



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

Versão 1.0
XXX.YY
22 a 25 Novembro de 2009
Recife - PE

Tabela formatada

GRUPO V

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

**ANÁLISE DE FALTA “CROSS-COUNTRY” EXTERNA COM ATUAÇÃO INCORRETA DE ESQUEMA DE RELÉ
DIGITAL: UM ESTUDO DE CASO**

**Manoel de Freitas S. de Almeida (*)
COPEL**

**Rodrigo Priss (*)
COPEL**

**Luiz Vinicius S. Puppi (*)
COPEL**

RESUMO

Os relés digitais aplicados à proteção de elementos do sistema elétrico de potência incorporam um grande número de funções de proteção que, para uma aplicação eficiente, precisam ser estudados e ter critérios de ajuste bem definidos. O estudo dos elementos de proteção de um relé digital indica que a equipe de proteção deve possuir conhecimento aprofundado das lógicas utilizadas pelos elementos de proteção para que estes sejam aplicados de forma correta. Uma das melhores fontes de aprendizado, tanto para ajustadores quanto para fabricantes de relés, é a análise de perturbação, por meio da qual se pode, por um lado, validar e corrigir critérios e modos de aplicação, e de outro, para também validar e, eventualmente corrigir, os algoritmos empregados nos relés de proteção de sua fabricação. Dentro deste enfoque, este informe técnico apresenta um estudo de caso resultante de uma análise de perturbação originada pela atuação indevida do elemento direcional, associado a um esquema de teleproteção, baseado no esquema de transferência de disparo por sobrealcance permissivo ("Permissive Overreach Transfer-Trip" - POTT). O artigo apresenta a sequência de análise desenvolvida, as ferramentas criadas e as conclusões relativas aos critérios de ajuste empregados.

PALAVRAS-CHAVE

Relés Digitais, Proteção, Teleproteção, Direcionalidade

1.0 - INTRODUÇÃO

Os esquemas de teleproteção existentes em relés digitais, quando devidamente parametrizados, oferecem uma solução seletiva e confiável para a eliminação de faltas na linha de transmissão protegida. Estes esquemas proporcionam a possibilidade de operação simultânea, de alta velocidade, para faltas entre fases e fase-terra em 100% da linha de transmissão protegida: a meta ideal de proteção primária (1).

Entretanto, é necessário um estudo aprofundado dos manuais e guias de aplicação dos relés utilizados, bem como rotinas de testes que verifiquem e comprovem o correto funcionamento do relé. Os critérios de ajuste empregados e o desempenho do relé são colocados à prova quando ele é posto em operação e se passa a observar o seu comportamento em condições reais do sistema elétrico.

A análise de perturbação passa a ser ferramenta imprescindível do engenheiro de proteção, pois, por meio dela, todas as etapas que precederam a colocação do relé em operação são validadas ou sofrem alterações, de acordo com a resposta do relé frente a solicitações.

Desta forma, nota-se a importância de estudos minuciosos de análise de perturbação. Como resultados, pode-se otimizar a aplicação do relé, melhorar os critérios de ajuste adotados, e conseqüentemente, contribuir para um melhor desempenho do sistema elétrico.

Ao longo deste trabalho, serão detalhadas todas as etapas da análise de uma falta "cross-country" externa, que resultou em uma atuação incorreta do esquema de proteção empregado; são analisadas características e parâmetros do relé, bem como as melhorias implementadas em função desta análise.

2.0 - DESCRIÇÃO DO SISTEMA E DA PERTURBAÇÃO

A perturbação em análise ocorreu no sistema composto pelas subestações Fundão 138 kV (FND), Santa Clara 138 kV (SCL), Guarapuava 138 kV (GVA) e Vila Carli 138 kV (VCA), conforme mostrado na Figura 1. As linhas de transmissão SCL-GVA 138 kV e SCL-VCA 138 kV partem da SE SCL percorrendo um trecho de 47 km em circuito duplo (compartilhando as mesmas torres).

Este estudo de caso refere-se à análise da perturbação ocorrida em 07/08/2008 às 09h07min envolvendo as linhas de transmissão Santa Clara – Fundão 138 kV (SCL-FND), Santa Clara – Guarapuava 138 kV (SCL-GVA) e Santa Clara – Vila Carli 138 kV (SCL-VCA).

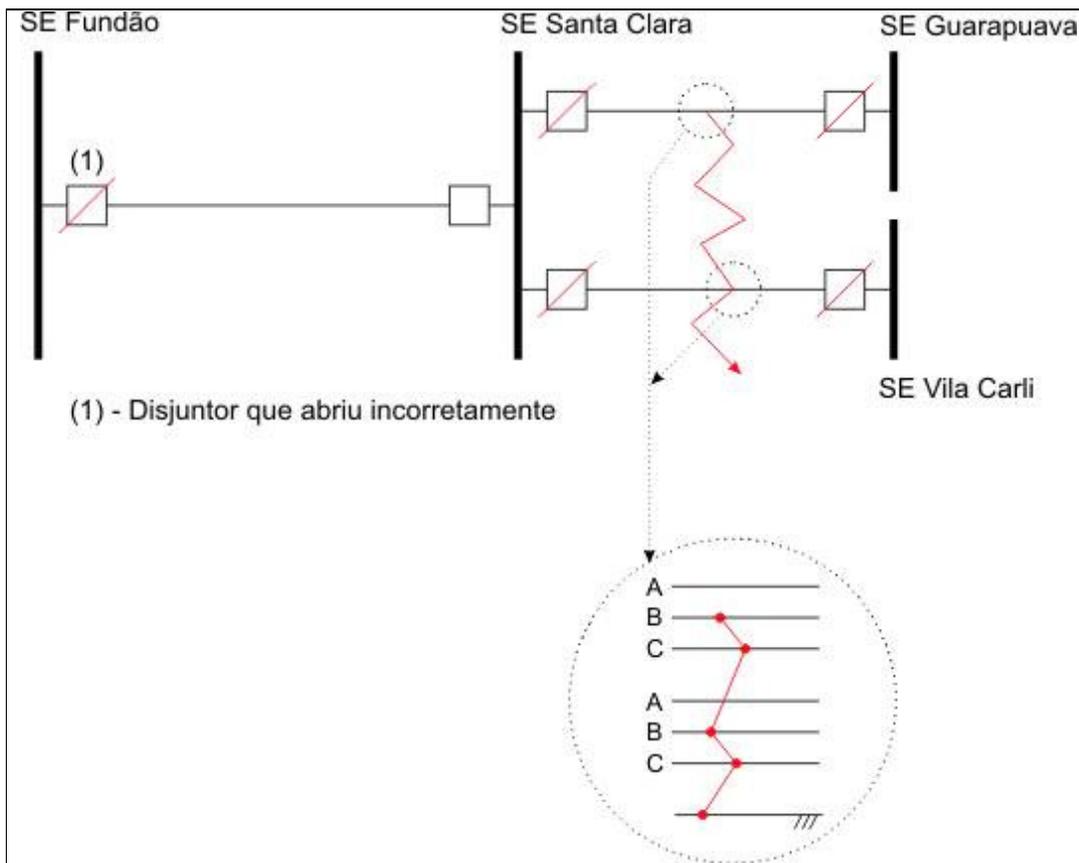


Figura 1 – Sistema Elétrico Envolvido na Perturbação de 07/08/2008

Nesta data, uma descarga atmosférica causou um curto-circuito fase-fase-terra ("cross-country"), que envolveu as fases B, C e a terra das linhas de transmissão em 138 kV Santa Clara – Guarapuava e Santa Clara – Vila Carli.

A distância provável da falta foi de 25 km a partir da subestação Santa Clara (dentro do trecho de circuito duplo).

O tempo de eliminação da falta foi de 63,4 ms (3,8 ciclos) conforme indicado na registro da oscilografia da subestação Santa Clara 138 kV, mostrado na Figura 2.

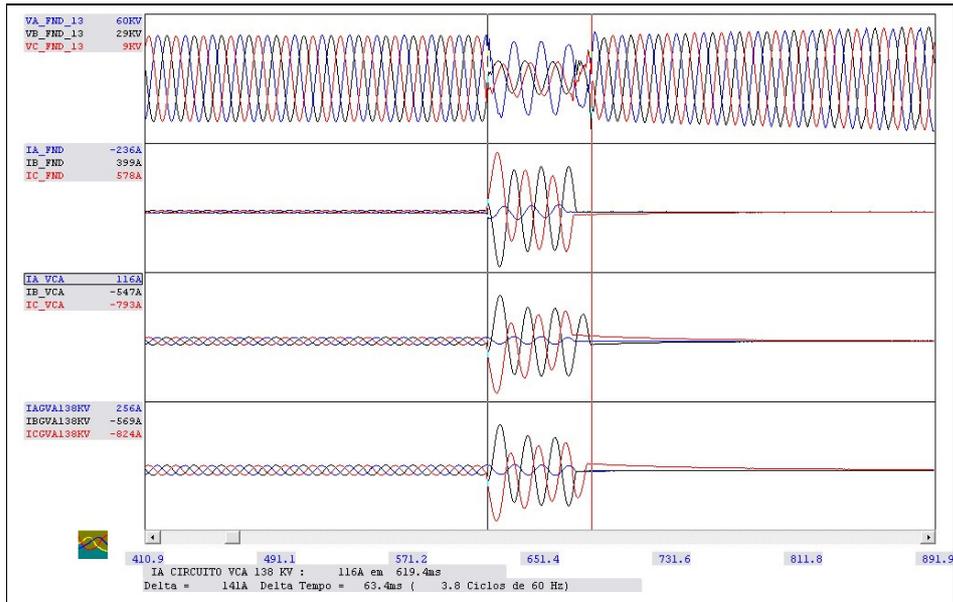


Figura 2 – Oscilografia da Perturbação de 07/08/2008 vista pela Subestação Santa Clara 138 kV

3.0 - ANÁLISE DA ATUAÇÃO DO ESQUEMA DE PROTEÇÃO

3.1 Proteções do Sistema que Atuaram Corretamente

Na SE Santa Clara, ocorreram aberturas corretas dos disjuntores dos circuitos Guarapuava e Vila Carli em virtude de comando de “TRIP” dos relés digitais destes circuitos. Similarmente, na SE Guarapuava, ocorreu abertura do disjuntor do circuito Santa Clara e na SE Vila Carli ocorreu abertura do disjuntor do circuito Santa Clara. Estas aberturas eliminaram o curto-circuito

3.2 Proteções do Sistema que Atuaram Incorretamente

Os relés de proteção da SE Fundão, circuito Santa Clara, enviaram comando de “TRIP” incorreto para o disjuntor deste circuito, fato este ocorrido após recebimento de um sinal permissivo, pelo esquema de teleproteção, do terminal remoto (SE Santa Clara), o que pode ser comprovado analisando a oscilografia registrada pelo relé do terminal Fundão deste circuito, conforme Figura 3.

Como a falta foi eliminada sem que ocorresse retardo ou falha de disjuntores, o disjuntor da SE Fundão, circuito Santa Clara, não deveria ter recebido sinal de “TRIP”. Caracteriza-se assim a atuação incorreta do esquema de proteção da LT Santa Clara – Fundão 138 kV.

Como o esquema de teleproteção utilizado é o POTT, a proteção do terminal de Fundão gerou comando de “TRIP” após a recepção de sinal permissivo do terminal de Santa Clara. Como a falta ocorreu “atrás” do terminal de Santa Clara, este sinal permissivo não deveria ter sido emitido. Por meio de simulações da falta em laboratório e de interpretações teóricas dos esquemas lógicos apresentados no manual do relé, a definição de direcionalidade e o envio deste sinal permissivo foi analisado e será descrito nos itens a seguir.

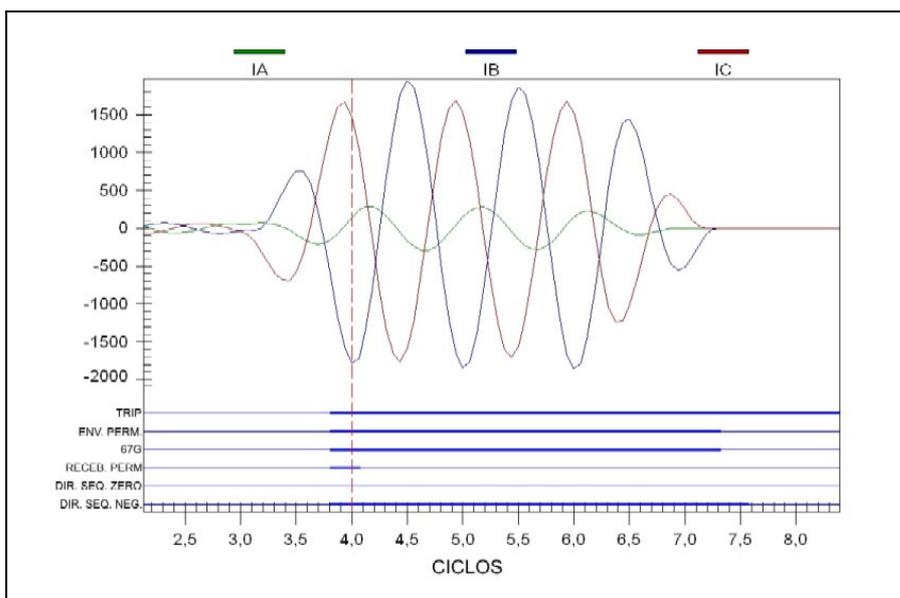


Figura 3 – Oscilografia Registrada Pelo Relé da SE Fundão, Circuito Santa Clara

4.0 - ANÁLISE TEÓRICA DO ESQUEMA DE TELEPROTEÇÃO EMPREGADO

O esquema POTT tem seu funcionamento baseado em elementos ajustados em sobrealcance, como o próprio nome indica. As funções de proteção empregadas neste esquema, no caso da LT Santa Clara – Fundão 138 kV, são os elementos de distância de fase e terra e o elemento direcional de sobrecorrente de terra. O transmissor é chaveado com um sinal permissivo, quando o elemento de sobrealcance associado detecta uma falta dentro do seu alcance.

Conforme a Figura 4, para uma falta ao longo da linha protegida, as funções de sobrealcance de ambos os extremos da linha de transmissão operam e geram um sinal de nível 1 para uma das entradas da porta lógica AND (&). Ao mesmo tempo, também é transmitido um sinal permissivo (TX) para o terminal remoto. Uma vez recebido um sinal permissivo (RX), este gera o segundo sinal de nível 1 na porta AND (&), o que produz uma saída de “TRIP” para o disjuntor. Para as faltas externas, somente um dos terminais terá o elemento permissivo atuado e enviará sinal permissivo ao terminal remoto, então a abertura de disjuntor por teleproteção não será iniciada em nenhum terminal.

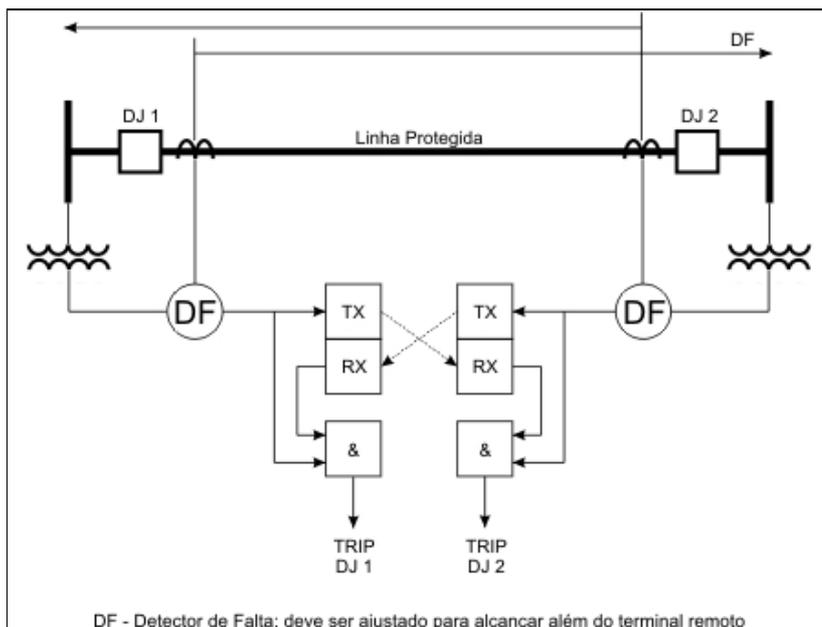


Figura 4 – Lógica do Esquema POTT

5.0 - ANÁLISE TEÓRICA DO ELEMENTO DIRECIONAL DO ELEMENTO 67N

O elemento direcional de sobrecorrente de terra empregado no esquema de teleproteção tem a sua direcionalidade controlada por um elemento direcional que funciona com base em duas funções distintas: um elemento direcional de seqüência negativa e um elemento direcional de seqüência zero.

A lógica de decisão do elemento direcional, mostrado de forma simplificada na Figura 5, define a prevalência do elemento de seqüência negativa ou do elemento de seqüência zero em função de uma série de parâmetros que envolvem os níveis de corrente de seqüência e a relação destes entre si e com a corrente de seqüência positiva.

O estudo e o entendimento desta lógica foi de fundamental importância para a avaliação dos parâmetros de ajuste empregados no relé e para a criação de planilhas, empregadas como ferramentas de análise.

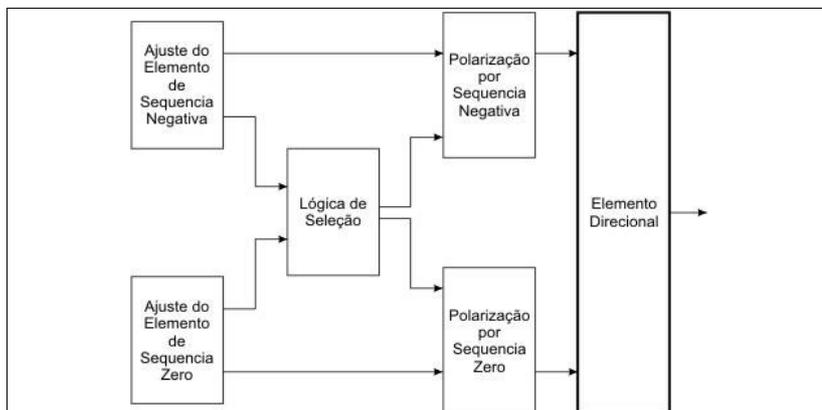


Figura 5 - Exemplo de Fluxo Geral da Lógica de Direcionalidade

6.0 - ANÁLISE TEÓRICA E SIMULAÇÕES EM LABORATÓRIO

Por meio dos registros oscilográficos obtidos dos relés envolvidos, foi possível obter as correntes e as tensões de sequência positiva, negativa e zero durante todo o tempo da falta. Estes dados foram aplicados em planilhas desenvolvidas especificamente para determinar a direcionalidade da falta (à frente ou reversa), simulando o comportamento do relé durante a perturbação.

Para definição de direcionalidade, o relé em questão utiliza um elemento de sequência negativa (comportamento previsto pela Tabela 1), de um elemento de sequência zero (comportamento previsto pela Tabela 2) e de uma lógica de seleção entre estes dois elementos, cuja saída teórica consta da Tabela 3.

A análise da indicação do sentido da falta, feita por meio da lógica contida no manual do relé, resulta na definição de direcionalidade final exibida na Tabela 3. Fica assim caracterizado que nesta análise teórica, existem instantes que direção da falta é incorreta, indicando falta à frente ao invés de reversa, para este caso específico. Este comportamento é verificado no período inicial da falta.

O resultado contido na Tabela 3 leva à conclusão que o elemento direcional do relé possui tendência de atuação indevida durante o período inicial da falta durante o qual a janela de dados usada pelo algoritmo possui informações do período de pré falta, além de dados de falta.

Atendo-se ao fato que o processamento do relé é de quatro vezes por ciclo (3), conclui-se que o relé informa a direcionalidade aproximadamente nos tempos de 3.25, 3.50, 3.75, 4.00 e 4.25 ciclos.

Em laboratório, os ajustes do relé da SE Santa Clara, circuito Fundação 138 kV foram descarregados em um relé de mesmo modelo do existente. Com o auxílio de fonte de testes, as correntes e tensões reais de falta foram injetadas no relé diversas vezes para se repetir o evento.

Como resultado destes testes, notou-se que aproximadamente 15% dos ensaios resultaram em indicação errada da direcionalidade informada pelo relé no início da falta, com respectivo envio de sinal permissivo pelo mesmo, reproduzindo o comportamento do relé na ocasião real. Isto demonstra que a atuação incorreta foi devida a uma instabilidade causada pela janela de dados do relé.

Durantes estes testes foram recalculados e alterados os parâmetros de ajuste do elemento direcional por meio de critérios distintos sem sucesso.

Em contato com o fabricante do relé, foi sugerido por este, em consenso com a engenharia de proteção da COPEL, a temporização do elemento direcional de terra permissivo empregado no esquema de teleproteção.

Esta temporização foi implementada e os testes repetidos, desta vez, obtendo-se sucesso na operação do esquema POTT em 100% dos casos simulados.

Tabela 1 – Comportamento Teórico do Elemento Direcional de Sequência Negativa do Relé da SE SCL, cto FND

DADOS											
RTC	800	15	Z2R	0.45	Z0F	0.855	50GRP	0.25	a0	0.1	E32 AUTO
RTP	1200	11	50QFP	0.5	Z0R	0.955	Z1L ANG	77.44	a2	0.1	ORDER
Z2F	0.35		50QRP	0.25	50GFP	0.5	Z0L ANG	66.87	k2	0.2	QV
V2 (kV)	ANG V2	I2 (A)	ANG I2	PICKUP Z2F	PICK UP Z2R	Z2	V2 sec	I2 sec	B-CONCLUS	MPO (CICLO)	CONCLUSAO
0.1	81.5	8.4	0	0.0406746	0.7343254	1.58331818	0.08333333	0.0525	INDEFINIDO	3.25	INDEFINIDO
0.3	114.2	8.1	0	-0.7970679	1.5720679	3.9562932	0.25	0.050625	REVERSO	3.313	INDEFINIDO
2.9	338.9	11	0	-8.35037879	9.12537879	-5.21999432	2.41666667	0.06875	INDEFINIDO	3.375	INDEFINIDO
2.3	353.6	37.5	0	-1.60694444	2.38194444	0.87751874	1.91666667	0.234375	INDEFINIDO	3.438	INDEFINIDO
1.1	191.9	38.1	0	-0.5248797	1.2999797	-1.59392355	0.91666667	0.238125	FRENTE	3.5	FRENTE
1.4	201.4	18.1	0	-2.14076888	2.91576888	-5.76102826	1.16666667	0.113125	FRENTE	3.563	INDEFINIDO
3	35.1	10.9	0	-8.73681193	9.51181193	27.1251766	2.5	0.068125	REVERSO	3.625	INDEFINIDO
2.7	341.5	38.6	0	-1.89410622	2.66910622	-0.96516322	2.25	0.24125	INDEFINIDO	3.688	INDEFINIDO
3	296.3	55.9	0	-1.35140877	2.12640877	-5.57195964	2.5	0.349375	FRENTE	3.75	FRENTE
4.7	332.1	93.6	0	-1.23628917	2.01128917	-1.77117943	3.91666667	0.585	FRENTE	3.813	FRENTE
5.8	350.1	163.1	0	-0.74786685	1.52286685	0.22004715	4.83333333	1.019375	INDEFINIDO	3.875	INDEFINIDO
5.1	14.1	228	0	-0.30811404	1.08311404	1.33821375	4.25	1.425	REVERSO	3.938	REVERSO
4.5	28.7	273.9	0	-0.11014513	0.88514513	1.44463752	3.75	1.711875	REVERSO	4	REVERSO
4.5	79.2	290	0	-0.07974138	0.85474138	2.06798947	3.75	1.8125	REVERSO	4.063	REVERSO
7.8	95.5	270	0	-0.52546296	1.30046296	3.66208033	6.5	1.6875	REVERSO	4.125	REVERSO
11.6	87.5	246.8	0	-1.12922069	1.90422069	6.17053176	9.66666667	1.5425	REVERSO	4.188	REVERSO
14.2	58.8	282.4	0	-1.23860954	2.01360954	6.35276022	11.83333333	1.765	REVERSO	4.25	REVERSO
CICLOS	I1	I1 sec	I2 sec	3 * I2	32QE	32QGE	50QF	50QR	SENS		
3.25	65.7	0.410625	0.0525	0.1575	0	0	0	0	INSENSIVEL		
3.313	66.6	0.41625	0.050625	0.151875	0	0	0	0	INSENSIVEL		
3.375	79.1	0.494375	0.06875	0.20625	0	0	0	0	INSENSIVEL		
3.438	109.3	0.683125	0.234375	0.703125	1	1	1	1	SENSIVEL		
3.5	153.5	0.959375	0.238125	0.714375	1	1	1	1	SENSIVEL		
3.563	212.6	1.32875	0.113125	0.339375	0	0	0	1	SENSIVEL		
3.625	298.6	1.86625	0.068125	0.204375	0	0	0	0	INSENSIVEL		
3.688	397.4	2.48375	0.24125	0.72375	0	0	1	1	SENSIVEL		
3.75	477.4	2.98375	0.349375	1.048125	1	1	1	1	SENSIVEL		
3.813	523.9	3.274375	0.585	1.755	1	1	1	1	SENSIVEL		
3.875	536.4	3.3525	1.019375	3.058125	1	1	1	1	SENSIVEL		
3.938	548.2	3.42625	1.425	4.275	1	1	1	1	SENSIVEL		
4	591.6	3.6975	1.711875	5.135625	1	1	1	1	SENSIVEL		
4.063	701.7	4.385625	1.8125	5.4375	1	1	1	1	SENSIVEL		
4.125	855.2	5.345	1.6875	5.0625	1	1	1	1	SENSIVEL		
4.188	1017.4	6.35875	1.5425	4.6275	1	1	1	1	SENSIVEL		
4.25	1140.2	7.12625	1.765	5.295	1	1	1	1	SENSIVEL		

Tabela 2 – Comportamento Teórico do Elemento Direcional de Sequência Zero do Relé da SE SCL, cto FND

V0 (kV)	ANG V0 e VC	I0 (A)	ANG I0 e IG	PICKUP Z0F	PICK UP Z0R	Z0	V0 sec	I0 sec	IG sec = 3VC	IG sec = 3IO	B-CONCLUS	MPO (CICLO)	CONCLUSAO
0.1	316.7	7	0	0.59255952	1.19244048	-0.65677478	0.08333333	0.04375	0.25	0.13125	FRENTE	3.25	INDEFINIDO
0.1	-2.6	6.2	0	0.53111559	1.25388441	0.75418876	0.08333333	0.03875	0.25	0.11625	INDEFINIDO	3.313	INDEFINIDO
2.6	7.2	22.3	0	-2.81764761	4.60264761	7.85020647	2.16666667	0.139375	6.5	0.418125	REVERSO	3.375	REVERSO
3.4	0.5	55.7	0	-0.96595975	2.75095975	3.26228095	2.83333333	0.348125	8.5	1.044375	REVERSO	3.438	REVERSO
2.3	-2.3	81.4	0	0.12689906	1.65810094	1.33967517	1.91666667	0.50875	5.75	1.52625	INDEFINIDO	3.5	INDEFINIDO
1.4	0.5	94.7	0	0.57596577	1.20903423	0.79008842	1.16666667	0.591875	3.5	1.775625	INDEFINIDO	3.563	INDEFINIDO
2.7	87.1	93.3	0	0.10411977	1.68088023	3.62049684	2.25	0.583125	6.75	1.749375	REVERSO	3.625	REVERSO
4.1	83.6	87.1	0	-0.50032769	2.28532769	6.01064646	3.41666667	0.544375	10.25	1.633125	REVERSO	3.688	REVERSO
4.9	77.5	84.3	0	-0.86877471	2.65377471	7.61709861	4.08333333	0.526875	12.25	1.580625	REVERSO	3.75	REVERSO
5.4	54.5	101	0	-0.71342822	2.49842822	6.96321681	4.5	0.63125	13.5	1.89375	REVERSO	3.813	REVERSO
5.4	49.4	130.4	0	-0.3116181	2.0966181	5.26679044	4.5	0.815	13.5	2.445	REVERSO	3.875	REVERSO
5.6	47.4	164.3	0	-0.06738309	1.85238309	4.28465847	4.66666667	1.026875	14	3.080625	REVERSO	3.938	REVERSO
5.3	62.1	187	0	0.12400847	1.66099153	3.76587782	4.41666667	1.16875	13.25	3.50625	REVERSO	4	REVERSO
5.3	71	198.5	0	0.1787416	1.6062584	3.55078933	4.41666667	1.240625	13.25	3.721875	REVERSO	4.063	REVERSO
5.8	84.5	195	0	0.07729701	1.70770299	3.77954857	4.83333333	1.21875	14.5	3.65625	REVERSO	4.125	REVERSO
7.1	81	189.2	0	-0.1821309	1.9671309	4.85213863	5.91666667	1.1825	17.75	3.5475	REVERSO	4.188	REVERSO
8.2	77.7	188.1	0	-0.38437777	2.16937777	5.70898446	6.83333333	1.175625	20.5	3.528875	REVERSO	4.25	REVERSO
CICLOS	I1	I1 sec	IG sec	IG / 3	50GF	50GR	32VE	SENS					
3.25	65.7	0.410625	0.13125	0.04375	0	0	0	INSENSIVEL					
3.313	66.6	0.41625	0.11625	0.03875	0	0	0	INSENSIVEL					
3.375	79.1	0.494375	0.418125	0.139375	0	1	1	SENSIVEL					
3.438	109.3	0.683125	1.044375	0.348125	1	1	1	SENSIVEL					
3.5	153.5	0.959375	1.52625	0.50875	1	1	1	SENSIVEL					
3.563	212.6	1.32875	1.775625	0.591875	1	1	1	SENSIVEL					
3.625	298.6	1.86625	1.749375	0.583125	1	1	1	SENSIVEL					
3.688	397.4	2.48375	1.633125	0.544375	1	1	1	SENSIVEL					
3.75	477.4	2.98375	1.580625	0.526875	1	1	1	SENSIVEL					
3.813	523.9	3.274375	1.89375	0.63125	1	1	1	SENSIVEL					
3.875	536.4	3.3525	2.445	0.815	1	1	1	SENSIVEL					
3.938	548.2	3.42625	3.080625	1.026875	1	1	1	SENSIVEL					
4	591.6	3.6975	3.50625	1.16875	1	1	1	SENSIVEL					
4.063	701.7	4.385625	3.721875	1.240625	1	1	1	SENSIVEL					
4.125	855.2	5.345	3.65625	1.21875	1	1	1	SENSIVEL					
4.188	1017.4	6.35875	3.5475	1.1825	1	1	1	SENSIVEL					
4.25	1140.2	7.12625	3.528875	1.175625	1	1	1	SENSIVEL					

Tabela 3 – Comportamento Teórico da Lógica de Seleção de Sequência do Relé da SE SCL, cto FND

TEMPO (CICLOS)	INDICACAO
3,25	SEM DIRECIONALIDADE
3,313	SEM DIRECIONALIDADE
3,375	REVERSO
3,438	INDEFINIDO
3,5	FRENTE
3,563	INDEFINIDO
3,625	REVERSO
3,688	REVERSO
3,75	FRENTE
3,813	FRENTE
3,875	INDEFINIDO
3,938	REVERSO
4	REVERSO
4,063	REVERSO
4,125	REVERSO
4,188	REVERSO
4,25	REVERSO

7.0 - CONCLUSÃO

Análises de perturbações criteriosas são imprescindíveis em diversos aspectos, pois, por meio destas, obtém-se subsídios tanto para certificar que o esquema de proteção foi corretamente aplicado quanto para comprovar que a funcionalidade proposta pelo fabricante está correta. Em caso de atuações indevidas, a análise de perturbação é utilizada como ferramenta para propor melhorias que vão desde o projeto e fabricação do equipamento até melhorias no ajuste deste pelo engenheiro de proteção.

A realização desta análise de perturbação criou a possibilidade de um aprendizado extremamente importante na formação de engenheiros de proteção. Além do levantamento de dados e da interpretação de registros de oscilografia gerados por relés e registradores digitais, o estudo criterioso das lógicas e funções internas e o contato direto com o fabricante do relé criaram um ambiente de discussão e estudo bastante importante para o aprendizado.

Além disso, critérios de ajuste foram sedimentados e revisados, além de criar uma segurança maior na equipe para a proposição de alterações tanto de ajustes quanto de critérios de ajustes para várias funções dos relés digitais.

A criação de ferramentas computacionais, tais como as planilhas mostradas neste trabalho, também é importante para se analisar o comportamento de relés, além de gerar um conhecimento maior a respeito das lógicas e do funcionamento destes.

8.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Blackbum, J. Lewis. Protective relaying: principles and applications - 2nd edition; MARCEL DEKKER, INC., 1998.
- (2) Cigré Joint Working Group 34/35.11. Protection Using Telecommunications; CIGRÉ, 2000.
- (3) SEL-311C Instrotucion Manual; Schweitzer Engineering Laboratories, 2006.