



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

ESTUDO E SIMULAÇÃO DE PROTEÇÃO DE ZONA MORTA EM SUBESTAÇÃO DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

**RODRIGO NIEDERAUER DA SILVA(1);
CEEE-GT(1);**

RESUMO

Este trabalho apresenta a resposta da proteção para curtos-circuitos em zona morta de proteção, região entre o DJ e o TP na LT CIN C1 na SE NSR, onde faltas nesse ponto são eliminadas por retaguarda remota, através do relé de distância em tempos de segunda zona, não atendendo o procedimento de rede do ONS e a portaria do MME em tempos atuais. Dessa forma será avaliada faltas nessa zona, através da modelagem da LT no *software ATPDraw*, e posterior modelagem do relé de proteção de zona morta, demonstrando os benefícios da inclusão dessa proteção e servindo de base para estudos e simulações.

PALAVRAS-CHAVE

Zona morta de proteção, curto-circuito, relé de distância, relé diferencial, *ATPDraw*.

1.0 - INTRODUÇÃO

Certas faltas podem ocorrer em zonas críticas conforme a configuração e disposição das chaves e disjuntores em uma subestação de energia, de modo que os dispositivos de proteção podem não detectar ou identificar esses defeitos, não o isolando de forma correta, deixando o sistema elétrico vulnerável, podendo levar a interrupções no fornecimento de um número maior de consumidores ou ainda a maiores danos nos equipamentos das subestações e nas linhas de transmissão.

Nesse contexto, o presente trabalho tem por objetivo investigar faltas na zona morta de proteção, região entre o transformador de corrente (TC) e o disjuntor (DJ), na subestação Nova Santa Rita (NSR), parte de 230 kV, na LT Cidade Industrial (CIN) Circuito (C) 1. No primeiro momento será modelado os relés 21 em ambos os lados da LT e 87B adaptado à somente essa LT, simulando situações de curtos-circuitos em toda extensão da LT, até o ponto de zona morta de proteção, após esta etapa validar a modelagem com os valores de Curtos-circuitos já modelados no *software ASPEN OneLiner* pela CEEE-GT. Com isso analisar o comportamento dos relés de distância a essas faltas com as proteções já existentes e depois com a inclusão de proteção de zona morta, visto que nesta SE não dispõe da mesma nos módulos de 230 kV. A modelagem será através do *software Alternative Transient Program (ATPDraw)*, utilizando-se de recursos atuais de fabricantes de relés.

Esse trabalho se baseia nos requisitos mínimos que devem ter os sistemas de proteção em subestações da rede básica que consta no módulo 2 do procedimento de rede do ONS e na portaria do Ministério de Minas e Energia (MME) de nº 576, de 31 de outubro de 2012, onde ditam que todos os componentes da instalação devem possuir funções de proteção unitárias, com sobreposição de zonas ou lógicas adicionais para zonas mortas e se todas as faltas na instalação são eliminadas por atuação de proteções unitárias, sem necessidade de atuação das proteções de retaguarda remota. [1; 2].

(*) Rua Joaquim Porto Vilanova, n° 210 – Bairro Jardim Carvalho – CEP 91.410-200 Porto Alegre, RS – Brasil
Tel: (+55 51) 3027-6290 - (+55 51) 99653-9393 - Email: rodrigo.silva@ceee.com.br; ro.dns@hotmail.com

2.0 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A proteção de barramento e linhas de transmissão podem incluir esquemas especiais para eliminar faltas em zona morta através de *trips* seletivos aos DJs localizados nas zonas adjacentes, onde falhas entre TCs e DJs são falhas de linha observadas pela medição, mas são falhas de barramento no ponto de vista do local da falha, devido os sistemas de proteção não distinguirem a diferença quando o DJ está fechado e em condições normais de operação não podem ser extintas instantaneamente quando o DJ da zona de defeito está aberto. [3].

Para o caso em que o TC está entre o barramento e o DJ e a falta está no ponto marcado conforme Figura 1 - (a) o referido DJ será aberto pela proteção de linha e a falta vai persistir devido ainda estar sendo alimentada pelo barramento e fora da zona de proteção do mesmo. Uma solução para extinção da falta é confiar na função BF, onde é iniciada a partir da abertura do DJ e como continuará passando a corrente de falta pelo TC, o tempo programado expira e manda *trip* para todos os DJs da zona do barramento. Essa aplicação do BF requer que o mecanismo de medição do relé verifique o sinal de corrente e não somente o sinal de posição do DJ. [3].

Uma segunda solução é alterar o limite da zona, ou seja, removendo a corrente do TC-2 da zona de medição da proteção diferencial do barramento quando o DJ se abre, conforme a Figura 1 - (b), colocando um atraso de 2 ciclos para permitir que as medições de corrente do 87B sejam redefinidas logo que a própria corrente sair dos cálculos, expandindo assim a zona do barramento até os polos abertos do DJ, sendo uma solução moderna, permitindo que o relé de 87B atue após aberto o DJ da LT, como mostra a Figura 1 - (c). Esse esquema de expansão da zona do barramento até o DJ aberto é equiparado à função BF, com diferença que se a falha ocorrer e o DJ estiver aberto, terá um pequeno atraso em relação ao BF, e contida na zona do barramento, independente dos elementos de linha e do relé da função BF. Importante ressaltar é o atraso extra na eliminação da falta, que além do tempo de abertura do DJ, tem o atraso da lógica; e que a medição de corrente do TC-2 deve ser automaticamente incluída nos cálculos do diferencial instantes antes que o DJ seja fechado, com auxílio de supervisão de comando do DJ. [3; 5].

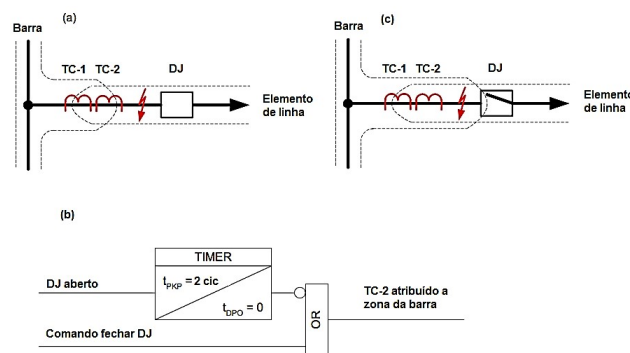


Figura 1 - Considerando TC no lado da barra. [3]

A Figura 2 mostra como na Figura 1 como funciona a expansão e atuação do 87B. Como o 87B verifica se há diferença de corrente entre o I_T e a soma das demais correntes I_1 , I_2 e I_3 , enquanto estiver na soma dos cálculos a corrente I_3 no TC-2, medindo a corrente de defeito, não vai haver diferença, mas quando retira dos cálculos do diferencial I_3 , I_T vai ser diferente da soma de $I_1 + I_2$, pois a corrente de defeito ainda está no I_T . Dessa forma o 87B manda *trip* para os DJ 52-1, 52-2, 52-3, eliminando as possíveis fontes de tensão do barramento.

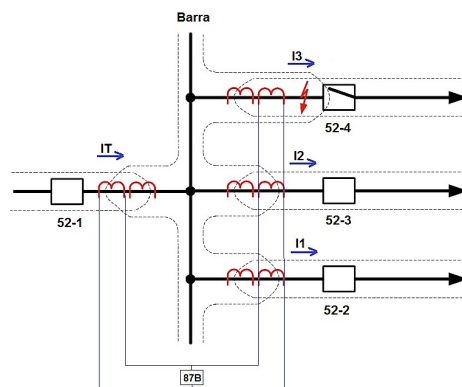


Figura 2 - Expansão da zona do barramento com TC no lado da barra¹

¹ Elaborado pelo autor.

Outra forma é aplicar a mesma lógica da Figura 1 - (b) no relé de linha, usando uma função de sobrecorrente instantânea que supervisiona a corrente do TC-1, que percebendo corrente com DJ aberto manda *trip* para todos os DJs do barramento. [3].

Quando instalado o TC somente no lado da LT, a falha entre TC e o DJ, ver Figura 3 - (a) e Figura 3 - (c), não terá atraso pela proteção do barramento, pois a falha agora está na zona do mesmo, sendo removida como tal, através de disparo da função BF, iniciado pela proteção de barras, semelhante ao caso do TC do lado do barramento já mencionado, não sendo seletivo, porque os DJs do barramento são todos abertos, sendo que o ideal que esse defeito não desse *trip* aos elementos que não estão com falha. Como o defeito está na zona morta a falha vai permanecer e só será extinguida em tempos de segunda zona pelo 21 remoto, como já comentado, salvo se o relé diferencial dispôr de função específica para esse tipo de defeito. A exemplo de relés 87B atuais que incluem a função *End fault protection (EFP)*, que ao detectar que o DJ está aberto, supervisiona com um relé de sobrecorrente a corrente ainda passante entre o TC e o DJ, ver Figura 3 - (b), em caso positivo, a proteção atua disparando um TDD para a extremidade remota do circuito; e logo desabilitada a função assim que receba comando de fechamento do DJ.

Esse método também pode ser útil quando o circuito apresenta um gerador, detectando o defeito e desconectando-o do sistema, mostrando que o defeito não é no mesmo e sim na zona morta, deixando o gerador apto para entrar em serviço logo que falta seja removida. De forma diferente o relé de linha com função de sobrecorrente, supervisiona o defeito entre TC e o DJ e aciona o BF, disparando tanto os DJs dos módulos ligados ao barramento e também os remotos. A vantagem é que a magnitude da falha não tem grandes proporções, pois é removida rapidamente; mas a seletividade desse sistema de proteção ainda não é o ideal, mas aceitável, mesmo que o 87B desligue todos os DJs ligados ao barramento para um defeito de linha, visto que estudos do sistema apresentam raridade para faltas em zona morta, mas não devendo ser desconsiderados. [3; 5].

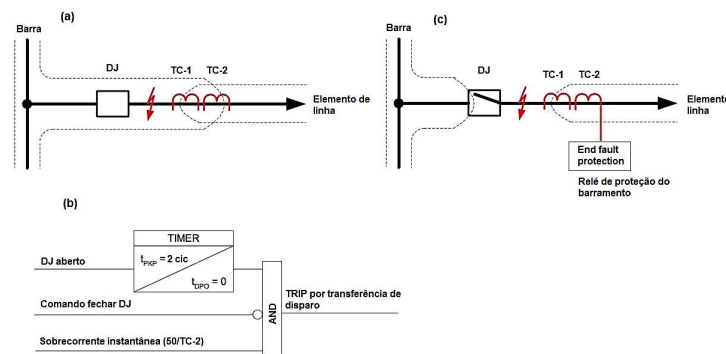


Figura 3 - Considerando TC somente no lado da linha. [3].

3.0 - METODOLOGIA

Nesta seção apresenta a simulação, através da modelagem no *software ATPDraw*, de faltas na LT até a sua zona morta de proteção, demonstrando a dinâmica das proteções de distância e de diferencial do barramento, no início a proteção com sua configuração original e depois com inclusão de proteção de zona morta. A metodologia para alcançar o objetivo deste trabalho, se dará a partir de procedimentos, coletas de dados e técnicas de análise conforme o fluxograma da Figura 4.

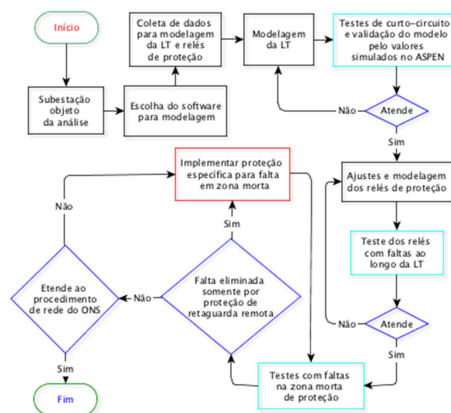


Figura 4 - Fluxograma da metodologia.²

² Elaborado pelo autor.

3.1 Sistema de proteção da LT CIN C1 e ponto de zona morta

A LT CIN C1 assim como os demais circuitos de responsabilidade da CEEE-GT na SE NSR dispõe de relés 21, 21N, 27, 59, 62 BF, 67N, 79, 85, SOTF e 87L, com configuração de TCs após o DJ.

A Figura 5 apresenta uma falta na zona morta na LT CIN C1 em NSR, onde a corrente de curto-circuito está com potência total, sendo fornecida pela contribuição de NSR e CIN.

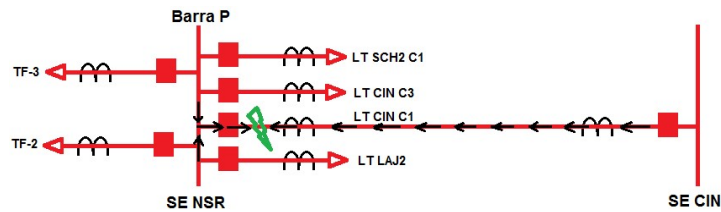


Figura 5 - Falta em zona morta na LT CIN C1 na SE NSR.³

Instantes após o início da falta, como está na zona do diferencial, 87B, ocorre disparo de todos os disjuntores ligados à barra P de 230 kV, com tempos aproximados na ordem de 70 ms, ou seja, 1 ciclo da atuação do diferencial e mais 3 ciclos para abertura dos DJs.

Na Figura 6, apresenta a configuração após atuação do diferencial, com todos DJs desligados da barra P de 230 kV em NSR, onde a falta se mantém pelo lado remoto, SE CIN, até a atuação do relé de distância em segunda zona, na ordem de 300 ms mais o tempo de disparo do DJ e extinção total da falta, próximos de 350 ms.

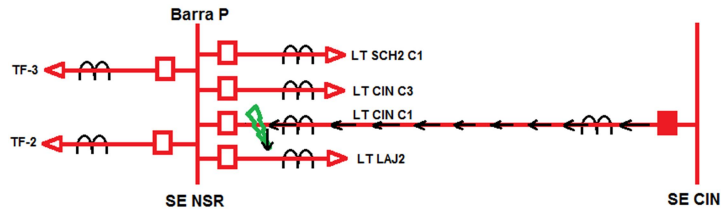


Figura 6 - Falta em zona morta na LT CIN C1 após atuação do 87B.⁴

3.2 Módulo de proteção lado de NSR modelado no ATPDraw

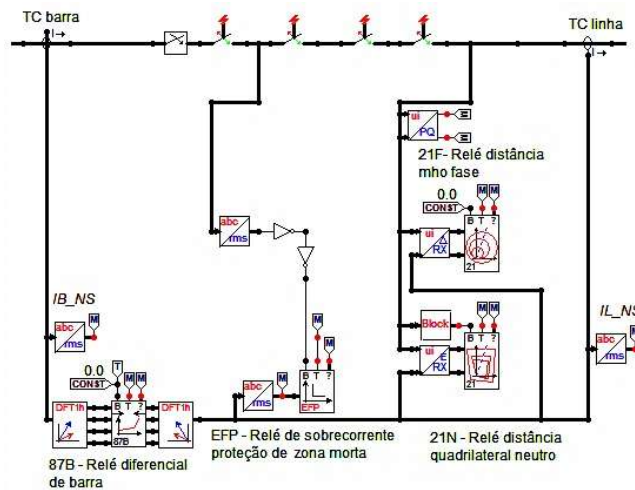


Figura 7 - Sistema de proteção modelado no lado de NSR.⁵

No lado da SE CIN foram modelados somente os relés 21F e 21N, a fim de simular a atuação desses relés nas faltas ao longo da LT até a zona morta em NSR.

³ Elaborado pelo autor.

⁴ Elaborado pelo autor.

⁵ Elaborado pelo autor.

4.0 - ANÁLISE DOS RESULTADOS

Nesta seção serão apresentados os resultados dos testes da proteção de distância, do diferencial de barras e do *EFP*. Os testes realizados foram em toda extensão da LT até a zona morta para diferentes tipos de falta, a fim de validar o modelo e verificar as vantagens do uso do relé diferencial com *EFP*.

Os testes realizados foram todos com falta a partir de $t = 50\text{ms}$, a fim de identificar da melhor forma nos gráficos o início dos *trips* e correntes de falta.

4.1 Curtos-circuitos na linha de transmissão

A Figura 8 apresenta falta trifásica em 16,33% da LT CIN em NSR e 83,33% da LT NSR C1 em CIN.

Nota-se que as impedâncias de falta vistas pelo relé 21F do lado de NSR no momento da falta saem da zona de impedância de carga do sistema para a impedância linha, com *trip* em zona 1 no lado da SE NSR, e em zona 2 no lado da SE CIN.

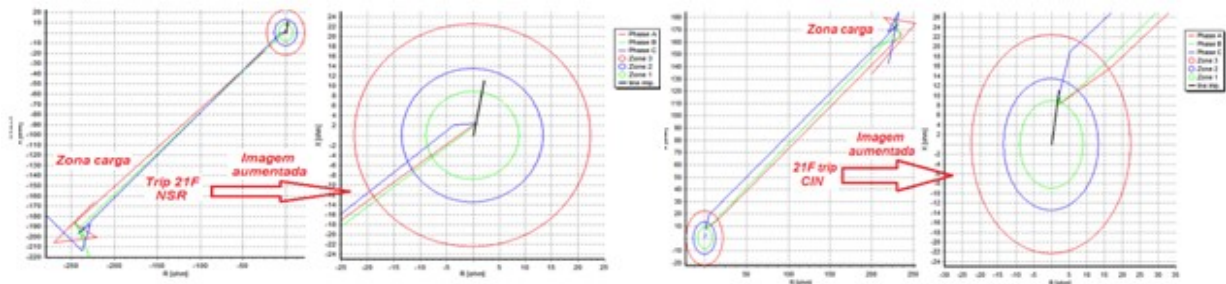


Figura 8 - Curto-circuito trifásico aplicado na LT. ⁶

A Figura 9 apresenta curto-circuito monofásico a terra franco em 16,33% da linha a partir de NSR e a 83,33% do terminal da CIN, onde atua zona 1 no lado de NSR e em zona 2 no lado da SE CIN.

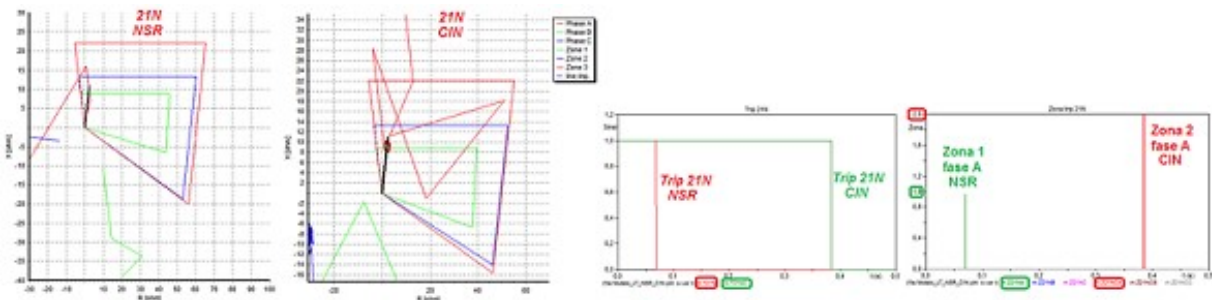


Figura 9 - Atuação dos relés 21N nos dois terminais com indicação de zona. ⁷

4.1.1 Resumo dos testes ao longo da LT

A Tabela 1 resume todos os testes realizados ao longo da LT para diferentes tipos de falta, indicando qual o relé que sensibilizou e os tempos de *trip*. Uma observação importante na mesma tabela é que deve-se considerar o tempo em que os relés perceberam a falta e realizaram o *trip*, não o tempo de extinção das faltas, pois serão acrescentados há esse tempo um tempo médio de abertura dos DJs de 50 ms.

⁶ Elaborado pelo autor.

⁷ Elaborado pelo autor.

Tabela 1 - Tempos de *trip* para diferentes tipos de falta ⁸

Tipo de falta	Trip relé	Lado	1º zona - t (ms)				2º zona - t (ms)	
			16,67%	33,33%	50%	66,67%	83,33%	100%
			3,75km	7,5 km	11,25km	15km	18,75km	22,5km
a-g	21N	NSR	18,52	20,61	22,70	24,79	312,70	314,80
		CIN	16,43	20,61	21,61	45,69	333,60	337,80
ab	21F	NSR	16,43	18,52	20,61	23,40	316,20	316,30
		CIN	15,40	20,63	32,70	32,70	312,70	314,80
ab-g	21N	NSR	14,34	14,34	16,43	22,70	312,70	314,81
		CIN	16,42	12,25	32,70	34,79	312,58	312,60
abc	21F	NSR	16,43	18,52	20,61	22,69	311,20	313,30
		CIN	26,43	30,61	32,70	32,70	312,70	314,80

4.2 Curtos-circuitos na zona morta em NSR

Nesta subsecção apresentará as simulações de faltas na zona morta de proteção na LT CIN C1 em NSR. Primeiro sem a proteção *EFP* e depois com a inclusão dessa.

4.2.1 Sem proteção de zona morta

A Figura 10 apresenta a simulação de falta monofásica na fase b na zona morta de proteção, com medição das correntes no lado da barra e da linha, onde no início da falta o curto-circuito é alto devido ao transitório e a influência das fontes de tensão nos dois lados do circuito. Assim que ocorre o *trip* pelo 87B e o DJ é desligado, o nível de curto-circuito reduz devido já ter passado o transitório e também devido à fonte de tensão ficar só pelo lado da SE CIN, onde se mantém o curto-circuito até operar o 21N em zona 2.

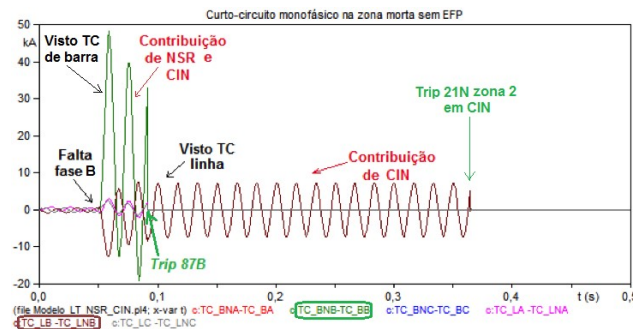


Figura 10 - Curto-circuito monofásico na fase b na zona morta. ⁹

Enquanto as correntes que entram pelo TC de barra e saem pelo TC de linha ou vice-versa são praticamente iguais em módulo e fase não ocorre *trip* do 87B, essas correntes percorrem juntas como pode ser percebido na Figura 11 as fases a e c, e quando ocorre a falta, que nesse caso foi na fase b, esse corrente destoa e insiste na zona de *trip*.

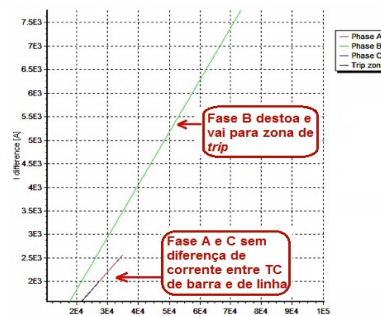


Figura 11 - Corrente diferencial vista pelo 87B. ¹⁰

⁸ Elaborado pelo autor.

⁹ Elaborado pelo autor.

¹⁰ Elaborado pelo autor.

4.2.2 Com proteção de zona morta

A Figura 12 apresenta a simulação de falta monofásica na fase a na zona morta de proteção, onde também há atuação do 87B devido à falta ser do lado do barramento, e no mesmo instante o relé de sobrecorrente instantâneo percebe que ainda há corrente passando no TC de linha, atingindo sua corrente de *pick-up* e disparando o DJ remoto na SE CIN, eliminando a fonte de alimentação do defeito antes da atuação dos relés 21.

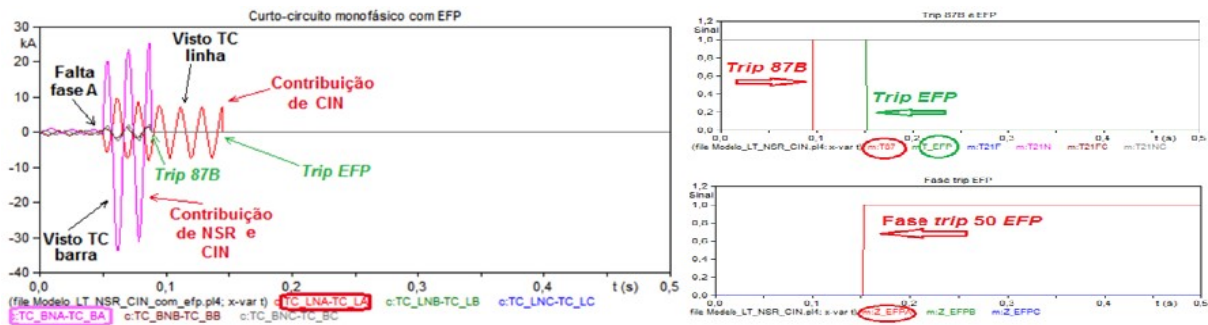


Figura 12 - Curto-circuito monofásico na fase a na zona morta.¹¹

A Figura 13 apresenta a corrente atingindo os níveis de *pick-up* do relé de sobrecorrente, onde em 10 ms a corrente está próxima de 500 A, ainda abaixo da corrente máxima de projeto da LT.

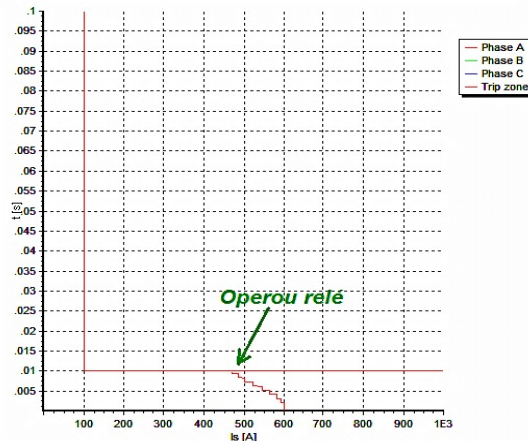


Figura 13 - Atuação do relé 50 EFP.¹²

As simulações para diferentes tipos de falta na zona morta são mostradas na Tabela 2, agora com ganho de tempo de extinção total da falta em metade do tempo de zona 2 do relé 21, e diferente do sistema de proteção sem EFP, mesmo com resistência de falta o *trip* ocorre. Testes com valores de 450 ohms de resistência de falta foram realizadas para verificar a eficácia do sistema, sempre ocorrendo o *trip* do DJ remoto na SE CIN.

Tabela 2 - Tempos de extinção total do curto-circuito com EFP¹³

Tipo de Falta		t (ms)
abc	S/Rf	128,5
ab-g	S/Rf	133,7
bc	S/Rf	131,6
a-g	S/Rf	119,1
	C/Rf 80Ω	101,2

A Figura 14 apresenta um comparativo de tempos de extinção das faltas em zona morta com em sem o sistema EFP.

¹¹ Elaborado pelo autor.

¹² Elaborado pelo autor.

¹³ Elaborado pelo autor.

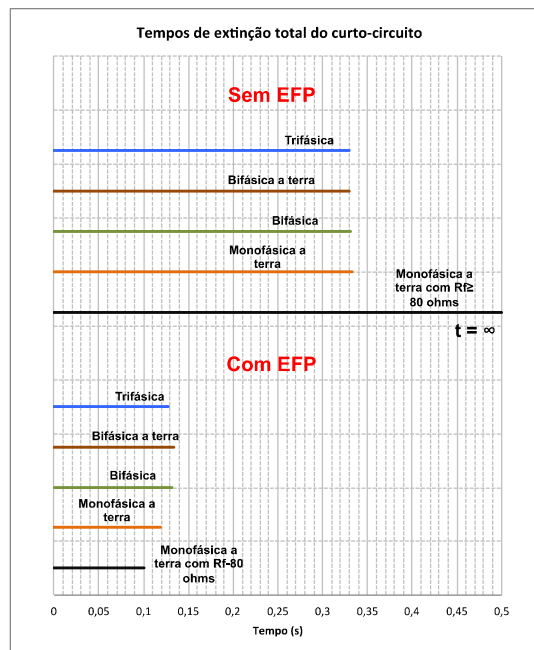


Figura 14 - Comparativo de tempos de extinção de faltas na zona morta. ¹⁴

5.0 - CONCLUSÃO

Em virtude do que foi mencionado de modo geral, considera-se as seguintes vantagens do sistema de proteção *EFP* verificado nas simulações:

- atua extinguindo o curto-circuito em menos do que a metade do tempo de segunda zona dos relés de distância de retaguarda remota;
- atende aos requisitos mínimos que o ONS define para os sistemas de proteção, não dependendo de proteção de retaguarda remota;
- identifica o módulo e a fase envolvida no defeito, tornando mais eficiente as atitudes a serem tomadas pelas equipes de operação e manutenção no restabelecimento das LTs conectadas ao barramento;
- evita problemas maiores caso a resistência de falta seja alta e não atue os relés de distância remotos.

A viabilidade da troca do relé diferencial de barras na SE NSR, parte de 230 kV, assim como em outros casos de subestações sem esse tipo de proteção, tens que avaliar o custo do relé e seus periféricos, desde os transformadores de instrumentos até a sala de comando, custo com equipes trabalhando, a necessidade de desligamentos, onde a soma disso tudo, comparar com índice provável de acontecer uma falha nessas zonas mortas e o custo caso haja a falta em multas por não cumprir a normativa imposta pelo procedimento de rede, considerando ainda a adição de LTs novas ao barramento, visto que a subestação está projetada para incorporar módulos futuros, considerando também não o impacto financeiro por final, mas sim o impacto a sociedade com possíveis faltas de energia elétrica.

A pesquisa e posterior modelagem e simulação demonstrou uma solução para faltas em zona morta, ampliando a compreensão, atingindo o que foi proposto nesse estudo, demonstrando também que faltas em zona morta inevitavelmente faz atuar o relé o diferencial, desligando todos os módulos conectados a esse, acredita-se que a pesquisa vai levar num futuro próximo a algoritmos incorporados a relés, que vão identificar a falta nessa zona antes da atuação do 87B.

¹⁴ Elaborado pelo autor.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (ONS). **Submódulo 2.6 - Requisitos mínimos para os sistemas de proteção e de telecomunicações**. Rev 2. [S.l.], 2011. Disponível em: <[http://extranet.ons.org.br/operacao/prdocme.nsf/videntificadorlogico/01C17A75ACE6C74383257945005D54F4/\\$file/Submódulo%202.6_Rev_2.0.pdf?openelement](http://extranet.ons.org.br/operacao/prdocme.nsf/videntificadorlogico/01C17A75ACE6C74383257945005D54F4/$file/Submódulo%202.6_Rev_2.0.pdf?openelement)>. Acesso em: 25 ago. 2016.
- (2) BRASIL. Ministério de Minas e Energia (MME). **Portaria nº 576, de 31 de outubro de 2012**. Anexo: Protocolo de avaliação dos sistemas de proteção, item: 7.9.8. Requisitos Gerais de Operação . Disponível em: <http://www.mme.gov.br/documents/10584/1139125/CMSE_-_Ata_da_120x_Reuniao_xExtraordinxriax_x31-10-2012x.pdf/a7c2d6c6-dffd-465c-944e-9c2de3f0cf52>. Acesso em: 25 ago. 2016.
- (3) INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS (IEEE). **IEEE Guide for Protective Relay Applications to Power System Buses**. Nova York: IEEE, 6 nov. 2009. Documento em pdf.
- (4) MYSORE, Pratap; HDR, Inc. Introduction to Power System Protection. **IEEE Twin Cities Workshop**. [S.l.], Abr. 2015. Disponível em: <https://www.google.com.br/?gfe_rd=cr&ei=JE4KWODuMa3L8geE37HAAQ&gws_rd=ssl#q=IEEE+Twin+Cities+Workshop+April+17%2C+2015+Pratap+Mysore%2C+P.E.%2C+HDR%2C+Minneapolis%2C+MN>. Acesso em: 18 set. 2016.
- (5) RUSH, Peter. **Proteção e Automação de Redes: Conceito e Aplicação**. Coordenação da tradução de José Antonio Jardini. 1. ed. São Paulo: Editora Blücher: Schneider, 2011. Livro eletrônico.

7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Rodrigo Niederauer da Silva

Engenharia Elétrica com ênfase em Sistemas de Energia (UNISINOS, 2017).

Trabalha na CEEE-GT desde 2006 (Atualmente no Departamento de Operação do Sistema/ Seção de Operação de Subestações).