



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

GPC - 09
16 a 21 Outubro de 2005
Curitiba - Paraná

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

**A EXPERIÊNCIA DA ELETRONORTE NA SIMULAÇÃO EM TEMPO REAL
DOS SISTEMAS DE PROTEÇÃO DA REDE BÁSICA**

**JOSÉ GALIB TANNURI * ROBERTA AZEVEDO M. DE MENDONÇA PAULO CESAR G. CAMPOS
CARLOS ANTONIO FARIA FLORIANO JOAQUIM NETO DE REZENDE JUNIOR
ISMAEL TELLES PIRES VALDETARO**

ELETRONORTE

RESUMO

Devido ao aumento da complexidade dos sistemas elétricos de potência, à evolução tecnológica dos equipamentos dedicados e à exigência cada vez maior de sistemas seguros e confiáveis, observa-se uma crescente necessidade de simular em tempo real os sistemas de proteção, a fim de aprimorar o desempenho destes sistemas quanto à velocidade, à sensibilidade e à segurança em suas atuações.

Sendo assim, este trabalho apresenta a experiência da ELETRONORTE no processo de simulação de dispositivos de proteção, descrevendo a fase de preparação para os ensaios, a determinação dos casos a serem simulados, fatores que podem influenciar na operação do sistema de proteção e resultados obtidos em simulações realizadas no sistema da Eletronorte em particular

PALAVRAS-CHAVE

Proteção, Simulação em Tempo Real, RTDS™, Relé Numérico, Equivalentes.

1.0 - INTRODUÇÃO

Este trabalho descreve algumas experiências da ELETRONORTE mediante a aplicação de ensaios de simulação nos seus sistemas de proteção. Normalmente, estes ensaios são para verificação da aplicação e, portanto dão maior ênfase ao desempenho do esquema de proteção.

Optou-se por estes ensaios porque seria extremamente difícil avaliar este desempenho por meio de estudos analíticos, tendo em vista a complexidade dos relés numéricos e da configuração do sistema.

Os ensaios são feitos por meio de simulações do esquema completo de proteção em tempo real.

Outro ponto importante apresentado neste trabalho é o processo de preparação dos casos a serem simulados.

2.0 - ASPECTOS GERAIS DAS SIMULAÇÕES REALIZADAS

A ELN realizou o primeiro ensaio de simulação em um sistema de proteção, quando do fornecimento de equipamentos da fase inicial de implantação do seu sistema, em 1978. Naquela ocasião tomou-se a decisão de realizar ensaios de aceitação do esquema de proteção devido à mudança de tecnologia eletromagnético para estáticos e à falta de tradição na fabricação de relés pelo fornecedor. Assim sendo, o sistema de proteção só seria aceito se fosse aprovado nos ensaios de simulação. Os ensaios foram realizados no TNA da EDF (Eletricité de France). Logo na primeira semana de ensaios, eles foram suspensos, para modificação dos filtros dos relés que estavam operando incorretamente. No prosseguimento destes ensaios, foram modificadas as funções direcionais e se redefiniu com segurança os ajustes do relé. Este sistema de proteção foi instalado e operou até

*SCN- Quadra 06, Conjunto A Bloco B sala 1212 CEP 70718-900 – Brasília-DF- BRASIL
Tel.: (061) 421-5125 - Fax: (061) 328-6036 - e-mail: tannuri@eln.gov.br

recentemente com bom desempenho, quando foi substituído por relés numéricos, por causa da perda de confiabilidade decorrente de problemas de manutenção (relés obsoletos, sem peças de reposição, etc). Com base nesta experiência a ELN decidiu colocar nas especificações da modernização de suas subestações, dois tipos de ensaios para o sistema de proteção: certificação do funcionamento integrado e do esquema completo da proteção.

2.1 Ensaio para o Certificado do Funcionamento Integrado

Estes ensaios são realizados na fábrica, e têm como objetivo a verificação de todas as funções que serão ativadas no campo. Pode-se dizer que se tratam de ensaios do tipo funcional. Esses ensaios não serão detalhados, porque não fazem parte do escopo deste trabalho.

2.2 Ensaio do Esquema Completo da Proteção

O objetivo destes ensaios é verificar o desempenho dos equipamentos sob várias condições operativas do sistema.

Com a execução destes ensaios, além de determinar o desempenho da proteção para uma dada característica da rede, tais como: topologia, impedância da fonte, compensação série, carregamento e comprimento das linhas, os resultados podem ser usados para definir as diretrizes e instruções para parametrização da proteção.

Devido ao grande número de combinações onde todas funções podem trabalhar em conjunto e a complexidade da rede, torna-se imprescindível a realização deste teste em tempo real. Na maioria das vezes os ensaios foram feitos pela ELN com a utilização do RTDS™. Detalhes sobre os recursos do simulador RTDS™ encontram-se na referência (1).

É importante salientar ainda que na simulação em tempo real há possibilidade de representar o esquema completo de proteção e verifica-se:

- A influência do esquema de teleproteção na eliminação do defeito;
- O comportamento da proteção durante todos os tipos de transitórios que podem ocorrer no sistema;
- A necessidade de modificar os ajustes iniciais, definidos nos estudos analíticos dos relés devido à problemas encontrados durante a simulação;
- Um grande aprendizado dos participantes durante a simulação sobre características e o comportamento do sistema a ser protegido.

Na simulação no RTDS™ não se consegue representar todo o sistema de potência, portanto, haverá necessidade de representar partes desse sistema por meio de equivalentes que permitam a sua representação da melhor maneira possível. Sendo assim, é de extrema importância a determinação destes equivalentes.

3.0 - ELABORAÇÃO DOS EQUIVALENTES DO SISTEMA

Na elaboração dos equivalentes é essencial representar o maior número possível de componentes do sistema de potência. Procedendo desta forma, deve-se garantir que todos os fatores do sistema que afetam o desempenho da proteção estejam representados.

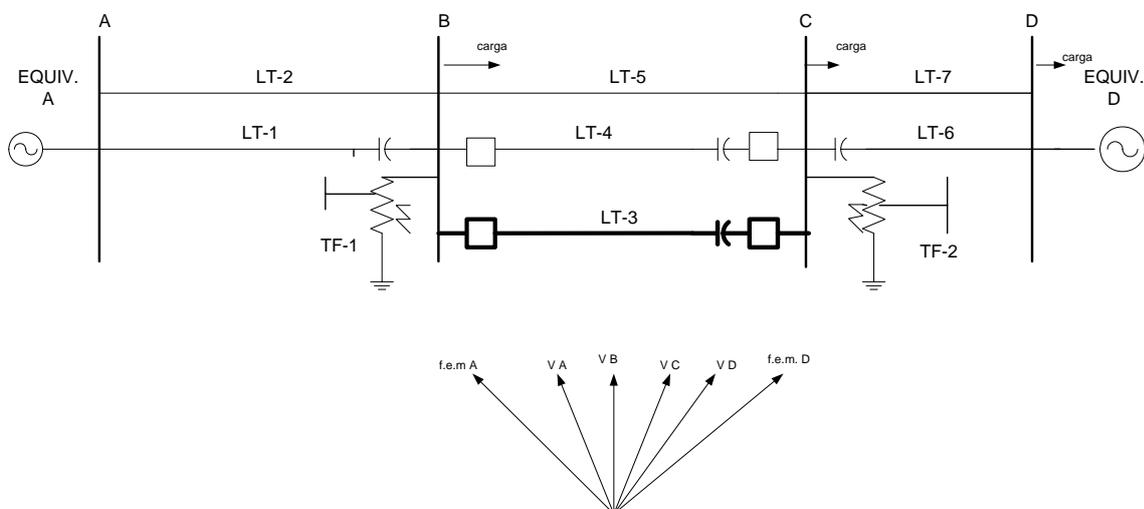


FIGURA 1 Configuração mínima ideal do sistema para simulação

Na figura 1 está representada uma configuração mínima ideal para a simulação em tempo real no RTDS™, da proteção da LT 3. Os equivalentes A e D devem ser as impedâncias de Thevenin de seqüência positiva e zero correspondentes a condição de curto máxima, ou a condição de curto mínima. A representação das linhas é feita de diferentes maneiras. Entre as barras A e B, por exemplo, existem n circuitos em paralelo, onde LT 2 é uma linha equivalente a (n-1) circuitos em paralelo, e a LT 1 é uma linha física que completa os n circuitos. No trecho B e C estão representadas a linha que será testada a proteção LT 3, uma linha paralela LT 4 e (n-2) circuitos em paralelo LT 5. Já entre as barras C e D a linha LT 6 é uma linha física e a LT 7 é uma linha equivalente a (n-1) circuitos em paralelo.

Procedendo desta forma, pode-se durante a simulação aplicar defeitos na linha protegida, nas linhas adjacentes e na linha em paralelo a linha que está testando a proteção.

Outro ponto importante a se destacar é a influência na direcionalidade do relé da corrente de carga que passa na linha antes do defeito. Portanto, precisa-se representar no RTDS™ um fluxo de potência que mostre a condição mais desfavorável para o relé, que é o fluxo que acarreta maior ângulo entre a f.e.m. A e VB. Isto ocorre para maior carregamento possível das linhas. Para um sistema eminentemente hidráulico o carregamento máximo depende também das condições hidrológicas. Sugere-se, entretanto, carregar as linhas com sua potência característica.

4.0 - ALGUNS IMPACTOS NA PROTEÇÃO DE DISTÂNCIA

Alguns fatores provocam efeitos que afetam a operação dos relés de distância, podendo provocar operações indevidas dos mesmos. Estes fatores são:

- Grande carregamento das linhas de transmissão;
- Linhas de transmissão longas, terminando com grandes bancos de transformadores;
- Linhas de transmissão em paralelo na mesma faixa de servidão;
- Compensação série nas linhas de transmissão.

O carregamento das linhas aumenta o ângulo entre a tensão da barra onde está localizado o relé e a f.e.m da fonte que está atrás deste relé. Se este ângulo for acima de 50° e se a unidade direcional utilizar polarização for tensão de memória, existe o risco de operação indevida desta unidade.

Uma linha longa terminando com grandes bancos de transformadores pode amplificar em dezenas de vezes a resistência de defeito por causa da corrente de infeed na resistência, por exemplo, um curto fase-terra próximo a SE Tucuruí amplifica a resistência defeito vista V. Conde em 86 vezes.

Linhas paralelas na mesma faixa de servidão possuem acoplamento mútuo de seqüência zero que podem provocar sobrealcance ou subalcance dependendo das condições do curto fase-terra. As condições para sobrealcance e para subalcance estão mostradas nas figuras 2 e 3 respectivamente.

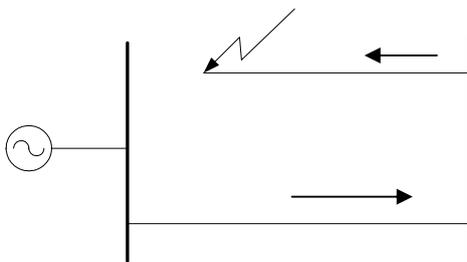


FIGURA 2 sobrealcance

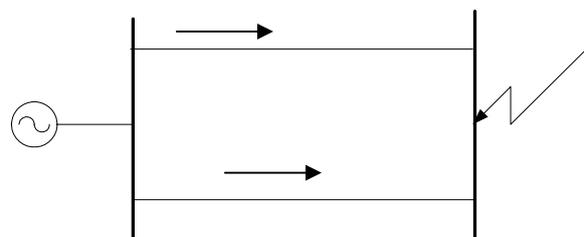


FIGURA 3 subalcance

A compensação série quando utilizada em linhas de transmissão, causa fenômenos que podem acarretar na operação indevida da proteção, se as características e a parametrização do relé não forem adequados. Entre estes fenômenos podem-se citar as inversões de tensão e de corrente, transitórios rápidos e lentos e oscilação subsíncrona.

A inversão de tensão ocorre para curtos próximos ao capacitor série, e para evitar a má operação do relé usa-se tensão de memória.

Com o emprego do MOV para proteger o banco de capacitores tornou-se rara a ocorrência do fenômeno de inversão de corrente, porque nas situações em que essa inversão ocorreria, se garante sempre o "by-pass" do banco. É bom lembrar que quando MOV conduz haverá um deslocamento de fase da corrente e da tensão de defeito, decrescendo de 90° para cerca de 10 a 20° .

A proteção das linhas compensadas com capacitor série fica sujeita a transitórios de alta e de baixa freqüência, ocasionados pela variação instantânea da energia armazenada nos capacitores e nos indutores do sistema quando ocorre um defeito. No sistema ELN a alta freqüência tem variado de 200-400Hz.

A oscilação subsíncrona ocorre quando o capacitor série interage com o sistema. Esta oscilação pode ser provocada por um pico de tensão ou de corrente. Normalmente a freqüência desta oscilação é da ordem de 15 a

90% da frequência do sistema. Por estarem próximas à frequência nominal do relé essas frequências são de difícil filtragem e provocam uma trajetória da impedância aparente medida segundo uma espiral logarítmica em torno da impedância da linha, como mostra a figura 4.

Estes fatos enfatizam a extrema necessidade de realizar a simulação em tempo real principalmente quando a linha é compensada com capacitor série.

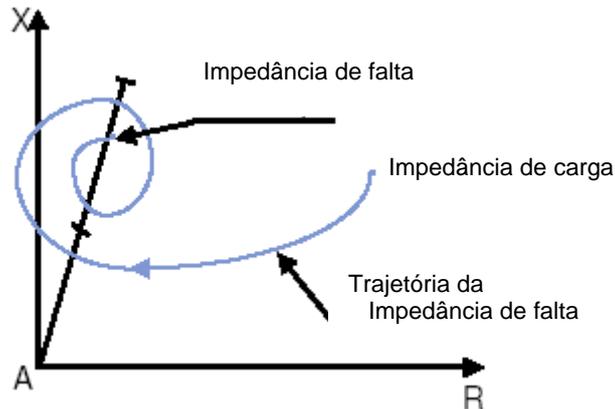


FIGURA 4 Trajetória da impedância vista devida oscilação subsíncrona, para um defeito remoto na linha adjacente.

5.0 - O ESCOPO DAS SIMULAÇÕES

Geralmente a ELN realiza a simulação para dois cenários: o atual e para um determinado horizonte. Em ambos os cenários se consideram duas condições de carga, o carregamento máximo e o mínimo. Cada tipo de falta é simulado com ângulo de inserção de 0 e 90°. A seleção do número de faltas, suas posições e tipos de faltas a serem simulados, depende do conflito entre a demanda técnica e o custo.

Nas simulações realizadas pela ELN os seguintes tipos de defeitos para cada posição são executados: L1-G, L1-L2, L2-L3-G, L1-L2-L3, com e sem resistência de defeito

6.0 - RESULTADOS DE ENSAIOS REALIZADOS

Foram selecionados alguns ensaios realizados cujos problemas e soluções estão apresentadas a seguir.

6.1 Sistema Acre Rondônia 230 kV

Este sistema possui nas suas extremidades fontes com potência de curto-circuito bem diferentes, em Porto Velho 6972 MVA e Rio Branco 512 MVA. A distância entre estas fontes é de 500 Km, interligadas por uma linha de 230kV, conforme a figura 5.

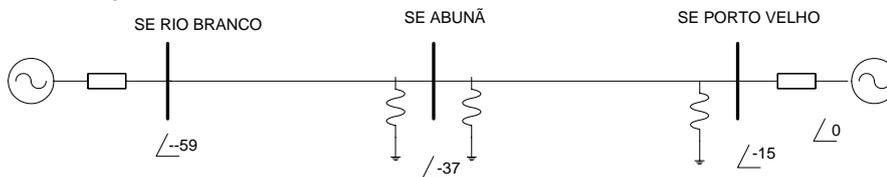


FIGURA 5 Sistema de Interligação Acre-Rondonia 230kV.

Durante os ensaios constatou-se vários problemas na proteção, tais como, direcionalidade, ajuste e seleção de fase..

Enquanto que a tensão de referência no relé que foi testado, for maior que um determinado parâmetro, o ângulo de fase da impedância é determinado entre a corrente e a tensão de defeito. No caso contrário, quando a tensão de referência for menor, o ângulo da impedância no "loop" fase-terra é determinado pela corrente de defeito e a tensão das fases sãs. Já para o "loop" fase-fase, a tensão de referência inclui uma parcela da tensão de memória. Para um curto fase-fase atrás e com a atuação da tensão de memória o relé opera indevidamente por causa da perda de direcionalidade. A solução dada pelo fabricante foi adaptativa, se o ângulo de fase é determinado entre a

corrente e a tensão de defeito a condição de direcionalidade é uma, se a tensão de memória participa da tensão de referência a condição de direcionalidade é outra. Procedendo desta forma o relé passou operar corretamente. Os relés apresentaram dificuldade na seleção correta das fases para o religamento monopolar, contornou-se o problema alterando ajustes e criando lógicas internas com o objetivo da identificação correta das mesmas. Em face ao elevado infeed nas resistências de defeito que provocam abertura seqüencial da linha, para atender ao tempo de eliminação do defeito foi imprescindível a utilização da transferências direta de disparo.

6.2 Sistema Norte Nordeste

Nos ensaios de simulação para verificação do desempenho das proteções dos Circuitos 1 e 2 de 500kV entre as Subestações Tucuruí e Marabá e Circuito 1 entre as Subestações Tucuruí e Vila do Conde, foram detectados problemas nos quais houve necessidade de alteração de ajustes e de lógicas. A figura 6 mostra o sistema Norte Nordeste simulado.

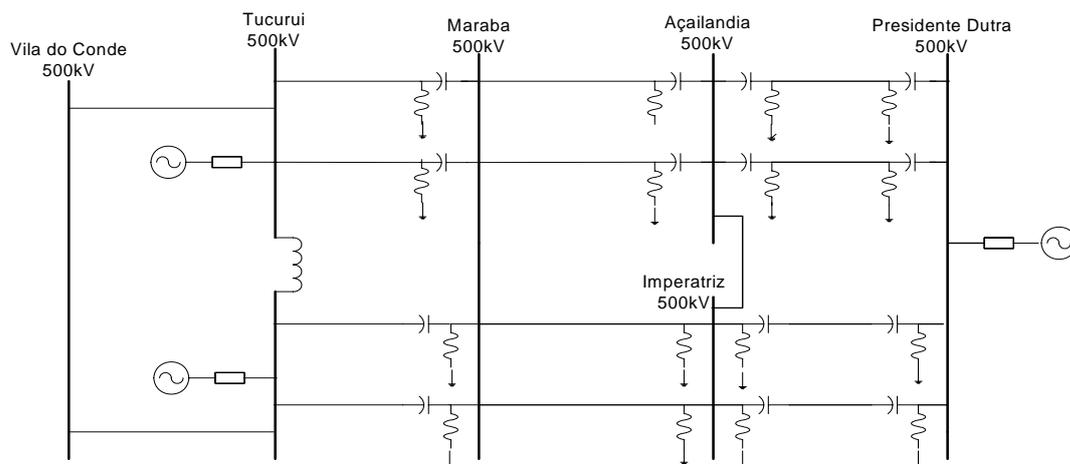


FIGURA 6 Sistema Norte Nordeste

Para os casos envolvendo linhas com compensação série, foi necessário reduzir ou bloquear a primeira zona, visto que a mesma sobrealcançava as linhas paralelas e adjacentes. Nas linhas adjacentes este sobrealcance é devido à oscilação subsíncrona. Nos casos que envolveram linhas paralelas com abertura seqüencial, foi necessária a implementação de novas lógicas e ajustes para obter-se a correta atuação das proteções.

Observou-se também nestes ensaios problemas relativos à função direcional para algumas faltas reversas externas onde se fez necessária a utilização da tensão de memória. Para este caso, como o relé permitia, o problema foi corrigido por meio de ajuste.

6.3 Sistema Tramo Oeste do Pará

Este sistema possui nas suas extremidades fontes com características distintas, ou seja, do lado da UHE Tucuruí uma fonte com potência de curto-circuito, na época da simulação, de aproximadamente 18000 MVA, enquanto que o lado da UHE Curuá-Una a potência de fonte era de 200MVA. Essas fontes estão interligadas por aproximadamente 650Km de Linhas de Transmissão em 230kV, conforme figura 7.

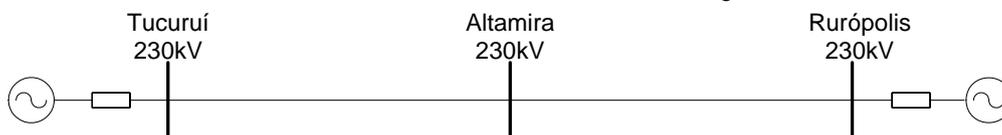


FIGURA 7 Sistema do Tramo Oeste do Pará

Durante as simulações foram aplicados diversos tipos de falta em vários pontos do sistema, monitorando-se o desempenho das proteções das linhas Tucuruí-Altamira e Altamira-Rurópolis.

Constatou-se nas simulações a atuação da primeira zona instantânea do terminal da SE Rurópolis para uma falta bifásica na barra de 230kV da SE Tucuruí. O ajuste, desta primeira zona correspondia a um alcance de 130Km a partir da SE Rurópolis e esta unidade estava operando para uma falta localizada a aproximadamente 650Km.

Verificou-se que os sinais de tensão e corrente medidos pelo relé eram fortemente distorcidos por um ruído de baixa freqüência. Este ruído era provocado pelo "line charging". A sua filtragem é bastante difícil porque possui uma freqüência muito próxima da nominal.

Esta situação fazia com que a impedância aparente vista pelo relé se movesse freneticamente no plano de impedância até se estabilizar no valor correspondente ao da falta. Ao mesmo tempo a característica dinâmica do tipo mho do relé sofria uma expansão muito grande porque a fonte equivalente do sistema atrás era muito fraca.

Antes da estabilização da impedância aparente vista pelo relé, ela se situava por alguns instantes no terceiro e quarto quadrantes. Devido a grande expansão da característica mho da primeira zona do relé esta unidade operava momentaneamente por cerca de 2 milissegundos. Uma vez operada ela era selada por corrente e permanecia operada enquanto esta corrente estivesse acima do valor ajustado nos sensores de corrente de supervisão da proteção.

Como solução foi adotada para a primeira zona destas proteções uma temporização de 6 milissegundos. Esta temporização não compromete o desempenho da proteção e evita a operação durante o transitório inicial da falta.

6.4 Função Direcional por Seqüência Negativa

Por considerar que a função da direcionalidade executada pela tensão de memória sofre influência da corrente de carga, tem fabricante de relé projetando a direcionalidade com seqüência negativa.

Durante os ensaios de simulação da proteção do segundo circuito da linha de transmissão Tucuruí-Vila do Conde 500kV, verificou-se que, para os ajustes inicialmente implantados, algumas faltas reversas estavam sendo declaradas como faltas à frente pela unidade direcional de seqüência negativa.

Após diversas simulações para pesquisa da causa da atuação incorreta das unidades direcionais de seqüência negativa chegou-se à conclusão de que ela estava ocorrendo devido ao "line charging". Quando não se considera o "line charging" o ângulo entre a tensão e a corrente de seqüência negativa medida por um relé, durante uma falta desequilibrada, deve ser próximo de noventa graus, pois somente é influenciado pelas impedâncias de seqüência negativa da linha e dos equivalentes do sistema, cujas características são altamente indutivas.

Notou-se, no entanto, que para determinadas faltas reversas externas o ângulo dos fasores de tensão e de corrente de seqüência negativa se aproximava de zero e as unidades direcionais correspondentes identificavam a falta como sendo interna à linha protegida.

Modificando-se os parâmetros da linha utilizados no simulador com o intuito de reduzir artificialmente o "line charging", verificou-se que o ângulo entre os fasores aumentava e o relé passava a operar corretamente, evidenciando assim o efeito das corrente capacitivas da linha na direcionalidade do relé.

Para a solução do problema foi alterado no relé em questão o ajuste do ângulo da linha, porque o cálculo da impedância de seqüência negativa aparente relé dependia diretamente desse ajuste.

Após esta mudança vários casos foram simulados e o desempenho do relé se mostrou satisfatório para todos os casos simulados.

7.0 - CONCLUSÕES

Os problemas e as soluções apresentadas em cada simulação realizada no sistema de proteção enfatizam a importância de executar sempre ensaios em tempo real.

O próximo desafio para ELN é incluir no escopo destes ensaios à simulação dinâmica do sistema de potência.

Com a execução destes ensaios, adquire-se uma compreensão clara da operação da proteção no sistema que está sendo protegido.

8.0 - BIBLIOGRAFIA S

- (1) Almeida, H.H., Santo, E.S., Lima, C.R., Oliveira, B.D., Luz, S.G., Macedo, P.J.N., Zani, R.C., Oliveira, W., Ushikubo, M." Utilização de Simulador Digital em Tempo Real na Execução de Testes do Sistema de Proteção das Linhas de Transmissão de Salto Caxias – Salto Santiago 525 kV e Salto Caxias – Cascavel 525kV" XV SNPTEE, Foz do Iguaçu, 1999.
- (2) Roberts, J., Guzman, A. "Directional Element Design And Evaluation" Schweitzer Engineering Laboratories, Pullman USA
- (3) Ziegler, G., "Numerical Distance Protection: Principles and Application" Publicis – MCD – Verl., 1999