



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

GPC - 05
16 a 21 Outubro de 2005
Curitiba - Paraná

**GRUPO V
GRUPO DE ESTUDO DE PROTEÇÃO, MEDIÇÃO E CONTROLE EM SISTEMAS DE POTÊNCIA - GPC**

PROTEÇÃO DO TRANSFORMADOR DEFASADOR DA SUBESTAÇÃO DE ANGRA DOS REIS

*Wagner de Oliveira	Donald Menzies	Luiz Fabiano	Walmer F. Soares
ABB-Brasil	ABB-Suécia	ABB-Brasil	FURNAS

RESUMO

O presente trabalho tem por objetivo apresentar um resumo sobre o Transformador Defasador e a implantação de Terminais de Proteção de Distância e Diferencias Percentuais com Algoritmo Adaptativos para o conjunto de Auto-Transformadores Reguladores com "LTC" de 500/138 kV e Transformador Defasador de 138kV-138kV Variável de $\pm 21^\circ$ com "LTC". A implantação do Transformador Defasador por FURNAS foi em função do controle de tensão e suporte de potência reativa entre os Sistema de 500 kV e 138 kV do Sistema Furnas da Subestação de Angra dos Reis, no estado do Rio de Janeiro para evitar consequentes sobrecarga no sistema de 138 kV. A Subestação de 500 kV de Angra dos Reis é interligada ao Sistema de Transmissão da "Área-Rio" e o suprimento no nível de tensão em 138 kV é feito pela Região Oeste, não havendo uma interligação direta com a Subestação de Angra dos Reis em 500 kV. A energia gerada pela Usina de Angra percorre um longo caminho para ser consumida no local, totalizando aproximadamente 300 km, cuja qualidade da energia e os baixos níveis de curto-circuito para esse sistema são comprometidos. Foram realizadas Simulações das Proteções no "RTDS" de FURNAS para verificação do desempenho das proteções.

PALAVRAS-CHAVE

Auto-Transformador, Transformador Defasador, Proteção, Diferencial, Distância.

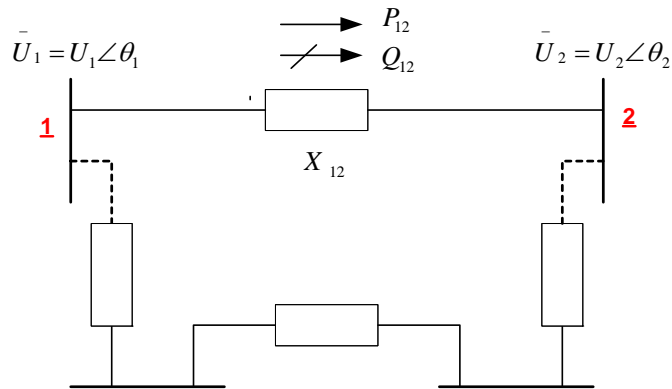
1.0 - INTRODUÇÃO

A energia gerada pelas Usinas Nucleares de Angra I e II é de grande importância para o abastecimento da região sudeste do Brasil, especialmente para o Estado do Rio de Janeiro. Entretanto, apesar destas usinas situarem-se junto ao litoral sul do estado, o sistema de Sub-Transmissão da CERJ em 138 kV que abastece o município de Angra dos Reis e demais municípios limítrofes, possui um grande sistema com linhas radiais que partem da Usina Termica de Santa Cruz e da SE Zona Oeste, não possuindo interligação direta com as Usinas Nucleares. Desta forma, os sistema de 138 kV não desfrutava das vantagens propiciadas pelas Usinas de Angra I e II em termos de controle de tensão e suporte de potência reativa. Para solucionar este problema e evitar a consequente sobrecarga no sistema de 138 kV, foi decidido por Furnas a instalação de um Conjunto de Autotransformadores Reguladores de 500/138 kV e um Transformador Defasador de 400 MVA, 138 kV-138 kV, ± 16 taps, $\pm 21^\circ$ para interligar o sistema de 500 kV para o abastecimento da área RJ/ES, onde estão conectados as Usinas Nucleares de Angra I e II ao sistema de Sub-Transmissão 138 kV do Sul Fluminense.

*Av. Monteiro Lobato, 3285 - Bairro São Roque – Guarulhos – São Paulo – Brasil
CEP: 07190-904 – CP 71, Prédio 14 MC, Depto PTS-SA – Sistemas de Proteção e Automação
Tel.: (011) 6464-8799 - Fax: (011) 6464-8660 - e-mail: wagner.oliveira@br.abb.com

O Transformador Defasador tem sido focado nos últimos anos para o controle do fluxo de potência em sistemas de transmissão em paralelo com diferentes empresas concessionárias de forma a trabalharem com a mesma tensão operativa, ver Figura I. Nos Estados Unidos sua aplicação é mais difundida e no Brasil trata-se da primeira aplicação em Sistemas de Transmissão.

FIGURA I - Fluxo de Potência em Sistema de Transmissão em Paralelo



$$\vec{P}_{12} = \frac{\vec{U}_1 \cdot \vec{U}_2}{X_{12}} \cdot \text{sen}(\delta_{12}) \quad [1]$$

$$\vec{Q}_{12} = \frac{U_1^2}{X_{12}} - \frac{\vec{U}_1 \cdot \vec{U}_2}{X_{12}} \cdot \text{cos}(\delta_{12}) \quad [2]$$

$$\delta_{12} = \theta_1 - \theta_2 \quad [3]$$

O Fluxo de Potência Ativa de P_{12} :

-Função da Diferença do Ângulo de Fase

$$\delta_{12} > 0 = \text{fluxo no sentido da barras } 1 \rightarrow 2 \quad [4]$$

$$\delta_{12} < 0 = \text{fluxo no sentido da barra } 2 \rightarrow 1 \quad [5]$$

-Função da Reatância entre a Barras X_{12}

-Controle da Interligação do Sistema

---AutoTransformador Regula o Módulo da Tensão, com o "LTC", que se encontra em fase

$$|U| \pm \Delta U \quad [6]$$

-Transformador Defasador Regula a Fase da Tensão, com o "LTC", que deve ter o mesmo módulo.

$$U \angle \delta \pm \Delta \delta \quad [7]$$

2.0 - APLICAÇÃO DO TRANSFORMADOR DEFASADOR

O Transformador Defasador em Sistemas de Potência se baseia no princípio de funcionamento com o transformador série, "Booster Série" em conjunto com um transformador de excitação e regulação, ver a figura II referente ao Diagrama Unifilar do Transformador Defasador e a Diagrama Vetorial de Deslocamento Angular das Tensões no Transformador Defasador, conforme Figuras II e III.

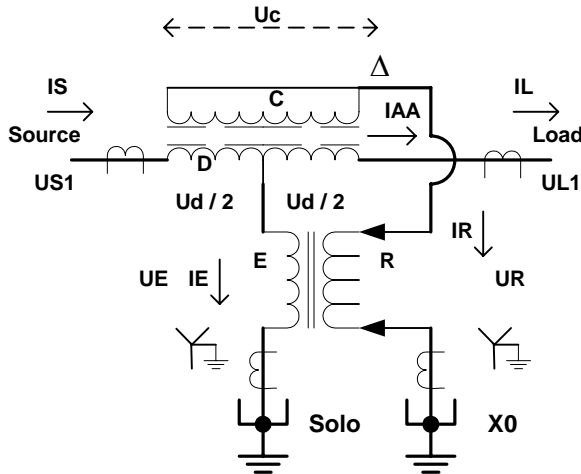


Figura II - Diagrama Unifilar do Transformador Defasador

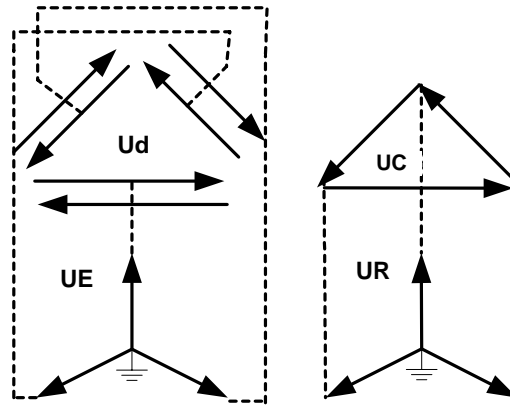


Figura III - Diagrama Vetorial de Deslocamento Angular das Tensões no Transformador Defasador

Foi concebido por FURNAS/ABB, o modelo do Transformador Defasador com o princípio de dois núcleos, cuja impedância na posição central é definida pela impedância do enrolamento série, conforme Figura II. As grandezas envolvidas são as tensões da fonte "US1" correspondem a tensão de 138 kV na saída do Auto-Transformador que é igual a soma vetorial de "UE + Ud/2" no Transformador Defasador. O Enrolamento de Excitação "E" é excitado com a tensão "UE" que é conectado a partir da derivação central do enrolamento Secundário "D". O Enrolamento Secundário de Regulação "R" é ligado em estrela e que alimenta o primário do enrolamento "C" do transformador série através do comutador sob carga em 33 posições de tap. O enrolamento "C" corresponde ao enrolamento Primário do Transformador Série ligado em delta com defasamento, cuja tensão "UC" desse enrolamento depende da posição do comutador no enrolamento "R", sendo que na posição central se encontra curto-circuitada. ..O Enrolamento Secundário "D" corresponde ao enrolamento do Transformador Série, cuja tensão induzida "Ud" nesse enrolamento está defasado de 90° graus elétricos em relação a tensão de excitação "UE" e que define o valor do defasamento elétrico da tensão entre a entrada de tensão da "Source" US1" e a saída da carga "Load" "UL1", portanto, podemos controlar as correntes em circuitos distintos através do controle da tensão em quadratura "Ud" do Transformador Defasador ou seja, controlamos o ângulo de defasagem. A tensão no enrolamento do defasador "Ud" é definido da seguinte forma:

$$\vec{Ud} = 2 \cdot \left(\frac{\vec{US1}}{\sqrt{3}} \right) \cdot \sin\left(\frac{\delta}{2}\right) \quad [8]$$

$$\vec{IS} = \vec{IE} + \vec{IL} \quad [9]$$

$$\vec{IE} = 2 \cdot \vec{IAA} \cdot \sin\left(\frac{\delta}{2}\right) \quad [10]$$

A Figura IV demonstra o Diagrama Vetorial com as tensões e corrente do Transformador Defasador:

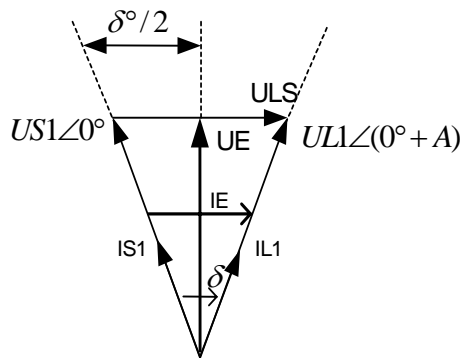


Figura IV - Diagrama Fasorial com as Tensões e Correntes do Transformador Defasador

Foi definido que para a potência passante de 400 MVA, a tensão da fonte varia de 124 kV...145 kV, ± 16 tap's o ângulo máximo/tap será de aproximadamente $\pm 1.37^\circ$ graus elétricos, totalizando $\pm 21.66^\circ$ elétricos para a regulação do fluxo de potência entre os sistemas de 500 kV e 138 kV. A Figura V demonstra o Deslocamento Angular Trifásico da Tensão entre os terminais "S" e "L" do Transformador Defasador.

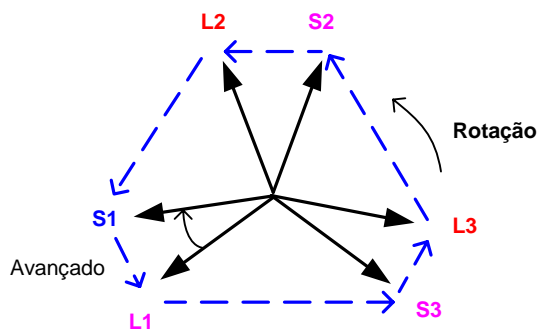


Figura V - Deslocamento Angular Trifásico da Tensão

2.1 Proteções Utilizadas

Foram implementados Terminais de Proteção para o Conjunto do Auto-Transformadores e Transformador Defasador para detectar faltas ou condições anormais e desliga-los o mais rápido possível, garantindo a estabilidade entre os sistema de 500 e 138 kV. Cada Terminal de Proteção está relacionada com a aplicação e o algoritmo específico e no caso do Transformador Defasador em condições normais aparecem correntes diferenciais nos enrolamentos de excitação "Excitation Current" e de Regulação "Regulation Current" do Transformador Defasador que se comportam como correntes diferenciais no circuito. Neste trabalho será dado um enfoque simplificado da aplicação do Transformador Defasador por razões de espaço no artigo. A aplicação da Proteção para um Auto-Transformador é uma aplicação convencional, mas para um Transformador Defasador são necessários a utilização de um Terminal de Proteção Primária Diferencial Percentual (5) (87TDP) para os enrolamentos definidos como "Source", "Load" e o enrolamento de "Excitação" e para o Terminal de Proteção Alternada Diferencial Percentual (87TDA) dos enrolamentos "Source", "Load" e "Regulação". O controle do ângulo é realizado através de um Terminal de Controle de Regulação de Potência Ativa/tap e Reativa/tap para a potência desejada entre os Sistemas de 500 kV e 138 kV.

2.1.1 Proteção Diferencial Percentual tipo 1

O esquema de proteção recomendado para o Transformador Defasador é similar ao dos Transformadores Convencionais, com exceção para a função diferencial Percentual, ver a Figura VI que demonstra a aplicação da Proteção Diferencial Principal 87TDP do Transformador Defasador para a proteção dos enrolamentos da fonte "US1", do enrolamento da carga "L" e do enrolamento de excitação "E" definidos como enrolamentos principais.

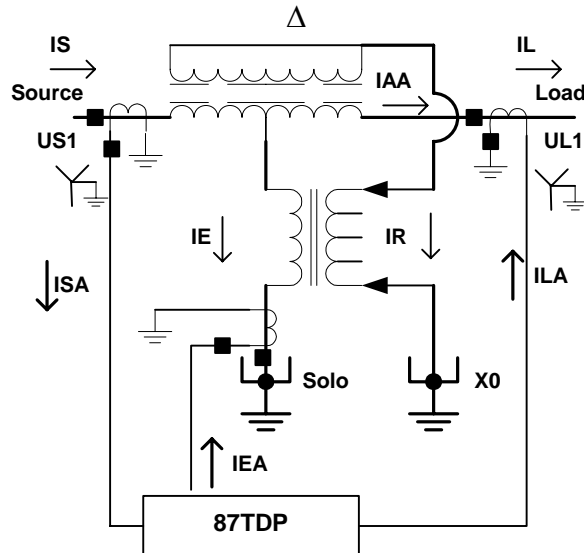


Figura VI - Proteção Diferencial Primária 87TDP do Transformador Defasador

2.1.2 Proteção Diferencial Percentual tipo 2

Na Figura VII foi aplicada a Proteção Diferencial Alternada 87TDA do Transformador Defasador para a proteção dos enrolamentos da fonte "US1", do enrolamento da carga "L" e do enrolamento de regulação "R", definidos como enrolamento secundários.

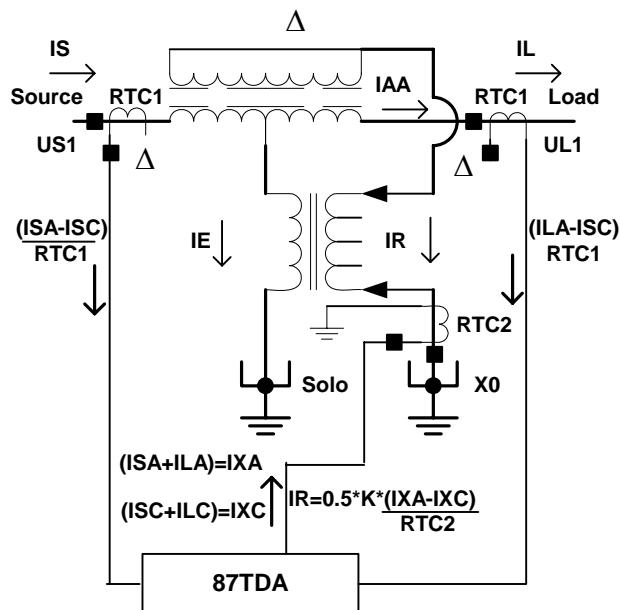


Figura VII - Proteção Diferencial Alternada 87TDA do Transformador Defasador

Adotou-se os Terminais de Proteção RET 316*4 que possuem a Curva Característica Adaptativa de Operação para a Função Diferencial Percentual:

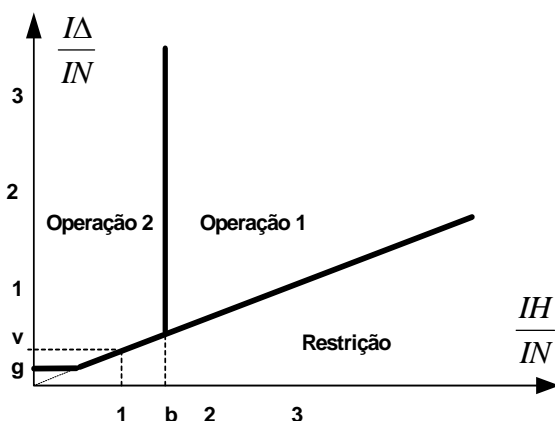


Figura VIII - Curva Característica de Operação da Função Diferencial

A Equação da Corrente Diferencial é definida por:

$$\frac{I\Delta}{IN} = \sum_{k=1}^3 \left| \frac{\vec{I}_k}{IN} \right| = \left| \frac{\vec{I}_1}{IN} + \frac{\vec{I}_2}{IN} + \frac{\vec{I}_3}{IN} \right| \quad [11]$$

Deve-se tomar o cuidado para o cálculo do “slope” da curva característica, para que a função não opere indevidamente para o ângulo máximo da Equação da Corrente de Restrição definidas pela relação “IE/IAA” no circuito do Transformador Defasador.

$$\frac{IH}{IN} = \begin{cases} \sqrt{\left(\frac{I1'}{IN}\right)\left(\frac{I2'}{IN}\right)} \cdot \cos \alpha & \text{para } \cos \alpha \geq 0 \\ 0 & \text{para } \cos \alpha < 0 \end{cases} \quad [12]$$

$$\frac{I1'}{IN} = \text{MAX} \left[\left(\frac{I1}{IN}, \frac{I2}{IN}, \frac{I3}{IN} \right) \right] \quad [13]$$

$$\frac{I2'}{IN} = \left(\frac{I1}{IN} + \frac{I2}{IN} + \frac{I3}{IN} \right) - \frac{I1'}{IN} \quad [14]$$

$$\cos \alpha = \angle \left[\left(\frac{I1'}{IN} \right), \left(\frac{-I2'}{IN} \right) \right] \quad [15]$$

O ajuste do Fator de Estabilidade “b” para Falhas Passantes é definido por:

$$\frac{IH}{IN} > b$$

[16]

2.1.3 Proteção de Distância para o Conjunto de Auto-Transformador e Transformador Defasador

Adotou-se os Terminais de Proteção de distância REL 316*4 do lado de 500 kV e 138 kV que possui a Curva Característica de Operação da Figura IX para a Supervisão e Proteção da Função de Impedância do Conjunto Auto-Transformador e Transformador Defasador e vice-versa, sendo esta proteção utilizada como “Back-up” da Proteção Diferencial Percentual com esquema de teleproteção via “TDD” Transferência de Disparo Direto” entre os terminais de proteção.

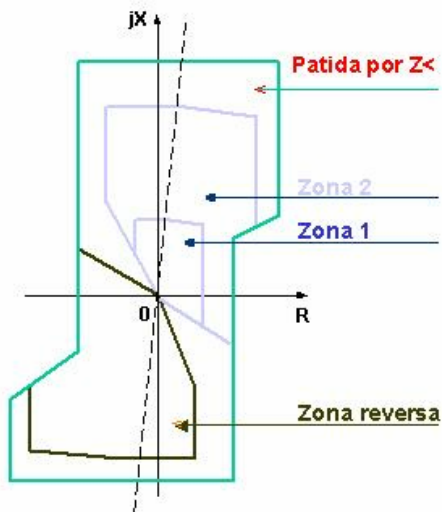


Figura IX – Curva Característica da Impedância

A Figura X demonstra o tempo tipo de disparo para a implementação do Algoritmo do Terminal de Proteção Diferencial e de Distância.

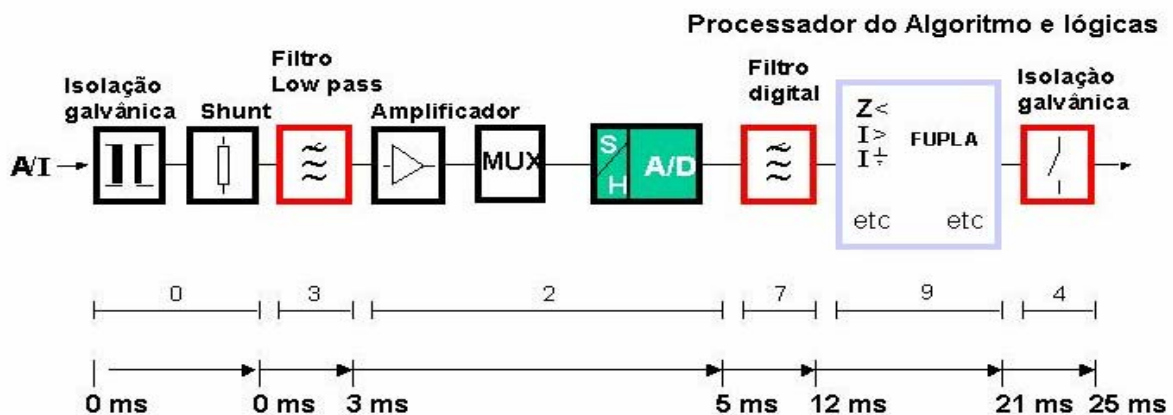


Figura X - Tempo de Processamento do Algoritmo da Função Diferencial e Distância dos Terminais de Proteção

2.1.4 Simulação das Proteções Utilizando o "RTDS"

A ABB contratou o Laboratório da Divisão de Estudos Especiais da Operação "DEEO.O" de FURNAS para a realização dos testes de desempenho do Sistema de Proteção do Conjunto Auto-Transformador e Transformador Defasador utilizando os Terminais de Proteção REL 316*4 e RET 316*4 (5) para o Sistema Angra dos Reis. Com base nos Estudos de Curto-Circuito Simétrico e Assimétrico realizados com o programa "ANAFAS", Fluxo de Potência Ótimo na Carga Leve e Pesada via programa "FLUPOT", programa "ANAREDE" para análise da rede e do programa "ATP". Foi verificado o desempenho das proteções e dos esquemas de teleproteção através da simulação em tempo real com aproximadamente 2000 disparos (curtos-circuitos) no sistema utilizando-se o Simulador Digital em Tempo Real "RTDS". Para cada configuração do sistema, houve a variação do ângulo via tap do Transformador Defasador e as contingências foram simuladas nos pontos de faltas monofásicas, bifásicas, bifásicas à terra, trifásicas com e sem resistência de falta com ângulo de incidência de 0° e 90° e falta evolutiva sobre a Configuração do Sistema Simulado.

2.1.5 Teste no Transformador Defasador em Campo

Para prever operações indevidas durante a energização devido as correntes "Inruh", foram introduzidos dois grupos de ajustes referentes a corrente mínima de operação nas proteções diferenciais percentuais (algoritmo adaptativo), o primeiro para energização em vazio do Auto-Transformador e do Transformador Defasador e o segundo para valores acima de 150 MW. A energização foi normal, variamos o tap em vazio para verificar se os valores da tensão "US1" e "UL1" se encontravam dentro dos valores calculados, após essa análise foi conectado o Transformador Defasador ao sistema de 138 kV, variando-se o tap na posição +8 para -78.3 MVA até o tap -5 com potência de -261 MVA com sentido do fluxo do lado de 500 kV para o 138 kV.

3.0 - CONCLUSÃO

Foram realizadas medições em todos os Terminais de Proteção, verificando-se as correntes diferenciais e os seus respectivos ângulos. Observamos que deve-se tomar o máximo de cuidado quando se trabalhar com a proteção "87TDA", que possui os transformadores de corrente conectados em delta em função do esquema de ligação do mesmo e da polaridade dos mesmos. A simulação no laboratório de Furnas com o "RTDS" nos ajudou a entender melhor os problemas com o Sistema de Angra dos Reis, no que refere-se as proteções no sistema.

4.0 - AGRADECIMENTOS

Agradecimentos ao Eng. Donald Menzies da ABB Power System Suécia, pela sua grande ajuda no desenvolvimento do Modelo do Transformador Defasador, e ao Eng. Kasuo Okamoto da ABB-Brasil pela grande ajuda e apoio a minha pessoa durante as simulações e ao Sérgio do Espírito Santo, Victor A.B. Franca, Carla H.B.P. Damiano, Hélio Hayashi, G. Sarcinele do Simulador de FURNAS, pelo excelente suporte durante os testes das simulações.

5.0 - BIBLIOGRÁFICA

- (1) A. Kramer and J. Ruff "Transformer for Phase Angle Regulation Considering the Selection of On-Load Tap-Changer", *IEEE Transaction on Power Delivery*, Vol. 13, No. 2, April 1998, pp. 518-525,
- (2) K.C. Lee and K.P. Poon "Statistical Switching Overvoltage Analysis of the First B.C. Hydro Phase Shifting Transformer Using the Electromagnetic Transient Program" *IEEE Transaction on Power System*, Vol. 5, No. 4, November 1990, pp. 1054-106,
- (3) P. A. Teixeira, Steven R., Brammer, W. Rutz, W. C. Merrit and J. L. Salmonsén "State Estimation of Voltage and Phase-Shift Transformer Tap Setting", *IEEE Transaction on Power Systems*, Vol. 7, No. 3, August 1992, pp. 1386..1393,
- (4) W. A. Elmore "Protective Relaying – Theory and Applications" ABB Power T&D Company Inc., Marcel Dekker, Inc./New York Basel Hong Kong, 1994, pp.178-184,
- (5) User's Guide, REL 316*4 and RET 316*4, Numerical Line Protection, 1MRB 520 050-UEN, Version V4.0/4.2, ABB Network Partner Ltd, Baden/Switzerland, 1 st Edition, March 1996.