



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

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

GRUPO -GPC

GRUPO DE ESTUDO GRUPO DE ESTUDO PROTEÇÃO E CONTROLE - GPC

ENSAIO EM RTDS: A EXPERIÊNCIA DA CEEE-GT

**André Darós Filomena (*)
CEEE-GT, UFRGS**

RESUMO

Este artigo descreve a experiência da Companhia Estadual de Geração e Transmissão de Energia Elétrica (CEEE-GT) em simulação digital em tempo real para a análise de sistemas de proteção. A necessidade de validação dos estudos teóricos de proteção, bem como a avaliação do desempenho dos sistemas de proteção quando submetidos às condições reais de falta, tem historicamente demandado a utilização de ferramentas de ensaios em laboratório. Dentre estas, a simulação digital em tempo real, ou *Real Time Digital Simulation* (RTDS), surge como o estado-da-arte para a simulação e validação dos esquemas de proteção de sistemas elétricos de potência, permitindo a representação em laboratório das condições reais do sistema elétrico no domínio tempo com elevado grau de fidelidade. O presente artigo tem como objetivo detalhar as etapas de definição e modelagem do ensaio, o processo de simulação e por fim, a análise dos resultados. Para tanto, é utilizado como estudo de caso os ensaios em RTDS realizados pela CEEE-GT para a proteção diferencial de barras de uma subestação de 230 kV da Rede Básica.

PALAVRAS-CHAVE

Ensaio em RTDS, Proteção de sistemas elétricos, Análise do desempenho de proteção, Simulação em tempo-real, Proteção diferencial de barras.

1.0 - INTRODUÇÃO

O crescente avanço tecnológico da proteção digital de sistemas elétricos de potência tem contribuído para o aumento da complexidade das funções de proteção implementadas em IEDs (*Intelligent Electronic Devices*). Por consequência dos recentes avanços na área de processamento digital de sinais, novos algoritmos têm sido desenvolvidos e implementados em IEDs para a execução das funções básicas de proteção (1).

Não obstante, o contínuo investimento na Rede Básica do Sistema Elétrico Brasileiro tem resultado no aumento da complexidade sistêmica, em prol da segurança e confiabilidade operativa. A implantação de novas subestações, bem como elementos de transformação, compensação reativa e linhas de transmissão têm possibilitado a expansão e o aumento da robustez da malha de transmissão. No entanto, e por consequência do novo modelo do setor, a expansão da Rede Básica tem resultado no aumento de agentes transmissores. Por ocasião do atual marco regulatório, frequentemente os novos *players* do setor elétrico devem compartilhar subestações já existentes com os atuais agentes. Assim, o compartilhamento de subestações por diferentes agentes tem se tornado uma necessidade usual no atual cenário. Nesta condição, um número indefinido de agentes podem ser conectados ao Sistema Interligado Nacional através de uma única subestação.

Para este cenário, o desempenho dos esquemas de proteção passa a interferir também aos agentes que compartilham uma subestação, ou ainda, cujas instalações são eletricamente adjacentes. Considerando, as penalizações previstas por meio da Parcela Variável, bem como da segurança e confiabilidade operativa do sistema de transmissão, é de interesse dos agentes transmissores e do Operador Nacional do Sistema (ONS), a

maximização do desempenho dos sistemas de proteção: com taxas mínimas de atuações indevidas e recusas de atuação, além do atendimento aos critérios de seletividade, velocidade, confiabilidade e segurança (2).

Neste caso, torna-se fundamental a realização de testes para avaliação do desempenho dos sistemas de proteção. De modo a validar os estudos de seletividade e coordenação, bem como avaliar o desempenho destes esquemas, diferentes ferramentas vêm sendo utilizadas para a simulação em laboratório, tendo como objetivo a representação fidedigna de perturbações. Dentre estas, é possível destacar como ferramentas clássicas: a simulação com base em estudos de curto-circuito e a utilização de dados reais de falta, ou de registros gerados por simuladores de transitórios eletromagnéticos do tipo EMTP. Estas abordagens utilizam a injeção dos sinais de tensão e corrente de falta diretamente aos dispositivos de proteção, através de malas, ou caixas, de testes.

No entanto, estas abordagens têm se revelado insuficientes para a validação dos esquemas de proteção de sistemas elétricos complexos bem como a simulação de um elevado número de condições de faltas. Embora seja a metodologia usual do setor elétrico, a simulação estática com base em relatórios de curto-circuito impede que o comportamento dinâmico do sistema de potência possa ser representado no teste. Ademais, as metodologias tradicionais são limitadas pela quantidade de entradas e saídas dos sinais de tensão e corrente, dificultando a realização de testes simultâneos em mais de um elemento de proteção, ou ainda, de testes que exijam um elevado número de sinais, como, por exemplo, os ensaios em proteção diferencial de barras.

Assim, a utilização de simulação digital em tempo real, ou *Real Time Digital Simulation* (RTDS), surge como o estado-da-arte para a simulação e validação dos esquemas de proteção de sistemas elétricos de potência. O ensaio em RTDS consiste na simulação em tempo real do sistema de potência – ou de seu equivalente – através da aplicação dos sinais de tensão e corrente a um ou mais IEDs, contemplando as condições típicas de operação e conjuntos de faltas pré-estabelecidas. Para tanto, é utilizado um programa computacional para simulação de transitórios eletromagnéticos e de amplificadores para injeção em tempo-real aos dispositivos de proteção os sinais de tensão e corrente simulados. Assim, torna-se possível a simulação automática do sistema, com diferentes condições operativas, ou conjuntos de testes, em pequenos intervalos de tempo.

De modo a apresentar e discutir os ensaios em RTDS, este artigo descreve a experiência adquirida pela Companhia Estadual de Geração e Transmissão de Energia Elétrica (CEEE-GT). O trabalho tem por objetivo a apresentação das diferentes etapas necessárias à execução dos ensaios: desenvolvimento e validação dos modelos equivalentes; determinação das informações necessárias para a realização dos testes; definição, acompanhamento e discussão dos ensaios. De forma a ilustrar o processo de definição do ensaio e simulação em RTDS, é apresentado como estudo de caso os resultados obtidos pela CEEE-GT nos ensaios da proteção diferencial de barras (87B) Siemens 7SS522 aplicada em uma subestação de 230 kV. O estudo de caso contempla a simulação de 44 condições de falta, resultando em um total de 280 testes realizados.

Este artigo está dividido da seguinte forma: a Seção 2 apresenta as etapas pertinentes à preparação para o ensaio em RTDS. A Seção 3 descreve o processo de definição do modelo equivalente. Os dados disponibilizados pela CEEE-GT para a realização do ensaio são apresentados na Seção 4. O estudo de caso é apresentado na Seção 5. As seções 6 e 7 apresentam, respectivamente, os resultados obtidos e as conclusões deste trabalho.

2.0 - PREPARAÇÃO PARA O ENSAIO EM RTDS

O ensaio em RTDS tem por objetivo a simulação das condições reais e/ou típicas de operação durante perturbações, representando com fidelidade o comportamento dinâmico e em regime permanente do sistema de potência. Para tanto, é utilizada a simulação computacional de transitórios eletromagnéticos em tempo-real e em malha fechada dos equivalentes da rede simulados no domínio tempo. Com base na simulação do sistema elétrico, as variáveis de interesse calculadas pelo programa de transitórios eletromagnéticos – sinais de tensão e corrente dos módulos em análise – são injetados em tempo-real aos dispositivos de proteção através de amplificadores. Desta forma, a simulação em RTDS propicia a análise da resposta em tempo-real do sistema de proteção.

Em função da complexidade de sistemas de potência, usualmente representados por matrizes esparsas com milhares de elementos, a simulação de transitórios eletromagnéticos destes sistemas sem reduções ou aproximações exige custos computacionais de ordem elevada. Visando a minimização deste custo, são utilizados modelos equivalentes. O processo de ensaios em RTDS exige, portanto, a definição de sistemas equivalentes reduzidos – cujas seis etapas utilizadas pela CEEE-GT são resumidas abaixo – que reproduzam com fidelidade o comportamento dinâmico e em regime permanente do sistema real.

Etapa 1 – Definição dos limites da rede elétrica de interesse. São definidas as áreas, ou subestações e interligações entre subestações que devem ser preservadas e representadas no ensaio em RTDS. Esta etapa deve considerar os objetivos e esquemas de proteções que serão ensaiados para definição da área de interesse.

Etapa 2 – Desenvolvimento do sistema equivalente. Com base na definição dos limites da rede elétrica de interesse, é desenvolvido um modelo reduzido do sistema elétrico, preservando a representação completa apenas do sistema a ser analisado. Assim, os demais elementos do sistema elétrico que não fazem parte da rede de interesse são suprimidos do modelo e substituídos por equivalentes de Thévenin.

Etapa 3 – Validação do sistema equivalente. De forma a validar o modelo reduzido desenvolvido, o mesmo é modelado em *softwares* de transitórios eletromagnéticos, como por exemplo ATP/EMTP (3). São executados ensaios de curto-circuito nas regiões de interesse, cujos resultados são comparados aos estudos de curto-circuito produzidos por ferramentas específicas, tais como Aspen Oneliner (4) ou ANAFAS (5) através da utilização os relatórios e casos de curto-circuito do Operador Nacional do Sistema que reproduzem a rede analisada.

Etapa 4 – Definição das condições de operação do sistema. Nesta etapa, são definidas as condições de operação do sistema a ser simulado, observando as condições de carga (leve, média ou pesada), unidades geradoras em operação, ou ainda, a operação em contingência. As condições de operação do sistema a ser simulado devem ser definidas conforme o sistema de proteção a ser ensaiado, observando a relevância de cada um dos aspectos no desempenho do esquema de proteção em análise. O desempenho da proteção diferencial de barras, *a priori*, não deve apresentar variações quando submetida a condições de carga distintas.

Etapa 5 – Definição dos pontos de falta. Com base no modelo reduzido são definidos os pontos em que as faltas serão aplicadas. As localizações e quantidade destes pontos devem ser definidas conforme o sistema de proteção em análise. Os ensaios de proteções de linhas de transmissão, por exemplo, devem prever um número superior de pontos e localizações de faltas que aqueles utilizados para ensaios de proteção diferencial de barras.

Etapa 6 – Definição do conjunto básico de ensaios. Para os pontos de falta definidos na Etapa 5, é elaborado o conjunto completo de ensaios, contemplando para cada pontos as informações básicas de tipo de falta, fases, resistência, ângulo de incidência e tempo da falta, bem como as condições de operação definidas pela Etapa 4. O conjunto de ensaios pode ter agregado, ainda, faltas evolutivas em tipo e em localização. Ainda, informações relativas aos esquemas de religamento automático (monopolar ou tripolar, com ou sem sucesso), como condições da perturbação (variação de frequência, oscilação de potência, etc.) podem complementar o ensaio.

3.0 - DETERMINAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO EQUIVALENTE

A execução dos ensaios em RTDS consistiu na modelagem do sistema de potência através de um equivalente reduzido do Sistema Elétrico Brasileiro, o qual representa sem aproximações a área de interesse e substitui os demais elementos por equivalentes de rede. Para o ensaio desenvolvido pela CEEE-GT, estes equivalentes foram calculados através da ferramenta Boundary Equivalent disponível no *software* de curto-circuito e coordenação de relés Aspen Onliner (4), tendo como base o caso de curto-circuito, ano-base 2011, do ONS. Esta ferramenta visa a redução de sistemas de grande porte para sistemas equivalentes com um número de barras limitado àquelas definidas pelo usuário. A ferramenta disponibiliza três opções para a determinação da rede equivalente: redução da rede elétrica para um número limitado de barras; exclusão de uma área do sistema e redução das demais barras; redução de uma região do sistema para as barras limítrofes, permanecendo o restante do sistema inalterado.

Para o sistema equivalente utilizado no ensaio em RTDS descrito neste artigo foi utilizada a opção “redução da rede para um número limitado de barras”. O processo de determinação do modelo reduzido é realizado automaticamente pela ferramenta Boundary Equivalent através da determinação de equivalentes de Thévenin multi-portas a partir da definição das barras de interesse. Deste modo, a rede que se deseja analisar é preservada e os demais elementos adjacentes são substituídos por equivalentes de Thévenin, do tipo fonte de tensão em série com impedância. Adicionalmente, a ferramenta pode gerar elementos artificiais para a representação de interligações sistêmicas eliminadas pelo processo de redução do sistema.

Diante da necessidade de validação do modelo equivalente produzido pelo Aspen Boundary Equivalent, este foi modelado no *software* de simulação de transitórios ATP/EMTP (4). As simulações no ATP/EMTP de faltas nas barras representadas foram comparadas com resultados calculados pelo Aspen Onliner, considerando dois casos de curto-circuito: o caso básico do ONS, o qual reproduz toda a Rede Básica e o equivalente gerado pelo Aspen Boundary Equivalent. Um algoritmo baseado no trabalho de (6) para extração das componentes fundamentais e remoção da componente DC dos sinais de tensão e corrente geradas pelo ATP/EMTP foi implementado, de forma a possibilitar o comparativo entre as respostas produzidas pelos três casos analisados. Com base nos resultados obtidos, cujos erros foram inferiores a 10%, o sistema equivalente foi considerado como validado.

4.0 - DADOS DE ENTRADA PARA A SIMULAÇÃO EM RTDS

Com base nos resultados das etapas definidas na Seção 2.0, o modelo reduzido e já validado do sistema de potência é disponibilizado aos responsáveis pela execução dos ensaios em RTDS para a sua no *software* de transitórios eletromagnéticos, previamente à execução dos ensaios. De forma a compartilhar a experiência da CEEE-GT para a simulação em RTDS da proteção diferencial de barras, são descritos abaixo os dados informados:

- a. Diagrama unifilar de operação da instalação em análise;
- b. Diagrama unifilar do sistema equivalente;
- c. Fluxo de potência para as condições de operação em cargas leve, média e pesada;
- d. Estudo de curto-circuito nas barras de interesse;
- e. Estudos de coordenação e seletividade do sistema de proteção em análise.
- f. Transformadores de potência:
 - Potência;
 - Quantidade de enrolamentos, tensões e tipo de conexões;
 - Curva de saturação do transformador;
 - Impedâncias de sequências positiva e zero dos enrolamento;
- g. Linhas de transmissão:
 - Classe de tensão;
 - Comprimento;
 - Impedâncias séries de sequência positiva e zero;
 - Admitância *shunt*.
- h. Equivalentes de rede e Unidades geradoras:

- Tensão interna e defasagem angular;
- Impedâncias série de sequências positiva, negativa e zero;
- i. Transformadores de Corrente (TC)
 - Relações de transformação;
 - Classe de exatidão;
 - Resistência do enrolamento secundário;
 - Curva de saturação dos TC;
 - Dados de impedância do *loop* dos cabos secundários entre os IED e os TC;
 - Impedâncias dos equipamentos conectados em série aos enrolamentos secundários.

5.0 - ESTUDO DE CASO

O ensaio em RTDS realizado pela CEEE-GT teve por objetivo a avaliação do desempenho da proteção diferencial de barras de arquitetura distribuída Siemens 7SS522 e suas respectivas *bay-units*, Siemens 7SS523, bem como a validação dos estudos desta proteção aplicada ao barramento de uma subestação de 230 kV. O ensaio em RTDS consistiu apenas na avaliação da função 87B, uma vez que para a subestação em análise, a lógica de falha de disjuntor (funcionalidade disponível no IED) é realizada pelos IED dos módulos.

5.1 Configuração do Sistema

A subestação analisada (SE1) é caracterizada pela configuração de seu barramento de 230 kV do tipo barra Principal e Transferência, conectadas através de disjuntor de transferência 24-1 e possui três linhas de transmissão (L1, L2 e L3) e dois transformadores em paralelo de 230/69 kV (TR-1 e TR-2). O setor de 69 kV é composto pela barra de operação, cinco linhas de transmissão radiais e um transformador 69/23 kV. O setor de 23 kV possui três alimentadores radiais. Cabe destacar a existência de geração proveniente de Pequena Central Hidrelétrica (PCH) conectada a uma das linhas de transmissão de 69 kV.

5.2 Sistema de Interesse

Por ocasião deste ensaio em RTDS contemplar a proteção diferencial de barras do setor de 230 kV, o sistema de interesse foi definido de forma a preservar apenas os elementos conectados ao barramento de 230 kV de S1 e suas interligações com as demais subestações de 230 kV, bem como ao setor de 69 kV de S1.

5.3 Modelagem do Sistema

O sistema equivalente definido pelo Aspen Boundary Equivalent é constituído pelos elementos ilustrados na Figura 1, onde são preservadas as interligações de 230 kV e a transformação 230/69 kV de SE1. Adicionalmente, foram acrescentados três elementos artificiais de 230 kV ao equivalente de rede: linhas de transmissão LT_{eq1} e LT_{eq2} e phase-shifter ($PS1$). No entanto, a impedância equivalente destes elementos possui ordem de grandeza muito superior às impedâncias das demais linhas de transmissão. Por consequência da influência reduzida destes elementos aos níveis de curto-circuito e do comportamento dinâmico no sistema, verificada através de simulações no softwares ATP/EMTP e Aspen Oneliner, estes elementos não foram representados no modelo ensaiado.

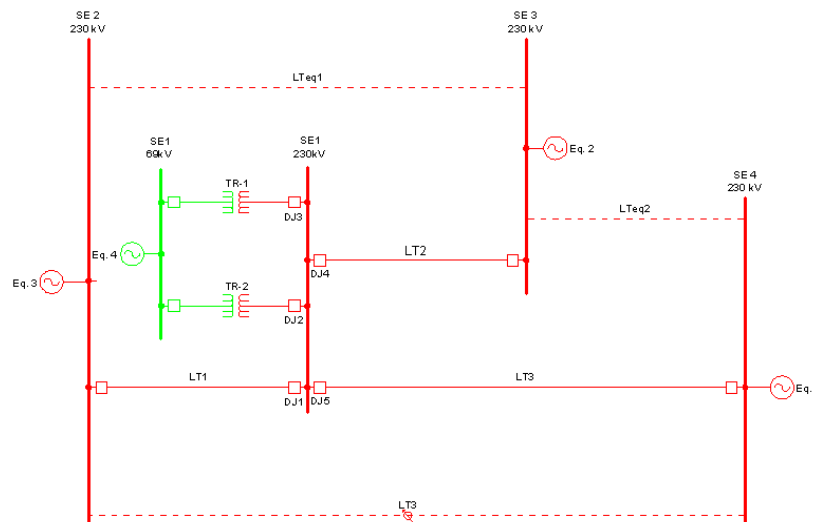


Figura 1 – Sistema equivalente definido pelo Aspen Boundary Equivalent.

5.4 Conjunto de testes

O programa de ensaios em RTDS da proteção diferencial de barras consistiu na aplicação de 280 faltas em 44 condições distintas. A definição do conjunto de testes teve como premissas básicas a avaliação do desempenho da proteção diferencial de barras Siemens 7SS522 perante aos quesitos de: confiabilidade, segurança, seletividade, velocidade e o desempenho dos algoritmos da função 87B durante perturbações e quando submetidos a condições anormais de operação. Para tanto, o programa de ensaios contemplou a simulação dos seguintes distúrbios:

- Falta interna e externa ao barramento de 230 kV com e sem resistências de falta;
- Falta evolutiva em local, com e sem resistência de falta e falta evolutiva em tipo;
- Falta interna a linhas de transmissão, com religamento automático monopolar e tripolar, sem sucesso;
- Falta interna ao barramento de 230 kV durante operação em contingência N-1;
- Falta externa do tipo *cross-country* (entre linhas de transmissão distintas);
- Falta interna e externa em condições de subfrequência e sobrefrequência;
- Falta interna e externa ao barramento de 230 kV em condições de sobrecarga dos TC.

5.5 Desenvolvimento do Ensaio em RTDS

A partir do modelo reduzido do sistema e as informações adicionais descritas na Seção 3, o sistema de potência foi modelado no simulador de transientes eletromagnéticos para a realização dos ensaios em RTDS, vide Figura 2. O conjunto de testes foi executado seguindo a filosofia caso a caso e não o uso de simulações em batelada¹. A adoção da metodologia caso a caso, embora reduza a quantidade de ensaios realizados, permite o acompanhamento individual do teste e dos resultados, incluindo a análise dos registros de oscilografia de cada uma das simulações. Na hipótese da ocorrência de um desempenho insatisfatório, ou da existência de dúvidas perante os testes por parte dos inspetores, os ensaios são interrompidos para discussão e análise minuciosa dos resultados e repetição do ensaio até que as mesmas sejam dirimidas. Na visão da CEEE-GT, esta abordagem associada à definição criteriosa dos conjuntos de testes, permite uma maior objetividade do ensaio.

Com base nestas premissas adotadas para os ensaios, os testes foram executados de acordo com a seguinte ordem cronológica para cada uma das 44 condições de teste:

- a. Consolidação das condições e de dados adicionais aos ensaios pelos inspetores e executores do ensaio;
- b. Elaboração e aprovação das tabelas de condições de testes;
- c. Programação do simulador;
- d. Execução dos testes;
- e. Elaboração da documentação do ensaio;
- f. Análise de resultados e conclusões.

5.6 Documentação do Ensaio em RTDS

Por ocasião da utilização de simulação caso a caso, a documentação resultante do ensaio em RTDS consistiu em três itens: tabelas de cada conjunto de testes e condição de falta, relatório do simulador RTDS para cada teste realizado e arquivo de parametrização do IED, contendo os registros de oscilografia e sequenciais de eventos.

As tabelas de conjunto de testes têm por objetivo a descrição das condições de testes programadas no simulador RTDS e foram distribuídas aos inspetores para acompanhamento dos ensaios. Os inspetores da CEEE-GT as utilizaram para analisar em tempo-real o desempenho em cada teste, acrescidas de comentários e do tempo de atuação do IED, tendo em vista a elaboração do relatório final. Estas tabelas consistiam nas seguintes informações:

- Título (descrição sucinta do ensaio);
- Descrição do teste e número de série do ensaio;
- Localização, tipo, resistência de falta e ângulo de incidência das falta #1 e da #2 (faltas simultâneas);
- Tempo de atuação de cada saídas de disparo;
- Observações.

O relatório do simulador RTDS, por sua vez, é constituído por informações complementares às tabelas de conjuntos de testes e é produzida manualmente pelos executores do ensaio para cada condição de teste. Assim, um número de relatórios equivalente ao número de testes é produzido em formato *pdf*, contemplando os dados das tabelas de conjunto de testes, os registros de oscilografia do simulador RTDS e o sequencial de eventos do IED, caso tenha ocorrido o disparo do sistema de proteção.

Com base nesta documentação, complementada com os registros de oscilografia e sequencial de eventos do IED testado, é possível a elaboração de relatórios referentes ao ensaio, bem como a análise do desempenho do sistema de proteção para os casos simulados. Estas informações, ainda, podem ser utilizadas como referências para relatórios de análises de ocorrências envolvendo os modelos de IEDs contemplados pelo ensaio.

5.7 Cronograma

Embora a execução dos ensaios em RTDS da proteção diferencial de barras tivesse uma duração de 5 dias, conforme Tabela 1, as etapas preparatórias e complementares dos ensaios exigiram uma dedicação de aproximadamente 35 dias da equipe CEEE-GT, conforme estabelecido abaixo:

- Definição do modelo equivalente e documentação: 3 dias;
- Validação do modelo equivalente: 2 dias;
- Definição do conjunto de ensaios e documentação: 10 dias;
- Elaboração de relatórios finais: 20 dias.

Tabela 1 – Cronograma dos ensaios em RTDS.

Tabela 1: Cronograma dos ensaios em RTDS				
Dia 1	Dia 2	Dia 3	Dia 4	Dia 5
Apresentações	Parametrização do IED	Ensaio em RTDS	Ensaio em RTDS	Ensaio em RTDS
Validação do modelo	Ensaio em RTDS			Conclusões
Definições do ensaio				Relatórios e documentação dos ensaios

¹ Simulação onde uma condição de teste é repetida exaustivamente.

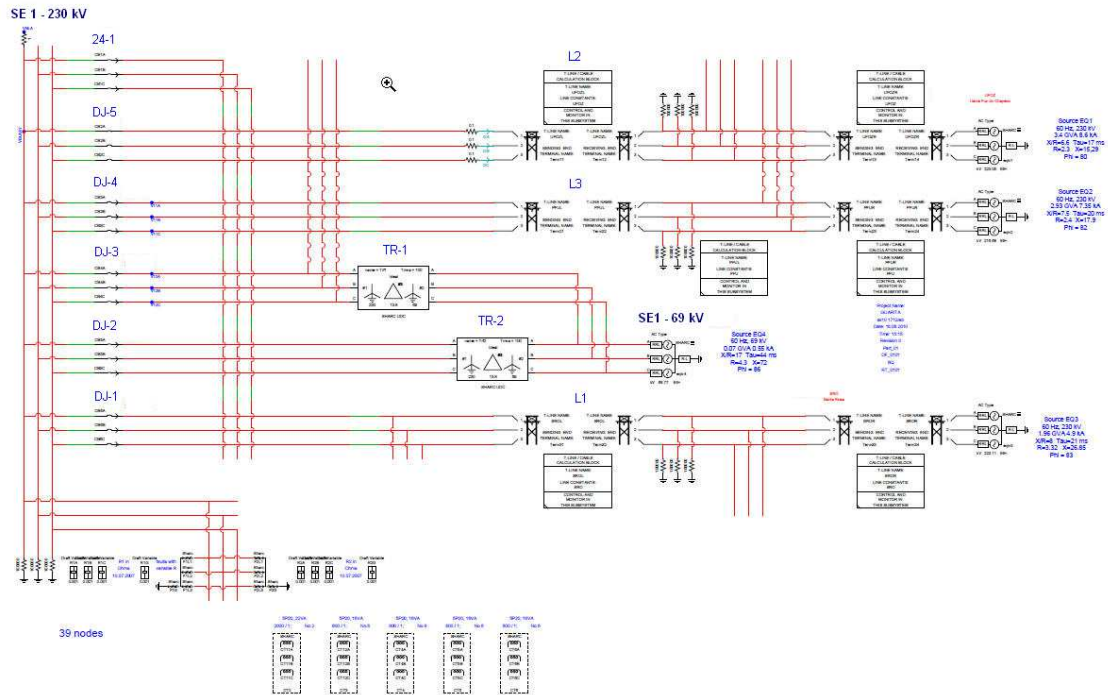


Figura 2 - Modelo implementado no programa de simulação de transientes eletromagnéticos do RTDS.

6.0 - ANÁLISE DE RESULTADOS

O desempenho dos resultados obtidos para a simulação em RTDS da proteção diferencial de barras Siemens 7SS522 é avaliado nesta seção sob dois aspectos: o desempenho do sistema de proteção quando submetido às condições de falta simuladas, bem como o tempo de resposta de atuação da proteção. Neste caso, foi considerado o tempo do algoritmo de proteção e o intervalo para a excitação das saídas de disparo das respectivas *bay-units*. Nesta seção são apresentadas algumas das 44 condições de falta contempladas pelo ensaio em RTDS.

6.1 Falhas internas ao barramento de 230 kV da subestação S1

O conjunto de testes de falhas internas ao barramento de 230 kV de S1 teve por objetivo a verificação da operacionalidade do IED e a avaliação do estudo de seletividade, garantindo a correta parametrização do IED. Foram realizados 19 testes com a variação dos seguintes parâmetros: tipo, ângulo de incidência e resistência de falta, além de contingência N-1. A Tabela 2 descreve alguns dos resultados obtidos para estas condições de teste.

Com base nos resultados obtidos, é possível verificar que a proteção diferencial de barras atende ao critério de confiabilidade de sistemas de proteção, atuando nas situações previstas. Não obstante, os testes demonstraram invariância aos aspectos de ângulo de incidência de falta e tipo de falta, bem como de contingências e resistência de falta, desde que observados a existência de correntes diferenciais (I_d) superiores ao *pickup*. Os resultados demonstraram que os ajustes definidos pelo estudo de seletividade atendem a todos os casos de contingências do tipo N-1, bem como para falhas resistivas, com valores superiores ao critério definido em (1).

A partir da Tabela 2, é possível observar que o tempo de operação da proteção diferencial para a condição de operação com a linha de transmissão L3 desligada é levemente superior aos tempos das demais condições. Esta observação resulta de que a proteção diferencial de barras Siemens 7SS522 utiliza dois algoritmos de proteção que operam em paralelo: rápido (1 of 1) e lento (2 of 2). O algoritmo rápido, cujo tempo de operação teórico é de 3 ms, tem como base a utilização de derivada dI_s/dt (8). O algoritmo lento, por sua vez, tem como base a lei de Kirchhoff dos nós e utiliza os sinais de corrente filtrados da frequência fundamental. Com base na Tabela 2, é possível verificar que para falhas simuladas com L3 desligada, não há a atuação do algoritmo 1 of 1.

Tabela 2 – Falhas internas ao barramento de 230 kV da subestação S1

Falta	$R_f(\Omega)$	Ângulo de incidência	Condição de operação	Desempenho proteção	Tempo de atuação (ms)
A-g	0,05	0°	Normal	Correto	20
A-g	0,05	45°	Normal	Correto	21
A-g	0,05	90°	Normal	Correto	28
C-g	15	60°	Normal	Correto	28
CA	15	60°	Normal	Correto	28
CA-g	40	60°	Normal	Correto	23
B-g	0,05	120°	Contingência L3	Correto	35
BC	0,05	120°	Contingência L3	Correto	35
BC-g	0,05	120°	Contingência L3	Correto	30
ABC	0,05	120°	Contingência L3	Correto	30

6.2 Faltas externas ao barramento de 230 kV da subestação S1

A simulação de faltas externas ao barramento de 230 kV de S1 foi realizada para avaliar a segurança da proteção diferencial de barras. Deste modo, é esperado que para todas as faltas simuladas, não ocorra o disparo da função 87B. Foram executados 67 ensaios de faltas externas, sendo os ensaios iniciais localizados nos módulos de 230 kV dos transformadores TR-1 e TR-2, condição extrema de curto-circuito, e posteriormente faltas internas à L1, L2 e L3. Foram analisadas diferentes tipos, ângulos de incidência e resistências de falta, bem como duas localizações distintas para cada uma das linhas de transmissão. Em todas as condições simuladas, o desempenho da proteção Siemens 7SS522 foi satisfatório, não ocorrendo disparos indevidos para faltas externas.

Tendo em vista que a filosofia adotada pela CEEE-GT contempla o esquema de religamento automático monopolar em suas linhas de transmissão, foram também realizados ensaios de faltas internas à L1, L2 e L3 com a atuação do religamento automático monopolar sem sucesso. Foram realizados 54 ensaios, contemplando para cada linha de transmissão, faltas do tipo A-g, B-g e C-g, duas localizações de falta e resistência de faltas distintas. Para todos os casos simulados, novamente, não houve a atuação da função 87B, conforme esperado.

Esta condição de falta contemplou também defeitos internos à L3, a qual possui a maior contribuição para a corrente de curto-circuito em S1, e a atuação do esquema de religamento automático tripolar sem sucesso. Esta teste permitiu avaliar tanto o desempenho do 87B durante o ciclo de religamento tripolar, quanto o processo de energização de uma linha de transmissão sob falta. Mais uma vez, não houve disparo para faltas externas.

6.3 Faltas evolutivas em local (interna/externa)

O conjunto de testes contemplando faltas evolutivas em local teve por objetivo a avaliação do tempo de resposta do algoritmo de proteção da função de 87B. Para tanto, foram realizadas faltas evolutivas de internas ao barramento de 230 kV de S1 para externa, em intervalos mínimos de tempo, conforme detalhado na Tabela 3.

Tabela 3 – Faltas internas para externas ao barramento de 230 kV da subestação S1

Falta	$R_f(\Omega)$	Ângulo de incidência	Tempo evolução	Tempo de atuação
A-g	0,05	0°	5 ms	-
AB	0,05	0°	5 ms	-
AB-g	0,05	0°	5 ms	-
ABC	0,05	0°	5 ms	19 ms
A-g	20	0°	10 ms	20 ms
AB	5	0°	10 ms	28 ms
AB-g	20	0°	10 ms	18 ms
ABC	10	0°	10 ms	20 ms

Conforme a Tabela 3, para três dos quatro casos simulados com tempo de falta de 5ms, não houve a atuação da proteção diferencial de barras. No entanto, para faltas trifásicas houve a atuação do 87B nesta condição. A atuação apenas neste teste pode ser explicada pelo comportamento dinâmico com maior severidade propiciado por faltas simétricas (8), resultando no disparo pelo algoritmo 1 of 1 do IED Siemens 7SS522. No entanto, para faltas com duração de 10 ms, houve a atuação da proteção diferencial de barras para todos os tipos de faltas do tipo *shunt*.

6.4 Faltas evolutivas em local (externa/interna)

O conjunto de testes de faltas evolutivas em local, de externas para internas, teve por objetivo a análise do tempo de resposta do IED Siemens 7SS522 quando submetido a uma variação de brusca de 180° nas corrente s de falta. Os ensaios consistiram inicialmente em faltas internas ao transformador TR-1 e posterior evolução para faltas internas à zona de proteção do 87B. A Tabela 4 descreve os resultados obtidos neste ensaio, onde as corretas atuações da proteção diferencial de barras são verificadas. Os tempos obtidos nestes ensaios demonstram atuação do algoritmo 2 of 2, em função do bloqueio de 150 ms do algoritmo 1 of 1 devido a falta externa inicial.

Tabela 4 – Faltas externas para internas ao barramento de 230 kV da subestação S1

Falta F1	$R_f(\Omega)$	Ângulo de incidência	Tempo evolução	Tempo de atuação
A-g	0,05	0°	5 ms	40 ms
AB	0,05	0°	5 ms	42 ms
AB-g	0,05	0°	5 ms	40 ms
ABC	0,05	0°	5 ms	21 ms
A-g	0,05	0°	10 ms	40 ms
AB	0,05	0°	10 ms	42 ms
AB-g	0,05	0°	10 ms	50 ms
ABC	0,05	0°	10 ms	50 ms

6.5 Faltas com operação em sobre e subfrequência

De forma a avaliar o desempenho dos algoritmos do IED Siemens 7SS522, foram executados ensaios de faltas internas e externas ao barramento do sistema com operação do sistema elétrico de potência em frequências entre 58 e 62 Hz. Foram realizados 32 ensaios, envolvendo os quatro tipos de faltas clássicas e em todos os ensaios realizados o desempenho foi satisfatório. Houve o disparo para faltas internas ao barramento de 230 kV de S1, com tempo máximo de 28 ms e sem atuações indevidas para defeitos externos à zona de proteção do 87B.

6.6 Faltas com TC em sobrecarga

O desempenho do IED Siemens 7SS522 durante a operação com transformadores de corrente saturados foi inicialmente analisado para faltas externas, localizadas no módulo de 230 kV do transformador TR-1, as quais apresentam as maiores correntes de falta. Foram efetuados testes com a operação do transformador de corrente em condições desfavoráveis, através da inserção de cargas resistivas equivalentes a 100% e 150% da carga nominal do transformador de corrente. Estas condições foram repetidas para faltas em *L1*, a qual possui o maior *burden* conectado aos TC. Em todos os ensaios de faltas externas com TC em condição desfavoráveis, houve o desempenho correto da proteção diferencial de barras, sem o disparo indevido para faltas externas, mesmo com a deformação dos sinais de corrente.

Finalmente, o desempenho do IED Siemens 7SS522 com transformadores de corrente em sobrecarga foi avaliado para faltas internas. Foram realizados ensaios de faltas no barramento de 230 kV de *S1* com todos os TCs operando em sobrecarga de 150%. Os resultados obtidos demonstraram, mais uma vez, desempenho satisfatório, com a atuação correta da proteção 87B para todos os tipos de falta e com tempos de atuação entre 20 e 27 ms.

7.0 - CONCLUSÃO

O ensaio em RTDS da proteção diferencial de barras Siemens 7SS522 teve por objetivo a validação dos estudos de seletividade e do desempenho deste IED aplicado à proteção do barramento de uma subestação de 230 kV. Com base nos resultados obtidos é possível concluir que os benefícios decorrentes da realização de simulações em tempo-real, permitem a análise de inúmeros aspectos inerentes às etapas de projeto, estudos, operação e análise de ocorrências da qual a proteção diferencial de barras analisada estará inserida. É possível concluir que tais ensaios propiciam – aliados ao acompanhamento em fábrica por especialistas no modelo IED – além da validação dos estudos de proteção, a fundamentação para a análise de perturbações, permitindo inclusive a avaliação do desempenho dos algoritmos da proteção diferencial de barras e no aprofundamento com relação ao conhecimento do IED e seu desempenho. Para tanto, é fundamental a definição prévia e criteriosa dos conjuntos de ensaios. A definição de testes em condições atípicas, ou críticas, mesmo que estas possuam probabilidades reduzidas de ocorrência, permitem que o desempenho do sistema de proteção seja avaliado em condições extremas, tais como as faltas evolutivas em local propostas pela CEEE-GT e que revelam minúscias do dispositivo de proteção.

Com base na experiência da CEEE-GT descrita neste artigo, o máximo aproveitamento dos ensaios está condicionado aos seguintes aspectos: definição minuciosa dos modelos reduzidos; disponibilização dos dados corretos ao ensaio com antecedência do ensaio; definição criteriosa dos conjuntos de ensaios; envio com antecedência dos conjuntos de ensaios aos executores; conhecimento por parte das equipes de inspeção e realização dos testes do IED em análise, do sistema em simulação e dos conjuntos de testes, bem como suas justificativas para execução.

Finalmente, a partir dos ensaios em RTDS realizados, atendendo a todas as premissas descritas ao longo deste artigo pôde-se afirmar que:

- Os estudos de coordenação e seletividade foram validados perante os requisitos de confiabilidade, segurança, seletividade e velocidade exigidos para proteção de barras de subestações de 230 kV.
- A aplicação da proteção diferencial de barras Siemens 7SS522 foi aprovada para a utilização no barramento de 230 kV da subestação analisada;
- O IED Siemens 7SS522 operou corretamente em todas as condições simuladas, mesmo àquelas consideradas como atípicas ou críticas;
- Os TC e as relações de transformação definidas nos estudos de seletividade estão adequados;
- Os resultados irão fomentar a equipe de análise de perturbação da CEEE-GT em análises de ocorrências.

8.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) PHADKE, A.G.; THORP, J.S. Computer Relaying for Power Systems. Baldock, Hertfordshire: Research Studies, 1993. 289p.
- (2) BLACKBURN, J.L. Protective Relaying: Principles and Applications. New York, NY: Marcel Dekker, 1998. 538p.
- (3) PRIKLER, L.; HOIDALEN, H. K. Atpdraw version 3.5 users manual: preliminary release no.1. 2002.
- (4) ADVANCED SYSTEMS FOR POWER ENGINEERING INC. Aspen Oneliner. [Online]. [S.]. Disponível em: <http://www.aspeninc.com/>. Acesso em: Mar. 2011.
- (5) CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA. ANAFAS – Análise de Faltas Simultâneas. [Online]. [S.]. Disponível em: <http://www.anafas.cepel.br/>. Acesso em: Mar. 2011.
- (6) LIN, Y.-H; LIU, C.-W. A New DFT-Based Phasor Computation Algorithm for Transmission Line Digital Protection. In: IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002: Asia Pacific, 2002, Yokohama. Proceedings... [S.], 2002. v. 3, p. 1733 – 1737.
- (7) SIEMENS AG. Distributed Busbar/Breaker Failure Protection 7SS522 V.4.0/7SS523 V.3.0/7SS525 V.3.0.[S.]. 2004.
- (8) KUNDUR, P. Power System Stability and Control. New York, NY: McGraw-Hill, 1994. 1207 p.

9.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

André Darós Filomena (IEEE Member'07) nasceu em Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil, em 27 de Outubro de 1982. Ele recebeu os títulos de Engenheiro Eletricista e Mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) em 2005 e 2008, respectivamente. Atualmente ele trabalha no Departamento de Engenharia de Proteção, Divisão de Automação, Supervisão e Proteção da Companhia Estadual de Energia Elétrica (CEEE-GT), Porto Alegre, Brasil e busca o título de Doutor em Engenharia Elétrica na UFRGS. Seus interesses de pesquisa incluem proteção, modelagem e análise de sistemas elétricos de potência.