



## Grupo de Estudo de Proteção, Medição, Controle e Automação em Sistemas de Potência-GPC

### Teste de Simulação em Tempo Real da Proteção Diferencial de uma Subestação em Barramento Triplo Seccionado da CHESF: Relatos, Experiência e Metodologia

**ROBERTO DIAS(1); SAULO SOARES SANTOS(1); EDUARDO ALBERTO DE SOUZA LOPES FILHO(2); PAULO RICARDO LOPES DE NAVARRO COUTINHO(2); ALCINDO JOSÉ DE SOUZA CAMPOS(2); FÁBIO PONTES CAMPANHA(2); BRUNO ALENCAR ARRAES(3); ARTUR BOHNEN PIARDI(4); GUILHERME LOURO JUSTINO(4); RODRIGO BUENO OTTO(4); ESC Engenharia(1);CHESF(2); Siemens (3); FPTI(4);**

#### RESUMO

Este trabalho apresenta os relatos, experiências e a metodologia empregada em um teste de simulação em tempo real, realizado sobre um sistema de proteção de barras a ser instalado na subestação Paulo Afonso da CHESF, com arranjo de barras triplas seccionadas. A complexidade do arranjo, capaz de apresentar-se, pela combinação de seus disjuntores de seccionamento de barras e de interligação, sob 32 configurações possíveis, exigiu, mesmo tratando-se de IED já consolidado no mercado, a realização de testes que confirmassem a capacidade de atendimento às exigências dos PR do ONS, referente aos requisitos mínimos para proteção de barramentos da rede básica, assim como a garantia de seletividade da proteção para essas diversas configurações possíveis, considerando a importância que a instalação desempenha em significativa parte do escoamento da geração Nordeste.

#### PALAVRAS-CHAVE

Simulação em Tempo Real, *Real Time Digital Simulator* (RTDS), Arranjo de Barramento de Subestações, Proteção Diferencial de Barra, Subestação de Barramento Triplo Seccionado

#### 1.0 - INTRODUÇÃO

A subestação (SE) de 230 kV Paulo Afonso III (PAF), da Companhia Hidrelétrica do São Francisco (CHESF), possui 27 vãos e níveis de curto-circuito monofásico e trifásico de 55 kA e 48 kA, respectivamente. Dado a sua grande importância para o sistema de transmissão Nordeste, em especial referente ao papel que desempenha no escoamento da geração proveniente do Complexo Hidrelétrico de Paulo Afonso, o barramento isolado a ar da SE PAF foi projetado e comissionado em arranjo de barra tripla seccionada (B3Sec), a fim de agregar confiabilidade pela redução do risco de desarmes de grandes proporções na SE. Nessa configuração não-convencional de barramento, cada uma das três barras é seccionável por chaves seccionadoras (neste trabalho referenciadas, simplificada, pelo termo "chaves"), aqui denominadas chaves de seção de barras (CSecBs). Além disso, o arranjo ainda conta com dois *ties*, localizados um em cada metade de barramento (seção) resultante do seccionamento, os quais garantem, pela combinação das chaves de interligação (CIntBs) com os disjuntores de interligação de barras (DIntBs) a interligação de barras. Junto com a combinação adequada das CIntBs com os DIntBs, as três chaves seletoras de barras (CSeIBs) de cada vão e suas chaves de by-pass de disjuntores (CBpDs), viabilizam a transferência de qualquer vão para qualquer seção de barra.

Como o arranjo original da SE PAF faz uso de CSecBs, as quais não operam sob carga, os benefícios do emprego de uma proteção de barras (87B) adaptativa não podem ser aproveitados plenamente nesta SE de alta densidade de potência. No sentido de incrementar a confiabilidade da SE PAF, a partir de meados de 2018 foi proposta uma modernização da topologia da SE e iniciado (a) um *retrofit* das CSecBs por *ties* de seccionamento constituídos por

disjuntores isolados a gás (DSecBs) monitorados por dois transformadores de corrente (TCs) sob configuração cruzada, e (b) a instalação de um sistema de proteção diferencial de barras (87B) digital adaptativa, nos termos da subseção 6.5.3 do Submódulo 2.6 dos Procedimentos de Rede (PR) do ONS, a fim de garantir seletividade sob qualquer configuração possível no seu arranjo não-convencional.

Os novos *ties* DSecBs, representados no unifilar da Figura 1 por GIS-B1, GIS-B2 e GIS-B3, combinados aos *ties* de interligação de barras (constituídos pelos DIntBs e ClntBs), representados, na Figura 1, por 14D1 e 14D2 e chaves do tipo 34Dx<sup>1</sup>-1 a 34Dx-4, remanescentes do arranjo original, garantem um espectro de configurações possíveis de operação, que vai desde o comportamento de barra única, com todos os *ties* de interligação (constituídos pelos DIntBs e ClntBs) e de seccionamento (DSecBs) fechados, até a operação sob seis seções de barramentos independentes, a qual garante o máximo de seletividade do esquema, quando todos esses mesmos *ties* estarão abertos. Considerando as demais combinações dos estados dos DSecBs, ClntBs e DIntBs, outras 30 configurações de operação são possíveis, se considerados todos os vãos operacionais.

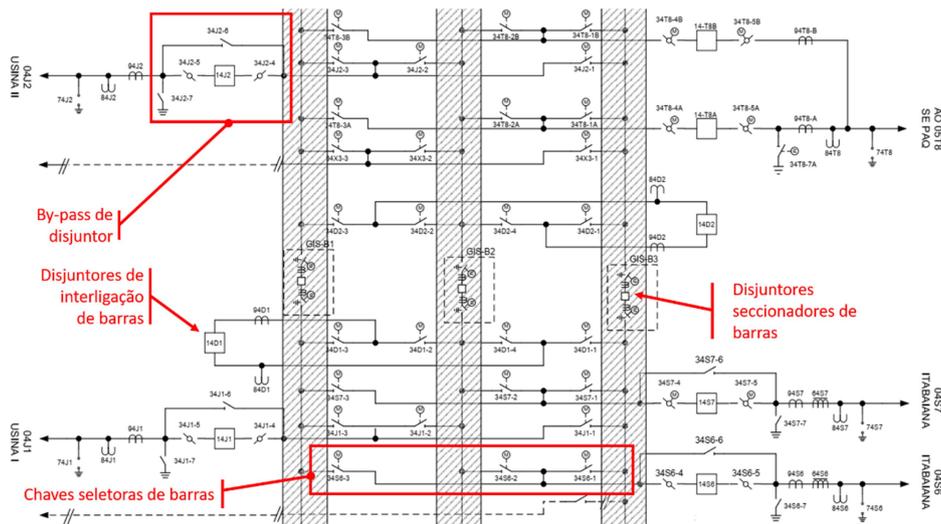


FIGURA 1 – Trecho central do novo barramento da SE PAF.

Devido a esse elevado número de possíveis configurações de operação da SE PAF, é complexa a tarefa de promover os princípios de seletividade e sensibilidade para o sistema de proteção 87B do arranjo de barramento descrito. Assim, foi definido pela equipe de engenharia da CHESF a realização de testes de simulação em tempo real (TSTR), reproduzindo na bancada de testes do LASSE/FPTI-BR, em Foz do Iguaçu/PR, o cenário da arquitetura constituída pelos IEDs (dispositivos eletrônicos inteligentes) SIEMENS<sup>®</sup> SIPROTEC 4 7SS52 (1) definidos no projeto de MPCCSR, de modo a simular as diversas configurações possíveis no esquema de barramento. A arquitetura do sistema de proteção 87B empregado na SE PAF é do tipo distribuída (um unidade central – UC com redundância, e 32 unidades de vão - UV, como apresentado na Figura 2a) e possui algoritmos modernos, como *bus-zone* (BZ), *check-zone* (CZ), estabilização de corrente de restrição, supervisão de saturação de TC, memorização da posição de chaves e algoritmo auto-adaptável para a detecção de defeitos, os quais, por filosofia do fabricante, são fortemente integrados à topologia do barramento, por meio da detecção da posição das CselBs (chaves tipo 34xx-1, 34xx-2 e 34xx-3 da Figura 1) e CBpDs (chaves tipo 34xx-6 da Figura 1), simuladas pelas gigas da Figuras 2b, conectadas ao sistema de proteção sob teste, registradas na Figura 2c, e correntes dos TCs. A montagem da bancada do sistema SIEMENS<sup>®</sup> SIPROTEC 4 7SS52 e gigas, no ambiente de testes do LASSE/FPTI-BR, foi realizada pela ESC Engenharia LTDA.



FIGURA 2 – (a) Bancada dos TSTR no LASSE/FPTI-BR, (b) detalhe das gigas de teste das unidades de vão e central, além da (c) conexão do sistema SIEMENS<sup>®</sup> SIPROTEC 4 7SS52 aos amplificadores da ferramenta RTDS<sup>®</sup>.

<sup>1</sup> “x” é máscara empregada neste trabalho para substituir códigos identificadores de vãos (S6, S7, T8, J2, por exemplo) e disjuntores de transferência (1 e 2, por exemplo), como pode ser visto no unifilar da Figura 1.

## 2.0 - METODOLOGIA DO TSTR

A metodologia do TSTR considerou (a) a montagem em laboratório do sistema de proteção 87B a ser empregado na SE PAF sob as abordagens monofásica (AbMF) e trifásica (AbTF), (b) o *start-up* das simulações para cada abordagem, (c) a exposição do sistema de proteção 87B do sistema SIEMENS® SIPROTEC 4 7SS52 a disparos (*shots*) por atuação da proteção e (d) a análise e discussão dos resultados. Todas as atividades desenvolvidas nos TSTRs aqui descritos, foram registradas no relatório oficial de atividades (2), elaborada pela equipe CHESF quando da finalização dos trabalhos no LASSE/FPTI-BR e após aprovação da ata de reunião de aceitação dos testes.

### 2.1 Abordagens monofásica e trifásica

Na AbMF, cerca de 150 *shots* foram realizados de modo a viabilizar uma análise global considerando todos as 32 UVs conectados à UC, fiados monofasicamente, a fim de verificar-se a atuação de binárias de saída, análise de registros oscilográficos e de sinalizações. A análise conduzida por AbMF, com esquemático apresentado na Figura 3b, teve característica qualitativa, permitindo mapear o comportamento dos principais algoritmos dos IEDs para defeitos internos nas diversas seções de barramento, nas zonas-mortas, externos com ou sem saturação de TCs, decorrentes de chaveamento sob falta ou de religamentos automáticos com ou sem sucesso, defeitos evolutivos de externos para internos e considerando a falhas de disjuntores. A AbTF, como apresentado na Figura 3a, foi conduzida com aproximadamente outros 1320 *shots* e, diferentemente do AbMF, teve viés predominantemente quantitativo, de modo a viabilizar a análise estatística com fins de avaliação de tempos de atuação da proteção, como tempos de *trips*, de atuação de falha de disjuntor, de TDDs (Transferência Direta de Disparo) e de *inter-trips*, principalmente; permitindo o confronto com as especificações técnicas dos IEDs empregados e atendimento às exigências dos Procedimentos de Rede do ONS associados aos requisitos mínimos para proteção de barramentos da rede básica.

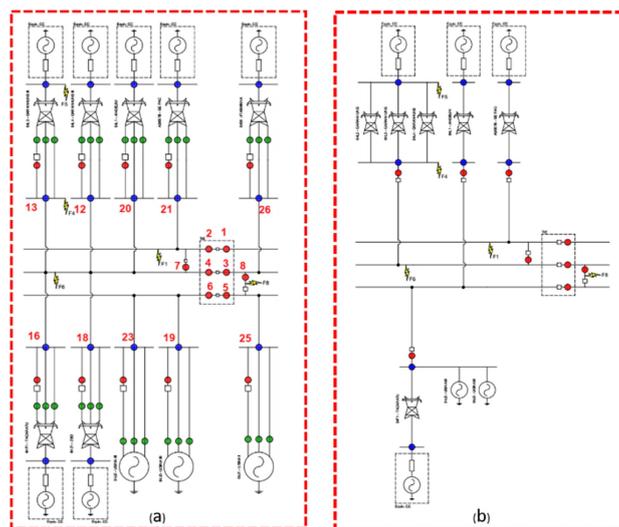


FIGURA 3 – (a) Configuração trifásica de testes e (b) configuração monofásica da bancada do TSTR, implementada no RSCAD® (*software* proprietário do RTDS®, ferramenta empregada pelo LASSE/FPTI-BR para realização do TSTR).

### 2.2 *Start-up* das simulações

O processo de posta em marcha das simulações para a AbMF e a AbTF consistiu (a) na validação das polaridades dos TCs virtuais modelados pela monitoração das correntes dos vãos, e (b) na adequação da lógica do 7SS52 para tratar as CBpDs.

#### 2.2.1 Validação das polaridades dos TCs virtuais da modelagem

Para a verificação das polaridades dos TCs modelados, representados no RSCAD® por pontos de medição direcionais, foi realizada injeção de corrente vão-a-vão, ou seja, um primeiro vão escolhido como vão de referência (dito vão fixo) sofria injeção de corrente e, com  $(n - 2)$  vãos abertos, o sinal era “coletado” em um segundo vão (dito vão variável). A escolha do vão variável era estratégica e visava, sempre, o estabelecimento de percursos constituídos por, pelo menos, dois TCs virtuais (pontos de medição direcionais do RSCAD®). Com a corrente estabelecida, os valores de  $I_{diff}$  e  $I_{stab}$  dos algoritmos BZ e CZ apresentados na tela de topologia do sistema SIEMENS® SIPROTEC 4 7SS52 na Figura 4, eram analisados e a partir da coerência de valores apresentada,

esperada com base na filosofia de proteção diferencial percentual (3), eventuais inversões de polaridades eram identificadas e corrigidas.

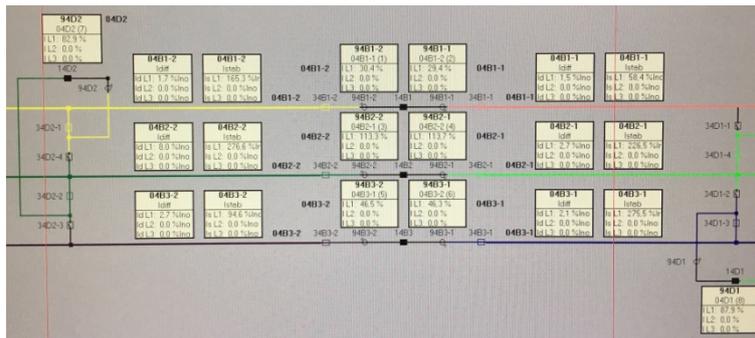


FIGURA 4 – Monitoramento das correntes (de linha,  $I_{diff}$  e  $I_{stab}$ ) dos vãos e setores, para *start-up* dos das simulações.

## 2.2.2 Adequação das lógicas

As configurações barra principal – barra de transferência (BPBT) e barra dupla a quatro chaves (BD4C), comuns na CHESF em SEs com nível de tensão de 230 kV, possuem chaves de *by-pass* de vão, isto é, chaves montadas com um terminal conectado ao vão, e o outro diretamente à barra. Diferentemente do BPBT e BD4C, o arranjo de barras da SE PAF possui vãos com a CBpD “bypassando” diretamente os disjuntores do vão, ou seja, seus terminais são conectados aos terminais das chaves isoladoras de disjuntor (CIsosDs), chaves do tipo 34xx-4 e 34xx-5, e das CSelDs, como se pode verificar no unifilar da Figura 1, tal como o esquema de barra dupla a cinco chaves (BD5C). A ausência dessa conexão direta com a barra por pelo menos um de seus terminais das CBpDs no arranjo B3Sec da SE PAF, exigiu a personalização, pela SIEMENS®, de implementação que tornasse o 87B funcional considerando a realidade do arranjo de barras da SE. Para isso, para cada vão, lógicas como a [1] e [2], apresentadas na Figura 5, foram desenvolvidas, com o objetivo de prevenir possível erro de interpretação do sistema SIEMENS® SIPROTEC 4 7SS52, uma vez que esse IED trata, por padrão, toda chave inserida no *Plant Configuration* do DIGSI 4® com intenção de realizar *by-pass*, como sendo chaves de *by-pass* de vão, tais quais as dos arranjos BPBT e BD4C, que no âmbito deste sistema denominam-se “*Bus Disconnector*”.

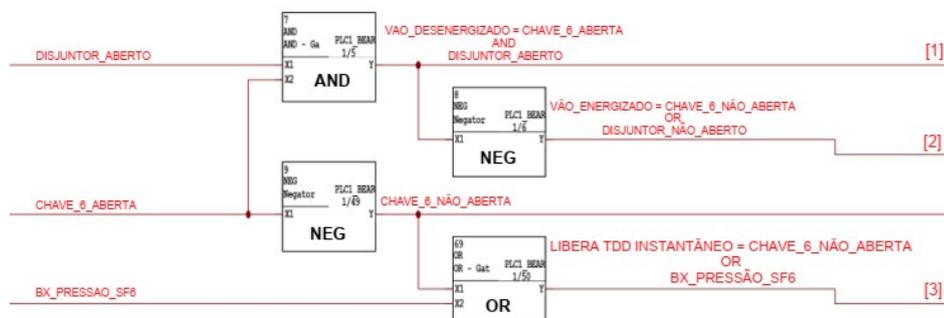


FIGURA 5 – Lógicas desenvolvidas pela SIEMENS®, durante os TSTRs, com classe de prioridade FAST PLC *Processing* no componente DIGSI CFC (Adaptado).

Na prática, então, a topologia do 87B sob análise foi desenvolvida no *Plant Configuration* do DIGSI 4® com as lógicas [1] e [2] (ver Figura 5) sendo executadas com classe de prioridade FAST PLC *Processing* no ambiente CFC (*Continuous Function Chart*) do software DIGSI 4® (4), a fim de não introduzir, pela leitura das novas instruções lógicas, atrasos nos tempos de atuação da proteção 87B. Ressalta-se que as lógicas [1] e [2] da Figura 5 se fazem necessárias para definir para o SIEMENS® SIPROTEC 4 7SS52, via lógica customizada pelo usuário, a função de *by-pass* do disjuntor pelos CBpDs do arranjo B3Sec da SE PAF, cuja modelagem não é disponível na biblioteca *built-in* do *Plant Configuration* do software DIGSI 4®. Referente a lógica [3] (ver Figura 5), ela foi exigível, no contexto definido pelas equações booleanas [1] e [2] já propostas, para evitar a inconsistência de enviar-se, desnecessariamente, um TDD instantâneo para o terminal remoto sem que a condição de vão transferido ou baixa pressão de gás estivessem em curso.

Para validar as lógicas [1] a [3] da Figura 5 nos testes realizados na plataforma de simulação em tempo real, foram reservados aproximadamente 20 *shots* considerando as condições críticas ilustradas na Figura 6, a saber:

- Curto-circuito interno com disjuntor do vão com *by-pass* em curso, quando da evolução da sequência de eventos de (a) a (c) apresentados na Figura 6;
- Curto-circuito interno com vão transferido, quando da evolução da sequência de eventos de (d) a (e)

- apresentados na Figura 6;
- Curto-circuito interno nas diversas barras com o vão normal, quando da evolução da sequência de eventos de (f) a (g) apresentados na Figura 6.

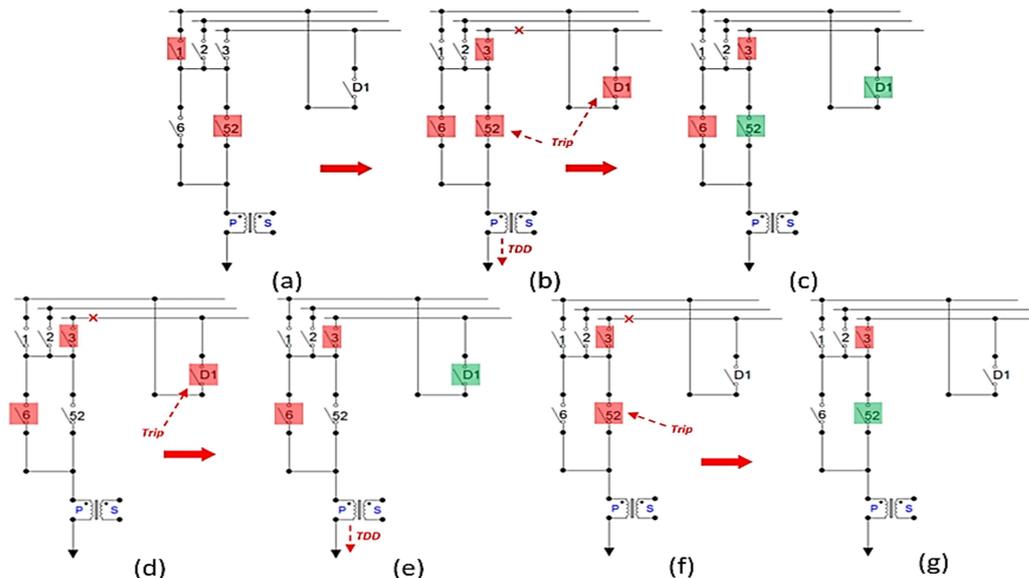


FIGURA 6 – Condições críticas definidas para validação das lógicas implementadas pela SIEMENS®, indicadas na Figura 5.

### 2.3 Exposição do sistema de proteção 87B da SE PAF aos disparos do TSTR

Consistiu na execução dos TSTRs propriamente ditos, objetos do artigo em questão, referente aos quais um rol de eventos severos, previamente definidos e elencados na Tabela 1, foram simulados ao longo de duas etapas (AbMF e AbTF) considerando cenários os mais realísticos possíveis, por exemplo, considerando as presenças de: resistências de falta, ângulos de incidência de defeitos variados, diversas topologias de curtos-circuitos (para a AbMF apenas defeito fase-terra foram considerados) e condições de fluxo de carga extremas.

TABELA 1 – Rol de eventos aplicados ao unifilar da Figura – (b) para a AbMF.

T1-Energização	T6-Interna com BF + CC em F6	T11-Ext relig s/ sucesso	T16-SOTF sat TC
T2-Energ sob falta	T7-Externa	T12-Evo int-ext 1/2 ciclo	T17-Interna tie aberto (CC em B3)
T3-Internas	T8-Externa com BF(partida ext)	T13-Evo int-ext 1/4 ciclo	
T4-Interna sat TC	T9-Externa sat TC	T14-Dead zone	
T5-Interna tie aberto	T10-Ext relig c/ sucesso	T15-SOTF	

#### 2.3.1 Etapa de TSTRs sob AbMF

Com foco qualitativo, objetivando confirmar as atuações e sinalizações resultantes com as esperadas, assim como validar a bancada para para a AbAT, a AbMT foi conduzida por meio da análise das partidas, *trips* e sinais analógicos de corrente, pela equipe de engenharia da CHESF, registrados nos arquivos da oscilografia em formato COMTRADE extraída da UC, gerada da aplicação dos 150 *shots* pelo RTDS®, em diversos pontos da Figura 3 – (b). Os comportamentos esperados para cada evento da Tabela 1 eram previamente listados e comparados com os *tops* digitais (partidas e *trips*) e dinâmica dos sinais de corrente registrados. Dessa metodologia de análise, as lições aprendidas foram registradas em relatório, com o objetivo de viabilizar uma abordagem proativa em testes futuros de mesma natureza.

Lições relevantes, decorrentes da análise de nuances dos algoritmos do SIEMENS® SIPROTEC 4 7SS52, foram aprendidas com a realização dos testes do sistema de proteção da SE PAF sob AbMF. A título de exemplo, três delas são relacionadas a seguir, com o objetivo de ratificar a importância dessa análise qualitativa preliminar no TSTRs:

- A análise das oscilografias dos *shots* especificamente associados à faltas externas não-evolutivas (eventos T7 a T10, ver Tabela 1), por exemplo, evidenciou divergência entre os níveis de curto-circuito esperados com os apresentados. A equipe do LASSE/FPTI-BR identificou que se tratava de divergência inerente ao modelo implementado no RSCAD®, que faz uso de “transformadores de interligação” com reatância indutiva própria de 0,1% (mínimo valor permitido pelo *software*) para acoplar, no ambiente de simulação, os dois racks amplificadores do RTDS® empregados, necessário para acomodar o elevado número de nós necessários para

a modelagem da SE PAF com o nível de detalhes requerido. Na prática, as correntes acabam sendo discretamente menores do que as levantadas no ANAFAS<sup>®</sup> (5), devido a presença dessa reatância que não existe fisicamente na SE. Como a presença da reatância afetava todas as correntes dos vãos indistintamente, a CHESF definiu como aceitável a divergência.

- b. A exposição da proteção 87B sob teste a curtos-circuitos evolutivos, de externos para internos em  $\frac{1}{2}$  ciclo (evento T12a, ver Tabela 1), sensibilizou o algoritmo diferencial levando ao *trip*, mas com tempos médios de extinção de defeitos superiores aos 100 ms requeridos pelo Procedimento de Redes vigente do ONS. Da análise, a SIEMENS<sup>®</sup> concluiu que a mudança de sentido experimentada pela corrente de defeito monitorada pelo sistema SIEMENS<sup>®</sup> SIPROTEC 4 7SS52, na transição do curto externo para o interno, introduz um incremento de tempo de processamento na extinção do defeito, decorrente da necessidade de seleção do critério de identificação de defeito a ser empregado (1-de-1, 2-de-2 ou Fourier) (1), sendo recomendado, para acomodar curtos-circuitos evolutivos, por filosofia de graduação, ajustar-se um fator-k, que no 7SS52 é o *slope* da curva  $I_{diff}$  versus  $I_{stab}$  (1), mais sensível, prática adotada para os demais testes. Os casos com tempo médio elevado de extinção de defeito (aproximadamente 100 ms) foram rodados novamente e sofreram redução para tempos médios de aproximadamente 77 ms.
- c. Nos casos de defeitos internos em alguma das barras interligadas por um DIntB sob falha (evento T6, ver Tabela 1), mesmo com a sensibilização do sistema SIEMENS<sup>®</sup> SIPROTEC 4 7SS52, foi observado nos testes sob AbMF um retardo médio de 24 ms entre o *intertrip* enviado para o DIntB falho, e o *trip* diferencial enviado aos DSecB e disjuntores dos vãos interligados pelo DIntB, mas não envolvidos diretamente no curto. Ao se analisar a pertinência do retardo em questão em conjunto com a SIEMENS<sup>®</sup>, foi constatada estratégia de atuação inerente ao algoritmo do sistema SIEMENS<sup>®</sup> SIPROTEC 4 7SS52 que, ao provocar um desequilíbrio de corrente diferencial para “induzir” o desligamento da segunda barra interligada pelo DIntB, introduz tempo de processamento adicional. Nas demais situações de falha de disjuntor de vão, o *delay*, como esperado, não se mostrou presente, já que nenhuma indução de corrente diferencial por parte do sistema SIEMENS<sup>®</sup> SIPROTEC 4 7SS52 era exigível, sendo as aberturas triviais (demais vãos na mesma barra do disjuntor em falha e respectivo DIntB) suficientes para impedir a alimentação do defeito.

Além das análises até aqui apresentadas, outras foram realizadas entre os 150 *shots* previstos sob AbMF, a saber: defeito em zona morta (em disjuntor de vão e de interligação), defeitos (internos e externos) com saturação de TCs, defeitos externos com religamento automático (com e sem sucesso), SOTF (*Switch-On-To-Fault*) e defeitos das condições críticas de teste reproduzidas na Figura 6, para validação das lógicas implementadas pela SIEMENS<sup>®</sup>. Para o desenvolvimento dessas análises, cada um dos resultados dos 150 casos simulados eram processados individualmente pela equipe de engenharia da CHESF, atividade que, especialmente na primeira metade desse quantitativo de disparos fluíu de forma um pouco mais lenta, já que muitos casos nessa etapa necessitavam ser refeitos para os ajustes de polaridades, ajustes de modelagem e, principalmente, para a validação das já referidas lógicas customizadas. Assim, se por um aspecto a duração da AbMF ultrapassou o período planejado no cronograma original de testes, por outro, a confiança da equipe de análise na bancada de testes para a condução dos demais 1320 *shots* da AbTF foi reforçada.

### 2.3.2 Etapa de TSTRs sob AbTF

Em detalhe, a AbTF consistiu na realização de um rol de 1320 *shots* distribuídos entre os eventos da Tabela 1 e considerando diferentes tipos de falta (AT, AB, ABC), sob distintos ângulos de incidência de defeito (0, 45 e 90°) e com e sem resistência de falta; considerando a barra da SE PAF com alguns vãos fora de operação, em quantidade suficiente para a acomodar a quantidade máxima de nós trifásicos permissível na atual plataforma RTDS<sup>®</sup> presente no LASSE/FPTI-BR. Desta forma, diferentemente da AbMF, a AbTF foi conduzida por bateladas, isto é, dado a quantidade razoável de *shots* disponíveis, cada evento (considerando as variações de tipo, ângulo e resistência de faltas) eram simulados, e seus resultados tabelados, várias vezes, de modo a viabilizar a realização de uma estatística, agora, envolvendo os tempos de processamento ou do algoritmo adaptável ( $t_{alg}$ ), de 10 a 30ms, em função do algoritmo sensibilizado, tempos de 50/62BF-TDD (ou *intertrip*) ( $t_{mltph}$ ), ajustado em 150 ms, atraso introduzido no *trip* pela comutação da binária de saída (BO) ( $t_{delay}$ ) e tempo de *retrip* ( $t_{retrip}$ ), ajustado e 120 ms.

A Tabela 2 é apresentada como planilha de registro de parte dos resultados obtidos quando da AbTF (outras três tabelas, considerando outros três conjuntos – denominadas configurações, no âmbito dos TSTRs – de locais de defeito, estão presentes no relatório do TSTR em questão). Nela foram registrados todos os instantes médios e média das composições de intervalos de tempo ( $t_{alg}$ ,  $t_{mltph}$ ,  $t_{mltph}$ ,  $t_{delay}$  e  $t_{retrip}$ ) calculados a partir das informações provenientes das simulações em *batch*, tabeladas por *scripts* desenvolvidos pela equipe do LASSE/FPTI-BR a partir dos *triggers* do RTDS<sup>®</sup>. Informações relevantes para a avaliação do sistema de proteção sob teste também podem ser extraídas desses resultados, por exemplo, quais vãos (BUs indicadas na primeira linha da tabela) sofreram *trip* quando da aplicação de defeitos nas localizações F1 a F8 (coluna DEFEITO) considerando os diversos eventos (coluna TESTE), bem como a resposta, em termos de tempos de atuação, aos eventos de aplicação de defeitos. Pode ser visto, como exemplo, que para defeitos na zona morta do DIntB que interliga as barras 2 e 3 (T8 em F8), tipicamente, os disjuntores associados às UVs 5, 6, 8 e 28 sofreram *trip* diferencial em



Uma análise comparativa dos valores médios calculados para as diversas configurações foi realizada e apresentada através do gráfico da Figura 7, indicando, pela sobreposição das curvas correspondentes a cada configuração no gráfico de teia indicado, a coerência do comportamento do sistema de proteção de barras da SE PAF, mesmo tendo sido submetida a defeitos de vários tipos (simétricos, assimétricos, com/sem resistência de falta, sob diversos ângulo de incidência e cenários de carga), sob diversas configurações (nas condições normal e transferida, considerando saturação de TC, evolutivos e não-evolutivos de externo para interno, considerando disjuntores sob falha, do tipo zona morta, etc) e em uma diversidade significativa de locais possíveis, inclusive os críticos) na zona de proteção do 87B.

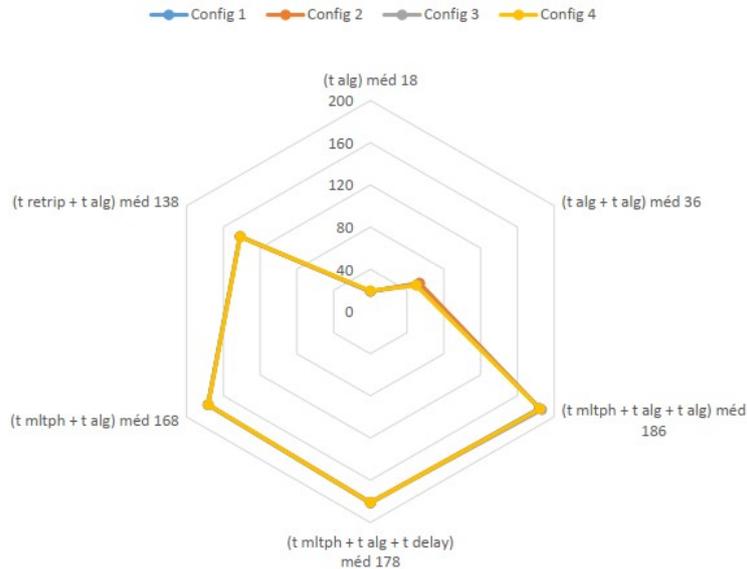


FIGURA 7 – Gráfico de teia para avaliação da coerência entre os resultados dos TSTRs considerando as configurações 1 a 4 adotadas na AbTF.

### 3.0 - CONCLUSÃO

Por meio da análise dos resultados apresentados nos TRST, conduzidos no RTDS<sup>®</sup> de propriedade e sob operação do LASSE/FPTI-BR para avaliação do sistema de proteção 87B a ser aplicado na proteção da SE PAF da CHESF, conclui-se que o sistema SIEMENS<sup>®</sup> SIPROTEC 4 7SS52 apresentou desempenho satisfatório na proteção do complexo arranjo em barra tripla seccionada (B3Sec).

O autores entendem que a metodologia adotada, baseada na divisão dos trabalhos de simulação nas abordagens monofásica e trifásica (AbMF e AbTF), foi responsável pela clareza das análises, isso porque a análise acurada caso-a-caso da AbMF viabilizou o conhecimento de nuances do sistema de proteção empregado e do sistema elétrico modelado, assim como promoveu a sinergia da equipe de engenharia envolvida nos testes, conferiu sensibilidade aos eventos simulados e, em termos de legado para o restante dos testes, garantiu uma bancada de simulação ajustada, em decorrência das lições aprendidas. Já o caráter sistemático da AbAT trouxe tecnicidade ao ambiente do TSTR, traduzindo em números, comportamentos experimentados pelo sistema de proteção sob teste, revelado apenas de forma qualitativa nas etapas antecedentes.

Por fim, recomenda-se como proposta futura de desenvolvimento a formalização dessa metodologia de testes de proteção diferencial de barra em casos de realização de TSTR de IEDs para emprego em subestações com arranjos complexos de barramentos e com um número significativo de vãos.

### 4.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) SIEMENS, Manual SIPROTEC Distributed Busbar/Breaker Failure Protection 7SS522, 7SS523 e 7SS525, v4, Nuremberg, 2014.
- (2) ZIEGLER, Gerhard. Numerical Differential Protection: Principles and Applications. Ed. Siemens. Erlangen, 2005
- (3) CHESF, Relatório de Atividade – Teste de RTDS do IED 7SS52 ref. a SE PAF, Recife, 2018.
- (4) SIEMENS, Manual DIGSI CFC, v4.87, Nuremberg, 2012.
- (5) CEPEL, ANAFAS – Análise de Falhas: Manual do Usuário, versão 7.2.0, Rio de Janeiro, 2017.

## 5.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



**Roberto Feliciano Dias Filho** é engenheiro eletricitista (UPE, 2003), mestre (UFPE, 2011) e doutor (UFPE, 2015) em Engenharia Elétrica. Como engenheiro na ESC Engenharia, é responsável pela promoção e acompanhamento da inovação nos setores de projetos, estudos e testes da empresa. É professor adjunto do curso de engenharia elétrica da UPE, onde leciona e pesquisa nas áreas de proteção e automação de sistemas elétricos e aplicações de sistemas de controle em acionamento de máquinas elétricas e fontes alternativas.

**Saulo Soares Santos** é graduado em Engenharia Elétrica (UPE, 2004) e Sócio Diretor da ESC Engenharia, onde dirige técnica e comercialmente as gerencias de Projetos (Elétrico, Civil e Eletromecânico), de Estudos, de Sistemas Supervisórios e de Commissionamento. Tem experiência em desenvolvimento e implantação de Sistemas de Proteção, Controle, Supervisão, Medição e Automação de Subestações de Energia de 69kV a 500kV voltados aos setores de geração, transmissão e distribuição.

**Eduardo Alberto de Souza Lopes Filho** é graduado em Engenharia Elétrica com ênfase em Sistemas de Potência (UFPE, 2011). Atualmente trabalha no corpo de engenharia da Companhia Hidro Elétrica do São Francisco - CHESF na área de novos projetos de sistemas de proteção e controle.

**Paulo Ricardo Lopes de Navarro Coutinho** é graduado em engenharia elétrica na Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campina Grande, Paraíba, Brasil, em 2002 e Mestre (UFCG, 2012). Trabalha na companhia hidroelétrica do São Francisco, CHESF, na área de engenharia de Medição, Controle, Proteção e Supervisão de usinas e subestações. Atualmente, ocupa cargo de gerente do Departamento de Commissionamento e Automação.

**Alcindo José de Souza Campos** é graduado em Engenharia Elétrica (UFPE, 1980) e tem especialização em proteção (UFPE). Tem 38 anos como Engenheiro da Chesf onde já atuou na Manutenção de Sistemas de Medição e Regulação, na Manutenção de Sistemas de Proteção e na Graduação do Sistema de Proteção da Transmissão. Gerenciou a Divisão Regional de Transmissão de Paulo Afonso e atualmente é o Gerente do Departamento de Proteção da Chesf.

**Fábio Pontes Campanha** é graduado (UPE, 2001) e especialista (UNIFEI, 2013) em Engenharia Elétrica. Já trabalhou na Koblitz nas atividades de Commissionamento e Orçamentos e no ONS operador de sistema. Hoje, como coordenador do setor de Análises de Perturbação, desempenho das proteções, testes e comissionamentos na Chesf-Eletróbrás.

**Bruno Alencar Arraes** é engenheiro eletricitista (UNESP, 2004), pós-graduado em Formação de Professores para o Ensino Superior (UNIP, 2014) e em MBA em Gestão de Projetos (Anhanguera-Uniderp, 2014). Trabalhando desde 2011 na SIEMENS Brasil, é engenheiro especialista em aplicação sendo responsável técnico pelos dispositivos SIPROTEC no Brasil através da Área de Vendas de Produtos de Automação em Energia. Trabalhou na ELTMAN (2010-2011), na GE Energy – GEVISA (2008-2009) e na Actual CPMI (2005-2008).

**Artur Bohnen Piardi** é graduado (UNIOESTE, 2012) e doutor (USP, 2017) em Engenharia Elétrica. Atualmente é pesquisador no Laboratório de Automação e Simulação de Sistemas Elétricos (LASSE) da Fundação Parque Tecnológico Itaipu - Brasil (FPTI-BR). Suas áreas de interesse estão concentradas em análise, proteção e controle de sistemas elétricos.

**Guilherme Louro Justino** é graduado em Engenharia Elétrica (UNIOESTE, 2011) e mestrando em Engenharia Elétrica (UNIOESTE, 2020). Atua como engenheiro no Laboratório de Automação e Simulação de Sistemas Elétricos (LASSE) da Fundação Parque Tecnológico Itaipu - Brasil (FPTI-BR). Suas áreas de interesse estão concentradas em proteção e simulação em tempo real de sistemas elétricos.

**Rodrigo Bueno Otto** é graduado em Engenharia Elétrica (UFPR, 2009), mestre em Engenharia de Energia aplicada a Agricultura (UNIOESTE, 2015) e doutorando em Engenharia Elétrica (USP, 2020). Atualmente é gerente do Laboratório de Automação e Simulação de Sistemas Elétricos e diretor do Instituto de Tecnologia Aplicada a Inovação - ITAI. Suas áreas de interesse estão concentradas em microrredes e controle de sistemas elétricos.