Potência – JOSÉ ROBERTO PASCON, LUIZ CERA ZANETTA JÚNIOR
- BT/PEA/9929 – Cálculo de Trajetórias de Elétrons em Estruturas Magnéticas – YASMARA CONCEIÇÃO DE POLLI, VIVIANE CRISTINE SILVA
- BT/PEA/0001 – Monitoramento de Transformadores de Potência Direcionado à Manutenção com Base nas Condições – SERGIO COSTA, AUGUSTO F. BRANDÃO JR.
- BT/PEA/0002 – Redes Neurais Artificiais Aplicadas a Estudos de Subestações de Alta Tensão Abrigadas Frente a Ensaio de Impulsos Atmosféricos – ANDRÉ NUNES DE SOUZA, FERNANDO SELLES RIBEIRO
- BT/PEA/0003 – Relé Diferencial para Transformador de Potência Implementado com uma Rede MLP – RICARDO CANELOI DOS SANTOS, EDUARDO CESAR SENGER
- BT/PEA/0004 – Minimização de Resíduos Sólidos Urbanos e Conservação de Energia – PAULO HÉLIO KANAYAMA, LINEU BELICO DOS REIS
- BT/PEA/0005 – Modelamento de Conversores CC/CC por meio da Chave PWM – LUIZ FERNANDO P. DE MELLO, WALTER KAISER
- BT/PEA/0006 – Estudo de Surtos em Redes Secundárias de Distribuição Causados por Descargas Atmosféricas Diretas na Rede Primária – WELSON BASSI, JORGE M. JANISZEWSKI
- BT/PEA/0007 – Modelagem da Magnetohidrodinâmica em 3D pelo Método de Elementos Finitos – SERGIO LUÍS LOPES VERARDI, JOSÉ ROBERTO CARDOSO



