



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

FI/GPC/25
18 a 21 de Outubro de 2015
Foz do Iguaçu - PR

GRUPO – V

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

**RELIGAMENTO AUTOMÁTICO DA LINHA LI 500KV MD-VHA 1
- EXPERIÊNCIA DA ITAIPU E SOLUÇÃO DE PROBLEMAS**

**José Benedito Mota Júnior(*)
ITAIPU BINACIONAL**

**Eron Marcio Nyznyk
ITAIPU BINACIONAL**

**Esteban Federico Vargas Correa
ITAIPU BINACIONAL**

**Sergio Mauricio Franczak
ITAIPU BINACIONAL**

RESUMO

Em outubro de 2013, entrou em operação a linha de transmissão LI 500kV MD-VHA 1, interligando a subestação da Margem direita da Itaipu (SE-MD) à subestação de Villa Hayes (SE-VHA) do sistema ANDE (Paraguai). Essa linha de transmissão com capacidade de 2.200MVA e 347km de extensão, apresenta um papel essencial no atendimento ao setor elétrico paraguaio.

Os estudos realizados para a entrada em operação da linha recomendaram a adoção do religamento automático tripolar com o terminal da subestação da SE-MD como líder. As análises dos primeiros desligamentos da linha indicaram a necessidade de reajustes de parâmetros da função de religamento e da função de sincronismo em ambos os terminais.

Devido às particularidades da interligação Itaipu/Ande decidiu-se pela realização de ensaios de modelo nas proteções da linha LI 500kV MD-VHA 1 nas dependências do Laboratório de Automação e Simulação de Sistemas Elétricos – LASSE, instalado no Parque Tecnológico Itaipu (PTI), de forma a validar os reajustes realizados. O objetivo do trabalho é apresentar os resultados dos ensaios de modelo na função de religamento automático das proteções da linha LI 500kV MD-VHA 1 mostrando os problemas detectados e as soluções adotadas, como a necessidade de alteração na lógica de fraca alimentação (weak infeed) no terminal da SE-VHA.

PALAVRAS-CHAVE

Ensaio de Modelo, Religamento automático, Weak infeed, RTDS.

1.0 - INTRODUÇÃO

A Usina Hidrelétrica de Itaipu atualmente é responsável pelo atendimento de aproximadamente 14% da energia elétrica consumida no Brasil e 79% da energia consumida no Paraguai, e está conectada aos principais corredores de transmissão do Sistema Interligado Nacional brasileiro (SIN) e do sistema do Paraguai: o setor de 60Hz conectado ao sistema de transmissão em 765kV e o setor de 50Hz conectado ao Elo de Corrente Contínua ± 600 kV e a quatro linhas de 220kV que alimentam o Paraguai. A usina atualmente possui 20 unidades geradoras com potência nominal de 700MW cada uma, totalizando 14.000MW.

(*) AV Tancredo Neves, n° 6731 - CEP 85.866-900 Foz do Iguaçu, PR – Brasil
Tel: (+55 45) 3520-2710 – Fax: (+55 45) 3520-2706 – Email: mota@itaipu.gov.br

Em outubro de 2013 entrou em operação a linha de transmissão LI 500kV MD-VHA 1, mostrada na Figura 1, interligando a subestação da Margem direita da Itaipu (SE-MD) à subestação de Villa Hayes do sistema ANDE (Paraguai). Essa linha de transmissão com capacidade de 2.200MVA e 347km de extensão apresenta um papel essencial no atendimento ao setor elétrico paraguaio.

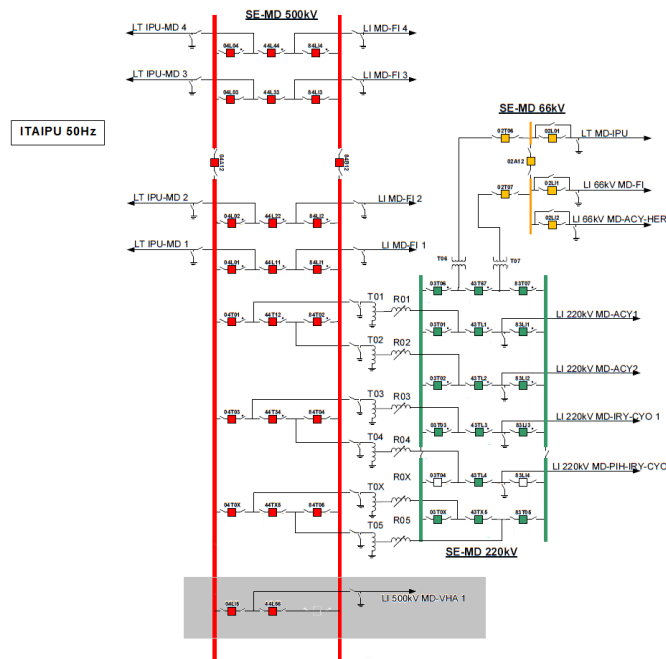


FIGURA 1 – Unifilar da SE-MD com a linha LI 500kV MD-VHA 1

As funções habilitadas na proteção da linha são: diferencial de linha – 87L, distância – 21, direcional de sequência zero – 67N, falha de disjuntor – 50BF e religamento automático – 79. A característica adotada na filosofia das proteções é considerar a função diferencial 87L como a principal proteção da linha.

Os estudos dinâmicos realizados para a entrada em operação da linha LI 500kV MD-VHA 1 recomendaram a adoção do religamento automático tripolar para faltas monofásicas com o terminal da subestação da SE-MD como terminal líder, bem como o valor de tempo morto de 0,5s de forma a minimizar os impactos para a carga.

Logo após a entrada em operação da linha ocorreram alguns desligamentos devido à contato com vegetação sem que ocorresse um ciclo completo de religamento automático com sucesso. As análises desses desligamentos verificou a existência de tempos adicionais no processo de religamento que tornavam o período com a linha aberta maior que o tempo definido nos estudos. Esse fato levou a necessidade de reajustes no tempo morto da função de religamento e de alguns parâmetros da função de sincronismo em ambos os terminais, bem como a necessidade de realizar uma verificação em todo o processo de religamento automático e fechamento em anel da linha. Para isso foram realizados pela Itaipu ensaios de modelo nas proteções de ambos os terminais. Esses ensaios foram realizados nas dependências do Laboratório de Automação e Simulação de Sistemas Elétricos – LASSE, Instalado no Parque Tecnológico Itaipu (PTI).

2.0 - O LABORATORIO DE SIMULAÇÃO - LASSE

O Laboratório de Automação e Simulação de Sistemas Elétricos (LASSE) foi implantado em 2008, fruto de uma parceria entre a ITAIPU BINACIONAL e a Fundação Parque Tecnológico Itaipu (FPTI), através do Programa de Pesquisa, Desenvolvimento & Inovação da Universidade Corporativa Itaipu. O principal objetivo do LASSE é suprir a demanda por um espaço propício para o desenvolvimento de pesquisas e execução de ensaios em tempo real, que pudesse dar suporte à atualização tecnológica da usina, cujo planejamento teve início em 2005. O Instituto de Tecnologia Aplicada e Inovação (ITAI), como parceiro estratégico da ITAIPU BINACIONAL e da FPTI, é responsável pela gestão operacional do LASSE.

O LASSE dispõe atualmente de uma estrutura baseada no simulador RTDS e em amplificadores de corrente e tensão que permitem a execução de ensaios de modelo em malha fechada e em tempo real, com cenários de testes similares às configurações de campo nas quais IED (Intelligent Electronic Devices) de controle e proteção estarão inseridos. Este tipo de ensaio realizado no LASSE, por ser o mais próximo da configuração real em campo, permite uma avaliação apurada dos equipamentos/sistemas de controle e proteção antes de suas instalações e comissionamentos, garantindo uma maior segurança e confiabilidade ao sistema de potência. Por exemplo, no

caso de ensaios de modelo de IEDs de proteção é possível confirmar e/ou aprimorar os ajustes previamente definidos, aplicando-se faltas no sistema de potência e verificando-se o comportamento desses equipamentos perante diferentes situações e configurações.

3.0 - ELABORAÇÃO DOS MODELOS

Para a realização dos testes considerando-se a nova configuração na SE-MD foi necessário o desenvolvimento de modelos do sistema Itaipu/Furnas/ANDE no RSCAD, que é o software utilizado pelo RTDS para as simulações.

Os modelos contemplaram a implementação de configurações, que representam diferentes topologias do sistema elétrico de potência no qual o circuito LI 500kV MD-VHA 1 está inserido. As diferentes configurações e os diferentes tipos de faltas aplicadas foram essenciais na verificação do comportamento do sistema de religamento automático da linha devido aos distintos tipos de contribuição para as faltas simuladas na interligação Itaipu-ANDE e ao comportamento das funções de proteção.

3.1 Configurações utilizadas nos modelos do sistema

A configuração de carga máxima (Configuração 1), mostrada na Figura 2, utilizada nos ensaios está descrita a seguir:

- 10 unidades geradoras em Itaipu 50Hz;
- 4 linhas de transmissão interligando Itaipu (SE-IPU) à Subestação Margem Direita (SE-MD);
- 4 linhas de transmissão interligando a Subestação Margem Direita à Subestação Foz do Iguaçu (SE-FI);
- Elo de corrente contínua na Subestação Foz do Iguaçu modelado como uma carga dinâmica;
- Bancos de filtros na Subestação de Foz do Iguaçu;
- Autotransformadores T1, T2, T3 e T4 modelados com um único componente do RSCAD, representando o equivalente dos quatro, considerando-se as curvas de saturação;
- Transformadores R1, R2, R3 e R4 modelados com um único componente do RSCAD, representando o equivalente dos quatro, considerando-se as curvas de saturação e os mesmos operando no tap máximo;
- Transformador RX e autotransformador TX modelados considerando-se suas respectivas curvas de saturação (com RX operando no tap máximo);
- 1 linha de transmissão interligando a subestação da Margem Direita à subestação de Villa Hayes (SE-VHA), com suas transposições (LI 500kV MD-VHA 1);
- 2 linhas de transmissão interligando a subestação de Villa Hayes à subestação de Límpio do sistema ANDE;
- Dois transformadores na Subestação Villa Hayes considerando-se suas curvas de saturação;
- Sistema elétrico de potência paraguaio modelado como um equivalente de curto-circuito em Acaray (SE-MD 220kV), uma carga de impedância constante nessa mesma subestação e uma carga de impedância constante em Límpio.

A Configuração 2 do modelo do sistema elétrico da interligação Itaipu-Eletróbrás Furnas 50Hz, também mostrada na Figura 2, foi criada a partir da Configuração 1, com topologia usando o sistema completo Itaipu/ANDE/Furnas, carga mínima e quatro unidades geradoras de Itaipu sincronizadas ao sistema.

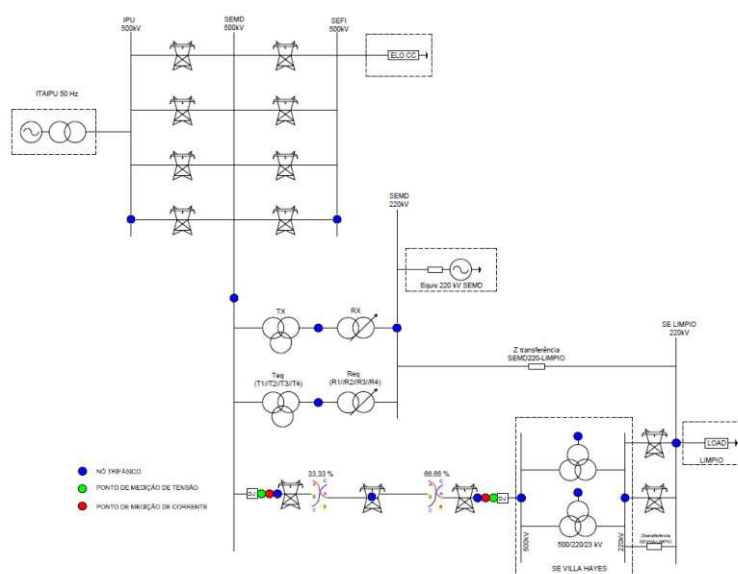


FIGURA 2 – Diagrama simplificado do modelo adotado nas Configurações 1 e 2.

A Configuração 3 representa a configuração do setor de 50Hz da Itaipu com quatro unidades separadas para o sistema ANDE, conectadas a 2 circuitos de 500kV que interligam Itaipu ao barramento de 500kV da SE-MD e ao sistema ANDE 220kV, conforme mostrado na Figura 3.

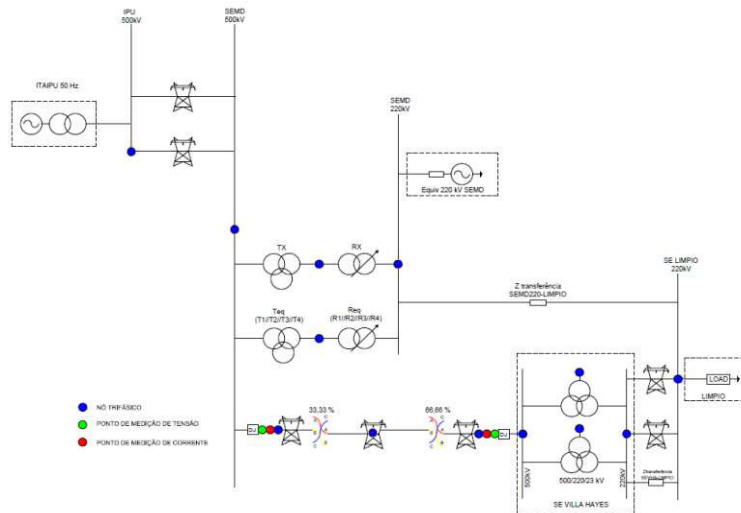


FIGURA 3 – Diagrama simplificado do modelo adotado na Configuração 3.

3.2 Aferição do modelo

De forma a garantir a confiabilidade dos resultados dos ensaios, os modelos desenvolvidos no RSCAD foram previamente validados pela Itaipu por simulações realizadas no aplicativo ATP (Alternative Transient Program) e no software de curto-circuito ASPEN ONELINER. Esta ação permitiu um ajuste fino dos modelos do RSCAD que seriam utilizados para as simulações nas diferentes configurações do sistema elétrico da interligação Itaipu-ANDE-Furnas 50Hz. E assim, os valores de tensão e corrente obtidos das simulações estariam bem próximos dos valores reais medidos em condições de curto-circuito no sistema Itaipu/ANDE/Furnas 500kV/50Hz.

4.0 - OS ENSAIOS

4.1 Falta monofásica aplicada a 50% da linha

Depois de garantidas as pré-condições necessárias para o processo de religamento tripolar automático em ambos os terminais da linha LI 500kV MD-VHA 1, os testes foram iniciados com a aplicação de uma falta monofásica localizada a 50% da linha na condição de operação com carga máxima.

Esse teste inicial serviu para confirmar como corretas as condições que necessitaram ser habilitadas previamente na lógica do religamento automático dos IEDs e verificar as condições de energização, o processo de religamento no terminal da SE-MD e as condições de fechamento em anel no terminal da SE-VHA associadas ao religamento do disjuntor nesse terminal.

A falta monofásica (fase R), com ponto de incidência a 90° da onda de tensão, foi aplicada a 50% da linha LI 500kV MD-VHA 1, conforme o registro do IED do terminal da SE-MD mostrado na Figura 4, de onde pode-se tecer os seguintes comentários:

- o religamento automático ocorreu corretamente em ambos os terminais;
- o tempo morto foi da ordem de 369ms no terminal da SE-MD;
- no terminal da SE-VHA o tempo morto total foi da ordem de 564ms, englobando o tempo morto ajustado (300ms), o tempo de verificação das condições de anel no terminal na SE-VHA e o tempo de fechamento do disjuntor;
- as condições necessárias para permitir o processo de religamento automático foram alcançadas.

Analogamente, a simulação de falta localizada a 100% da linha, a partir do terminal da SE-MD, também apresentou religamento automático com sucesso em todas as configurações e com tempos similares aos apresentados pelo ensaio com a falta localizada a 50% da linha.

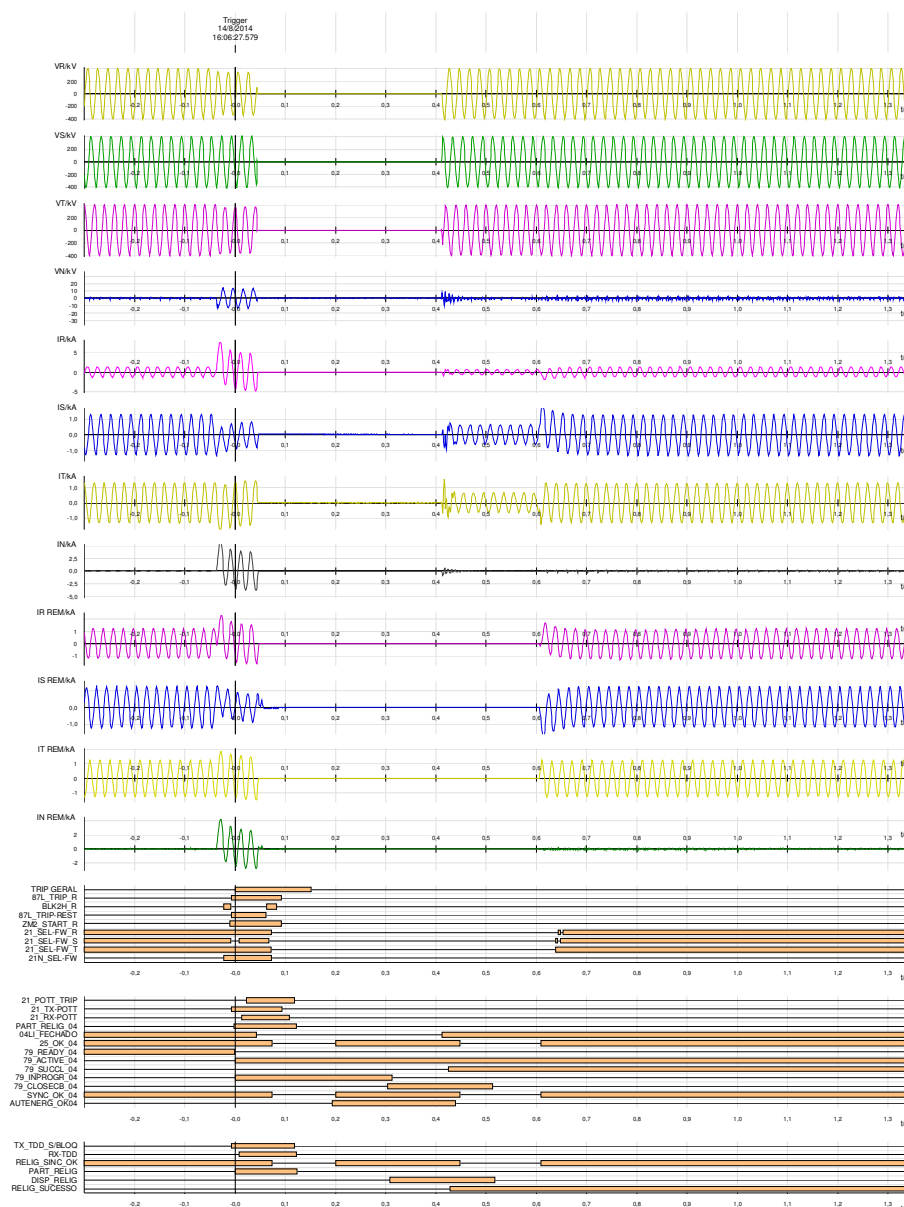


FIGURA 4 – Registro IED terminal SE-MD – falta monofásica à 50% linha

4.2 Falta monofásica aplicada a 0% da linha

A falta monofásica (fase R), com ponto de incidência a 90° da onda de tensão, aplicada a 0% da linha LI 500kV MD-VHA 1 apresentou o registro do RTDS mostrado na Figura 5, onde verificou-se que o processo de religamento não se concluiu. O comportamento do esquema de religamento automático foi o mesmo para os ensaios realizados em todas as configurações estudadas. Pela análise nos registros é possível tecer os seguintes comentários:

- o processo de religamento foi interrompido 120ms após ter sido iniciado no terminal da SE-MD;
- o bloqueio do religamento no terminal da SE-MD ocorreu simultaneamente ao sinal de recepção de POTT 21;
- o terminal da SE-VHA não mediu 2ª zona e consequentemente não enviou sinal de POTT para a SE-MD;
- houve a sinalização de TRIP-WEI (fraca alimentação) pelo terminal da SE-VHA com o consequente envio de sinal de ECHO(sinalizado como recepção de POTT 21) e TDD para a SE-MD;
- A lógica resumida do esquema de fraca alimentação (weak infeed) do terminal da SE-VHA está mostrada na Figura 6.
- Conforme foi definido, no religamento automático da LI 500kV MD- VHA 1, mostrado de forma simplificada no diagrama lógico apresentado na Figura 7, a sinalização de trip por fraca alimentação é uma das condições que bloqueiam o processo de religamento automático do disjuntor no terminal da SE-VHA. Dessa forma, verifica-se que foi correto o bloqueio do religamento automático do disjuntor nesse terminal.

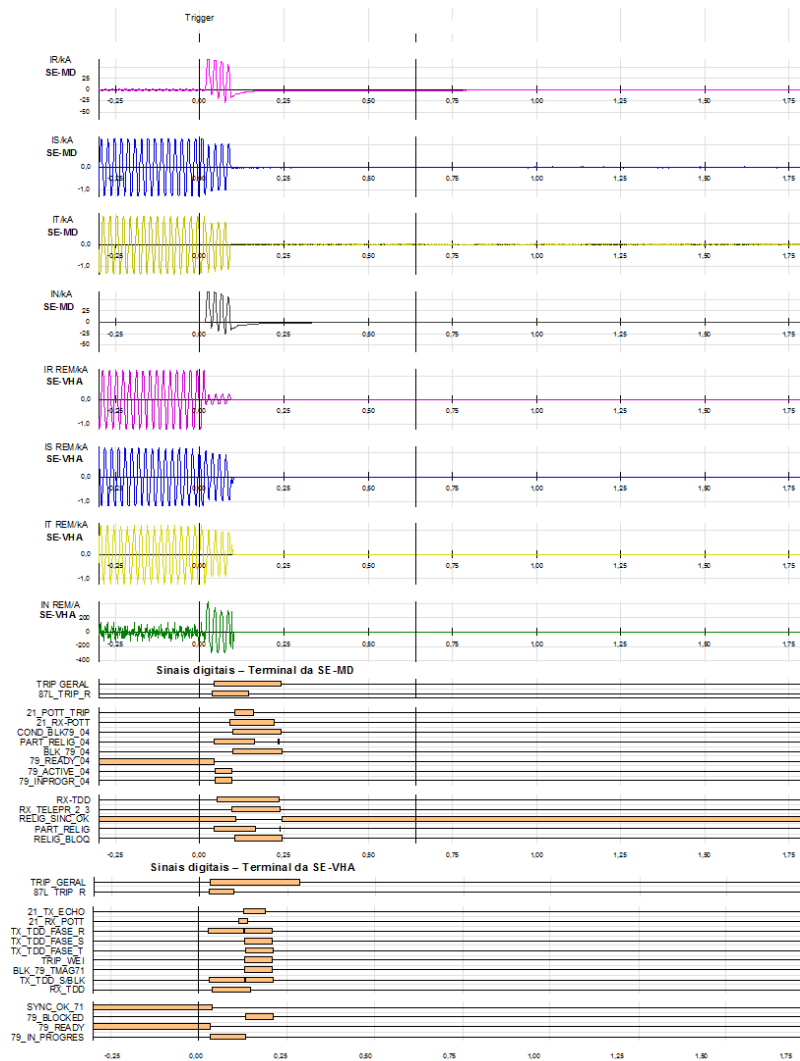


FIGURA 5- Registro IED terminal SE-MD – falta monofásica à 0% linha

O diagrama lógico mostrado na Figura 6 indica também que a origem do bloqueio do religamento automático do disjuntor no terminal da SE-MD foi a recepção do sinal de teleproteção por falta bifásica/trifásica (RX TELEPR 2P_3P). Nesse diagrama verificou-se que a sinalização recepção de teleproteção por falta bifásica/trifásica (RX TELEPR 2P_3P) na proteção do terminal da SE-MD foi consequência da recepção de TDD trifásico do terminal da SE-VHA.

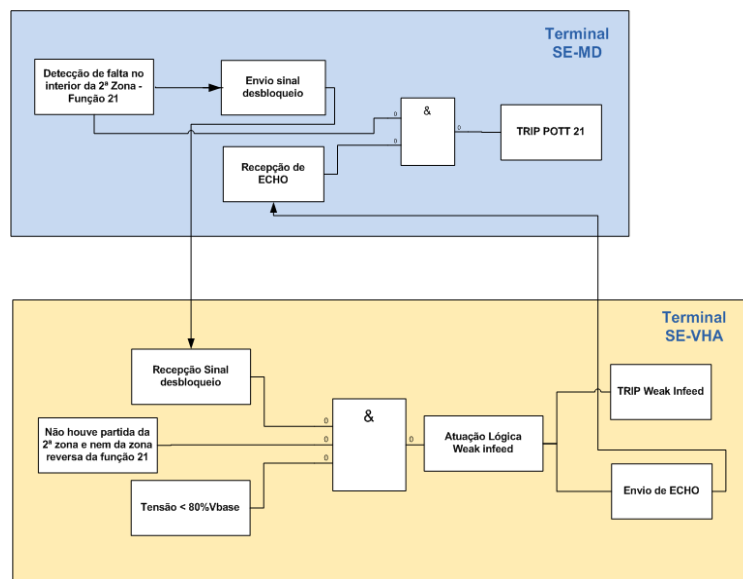


FIGURA 6- Diagrama lógico simplificado da lógica de fraca alimentação – SE-VHA

Pela análise dos sinais ativados no diagrama lógico da proteção do terminal da SE-VHA (Figura 7) verificou-se que o envio de sinal de teleproteção por falta bifásica/trifásica para o terminal da SE-MD teve como origem o trip por fraca alimentação no terminal VHA (TRIP-WEI), o qual ocorreu devido a incapacidade da função 21 em identificar a falta pela 2ª zona da função 21.

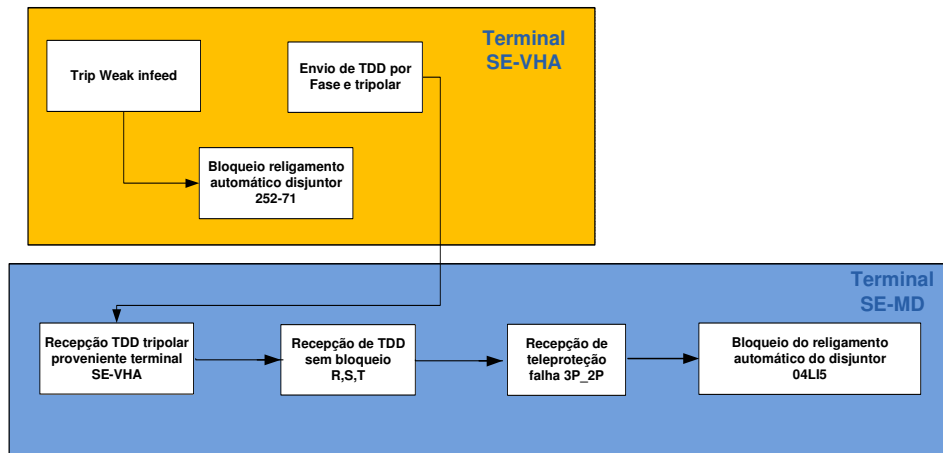


FIGURA 7- Diagrama lógico das condições de bloqueio do religamento automático do disjuntor da SE-MD

5.0 - RELIGAMENTO AUTOMÁTICO DA LINHA LI 500KV MD-VHA1 DURANTE FALTAS PRÓXIMAS AO TERMINAL DA SE-MD - SOLUÇÕES A SEREM ADOTADAS

O motivo da não ocorrência do religamento automático da linha em ambos os terminais durante faltas próximas ao terminal da SE-MD, em todas as configurações, pode ser resumido por:

Terminal da SE-VHA:

- A deficiência da função 21 em identificar faltas em 2ª zona próximas ao terminal da SE-MD;
- Atuação da lógica de fraca alimentação:
 - trip no terminal da SE-VHA;
 - envio de Echo e de TDD trifásico ao terminal da SE-MD;
 - bloqueio do religamento automático no terminal da SE-VHA.

Terminal de SE-MD:

- Recepção de TDD trifásico bloqueia o religamento automático.

De modo a evitar o bloqueio do religamento de ambos os terminais, tendo em vista a impossibilidade da função 21 em identificar a falta em 2ª zona foi necessário buscar soluções alternativas de modo a impedir o bloqueio da função 79. Dessa forma, durante os ensaios foram testadas as seguintes soluções:

a) Aumento do alcance da 2ª zona do terminal da SE-VHA para impedir a atuação da função weak infeed:

Devido ao fato da medição de 2ª zona impedir a atuação do esquema de weak infeed de um terminal de proteção de linha, foi testado o aumento o ajuste da 2ª zona do terminal da SE-VHA. Porém, como já citado anteriormente, devido a condição do sistema, a 2ª zona da função de distância da proteção do terminal da SE-VHA não consegue detectar faltas próximas ao terminal da SE-MD, o que inviabiliza usar a 2ª zona para impedir a atuação do esquema de weak infeed no terminal da SE-VHA.

b) Partida da Função 87L do terminal da SE-MD bloqueando o envio de sinal de desbloqueio (POTT) pela partida da função 21 2ª zona para o terminal da SE-VHA:

Com o bloqueio do POTT, a função de fraca alimentação (weak infeed) do terminal da SE-VHA não atua por não receber desbloqueio e dessa forma o religamento automático não é bloqueado em ambos os terminais. O ponto desfavorável dessa alternativa é o fato do bloqueio do envio de POTT influenciar na confiabilidade do esquema.

c) Retirada do envio de TDD tripolar ao terminal da SE-MD devido ao trip por fraca alimentação no terminal da SE-VHA juntamente com a retirada do bloqueio do religamento automático pela atuação da lógica de fraca alimentação também no terminal SE-VHA:

Essa ação não representa perda da confiabilidade na lógica, pois a atuação do esquema de fraca alimentação envia o sinal de ECHO para o terminal da SE-MD, mantendo a possibilidade de trip por

recepção de POTT associado à partida da 2ª zona da função 21 nesse terminal. Dessa forma, essa foi considerada a melhor alternativa.

6.0 - CONCLUSÃO

Os ensaios de modelo do religamento automático da LI 500kV MD-VHA 1 foram realizados considerando as diferentes configurações de alimentação na interligação Itaipu/ANDE/Furnas e variação no montante de potência entregue à ANDE devido à característica da interligação. Durante os ensaios foram encontradas deficiências no processo de religamento automático devido às particularidades da interligação Itaipu/Ande, bem como foram identificadas as soluções para esses problemas, com destaque para o comportamento das funções de proteção do terminal de Villa Hayes quando da ocorrência de faltas próximas ao terminal da SE-MD e o seu impacto no processo de religamento.

Os ensaios confirmaram que a alteração realizada no valor do tempo morto de 0,5s para 0,3s, em virtude da temporização adicional no processo de religamento, foi satisfatória e garantiu que o período de tempo com a linha aberta permanecesse dentro do tempo definido nos estudos.

Verificou-se também que para faltas muito próximas à SE-MD a contribuição do terminal da SE-VHA é praticamente nula e desse modo não há grande variação de impedância de modo a permitir sua entrar na característica da 2ª zona da função 21 desse terminal. Esse fato influencia negativamente na ocorrência do religamento automático em ambos os terminais da linha durante faltas próximas ao terminal da SE-MD, pois provoca a atuação da lógica de weak infeed no terminal da SE-VHA bloqueando o religamento e enviando TDD trifásico para o terminal da SE-MD. A recepção de TDD trifásico também bloqueia o religamento automático no terminal da SE-MD.

Durante os ensaios identificou-se que a melhor alternativa para solucionar o bloqueio do religamento automático em ambos os terminais da linha para faltas localizadas próximas ao terminal da SE-MD (0% da linha) será composta de ações que não representam perda da confiabilidade na proteção da LI 500kV MD-VHA 1, a serem realizadas na proteção do terminal da SE-VHA e que são descritas a seguir:

- retirada do envio de TDD tripolar ao terminal da SE-MD devido ao trip por fraca alimentação no terminal da SE-VHA.
- retirada o bloqueio do religamento automático pela atuação da lógica de fraca alimentação no terminal SE-VHA.

Devido ao fato do sistema de proteção da linha ainda se encontrar em garantia, as alterações encontram-se sob análise do fabricante e serão implantadas após sua aprovação.

O trabalho mostra a relevância da validação dos ajustes definidos nos estudos tanto para as funções de proteção, como para o processo de religamento automático e fechamento de anel de linhas de transmissão de sistemas complexos, como o caso da linha LI 500kV MD-VHA 1. Essa validação foi realizada com a utilização de ensaios de modelo a partir da simulação digital em tempo real e em malha fechada, como oferece o simulador RTDS. Alguns dos parâmetros e lógicas definidas conforme os estudos de curto-circuito e de estabilidade, e as regras ditadas pelo manual do fabricante necessitaram ser reavaliados durante os testes. Dessa forma, os ensaios de modelo garantem um aumento na confiabilidade dos ajustes definidos, bem como a confirmação da eficiência e ou otimização das lógicas implementadas nos IEDs.

7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(1) RTDS, Users Manual, Canadá, 2004, p. 2.1.

(2) J. Arrigala, Power system electromagnetic transients simulation, Volume 39, United Kingdom, 2003, p. 123.

(3) Mota Junior, J. B. et al, Definição e Validação dos Ajustes das Proteções das Linhas LI IPU 60Hz-FI considerando o Barramento de 500kV na SE Foz do Iguaçu, XXII SNPTTEE – Brasília 2013.

(4) Technnical Reference Manual RED670 –ABB.

(5) Application Manual RED670 – ABB.

8.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



José Benedito Mota Júnior nasceu em 1966 na cidade de Cristina, sul do estado de Minas Gerais. Recebeu seu diploma de graduação e de Mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Itajubá - Minas Gerais em 1988 e 2002, respectivamente. Trabalha na Itaipu Binacional desde 1989, inicialmente na área de manutenção eletroeletrônica - proteção e controle. Em 1997 passou a trabalhar na área de Estudos Elétricos e Normas do Departamento de Operação do Sistema da Itaipu, atuando em análise de perturbações, cálculos de ajustes de proteção, estudos de RTDS e modelagem de equipamentos para estudos transitórios. Ele é membro do Comitê de Estudos B5 Brasileiro do Cigré.