



Universidade Federal de Campina Grande  
Centro de Engenharia Elétrica e Informática  
Departamento de Engenharia Elétrica  
Grupo de Sistemas Elétricos



# **Análise do Desempenho de Transformadores de Potencial Capacitivos Frente a Sobretensões Transitórias**

## **Trabalho de Conclusão de Curso**

Aluna: Alana Kelly Xavier Santos

Orientador: Damásio Fernandes Júnior, D.Sc.

Campina Grande  
Julho de 2009

Universidade Federal de Campina Grande  
Centro de Engenharia Elétrica e Informática  
Departamento de Engenharia Elétrica  
Grupo de Sistemas Elétricos

# **Análise do Desempenho de Transformadores de Potencial Capacitivos Frente a Sobretensões Transitórias**

*Proposta de Trabalho de Conclusão de Curso apresentada ao  
Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade  
Federal de Campina Grande, em cumprimento parcial às  
exigências para Obtenção do Grau de Engenheiro Eletricista.*

*ALUNA:* \_\_\_\_\_  
*Alana Kelly Xavier Santos*

*ORIENTADOR:* \_\_\_\_\_  
*Damásio Fernandes Júnior*

Campina Grande  
Julho de 2009

# Agradecimentos

A Deus que me deu forças nas horas mais difíceis e esperança nos momentos de angústia.

Ao professor Damásio Fernandes Júnior pelo incentivo, amizade, apoio e confiança em mim depositada para realização deste trabalho.

A Célio Anésio da Silva, pela ajuda e companheirismo prestados durante a realização de alguns trabalhos de pesquisa.

A minha mãe Adilma, que sempre trabalhou arduamente para me proporcionar uma boa educação.

A minha tia Adenilda e minha avó Maria da Guia, por me incentivarem e me ajudarem ao longo da minha vida.

Ao meu namorado Diego Charles por toda paciência, ajuda, compreensão e incentivo a mim dedicado.

A todos os meus amigos, por me apoiarem nas horas que mais precisei.

A todo corpo docente de Engenharia Elétrica, por ter contribuído com a minha formação intelectual.

A Adail e demais funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica, pela presteza e amizade durante o curso.

# Sumário

|   |    |
|---|----|
| <b>1. Introdução</b> .....  | 4  |
| 1.1. Importância do Trabalho .....  | 4  |
| 1.2. Objetivos.....   | 5  |
| 1.3. Metodologia.....   | 5  |
| <b>2. Fundamentação Teórica</b> .....   | 6  |
| 2.1. O Transformador de Potencial.....  | 6  |
| 2.2. O Transformador de Potencial Capacitivo .....  | 7  |
| 2.3. Estudos nos Domínios do Tempo e da Frequência.....   | 9  |
| <b>3. Estimação de Parâmetros para o Modelo do TPC</b> .....  | 11 |
| 3.1. Formalização Matemática do Modelo .....  | 12 |
| 3.2. Método de Otimização Implementado .....  | 15 |
| <b>4. Representação das Não Linearidades dos Elementos que Contêm Núcleo Ferromagnético</b> .....   | 16 |
| <b>5. O Software TPCalc 1.1</b> .....   | 16 |
| 5.1. Modificação Feita ao TPCalc 1.1 .....  | 18 |
| <b>6. Cálculo de Parâmetros Utilizando o TPCalc Modificado</b> .....  | 18 |
| 6.1. Arquivos Externados pelo TPCalc Modificado.....  | 20 |
| <b>7. Simulações de Atuação e Falha do Circuito de Proteção</b> .....   | 22 |
| <b>8. Conexão e Desconexão ao Barramento de 230 kV</b> .....  | 26 |
| <b>9. Corte de Corrente Indutiva Próximo ao TPC</b> .....   | 29 |
| <b>10. Considerações Finais</b> .....   | 31 |
| <b>11. Cronograma</b> .....   | 32 |
| <b>12. Referências Bibliográficas</b> .....   | 33 |
| <b>Apêndice - Conversão da Curva <math>V_{rms}</math> - <math>I_{rms}</math> para Valores de Pico da Curva <math>\lambda - i</math></b> ..... | 35 |

# 1. Introdução

## 1.1. Importância do Trabalho

O TPC é largamente utilizado em empresas que trabalham com geração e transmissão de energia elétrica, a fim de fornecer sinais de tensão aos seus instrumentos de medição e dispositivos de proteção.

Os TPC são projetados para operarem tanto em regime permanente quanto em regime transitório. Na ocasião de fenômenos transitórios podem ocorrer alterações impróprias no sinal de tensão fornecido pelo TPC. Por isso, muitos trabalhos vêm sendo destinados ao desenvolvimento de modelos para o estudo do seu desempenho em regime transitório [IRAVANI et al, 1998; TZIOUVARAS et al, 2000].

Há diversos relatos de empresas nacionais e internacionais do setor elétrico sobre falhas de TPC que levaram a saídas intempestivas de linhas de transmissão, como também queima de equipamentos auxiliares de baixa tensão e danos irreparáveis causados aos TPC [CARVALHO Jr., 2008].

Outro problema ocasionado em empresas do setor elétrico é a ocorrência de sobretensões nos TPC. Em diversos casos, as oscilações com nível suficiente para provocar a atuação de dispositivos de proteção foram observadas durante operações rotineiras de chaves seccionadoras nos sistemas que operam em 230 e 500 kV [MORAES & VASCONCELOS, 1999], que acarretaram em interrupções no fornecimento de energia elétrica e em danos ao equipamento.

A regulamentação brasileira do setor elétrico impõe severas penalidades por indisponibilidades não programadas de funções de transmissão, como também interrupção do serviço de energia. Este fato requer das empresas medidas corretivas e preventivas no sentido de diminuir os desligamentos não programados.

A partir dessas premissas, é de suma importância a obtenção de um modelo computacional adequado de TPC, a fim de se prever o seu comportamento diante da ocorrência de fenômenos transitórios (tais como surtos de tensão), a partir de simulações digitais.

A introdução de parâmetros não lineares (núcleo magnético do transformador indutivo) inseridos ao modelo do TPC, o torna mais preciso, e faz com que simulações

digitais feitas a partir deste modelo, em programas do tipo EMTP (*Electromagnetic Transients Program*), se tornem mais realistas.

## **1.2. Objetivos**

Utilizar técnicas de programação em FORTRAN [PRESS et al, 1992] para o aperfeiçoamento do *software* TPCalc 1.1 [GSE/UFCG, 2007], a fim de que o modelo gerado possa contemplar também os parâmetros não lineares (núcleo magnético do TP indutivo) do TPC. De posse dos parâmetros estimados, fazer previsões do comportamento desses equipamentos nas situações de: atuação e falha do seu circuito de proteção, corte de corrente indutiva nas proximidades do seu terminal primário, como também conexão e desconexão do TPC a um barramento de 230 kV.

## **1.3. Metodologia**

Foi feita uma análise do estado da arte do comportamento dos TPC frente a sobretensões transitórias em sistemas de potência e dos métodos de conversão da curva tensão – corrente ( $V_{rms} - I_{rms}$ ) para valores de pico da curva fluxo – corrente ( $\lambda - i$ ), para elementos que contêm núcleo ferromagnético.

Foram utilizadas técnicas de programação em FORTRAN 90 [PRESS et al, 1992] para o aperfeiçoamento do *software* TPCalc 1.1 [GSE/UFCG, 2007], e a partir dos parâmetros estimados pelo *software* fazer previsões do desempenho do TPC frente a sobretensões transitórias, através de simulação digital utilizando o ATP - *Alternative Transients Program* [LEUVEN EMTP CENTER, 1987].

## 2. Fundamentação Teórica

Os transformadores são equipamentos que transferem energia elétrica de um circuito elétrico para outro, através da atuação de um campo eletromagnético. São constituídos por dois ou mais enrolamentos acoplados por um circuito magnético comum. Núcleos ferromagnéticos são normalmente utilizados para fornecer acoplamentos magnéticos elevados e grandes densidades de fluxo. Por isso, os transformadores construídos com núcleo de ferro são invariavelmente utilizados em sistemas elétricos de potência.

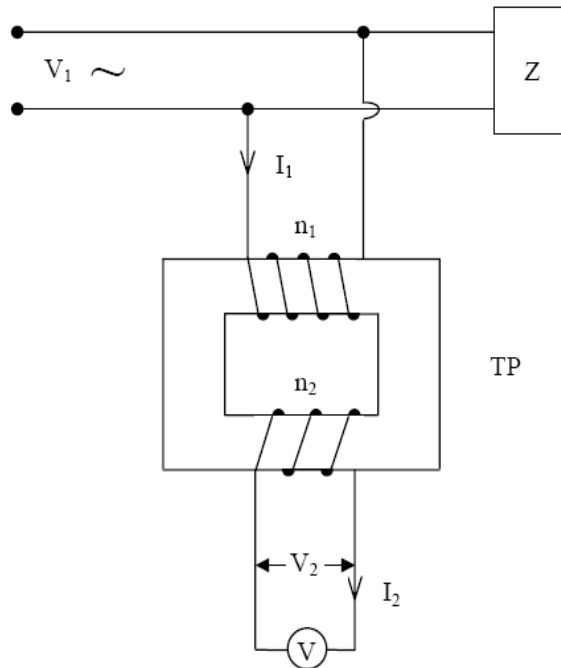
Dentre os diversos tipos de transformadores, dois tipos são destinados ao fornecimento de sinais de corrente e tensão aos instrumentos de medição e aos dispositivos de proteção: o transformador de corrente (TC) e o transformador de potencial (TP). O transformador de corrente é um equipamento destinado a reproduzir proporcionalmente em seu circuito secundário a corrente de seu circuito primário com sua posição fasorial mantida, conhecida e adequada para uso em instrumentos de medição, controle e proteção. Já o transformador de potencial é um equipamento destinado a transmitir o sinal de tensão a instrumentos de medição, controle e proteção. No presente trabalho, será dada atenção ao estudo do transformador de potencial, mais especificamente ao tipo capacitivo (TPC).

### 2.1. O Transformador de Potencial

Os transformadores de potencial são equipamentos que permitem aos instrumentos de medição e proteção funcionarem adequadamente, sem que seja necessário possuir tensão de isolamento igual a da rede à qual estão ligados [MAMEDE FILHO,1993].

Na sua forma mais simples, os transformadores de potencial possuem um enrolamento primário com  $n_1$  espiras e um enrolamento secundário com  $n_2$  espiras, de tal forma que  $n_1 > n_2$ , conforme a Figura 01. Logo, a tensão secundária  $V_2$  é menor do que a tensão primária  $V_1$  e normalmente padronizada em 115 V.

Na prática, os TP são considerados elementos redutores de tensão, pois uma tensão elevada  $V_1$  é transformada em uma tensão reduzida  $V_2$  de valor suportável pelos instrumentos de medição e proteção.



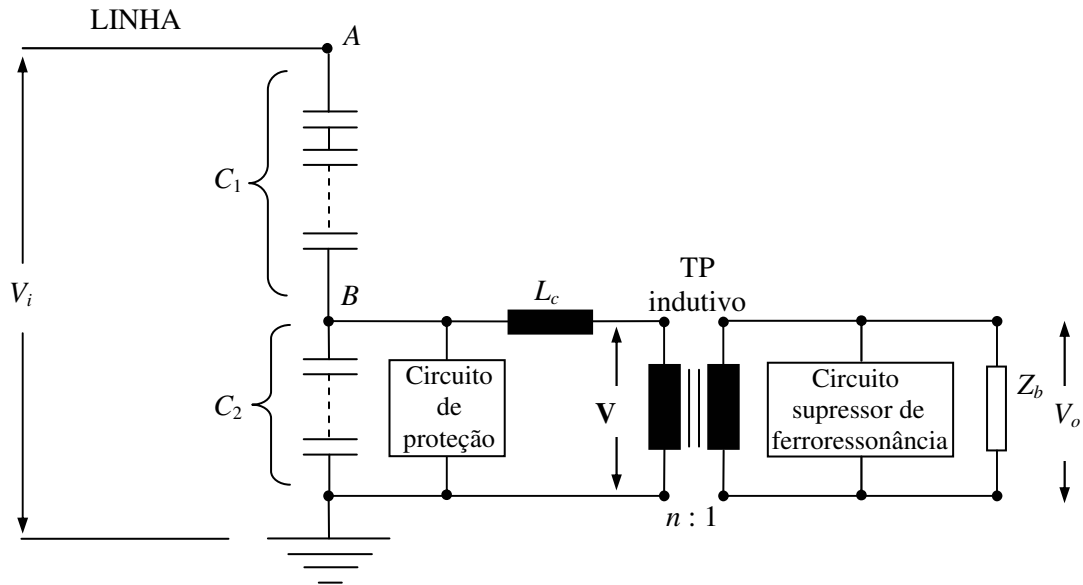
**Figura 01 – Esquema elétrico de um TP.**

Dentre os instrumentos normalmente conectados ao secundário dos transformadores de potencial os mais comuns são relés, voltímetros, medidores de energia elétrica e wattímetros.

## **2.2. O Transformador de Potencial Capacitivo**

Nos sistemas de potência que operam em tensões iguais ou superiores a 138 kV é mais conveniente e econômico o emprego de transformadores de potencial do tipo capacitivo [MEDEIROS FILHO, 1976; D'AJUZ et al., 1985]. Na Figura 02 pode-se observar o esquema elétrico básico de um TPC, em que o primário é constituído por dois conjuntos de elementos capacitivos ligados em série, havendo uma derivação intermediária em B, correspondente a uma tensão  $V$  que alimenta o enrolamento primário de um TP do tipo indução, intermediário, o qual fornecerá uma tensão secundária aos instrumentos de medição e proteção ali inseridos.





**Figura 02 - Esquema elétrico básico de um TPC a 60 Hz.**

Além de isolar o enrolamento secundário do enrolamento primário, os TPC devem reproduzir os efeitos transitórios e de regime permanente aplicados ao circuito de alta tensão o mais fielmente possível no circuito de baixa tensão. Para isto, um reator de compensação  $L_c$  é projetado pelo fabricante para evitar diferenças de fase entre as tensões  $V_i$  e  $V_o$  na frequência do sistema. Entretanto, pequenos erros podem ainda existir devido à corrente de magnetização e à carga  $Z_b$  do TPC [SWEETANA, 1971; LUCAS et al, 1992].

Oscilações originadas pelo fenômeno da ferroressonância podem aparecer na forma de onda da tensão secundária do TPC devido à possibilidade de as capacitâncias do circuito entrarem em ressonância com algum valor particular de indutância não linear dos elementos que contêm núcleo ferromagnético. Esse fenômeno transitório não pode ser tolerado em um TPC, uma vez que informações falsas poderiam ser transferidas aos instrumentos de medição e proteção, assim como sobretensões e sobrecorrentes destrutivas. Para amenizar esse tipo de problema, normalmente é colocado um circuito supressor de ferroressonância (CSF) em um dos enrolamentos do transformador de potencial indutivo.

Os circuitos supressores de ferroressonância podem ser ativos ou passivos. Eles são ativos quando apresentarem dispositivos semicondutores e passivos quando compostos por resistores, indutores e/ou capacitores.

A configuração de um TPC inclui ainda um circuito destinado a proteção da parte indutiva do equipamento contra sobretensões. Normalmente, este circuito é conectado em paralelo com o capacitor  $C_2$  da coluna capacitiva, ou com o reator de compensação, ou

ainda com o circuito supressor de ferroressonância [IRAVANI et al, 1998; TZIOUVARAS et al, 2000]. Este circuito de proteção pode ser constituído por um centelhador, por um centelhador em série com um resistor não linear ou por um pára-raios de óxido de zinco (ZnO).

### **2.3. Estudos nos Domínios do Tempo e da Frequência**

Embora o comportamento em regime permanente dos TPC seja bastante conhecido e reportado na literatura técnica específica, o comportamento dos mesmos quando submetidos a surtos de tensão necessita de maiores investigações. Nesse sentido, alguns trabalhos, incluindo ensaios de laboratório, testes em campo e simulações digitais, vêm sendo realizados com o intuito de desenvolver modelos de TPC para estudos de transitórios eletromagnéticos, no domínio do tempo e/ou da frequência.

Há estudos e modelos de TPC validados apenas no domínio do tempo, outros validados apenas no domínio da frequência, e ainda validados simultaneamente no domínio do tempo e da frequência.

Diante das limitações de faixa de frequência em que os modelos de TPC são validados para estudos que levam em consideração somente a análise no domínio do tempo, bem como limitações para validação da resposta transitória do TPC nos estudos que contemplam somente a análise no domínio da frequência, alguns trabalhos, inclusive este, se direcionaram no sentido de avaliar o comportamento do TPC nos domínios do tempo e da frequência, simultaneamente.

O trabalho de IRAVANI et al [1998] contemplou estudos nos domínios do tempo e da frequência, simultaneamente. Foram apresentados resultados de simulações digitais para um TPC submetido a operações de chaveamento e ocorrência de falta. Inicialmente, foram efetuados estudos no domínio da frequência para identificar a sensibilidade da curva de resposta em frequência aos parâmetros lineares do TPC. Após a análise dos componentes do TPC, foi utilizada a biblioteca de modelos do EMTP para detalhar a representação do TPC.

Simulações digitais de ferroressonância realizadas em um programa do tipo EMTP foram comparadas com ensaios de ferroressonância realizados em laboratório. Os resultados apresentaram boa concordância. Por meio de simulações digitais, a sensibilidade da resposta transitória do TPC foi investigada, no entanto, tais resultados não são comparados com medições em laboratório. Outra limitação verificada no referido trabalho

é a ausência de uma metodologia para estimação dos parâmetros lineares do TPC, uma vez que estes parâmetros podem ser obtidos levando-se em conta as interações magnéticas e capacitivas existentes no conjunto completo do TPC.

No trabalho de MORAES & VASCONCELOS [1999] foi apresentada uma metodologia experimental utilizada para solucionar o problema de sobretensões observadas no secundário dos TPC do sistema de 500 kV da Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (CHESF), quando submetidos a manobras de chaves seccionadoras. A metodologia foi dividida em duas etapas: na primeira foi feita uma análise experimental da resposta em frequência do TPC até 100 kHz, na segunda o TPC foi submetido a algumas condições transitórias que induzam oscilações oriundas do fenômeno da ferroressonância.

Através da avaliação da resposta em frequência, um filtro foi desenvolvido. Este filtro é composto por um circuito *RC* paralelo para conexão ao secundário do TPC, com o intuito de diminuir a probabilidade de ocorrência de sobretensões.

Para avaliação da resposta transitória, foi utilizado um circuito de teste com o objetivo de gerar oscilações de tensão, devido à abertura de curto-circuito na parte indutiva do TPC.

Uma limitação encontrada no trabalho de MORAES & VASCONCELOS [1999] é o fato de não serem apresentados estudos de simulação digital com um modelo computacional do TPC, devido ao fato de que a existência de tal modelo, validado com os resultados experimentais realizados, poderia fornecer subsídios para previsões da resposta transitória do TPC.

TZIOUVARAS et al [2000] apresentaram uma revisão sobre modelos matemáticos usados para representar o comportamento não linear do núcleo magnético. Esses modelos estudados foram usados na representação do núcleo de transformadores para instrumentos. Para o TPC, foram realizadas simulações digitais de abertura seguida de fechamento de uma chave no seu terminal primário e verificado que, oscilações típicas de ferroressonância podem aparecer no secundário do TPC quando o núcleo do TP indutivo estiver próximo à saturação e a carga no seu secundário for muito pequena.

Com relação aos estudos no domínio da frequência, foi feita uma análise de sensibilidade para mostrar a influência de alguns parâmetros do TPC na sua curva de resposta em frequência e os resultados confirmaram a importância da inclusão de

capacitâncias parasitas no modelo do TPC. Uma limitação deste trabalho é a falta de medições de tensões transitórias para uma avaliação mais precisa do modelo do TPC.

O trabalho de FERNANDES Jr. [2003] trouxe uma abordagem mais completa aos estudos de transitórios eletromagnéticos envolvendo TPC, a partir de um modelo mais preciso, contemplando o comportamento do TPC nos domínios do tempo e da frequência.

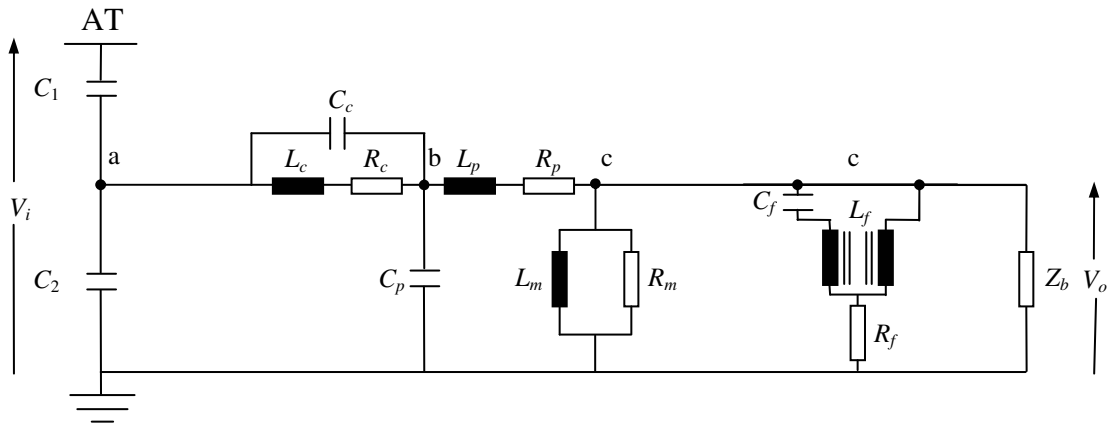
A partir de medições de amplitude e fase da curva de resposta em frequência de 10 kHz, são estimados os parâmetros lineares  $R$ ,  $L$  e  $C$  do TPC, incluindo as capacitâncias parasitas. No domínio do tempo, é feita uma modelagem dos elementos não lineares do TPC, tais como o TP indutivo, o reator de compensação, o reator do circuito supressor ferroressonância (CSF) e o elemento limitador de tensão. Essa modelagem é feita a partir de medições de sua característica não linear, com o objetivo de tornar as simulações digitais mais realistas.

Medições em laboratório de sobretensões transitórias foram realizadas com o objetivo de validar o modelo, tais como ensaio de ferroressonância e chaveamento no lado da tensão intermediária de um TPC de 230 kV.

### **3. Estimação de Parâmetros para o Modelo do TPC**

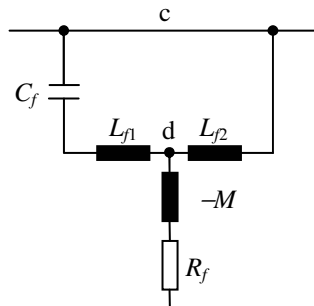
A fim de estimar os parâmetros  $R$ ,  $L$  e  $C$  lineares do TPC é necessário inicialmente utilizar um modelo que o represente satisfatoriamente. Desta forma, os parâmetros  $R$ ,  $L$  e  $C$  desse modelo devem reproduzir as funções de amplitude e fase da relação de tensão do TPC em toda a faixa de frequência de interesse.

O modelo de TPC adotado para estimação dos seus parâmetros lineares é mostrado na Figura 03. Segundo FERNANDES Jr. [2003], este modelo contempla os parâmetros mais relevantes na representação do TPC. Ele consiste da coluna capacitiva ( $C_1$  e  $C_2$ ), do reator de compensação ( $R_c$ ,  $L_c$  e  $C_c$ ), do TP indutivo ( $R_p$ ,  $L_p$ ,  $C_p$ ,  $R_m$  e  $L_m$ ) e do circuito supressor de ferroressonância ( $R_f$ ,  $L_f$  e  $C_f$ ).



**Figura 03 - Modelo do TPC adotado para estimação dos seus parâmetros lineares.**

Na Figura 03, o circuito supressor de ferroressonância foi modelado considerando  $L_f$  como um transformador não saturável para que seja sintonizado na frequência do sistema com um fator  $Q$  elevado, que deve ser esperado para um circuito dessa natureza. Para cálculo de parâmetros, foi adotado o modelo de CSF mostrado na Figura 04, em que  $M$  é a indutância mútua que representa o acoplamento magnético do transformador não saturável.



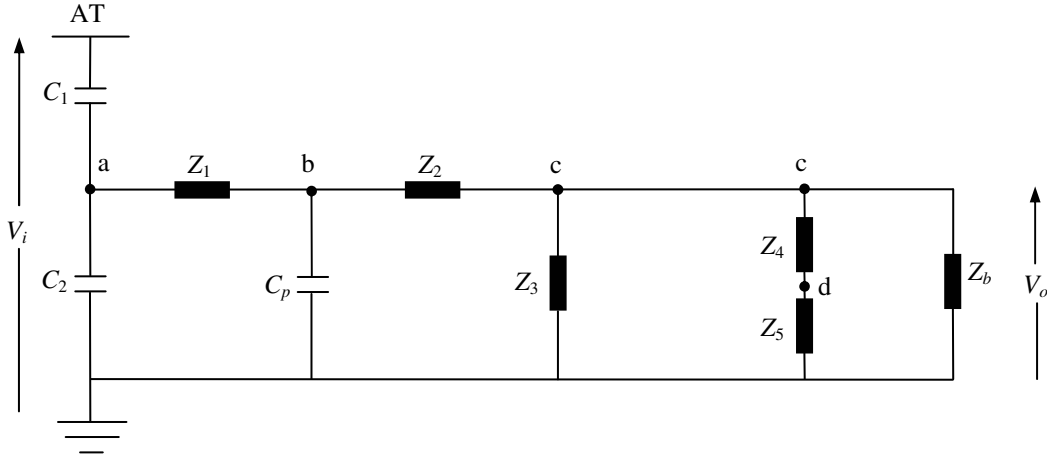
**Figura 04 – Modelo do CSF adotado para estimação de parâmetros.**

Para estimação dos parâmetros, uma técnica de minimização de funções não lineares foi utilizada, uma vez que as funções de transferência do modelo, amplitude e fase da relação de tensão representada por  $V_o/V_i$  dependem não linearmente dos parâmetros do equipamento.

### 3.1. Formalização Matemática do Modelo

Para o desenvolvimento matemático do modelo do TPC, foi utilizado o circuito mostrado na Figura 03. São considerados blocos de impedância  $Z_1$ ,  $Z_2$ ,  $Z_3$ ,  $Z_4$  e  $Z_5$ , conforme mostra a Figura 05. As impedâncias  $Z_4$ , entre os nós “c” e “d”, e  $Z_5$ , entre o nó

“d” e o terra, foram consideradas tomando-se como base o modelo de CSF apresentado na Figura 04.



**Figura 05 - Modelo do TPC com blocos de impedâncias para estimação de seus parâmetros lineares.**

As expressões para as impedâncias no domínio  $s$ , com  $s = j\omega$ , são as seguintes:

$$Z_1 = (R_c + sL_c) // (1/sC_c), \quad (01)$$

$$Z_2 = R_p + sL_p, \quad (02)$$

$$Z_3 = R_m // sL_m, \quad (03)$$

$$Z_4 = (sL_{f1} + 1/sC_f) // sL_{f2}, \quad (04)$$

$$Z_5 = R_f - sM, \quad (05)$$

onde  $L_{f1} = L_1 + M$ ,  $L_{f2} = L_2 + M$  e sendo  $//$  o símbolo de indicação de que os elementos estão conectados em paralelo.

Para o desenvolvimento da função de transferência do módulo da relação de tensão, a seqüência adotada é a seguinte: os elementos  $Z_3$ ,  $Z_4 + Z_5$  e  $Z_b$  conectados ao nó “c” são colocados em paralelo, de forma que a relação entre as tensões  $v_o$  e  $v_b$  pode ser escrita analiticamente aplicando o conceito de divisor de tensão:

$$\frac{v_o}{v_b} = \frac{Z_b // (Z_4 + Z_5) // Z_3}{Z_2 + Z_b // (Z_4 + Z_5) // Z_3}, \quad (06)$$

De forma análoga, a relação entre as tensões nos nós “b” e “a” pode ser colocada conforme a Equação (07).

$$\frac{v_b}{v_a} = \frac{(1/sC_p) // [Z_2 + Z_b // (Z_4 + Z_5) // Z_3]}{Z_1 + (1/sC_p) // [Z_2 + Z_b // (Z_4 + Z_5) // Z_3]}, \quad (07)$$

Finalmente, a relação entre as tensões  $v_a$  e  $v_i$  é escrita conforme a Equação (08):

$$\frac{v_a}{v_i} = \frac{(1/sC_2) // \{Z_1 + (1/sC_p) // [Z_2 + Z_b // (Z_4 + Z_5) // Z_3]\}}{(1/sC_1) + (1/sC_2) // \{Z_1 + (1/sC_p) // [Z_2 + Z_b // (Z_4 + Z_5) // Z_3]\}}, \quad (08)$$

As expressões finais para os módulos de  $v_o/v_b$ ,  $v_b/v_a$  e  $v_a/v_i$  no domínio da frequência podem ser escritas de forma genérica conforme as Equações (09), (10) e (11), respectivamente.

$$\left| \frac{v_o}{v_b} \right| = \frac{\sqrt{(E_4\omega^4 - E_2\omega^2)^2 + (-E_3\omega^3 + E_1\omega)^2}}{\sqrt{(F_4\omega^4 - F_2\omega^2 + F_0)^2 + (F_5\omega^5 - F_3\omega^3 + F_1\omega)^2}}, \quad (09)$$

$$\left| \frac{v_b}{v_a} \right| = \frac{\sqrt{(-C_6\omega^6 + C_4\omega^4 - C_2\omega^2 + C_0)^2 + (-C_7\omega^7 + C_5\omega^5 - C_3\omega^3 + C_1\omega)^2}}{\sqrt{(-D_6\omega^6 + D_4\omega^4 - D_2\omega^2 + D_0)^2 + (-D_7\omega^7 + D_5\omega^5 - D_3\omega^3 + D_1\omega)^2}}, \quad (10)$$

$$\left| \frac{v_a}{v_i} \right| = \frac{\sqrt{(A_8\omega^8 - A_6\omega^6 + A_4\omega^4 - A_2\omega^2)^2 + (-A_7\omega^7 + A_5\omega^5 - A_3\omega^3 + A_1\omega)^2}}{\sqrt{(B_8\omega^8 - B_6\omega^6 + B_4\omega^4 - B_2\omega^2 + B_0)^2 + (-B_7\omega^7 + B_5\omega^5 - B_3\omega^3 + B_1\omega)^2}}, \quad (11)$$

onde os coeficientes  $A_8, A_7, \dots, A_1, B_8, B_7, \dots, B_0, C_7, C_6, \dots, C_0, D_7, D_6, \dots, D_0, E_4, \dots, E_1, F_4, \dots, F_0$ , dependem dos parâmetros  $R, L$  e  $C$  do circuito equivalente do TPC.

A Equação (12) é a expressão para o módulo da relação de tensão do TPC. Ela é importante porque no método de ajuste é necessário conhecer a forma da função a ser aproximada, e as suas derivadas parciais com relação a cada parâmetro.

$$\left| \frac{v_o}{v_i} \right| = \left| \frac{v_o}{v_b} \right| \cdot \left| \frac{v_b}{v_a} \right| \cdot \left| \frac{v_a}{v_i} \right|, \quad (12)$$

A função de mérito que quantifica a concordância entre a solução aproximada (modelo) e a solução real (dados) é apresentada na Equação (13).

$$\chi^2(\mathbf{a}) = \sum_{i=1}^n \left[ \frac{y_i - y(x_i; \mathbf{a})}{\sigma_i} \right]^2, \quad (13)$$

Nesta equação,  $y_i$  é o  $i$ -ésimo ponto do conjunto de  $n$  dados que se pretende modelar,  $x_i$  é o  $i$ -ésimo valor da variável do conjunto de dados (por exemplo, frequência),  $y(x_i; \mathbf{a})$  é o  $i$ -ésimo ponto do modelo,  $\mathbf{a}$  é o vetor de parâmetros a ser determinado,  $\sigma_i$  é o

desvio padrão do  $i$ -ésimo ponto do conjunto de dados e  $\chi^2(\mathbf{a})$  é a função erro a ser minimizada.

O objetivo é determinar o vetor de parâmetros  $\mathbf{a}$  dado pela Equação (14):

$$\mathbf{a} = [C_1 \ C_2 \ R_c \ L_c \ C_c \ C_p \ R_p \ L_p \ R_m \ L_m \ L_{f1} \ C_f \ L_{f2} \ R_f \ M]^T \quad (14)$$

Este vetor apresenta 15 parâmetros, os quais estão implícitos nos coeficientes  $A_8, A_7, \dots, A_1, B_8, B_7, \dots, B_0, C_7, C_6, \dots, C_0, D_7, D_6, \dots, D_0, E_4, \dots, E_1, F_5, \dots, F_0$  das Equações (09), (10) e (11).

### 3.2. Método de Otimização Implementado

No *Software* (TPCalc 1.1) [GSE/UFCG, 2007] é utilizado como método de otimização o método de Levenberg-Marquardt. Este método consiste numa modificação do método de Newton para solução de problemas de mínimos quadrados não lineares [PRESS et al, 1992].

A solução do problema de minimização da Equação (13) é dada por:

$$\mathbf{a}_{k+1} = \mathbf{a}_k + \mathbf{p} = \mathbf{a}_k - [\nabla^2 F(\mathbf{a}_k)]^{-1} \nabla F(\mathbf{a}_k) \quad (15)$$

em que  $\mathbf{p}$  é o passo para a nova estimativa da solução,  $\nabla^2 F$  é a matriz Hessiana de  $F$  e  $\nabla F$  é o vetor gradiente de  $F$ .

Com o objetivo de aumentar as chances de convergência, o método de Levenberg-Marquardt modifica o método de Newton para a iteração em que  $[\nabla^2 F(\mathbf{a})]^{-1}$  não é positivo definida. Dessa forma,  $\nabla^2 F(\mathbf{a})$  é substituída por uma matriz  $\bar{\nabla}^2 F(\mathbf{a})$ , que é forçada a ser positivo definida em cada passo iterativo, isto é,  $\mathbf{z}^T [\bar{\nabla}^2 F(\mathbf{a})]^{-1} \mathbf{z} > 0$ , para todo  $\mathbf{z} \neq 0$ . Assim, o passo  $\mathbf{p}$  é computado a partir de:

$$\bar{\nabla}^2 F(\mathbf{a}) \mathbf{p} = -\nabla F(\mathbf{a}). \quad (16)$$



## 4. Representação das Não Linearidades dos Elementos que Contêm Núcleo Ferromagnético

A simulação de transitórios eletromagnéticos em sistemas de potência é essencial para o estudo da coordenação de isolamento, e para um projeto adequado de equipamentos destinados a proteção dos sistemas. Para realizar estes estudos em ferramentas computacionais, modelos matemáticos são necessários para diversos componentes.

Modelos de transformadores são especialmente importantes para o estudo de correntes de *inrush*, ferroressonância, harmônicas e subharmônicas. Em todos esses tipos de estudo, a representação das não linearidades dos elementos que contêm núcleo ferromagnético têm um papel bastante importante.

Neste trabalho, o núcleo ferromagnético do TP indutivo do TPC foi representado por uma indutância não linear (curva fluxo – corrente). Como normalmente os fabricantes de transformadores fornecem a curva de saturação de seus transformadores na forma de tensão *rms* como função da corrente *rms* (curva  $V_{rms} - I_{rms}$ ), neste trabalho foi adotada a técnica proposta por NEVES & DOMEL [1993] para conversão da curva tensão – corrente ( $V_{rms} - I_{rms}$ ) para valores de pico da curva fluxo – corrente ( $\lambda - i$ ). Esse processo de conversão é descrito no apêndice.

## 5. O Software TPCalc 1.1

O *Software* TPCalc 1.1, desenvolvido pelo GSE/UFCG, é destinado ao cálculo de parâmetros de tranformadores de potencial capacitivos (TPC), e tem como objetivo geral calcular os parâmetros  $R$ ,  $L$  e  $C$  lineares de um modelo de TPC, a partir de dados de resposta em frequência, de forma que tais parâmetros possam reproduzir satisfatoriamente as funções de módulo e fase da relação de tensão do TPC. Como mencionado anteriormente, o método de otimização utilizado no *Software* é o método de Levenberg-Marquardt.

O primeiro contato com o programa é por meio de sua janela principal, conforme pode ser visualizada na Figura 06.

O programa apresenta caixas de texto para o usuário informar as estimativas iniciais para o conjunto de parâmetros, podendo ainda utilizar um dos conjuntos de parâmetros que acompanham o *Software*.

O usuário deve inserir ao programa um conjunto de pontos  $(x_i, y_i, p_i)$  que são os  $i$ -ésimos valores de frequência, ganho e resposta de fase do TPC. O usuário pode editar os dados de entrada através do atalho “Reposta em Frequência de Referência” ou carregar o arquivo do diretório corrente.

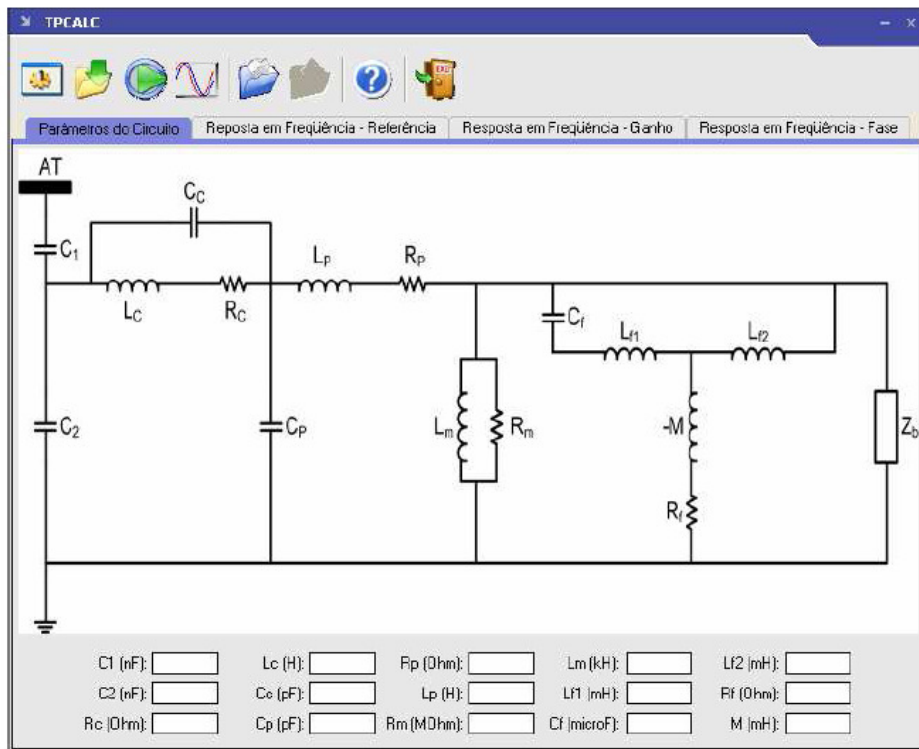


Figura 06 – Tela principal do *software* TPCalc 1.1.

Outros dados devem ser informados pelo usuário para correta execução do software, tais como a relação de transformação do TP indutivo e a tensão de operação do sistema em que o TPC em questão está instalado.

## 5.1. Modificação Feita ao TPCalc 1.1

No *software* TPCalc, a rotina responsável pela técnica de otimização para o cálculo dos parâmetros  $R$ ,  $L$  e  $C$  lineares do TPC é a “Calcula.for”. O sistema gráfico do *software* (desenvolvido na plataforma Borland C++ Builder 6) é dotado de possibilidades de visualização de resultados, capazes de agilizar a análise dos mesmos e permitir que os parâmetros externados sejam facilmente implementados em estudos de simulação de transitórios eletromagnéticos em programas do tipo EMTP (*Electromagnetic Transients Program*).

Um dos objetivos deste trabalho de conclusão de curso é aprimorar o *software* TPCalc, no sentido de que o modelo do TPC gerado possa contemplar também os seus parâmetros não lineares, como o núcleo magnético do TP indutivo. Para isso, a rotina “Calcula.for” foi adaptada para incorporar a técnica de conversão da curva tensão – corrente ( $V_{rms} - I_{rms}$ ) para valores de pico da curva fluxo – corrente ( $\lambda - i$ ) proposta por NEVES & DOMEL [1993]. Com essa modificação na rotina, o *software* passa agora a externar no formato de cartão do ATP tanto os parâmetros lineares ( $R$ ,  $L$  e  $C$ ) quanto os não lineares do TPC.

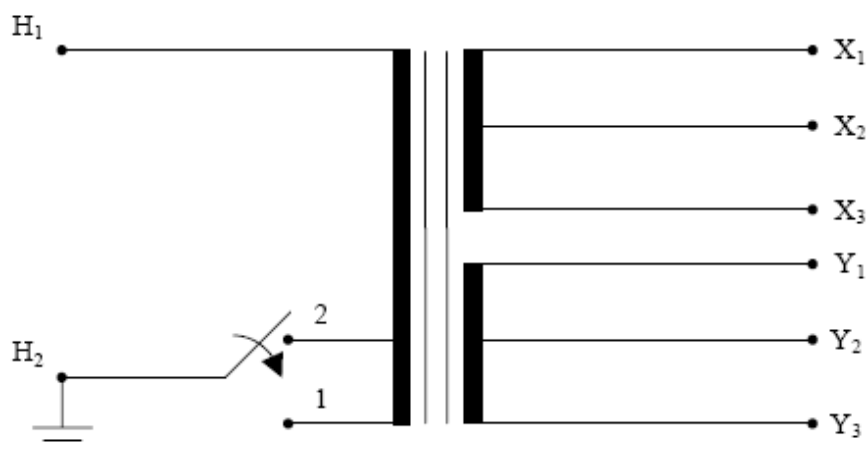
## 6. Cálculo de Parâmetros Utilizando o TPCalc Modificado

A fim de exemplificar as mudanças feitas no TPCalc, foi utilizado um TPC com tensão nominal de 230 kV reportado em FERNANDES Jr. [2003]. Os dados fornecidos pelo fabricante são listados abaixo:

- Tipo: CVT 245/8M.
- Tensão superior: 245 kV.
- NBI: 1050 kV.
- Carga térmica: 1500 VA.
- Tensão primária:  $230/\sqrt{3}$  kV.
- Tensão intermediária:  $30/\sqrt{3}$  kV.
- Tensão secundária: 115 V e  $115/\sqrt{3}$  kV.
- Relação: 2000 – 1154,7 : 1 para  $X_1$ ,  $X_2$  e  $X_3$ ; 2000 – 1154,7 : 1 para  $Y_1$ ,  $Y_2$  e  $Y_3$ .

- Máxima potência nominal: 400 VA.
- Capacitâncias da coluna capacitiva:  $C1 = 9660 \text{ pF}$  e  $C2 = 64400 \text{ pF}$ .
- Frequência: 60 Hz.

A configuração do TP indutivo do TPC pode ser observada na Figura 07.



**Figura 07 – Configuração do TP indutivo do TPC de 230 kV.**

Os resultados do ensaio de resposta em frequência de amplitude e fase da relação de tensão do TPC de 230 kV são utilizados como entrada de dados para o programa TPCalc modificado. Também são utilizados como dados de entrada um conjunto de estimativa inicial para os parâmetros do TPC de 230 kV. Este conjunto é mostrado na Tabela I.

**Tabela I – Estimativa inicial para os parâmetros do TPC de 230 kV.**

|                             |                                 |                             |
|-----------------------------|---------------------------------|-----------------------------|
| $R_c = 10 \text{ k}\Omega$  | $L_p = 100 \text{ H}$           | $L_{\rho} = 100 \text{ mH}$ |
| $L_c = 100 \text{ H}$       | $R_m = 1 \text{ M}\Omega$       | $R_f = 1 \text{ }\Omega$    |
| $C_c = 10 \text{ nF}$       | $L_m = 10 \text{ kH}$           | $M = 10 \text{ mH}$         |
| $C_p = 100 \text{ pF}$      | $L_{f1} = 10 \text{ mH}$        | -                           |
| $R_p = 100 \text{ k}\Omega$ | $C_f = 100 \text{ }\mu\text{F}$ | -                           |

Os valores de corrente e tensão rms medidos no TP indutivo do TPC de 230 kV, reportados em FERNANDES Jr. [2003], também são utilizados como dados de entrada para o TPCalc modificado. Esses valores são mostrados na Tabela II.

Tabela II – Valores de corrente e tensão rms para o TP indutivo do TPC de 230 kV.

| Corrente (A) | Tensão (V) |
|--------------|------------|
| 0,054        | 6,87       |
| 0,505        | 50,40      |
| 1,022        | 105,80     |
| 1,555        | 170,10     |
| 1,802        | 199,50     |
| 2,000        | 215,00     |
| 2,290        | 230,20     |
| 2,624        | 240,80     |
| 3,090        | 251,30     |

### 6.1. Arquivos Externados pelo TPCalc Modificado

No programa TPCalc são calculados os parâmetros  $R$ ,  $L$  e  $C$  lineares do TPC, funções ajustadas de módulo e fase da relação de tensão do TPC, erros relacionados a essas funções, assim como a característica não linear do TP indutivo do TPC. Esses valores são externados em arquivos de texto e no formato do ATP (*Alternative Transients Program*). Este arquivo pode ser externado para uma unidade monofásica, conforme mostra a Figura 08, ou para três unidades monofásicas, conforme mostra a Figura 09.

```

===== Arquivo com o modelo do TPC =====
C
C
C <BUS1><BUS2><BUS3><BUS4><      R(ohm)  >>    L(mH)    >>    C(microF) >>  >>
  TPC   TPCa
  TPCa   TPCa      .9660000E-02
  TPCa   TPCb      .6440000E-01
  TPCa   TPCb      .4884310E+04  .7469817E+04  .1782464E-01
  TPCb   TPCb      .6241931E-03
  TPCb   TPCC      .8475417E+04
  TPCC   TPCC      .7083915E+01  .1741959E+03
  TPCC   TPCd      .3080618E+02
  TPCd   TPCd      .4834064E+01  -.5448923E+01
C
C ===== Indutância não linear do TP indutivo =====
98 TPCC      .07637.02577 3
      .07637      .02577
      .72088      .18907
      1.42937      .39689
      2.14741      .63810
      2.51168      .74839
      2.98930      .80653
      3.66201      .86355
      4.58723      .90332
      5.71204      .94271
      571.20369    26.79988
      9999
C ===== Transformador de potencial indutivo =====
TRANSFORMER      TPIND
      9999
1 TPCb      .1E+05.8E+05 17.32
2 TPCC      .1E-07.1E-07 .1135
    
```

Figura 08 – Arquivo com o modelo computacional do TPC no formato do ATP para uma unidade monofásica.

```

TPC - Bloco de notas
Arquivo Editar Formatar Exibir Ajuda
C ===== Arquivo com o modelo do TPC =====
C
C ===== TPC1 =====
C <BUS1><BUS2><BUS3><BUS4>< R(Ohm) >< L(mH) >< C(microF) >< ><
  TPC1 TPCa1 .9660000E-02
  TPC1a TPCa1 .6440000E-01
  TPC1a TPC1b .4884310E+04 .7469817E+04
  TPC1a TPC1b .1782464E-01
  TPC1b TPC1b .6241931E-03
  TPC1c .8475417E+04
  TPC1c TPC1d .7083915E+01 .1741959E+03
  TPC1c TPC1d .3080618E+02
  TPC1d TPC1d .4834064E+01 -.544892E+01
C
C ===== Indutância não linear do TPind do TPC1 =====
98 TPC1c .07637 .02577 3
  .07637 .02577
  .72088 .18907
  1.42937 .39689
  2.14741 .63810
  2.51168 .74839
  2.98930 .80653
  3.66201 .86355
  4.58723 .90332
  5.71204 .94271
  571.20369 26.79988
  9999
C ===== TPind do TPC1 =====
TRANSFORMER TPIND1
  9999
1 TPC1b .1E+05.8E+05 17.32
2 TPC1c .1E-07.1E-07 .1135
C
C ===== TPC2 =====
C <BUS1><BUS2><BUS3><BUS4>< R(Ohm) >< L(mH) >< C(microF) >< ><
  TPC2 TPC2a .9660000E-02
  TPC2a TPC2a .6440000E-01
  TPC2a TPC2b .4884310E+04 .7469817E+04
  TPC2a TPC2b .1782464E-01
  TPC2b TPC2b .6241931E-03

```

**Figura 09 – Arquivo com o modelo computacional do TPC no formato do ATP para três unidades monofásicas.**

Outros arquivos são externados pelo programa, tal como o arquivo em que estão inseridos os pontos das curvas ajustadas de módulo e fase da relação de tensão do TPC, conforme mostra a Figura 10.

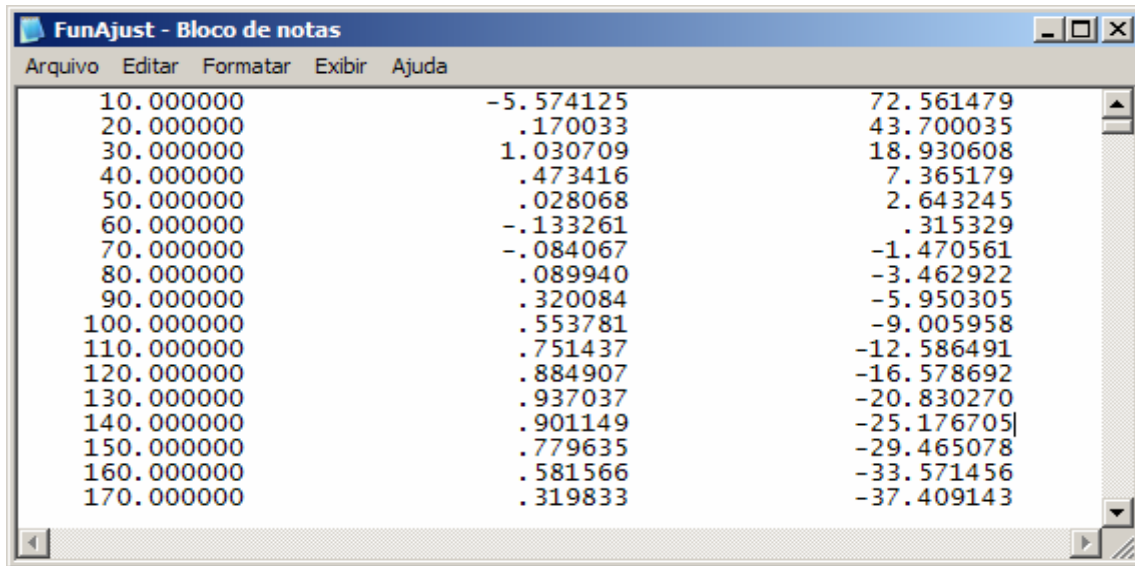


Figura 10 – Arquivo das curvas ajustadas de módulo e fase da relação de tensão do TPC.

Na Figura 10, a primeira coluna refere-se aos valores de frequências (em Hz), a segunda coluna refere-se aos valores ajustados da curva de módulo (em dB), e a terceira refere-se aos valores da curva de fase (em graus).

## 7. Simulações de Atuação e Falha do Circuito de Proteção

Para analisar a atuação ou falha do circuito de proteção é necessário realizar simulações de ferroressonância, baseadas em ensaios estabelecidos pela norma IEC 186. Essas simulações consistem da operação de fechamento-abertura de uma chave CH conectada a um dos terminais secundários do TPC, conforme mostra a Figura 11. A chave fecha em  $t = 125$  ms e permanece fechada durante 4,5 ciclos, quando o curto-circuito é eliminado. Não há cargas conectadas ao secundário do TPC, e o equipamento é energizado a 120% de sua tensão nominal em regime permanente.

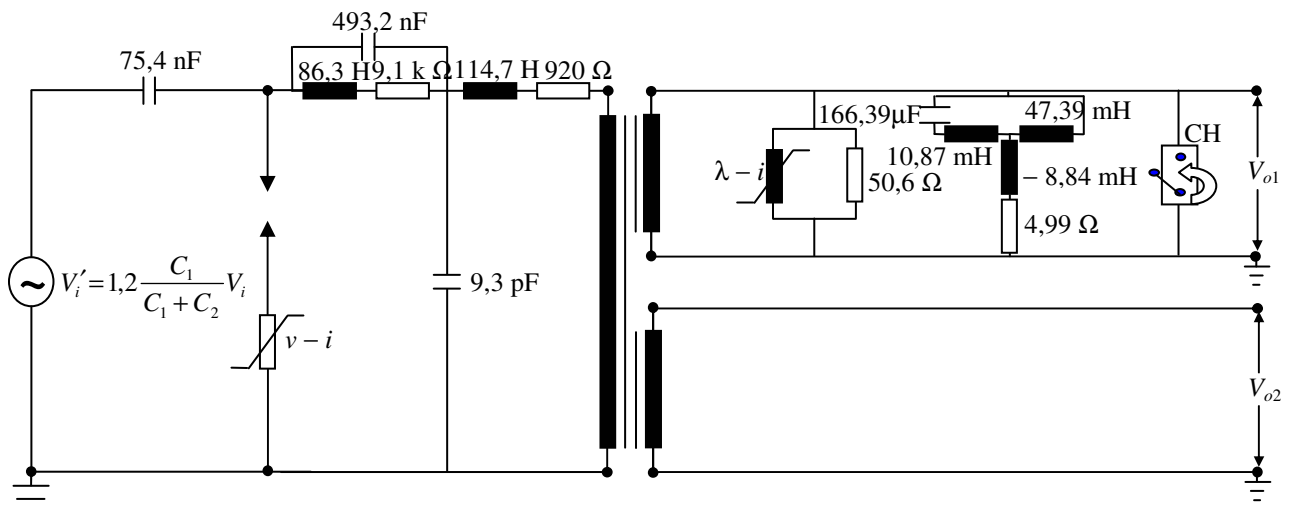


Figura 11 – Esquema utilizado para simulações de ferroressonância no TPC de 230 kV.

Para investigar a atuação do circuito de proteção, foi analisado o desempenho do pára-raios original do TPC, de carboneto de silício (SiC), comparando-o a um suposto pára-raios de óxido de zinco (ZnO) de mesma tensão nominal, 39 kV, cuja característica não linear  $v - i$  dos varistores foi estimada a partir do trabalho de COSTA [1999] e apresentada na Tabela III.

**Tabela III – Característica não linear estimada para um pára-raios de ZnO de 39 kV.**

| <b>Corrente<br/>(A<sub>pico</sub>)</b> | <b>Tensão de descarga<br/>(kV<sub>pico</sub>)</b> |
|--|---|
| 0,0008                                 | 24,86   |
| 0,003                                  | 43,78   |
| 0,07                                   | 52,69   |
| 1,0                                    | 55,88   |
| 100,0                                  | 61,60   |
| 200,0                                  | 62,70   |
| 1000,0                                 | 70,40   |
| 5000,0                                 | 77,00   |
| 10000,0                                | 82,50   |

O pára-raios de SiC é representado por um centelhador em série com um resistor não linear, cuja característica  $v - i$  foi estimada a partir do trabalho de FERNANDES Jr. [2003] e apresentada na Tabela IV.

**Tabela IV – Característica não linear do pára-raios de SiC do TPC de 230 kV.**

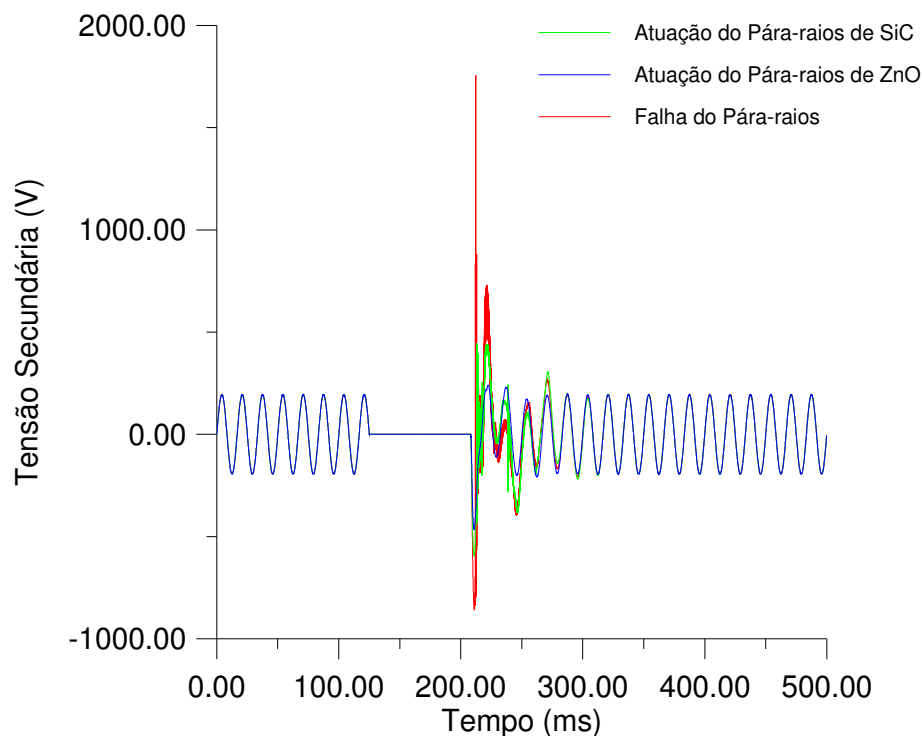
| <b>Corrente<br/>(A<sub>pico</sub>)</b> | <b>Tensão de descarga<br/>(kV<sub>pico</sub>)</b> |
|--|---|
| 100                                    | 20,8  |
| 200                                    | 27,9  |
| 500                                    | 39,0  |
| 1000                                   | 42,9  |
| 2000                                   | 45,5  |

A Figura 12 mostra a comparação da tensão transitória nos terminais secundários do TPC considerando a atuação do circuito de proteção composto pelo pára-raios de SiC (curva em verde), pelo pára-raios de ZnO (curva em azul) e quando o pára-raios falha (curva em vermelho). A falha do pára-raios é simulada retirando-o do modelo do TPC.

Analisando a Figura 12, pode-se perceber que a tensão transitória nos terminais secundários do TPC apresenta valores bastante elevados quando o pára-raios falha na eliminação do curto-circuito. A tensão referida chega a atingir valores superiores a 1,7 kV, que é capaz de danificar os instrumentos de proteção conectados ao secundário do TPC.



Uma análise comparativa entre os pára-raios de SiC e ZnO mostra que embora ambos apresentem um desempenho semelhante em termos de limitação de tensão, o amortecimento se dá mais rapidamente quando o circuito de proteção do modelo do TPC é composto pelo pára-raios de ZnO. No caso apresentado na Figura 12, as oscilações transitórias da tensão nos terminais secundários do TPC permanecem até 270,85 ms quando o circuito de proteção é composto pelo pára-raios de ZnO, e até 320,80 ms quando o circuito é composto pelo pára-raios de SiC.

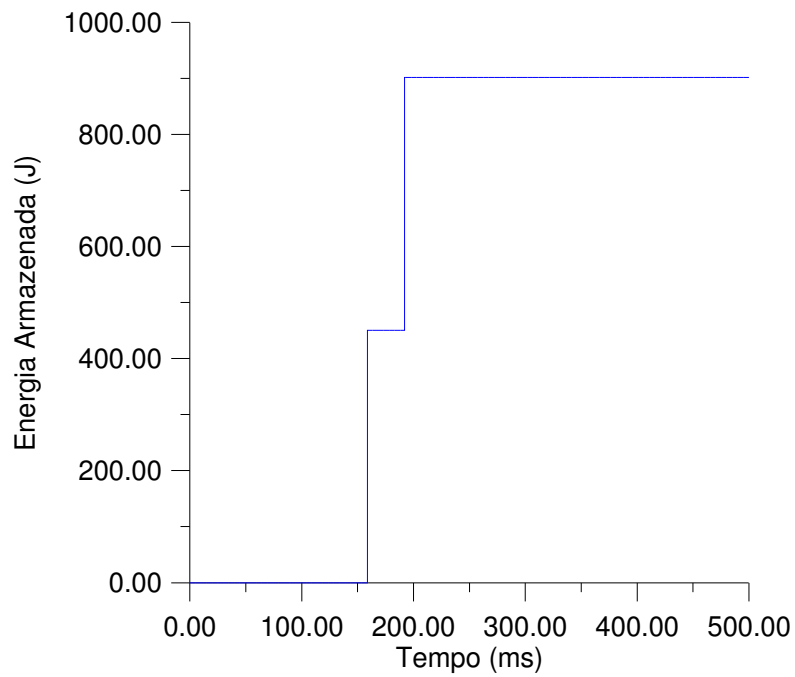


**Figura 12 – Tensão transitória no secundário do TPC considerando a atuação e falha do circuito de proteção.**

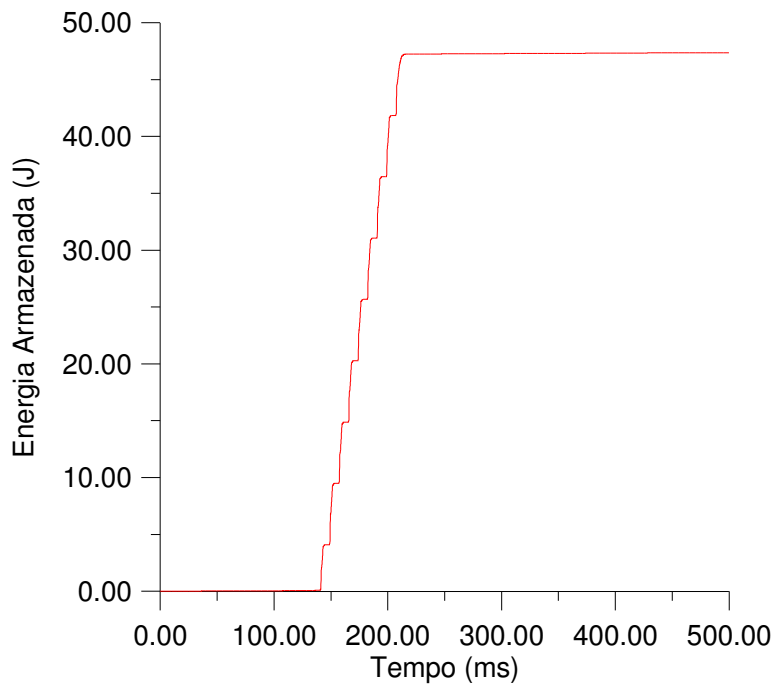
As energias armazenadas pelos pára-raios de carboneto de silício e de óxido de zinco, quando eles atuam para proteger o TPC, são mostradas na Figura 13 e 14, respectivamente. A energia armazenada pelo pára-raios de SiC é de aproximadamente 900 J, pois ele está sendo solicitado a absorver mais energia que o pára-raios de ZnO, que apresenta uma energia armazenada de aproximadamente 45 J.

Valores típicos de quantidades de energia absorvidas são: 1 kJ/kV (para o pára-raios de ZnO) e 500 J/kV (para o pára-raios de SiC). Logo, os pára-raios referidos, de tensão nominal de 39 kV, são capazes de absorver as quantidades de energia, durante o mesmo período de tempo em que foi feita a simulação.

Por isso, pode-se afirmar, que o circuito de proteção é bastante eficiente na limitação de sobretensões transitórias quando aparecem nos secundários do TPC.



**Figura 13 – Energia Armazenada pelo pára-raios de SiC.**



**Figura 14 – Energia Armazenada pelo pára-raios de ZnO.**

## 8. Conexão e Desconexão ao Barramento de 230 kV

Quando o TPC está ligado à rede elétrica, a sua resposta em frequência não dependerá somente dos parâmetros e da configuração do TPC, mas também da localização do TPC na rede. Com o intuito de investigar esta realidade, foram analisadas simulações de conexão seguida de desconexão do TPC ao barramento de uma subestação de 230/69 kV. Este tipo de estudo consiste em simular manobras de chaves seccionadoras localizadas nas proximidades do terminal primário do TPC.

A subestação em estudo é a Bongoi/CHESF de 230/69 kV [CHESF/GRL,1999], seu diagrama unifilar é mostrado na Figura 15. Foram modelados os equipamentos elétricos (disjuntores, chaves seccionadoras, transformadores, pára-raios e bancos de capacitores), os barramentos, as cargas e as linhas de transmissão dos lados de 69 e 230 V da subestação.

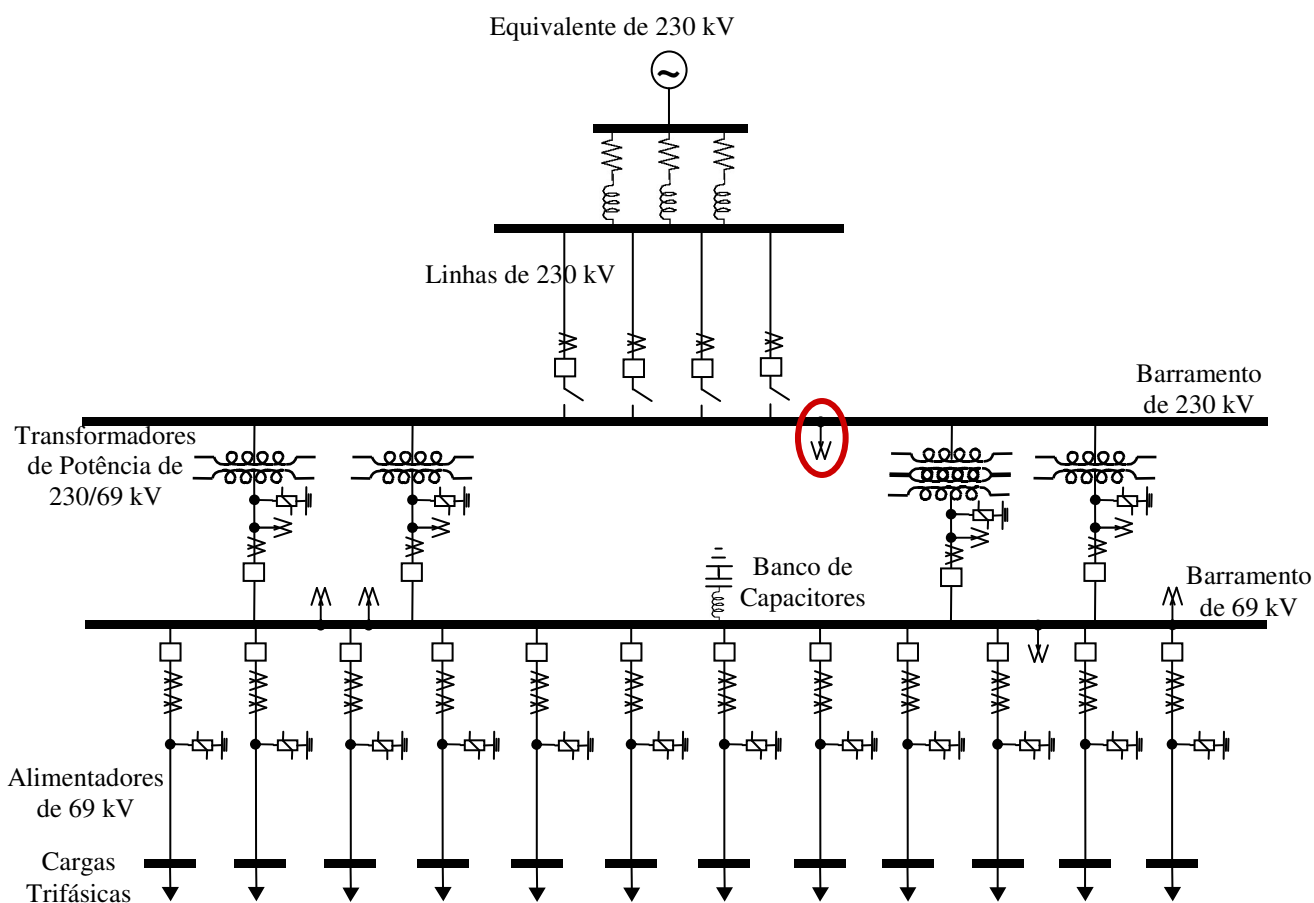


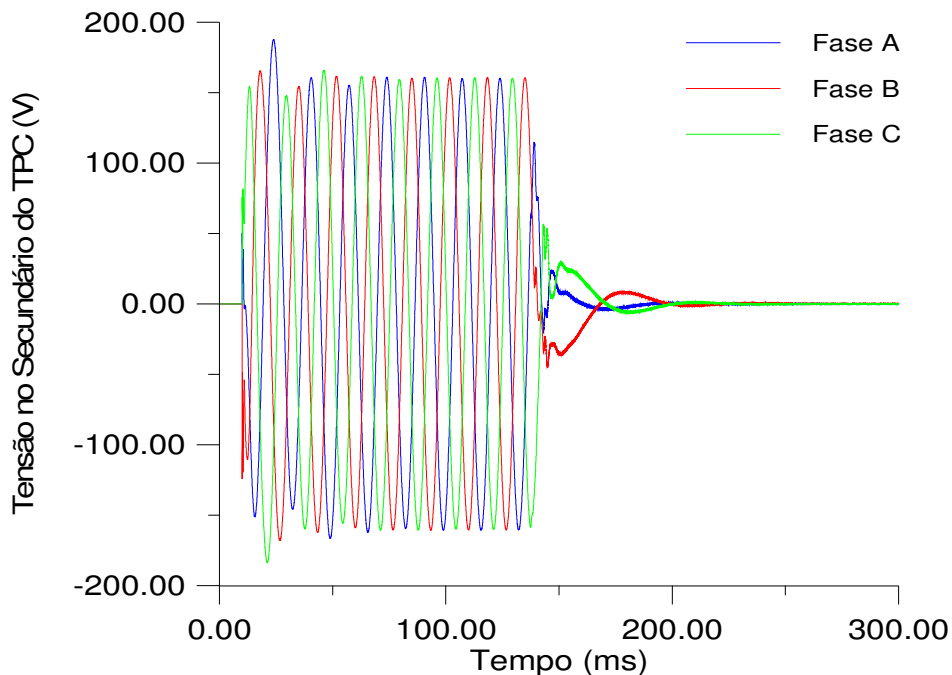
Figura 15 – Diagrama unifilar da subestação Bongoi/CHESF de 230/69 kV para o estudo de conexão e desconexão do TPC ao barramento de 230 kV.

O equivalente no barramento de 230 kV foi representado como modelo de elemento RL mutuamente acoplado do ATP. Neste caso, o equivalente de Thévenin é adequado para verificar os resultados da simulação, pois normalmente os transitórios observados no TPC apresentam frequências próximas à fundamental. Os valores de sequência apresentados pela CHESF são mostrados na Tabela V.

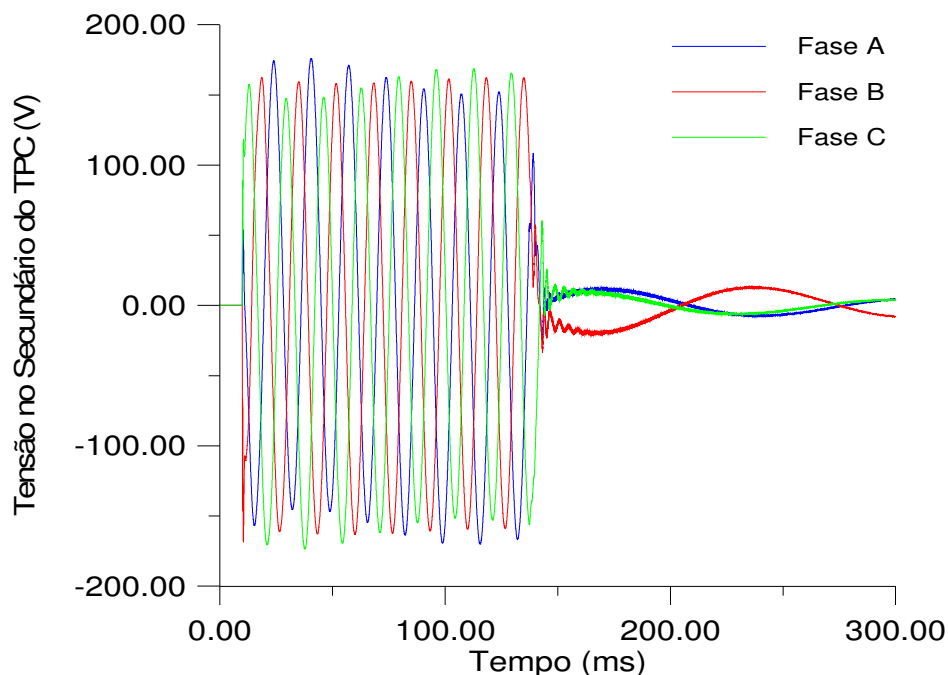
**Tabela V – Valores de sequência para o equivalente de 230 kV da subestação Bongri/CHESF.**

| Sequência zero  |            | Sequência positiva |            |
|-----------------|------------|--------------------|------------|
| Resistência     | Indutância | Resistência        | Indutância |
| 1,1268 $\Omega$ | 20,838 mH  | 0,9681 $\Omega$    | 28,531 mH  |

O TPC destacado na Figura 15 é o alvo das atenções deste estudo. O comportamento da tensão secundária deste TPC é analisado, considerando a atuação e a falha do circuito supressor de ferorrressonância (CSF) do TPC, quando o TPC é conectado e em seguida desconectado do barramento de 230 kV por chaves seccionadoras. As tensões secundárias dos três TPC do barramento, quando há atuação e falha do CSF, são mostradas nas Figuras 16 e 17, respectivamente.



**Figura 16 – Tensão secundária do TPC considerando a atuação do CSF quando ocorre a conexão seguida de desconexão do TPC ao barramento de 230 kV da subestação Bongri/CHESF.**



**Figura 17 – Tensão secundária do TPC considerando a falha do CSF quando ocorre conexão seguida de desconexão do TPC ao barramento de 230 kV da subestação Bongi/CHESEF.**

Observa-se, na Figura 16, que após a energização do TPC as tensões passam por um breve transitório e chegam ao regime permanente em aproximadamente 62 ms. E após a desenergização, as tensões são amortecidas pelo circuito supressor de ferroressonância em aproximadamente 63 ms.

No entanto, na Figura 17, pode-se observar que as oscilações transitórias das formas de onda permanecem pelo menos 125 ms, após a energização do TPC. Isto é devido ao circuito supressor de ferroressonância não estar atuando. Observa-se, ainda, que após a desenergização do TPC, as tensões são amortecidas num tempo maior do que quando há atuação do CSF, pelo menos 100 ms a mais.

Portanto, mesmo conectado à rede elétrica, o circuito supressor de ferroressonância é eficiente no amortecimento de tensões transitórias que aparecem nos terminais secundários do TPC, quando este é submetido à manobra de chaves seccionadoras.

## 9. Corte de Corrente Indutiva Próximo ao TPC

Com o intuito de simular uma situação mais crítica que um curto-circuito no primário do TPC, foram analisadas simulações de corte de corrente indutiva nas proximidades do seu terminal primário.

A configuração utilizada para realizar essas simulações é mostrada na Figura 18. Trata-se de um diagrama unifilar de um sistema de potência em que o barramento de 230 kV, ao qual o TPC está conectado, é desenergizado através da chave CH em um valor de corrente diferente de zero. Todos os disjuntores D estão com os contatos fechados. Os dados necessários as simulações são apresentados na Tabela VI.

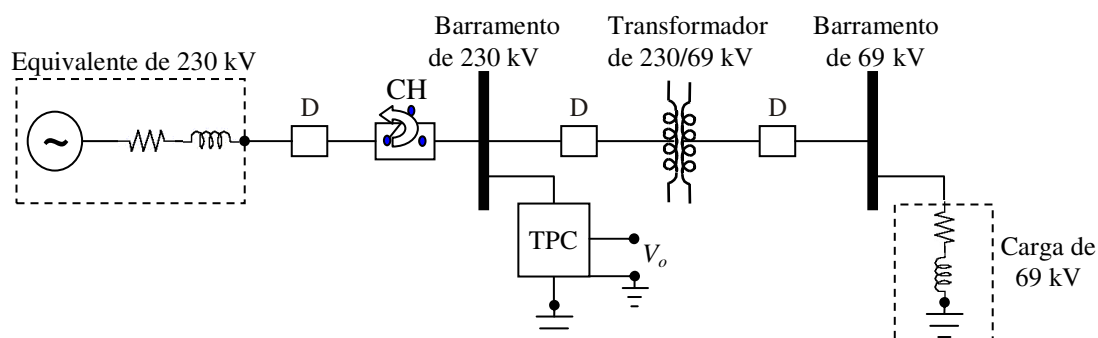
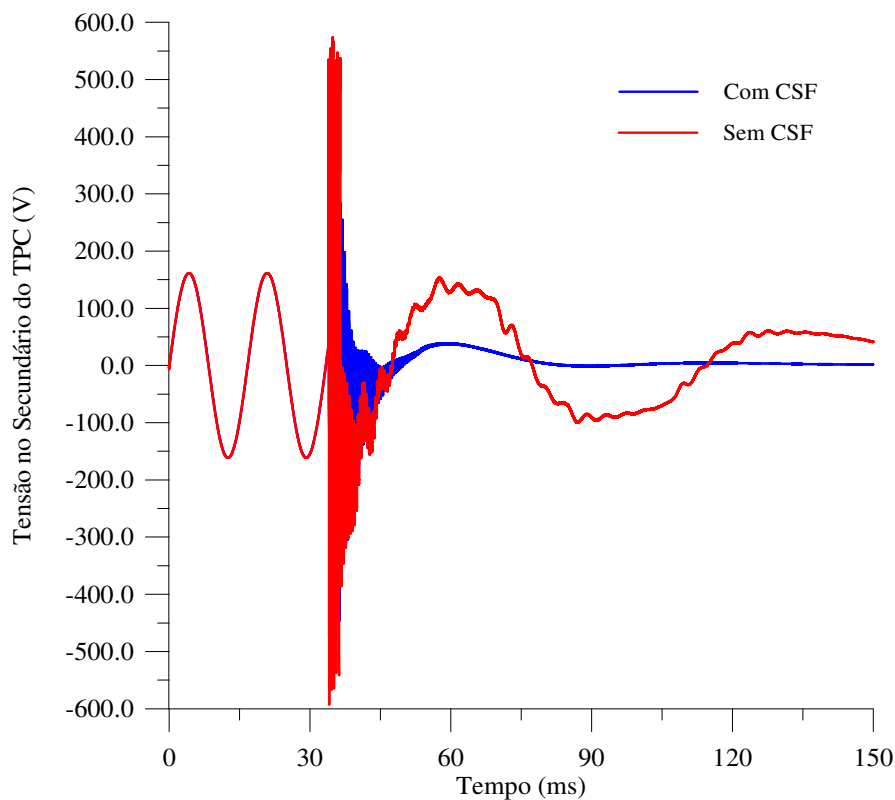


Figura 18 – Configuração utilizada para simulações de corte de corrente indutiva próximo ao TPC.

Tabela VI – Parâmetros R, L e C do sistema elétrico da Figura 18.

|  | Resistância     | Indutância | Capacitância |
|--|-----------------|------------|--------------|
| Equivalente de 230 kV                  | 0,9681 $\Omega$ | 28,513 mH  | –            |
| Disjuntores                            | –               | –          | 1300 pF      |
| Chave seccionadora                     | –               | –          | 200 pF       |
| Enrolamento de 230 kV do transformador | 0,6519 $\Omega$ | 13,125 mH  | –            |
| Enrolamento de 69 kV do transformador  | 0,0970 $\Omega$ | 1,973 mH   | –            |
| Carga de 69 kV                         | 80,0 $\Omega$   | 137,0 mH   | –            |

A tensão secundária do TPC, quando ocorre o corte de corrente indutiva, com o CSF (curva em azul) e sem CSF (curva em vermelho) são mostrados na Figura 19.



**Figura 19 – Tensão Secundária: modelo do TPC considerando a presença e a ausência do CSF nas simulações de corte de corrente indutiva.**

Pode-se observar na Figura 19 que as tensões no secundário do TPC, originadas pelo corte de corrente indutiva, são realmente mais severas e apresentam frequências mais elevadas que as tensões produzidas por uma falta no primário do TPC. Este resultado se deve ao aumento considerável da tensão nos elementos indutivos, quando ocorre uma variação brusca de corrente.

Pode-se, também, comprovar a eficiência do CSF no amortecimento de tensões secundárias, pois quando o referido circuito não está presente no modelo do TPC a forma de onda da tensão secundária oscila bastante até ser amortecida, além de apresentar amplitude mais elevada que na situação em que o CSF está incluso.

## 10. Considerações Finais

Neste trabalho de conclusão de curso foi feita uma revisão da literatura sobre o comportamento de transformadores de potencial capacitivos frente a sobretensões transitórias em sistemas de potência. Percebeu-se nesta revisão que, embora muito esforço tenha sido feito por pesquisadores de várias partes do mundo, ainda há complexidade na determinação dos parâmetros do modelo do TPC para estudos de transitórios eletromagnéticos.

Com a proposta de tornar os estudos de simulação de transitórios eletromagnéticos mais realistas, o *software* TPCalc foi modificado. Agora é possível obter um modelo de TPC mais completo, pois o *software* externa no formato de cartão do ATP, além dos seus parâmetros  $R$ ,  $L$  e  $C$  lineares, os parâmetros não lineares, como o núcleo magnético do TP indutivo, cuja característica fluxo – corrente ( $\lambda - i$ ) é convertida a partir de dados de entrada de tensão – corrente ( $V_{rms} - I_{rms}$ ).

Outra constatação importante é que o circuito de proteção, composto pelos pára-raios de ZnO ou de SiC, é eficiente na limitação das amplitudes e amortecimento de sobretensões transitórias nos secundários do TPC.

Foram realizadas simulações de sobretensões devido à manobra de chave seccionadora nas proximidades do TPC localizado numa subestação, bem como simulações de corte de corrente indutiva. Os resultados dessas simulações mostram que o circuito supressor de ferroressonância é eficiente no amortecimento da tensão transitória nos terminais secundários do TPC.



## 11. Cronograma

As atividades propostas para este trabalho, mostradas na Tabela VII, são as seguintes:

1. Avaliação do estado da arte sobre o desempenho do TPC frente a sobretensões transitórias;
2. Representação das não linearidades dos elementos que contêm núcleo ferromagnético no TPC a partir da conversão da curva tensão – corrente ( $V_{rms} - I_{rms}$ ) para valores de pico da curva fluxo – corrente ( $\lambda - i$ );
3. Aprimoramento do software TPCalc 1.1 para que modelo gerado possa contemplar também os parâmetros não lineares do TPC;
4. Análise de simulações digitais para fazer previsões do desempenho do TPC frente a sobretensões transitórias;
5. Elaboração do relatório.

**Tabela VII – Cronograma de atividades propostas e executadas.**

| ETAPAS | SEMANAS |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |
|--------|---------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|
|        | 1       | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
| 1      | ■       | ■ | ■ | ■ |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |
|        | ■       | ■ | ■ | ■ |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |
| 2      |         |   | ■ | ■ | ■ | ■ |   |   |   |    |    |    |    |    |    |
|        |         |   | ■ | ■ | ■ | ■ |   |   |   |    |    |    |    |    |    |
| 3      |         |   |   |   | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■  | ■  | ■  | ■  |    |    |
|        |         |   |   |   | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■  | ■  | ■  | ■  |    |    |
| 4      |         |   |   |   |   |   |   |   | ■ | ■  | ■  | ■  | ■  | ■  | ■  |
|        |         |   |   |   |   |   |   |   | ■ | ■  | ■  | ■  | ■  | ■  | ■  |
| 5      | ■       | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■  | ■  | ■  | ■  | ■  | ■  |
|        | ■       | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■  | ■  | ■  | ■  | ■  | ■  |

**Legenda:**

Previsto ■

Executado ■

## 12. Referências

- CARVALHO JR., A. V. *Interação Transitória entre Transformadores de Potencial Capacitivos e Linhas de Transmissão: Uma Contribuição para Minimizar Falhas*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco, agosto 2008.
- CHESF/GRL. *SE Bongí 230/69 kV (BGI)*, DO-97.3.0005, outubro 1999.
- COSTA, E. G. *Análise do Desempenho de Pára-raios de Óxido de Zinco*, Tese de Doutorado UFPB, abril 1999.
- D'AJUZ, A., RESENDE, F. M., CARVALHO, F. M. S., NUNES, I. G., AMON FILHO, J., DIAS, L. E. N., PEREIRA, M. P., KASTRUP FILHO, O. E. MORAIS, S. A. *Equipamentos Elétricos; Especificação e Aplicação em Subestações de Alta Tensão*. Rio de Janeiro, FURNAS 1985.
- FERNANDES JR., D. *Modelo de Transformadores de Potencial Capacitivos para Estudos de Transitórios Eletromagnéticos*, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Campina Grande, dezembro 2003.
- IRAVANI, M. R., WANG, X., POLISHCHUK, I., RIBEIRO, J. and SARSHAR, A. "Digital Time-Domain Investigation of Transient Behaviour of Coupling Capacitor Voltage Transformer". *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 13, No. 2, pp. 622-629, April 1998.
- LEUVEN EMTP CENTER. *ATP – Alternative Transients Program – Rule Book*, Heverlee, Belgium, July 1987.
- LUCAS, J. R., MCLAREN, P. G., KEERTHIPALA, W. W. L. and JAYASINGHE, R. P. "Improved Simulation Models for Current and Voltage Transformers in Relay Studies". *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 7, No. 1, pp. 152-159, January 1992.
- MAMEDE FILHO, J. *Manual de Equipamentos Elétricos*. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1993.
- MEDEIROS FILHO, S. *Medição de Energia Elétrica*. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1976.
- MORAES, H. M. e VASCONCELOS, J. C. A. "Sobretensões em TPC Durante Manobra de Chave Seccionadora". *XV Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica – XV SNPTEE*, Foz do Iguaçu, Paraná, 22 a 26 de novembro 1999.

- NEVES, W. L. A. and DOMMEL, H. W. "On Modeling Iron Core Nonlinearities". *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 8, No. 2, pp. 417-423, May 1993.
- PRESS, W. H., TEUKOLSKY, S. A., VETTERLING, W. T., FLANNERY, B. P. *Numerical Recipes in Fortran - The Art of Scientific Computing*. Second Edition. New York: Cambridge University Press, 1992.
- SWEETANA, A. "Transient Response Characteristics of Capacitive Potential Devices". *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-90, pp. 1989-2001, September/October 1971.
- TZIOUVARAS, D. A., MCLAREN, P., ALEXANDER, G., DAWSON, D., EZSTERGALYOS, J., FROMEN, C., GLINKOWSKI, M., HASENWINKLE, I., KEZUNOVIC, M., KOJOVIC, Lj., KOTHEIMER, B., KUFFEL, R., NORDSTROM, J. and ZOCHOLL, S. "Mathematical Models for Current, Voltage and Coupling Capacitor Voltage Transformers". *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 15, No. 1, pp. 62-72, January 2000.

## Apêndice

### Conversão da Curva $V_{rms} - I_{rms}$ para Valores de Pico da Curva $\lambda - i$

A curva fluxo – corrente ( $\lambda - i$ ) que caracteriza os elementos que contêm núcleo ferromagnético do TPC pode ser calculada a partir dos valores da curva de saturação tensão – corrente ( $V_{rms} - I_{rms}$ ). Para cada segmento linear  $k$  da curva  $\lambda - i$ , o valor do pico de fluxo é dado pela expressão abaixo:

$$\lambda_k = \frac{\sqrt{2}V_{k-rms}}{\omega}, \quad (17)$$

em que  $\omega$  é a frequência angular.

Para o primeiro segmento da curva  $\lambda - i$ , o valor de pico da corrente é dado por:

$$i_1 = \sqrt{2}I_{1-rms}. \quad (18)$$

Sabendo-se que o fluxo é uma função senoidal, do tipo  $\lambda_k(\theta) = \lambda_k \text{sen} \theta$ , pode-se obter o pico de corrente para os outros segmentos ( $k \geq 2$ ), a partir da avaliação da corrente  $I_{k-rms}$  para cada segmento  $k$ , usando a Equação (19) a seguir:

$$I_{k-rms}^2 = \frac{2}{\pi} \left[ \int_0^{\theta_1} \left( \frac{\lambda_k \text{sen} \theta}{L_1} \right)^2 d\theta + \int_{\theta_1}^{\theta_2} \left( i_1 + \frac{\lambda_k \text{sen} \theta - \lambda_1}{L_2} \right)^2 d\theta + \dots + \int_{\theta_{k-1}}^{\pi/2} \left( i_{k-1} + \frac{\lambda_k \text{sen} \theta - \lambda_{k-1}}{L_k} \right)^2 d\theta \right] \quad (19)$$

Na equação (19), a única variável desconhecida é a indutância  $L_k$  do último segmento, pois seu valor depende de  $i_k$  que ainda vai ser determinado. A equação (19) pode ser reescrita da forma abaixo:

$$a_k Y_k^2 + b_k Y_k + c_k = 0, \quad (20)$$

com  $a_k$ ,  $b_k$  e  $c_k$  conhecidos e  $Y_k = 1/L_k$  a ser determinado.  $Y_k$  pode ser obtido, encontrando a solução positiva da Equação (20). Dessa forma, o pico de corrente  $i_k$  é computado através da Equação (21):

$$i_k = i_{k-1} + Y_k (\lambda_k - \lambda_{k-1}). \quad (21)$$