

Estado da Arte em Proteção de Alimentadores de 15kV para Defeitos à Terra com Alta Impedância de Contato

**R. Garrido de Figueiredo – COELCE,
Orsino Oliveira Filho, Fernando A. Chagas, Ítalo F. da Nova e Luiz E. D. Santos - CEPEL**

E-mail: garrido@coelce.com.br

Palavras-chave – Falhas de alta impedância, proteção, sistemas de distribuição.

Resumo – Esse trabalho origina-se do projeto “Medições, Estudos e Ensaio para Avaliação e Projeto de Proteção para Falhas Fase-Terra em Sistemas com Alta Impedância de Contato”, realizado pelo CEPEL para a COELCE, no período de 06/2001 a 03/2002 envolvendo as seguintes atividades: estudos sobre relé ALSTOM, GE e ZIV; simulações computacionais de alimentadores; ensaios em laboratórios sob tensão nominal, medições de desequilíbrio em alimentadores da COELCE e ensaios em condições reais no campo, representando faltas a terra com alta impedância. Nesse documento são apresentadas informações sobre as atividades realizadas, seus principais resultados, análise e conclusões.

1. INTRODUÇÃO

Faltas a terra com alta impedância (FTAZ) são ocorrências não detectadas com facilidade pelos métodos de proteção convencionais utilizados em sistemas de distribuição de energia elétrica.

As principais características que contribuem para essa dificuldade de detecção são: a) As correntes e tensões normais dos alimentadores são muito pouco afetadas pela ocorrência de FTAZ; b) O desequilíbrio natural dos alimentadores pode limitar a proteção baseada em corrente de neutro ou outro parâmetro indicador de desequilíbrio. c) Na maioria dos casos de FTAZ, a corrente diminui com a duração da falta e d) Não há um parâmetro reconhecido como identificador confiável de uma FTAZ.

A carência de informações sobre proteções eficazes aplicáveis aos casos de FTAZ, a importância e responsabilidade envolvidas, principalmente pelos riscos que representam para vidas humanas, as características específicas dos sistemas de distribuição e dos terrenos das regiões atendidas e o interesse em investigar e encontrar soluções para as ocorrências no sistema, foram os fatores que motivaram a COELCE a submeter e obter aprovação da ANEEL para realizar um projeto de P&D sobre o assunto. Esse projeto foi realizado pelo CEPEL, com o apoio e acompanhamento técnico da COELCE e teve como objetivo principal identificar e avaliar, por meio de estudos e ensaios em laboratório e no campo, as possíveis soluções existentes para proteção eficaz em casos de FTAZ.

O projeto foi dividido nas seguintes etapas: a) Estudo sobre o estado da arte em proteção de sistemas de distribuição em casos de FTAZ; b) Identificação das metodologias disponíveis no mercado para o caso de FTAZ e dos relés que utilizam essas metodologias; c) Estudos sobre os relés; d) Estudos sobre os alimentadores da COELCE e identificação de casos críticos; e) Simulação dos alimentadores; f) Medições e análise de desequilíbrio nos alimentadores da COELCE; g) Ensaio laboratoriais com os relés em circuitos representativos dos alimentadores; h) Ensaio em condições reais no campo; h) Processamento e análise dos resultados e i) Propostas de ações.

Nesse trabalho são apresentadas as informações relevantes sobre as atividades realizadas e os principais resultados obtidos nas diferentes etapas do projeto.

2. ESTADO DA ARTE EM FTAZ

No início do projeto, a COELCE apresentou ao CEPEL informações sobre as principais técnicas de proteção existentes para sistemas de distribuição, incluindo uma especificamente desenvolvida para aplicações em casos de FTAZ.

As técnicas de proteção identificadas resumem-se na utilização de três funções com diferentes comportamentos diante das características particulares de FTAZ. Essas funções são: neutro sensível, relação I_2/I_1 e a denominada HIZ , que se baseia na avaliação das componentes harmônicas da corrente.

Com base nessa análise, a COELCE também identificou no mercado os fabricantes de relés indicados para serem objetos de estudo no projeto. Um relé de cada fabricante foi disponibilizado para o projeto e os fabricantes que participaram foram a ALSTOM, GE e ZIV.

3. RELÉS ESTUDADOS

Cada fabricante fez uma apresentação do respectivo relé e participou também dos ensaios no laboratório de alta potência do CEPEL em Adrianópolis, Rio de Janeiro, e na SE de Beberibe, no Ceará. A participação dos fabricantes nas etapas de ensaios no laboratório e no campo foi fundamental principalmente no apoio à parametrização dos relés, principalmente no caso da função não convencional HIZ .

3.1. O Relé ALSTOM

A ALSTOM disponibilizou um relé modelo MiCOM P143, que tem as funções convencionais de proteção e medição, considerando os sinais de tensão e corrente de fase e de neutro. Além das proteções convencionais, incluindo a de neutro sensível, o relé da ALSTOM possui uma função denominada fase aberta (“broken conductor”). Essa função é parametrizada com base na relação entre as componentes de seqüência negativa e positiva (I_2/I_1) da corrente no alimentador. Baseado em testes realizados pela COELCE, em bancada, simulando desequilíbrios, foi observado que a atuação do relé ALSTOM por essa função não depende somente da parametrização do valor limite para I_2/I_1 . A lógica de atuação do relé para essa função tem condicionantes não explícitas associadas aos valores de corrente de seqüência zero.

O software operacional do relé ALSTOM tem recursos convencionais utilizando janelas com menus, submenus e lista de funções. A parametrização e alteração de informações é feita por meio de cliks sobre o arquivo da função e sobre o parâmetro que se deseja alterar. Durante a parametrização, o software permite visualizar na tela somente uma caixa de texto de cada vez. O relé possui ainda software gráfico com recursos para análise das formas de onda aquisitadas.

3.2. O Relé ZIV

A ZIV participou disponibilizando um relé modelo 8IRD, que tem as funções convencionais de proteção e medição, considerando somente os sinais de corrente de fase e de neutro, incluindo a função neutro sensível. O relé da ZIV possui também a função parametrizada exclusivamente pelo valor da relação entre as componentes de seqüência negativa e positiva (I_2/I_1) da corrente no alimentador. Nos testes de bancada, realizados pela COELCE, o relé ZIV operou sempre que o valor limite parametrizado para a relação I_2/I_1 foi ultrapassado.

O relé 8IRD é o mais simples dos três utilizados nesse projeto. Seu software operacional possibilita a parametrização de todas as funções de atuação em uma única tela e tem recursos de oscilografia com possibilidades de medições das principais características dos sinais aquisitados.

3.3. O Relé GE

O terceiro relé estudado, modelo F60 – Feeder Management Relay, fabricado pela GE, foi comprado pela COELCE especificamente para o projeto. Além das proteções convencionais, incluindo a proteção de neutro sensível, e de uma função parametrizada pelo valor da corrente de seqüência negativa I_2 , esse relé possui uma unidade independente destinada especificamente à detecção de faltas de alta impedância. Essa unidade, denominada HiZ, tem seu funcionamento baseado na análise dos harmônicos e sub-harmônicos das correntes do alimentador, separando-os da componente

fundamental de cada corrente de fase e trabalhando somente com as componentes harmônicas amplificadas.

De acordo com a própria GE, a nova tecnologia HiZ empregada em seu relé serve para detectar muitas faltas que a proteção convencional baseada em sobrecorrente não consegue detectar, mas não há nenhuma tecnologia capaz de detectar todas as FTAZ de forma confiável e segura. A taxa de detecção considerada possível atualmente para FTAZ é da ordem de 70%.

Algumas características do funcionamento do módulo HiZ são: a) Não atua no curto espaço de tempo de ciclos, como ocorre com a proteção convencional. O tempo de atuação pode ser desde dezenas de segundos até minutos; b) Permite que a proteção convencional tente reconhecer a falta e atue primeiro. Há um período inicial de coordenação com a proteção convencional que pode ser parametrizado entre 10 e 200 ms; c) Monitora múltiplos parâmetros simultaneamente; d) Utiliza várias técnicas de análise dos parâmetros; e) Possui lógica para distinguir arcos no caso de condutor caído no solo de arcos em isoladores e outros arcos transitórios; f) Trabalha com níveis de sensibilidade parametrizáveis de 1 a 10 e quanto maior o nível de sensibilidade menor o nível de confiança na atuação do relé; g) Possui algoritmo inteligente que possibilita melhorar, ao longo do tempo, o nível de confiança na atuação. Esse algoritmo depende de um “aprendizado” em função do tempo que o relé fica instalado em um mesmo alimentador. O relé monitora as características normais e anormais do alimentador e armazena informações ao longo do tempo. Essas informações são utilizadas para aumentar a confiança e diminuir o tempo de atuação, quando da ocorrência de FTAZ.

O software operacional do relé GE também é baseado em janelas e a parametrização é feita por agrupamento de funções. Além disso, o software permite que mais de uma função ou de um grupo de funções seja visualizado na tela durante a parametrização.

O software gráfico da GE tem recursos para análise das formas de onda aquisitadas e seus resultados apresentam muitas informações de medições simultâneas, facilitando a análise e visualização.

Os manuais de todos os relés estudados, bem como as informações dos seus representantes, indicam que todos eles têm melhor desempenho da função neutro sensível quando se utiliza TC toroidal independente como sensor da corrente de neutro.

4. SIMULAÇÃO DOS ALIMENTADORES

Os alimentadores com maior possibilidade de desequilíbrio natural em função das cargas foram selecionados pela COELCE, que também forneceu informações sobre as características elétricas, distâncias,

cabos e valores de correntes de curto circuito e fluxo de carga.

Esses mesmos alimentadores foram também previamente indicados para as medições de correntes durante períodos de pelo menos 24 horas. Essas medições tiveram como objetivo avaliar a variação do desequilíbrio natural durante um período completo de variação da carga.

Foi feita uma análise baseada nos diagramas de fluxo de potência dos alimentadores do sistema COELCE, considerando o número e comprimento dos ramais, número de nós e os níveis de corrente na saída do alimentador e nos ramais mais extremos. Um dos alimentadores considerados de interesse para as simulações computacionais e para os ensaios no laboratório foi o de Araripe - ARP01M1, por ter corrente muito reduzida, da ordem de 2 A, no ponto extremo de ramificação (ponto 43). A corrente na saída desse alimentador é da ordem de 100 A. O diagrama utilizado como base para os cálculos das impedâncias representativas dos ramais do alimentador ARP01M1 está apresentado na Figura 1, onde também estão apresentados os valores de corrente de curto circuito obtidos por simulação realizada pela COELCE. As impedâncias dos ramais foram calculadas com as informações sobre as características materiais e dimensionais dos cabos. Para cada nó, foi calculada uma impedância representativa da carga do ponto para a terra. Essa impedância foi equivalente ao valor líquido de potência ativa e reativa obtido pelo balanço do fluxo de potência no ponto.

Inicialmente, foi realizada uma simulação do alimentador completo, com todos os seus ramais e cargas distribuídos de acordo com o diagrama apresentado na Figura 1. Em seguida, foram feitas simulações do alimentador com seus ramais e cargas concentradas, visando obter-se um circuito equivalente ao alimentador completo, para fins de representação no laboratório de ensaios do CEPTEL. Com base em comparações dos resultados das simulações para o circuito completo e para o simplificado, e considerando o interesse em simular curtos no ponto 43, os circuitos apresentados nas Figuras 2a) e 2b) foram considerados representativos das condições de interesse para o alimentador ARP01M1. Estes circuitos foram utilizados nos ensaios realizados no laboratório.

Para subsidiar a preparação dos ensaios e avaliar as possibilidades de atuação dos relés, os circuitos foram utilizados para simular falhas monofásicas para a terra com impedâncias de falta de 0 Ω (curto franco), 10, 42, 106, 144, 194 e 244 Ω. Foram utilizados circuitos equilibrados e também com desequilíbrio equivalente a um caso crítico obtido nas medições de campo, realizadas pelo CEPTEL. Um exemplo dos resultados dessas simulações está apresentado na Figura 3.

Da mesma forma, foram realizadas simulações considerando-se o ponto 16 do alimentador para efeito de ocorrência das falhas, conforme circuito apresentado na Figura 4.

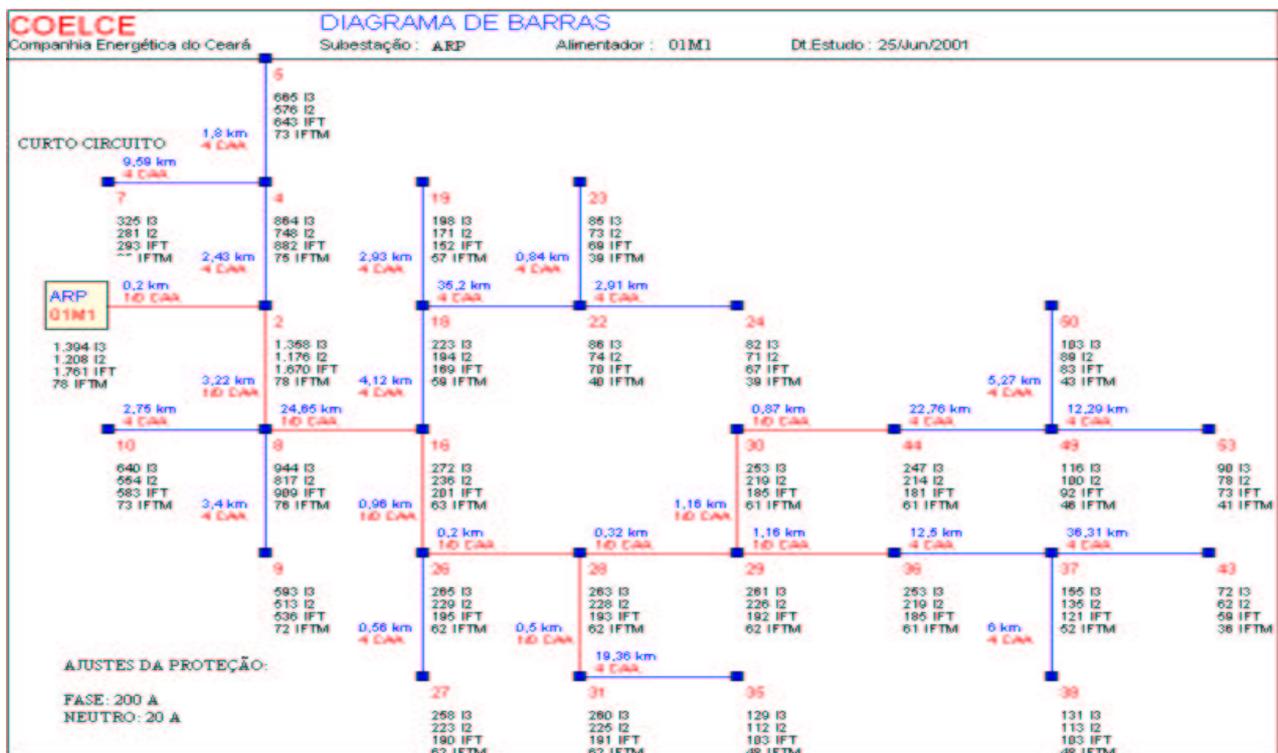


Figura 1 – Diagrama de Barras do alimentador ARP01M1. I3 = Curto trifásico, I2 = Curto monofásico, IFT = Curto fase terra, IFTM = Curto fase-terra com Z=100 Ω.

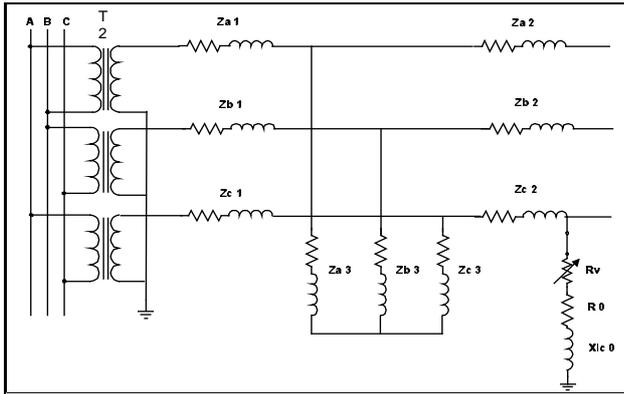


Figura 2 - Circuito de ensaio para defeito no ponto 43, ARP01M1

a) Cargas equilibradas

$R_0 = 6 \Omega$, $X_{lc0} = j38 \Omega$,
 $Z_{a1} = Z_{b1} = Z_{c1} = (18,65 + j13,22) \Omega$
 $Z_{a2} = Z_{b2} = Z_{c2} = (72 + j32) \Omega$
 $Z_{a3} = Z_{b3} = Z_{c3} = (53,33 + j22,5) \Omega$
 $R_v = 0 \Omega, 10, 42, 106, 144, 194 \text{ e } 244 \Omega$

b) desequilíbrio na fase C

$R_0 = 6 \Omega$, $X_{lc0} = j38 \Omega$
 $Z_{a1} = Z_{b1} = Z_{c1} = (18,65 + j13,22) \Omega$
 $Z_{a2} = Z_{b2} = Z_{c2} = (72 + j32) \Omega$
 $Z_{a3} = Z_{b3} = (53,33 + j22,5) \Omega$
 $Z_{c3} = (72 + j30,5) \Omega$
 $R_v = 0 \Omega, 10, 42, 106, 144, 194 \text{ e } 244 \Omega$

Os resultados dos valores de corrente antes e após as falhas simuladas para o ponto 43, em circuito equilibrado, estão resumidos nas Tabela I.

Pela análise dos resultados das simulações, observou-se que a variação da corrente na fonte, diante da ocorrência das falhas, pode não ser suficiente para sensibilização e atuação dos relés. Esse fato ocorre por causa da baixa corrente de curto circuito no ponto distante da fonte, em comparação com a corrente na saída do alimentador.

5. MEDIÇÃO DE DESEQUILÍBRIO NATURAL

5.1. Resultados disponibilizados pela COELCE

A COELCE possui em algumas subestações, principalmente em Fortaleza, sistema automático de monitoramento de seus alimentadores, permitindo leituras discretas em períodos pré-selecionados do dia. Resultados das medições de tensão, corrente e defasagem em 119 alimentadores/transformadores de 17 subestações diferentes, tomadas em horários de carga máxima e de carga mínima, totalizando 331 pontos medidos, foram informados pela COELCE ao CEPEL.

A partir das medições foram calculados os desequilíbrios de carga desses alimentadores, traduzidos pela corrente de neutro (I_n) e pela relação I_2/I_1 .

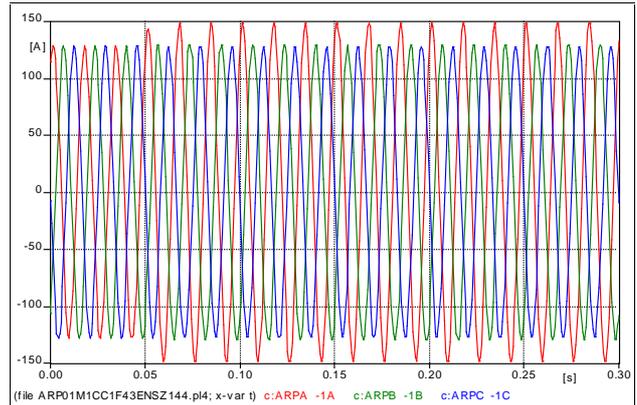


Figura 3 - I_{curto} fase terra, Circuito Fig. 2, $Z_{\text{falta}} = 144 \Omega$:
 $I_{\text{fonte}} = 90,3 \text{ A} : 104,7 \text{ A}$

TABELA I – Resumo dos resultados obtidos nas simulações computacionais para o alimentador ARP01M1. Ponto de ocorrência do curto monofásico = 43, circuito equilibrado

Z_{falta} (Ω)	Corrente na fonte (A_{ef})		Corrente de curto (A_{ef})
	Antes	Após	
0		118,3	43,6
10		117,1	40,8
42		113,0	33,6
106	90,3	106,8	24,5
144		104,7	21,0
194		102,4	17,6
244		100,6	15,1

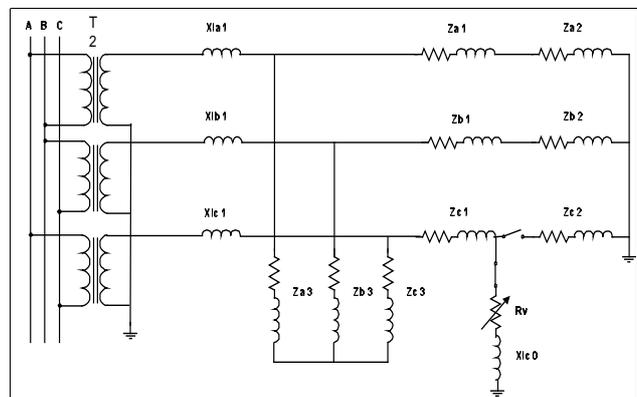


Figura 4 - Circuito de ensaio para defeito no ponto 16, ARP01M1, cargas equilibradas.

$X_{lc0} = j50 \Omega$
 $X_{la1} = X_{lb1} = X_{lc1} = j5,8 \Omega$
 $Z_{a1} = Z_{b1} = Z_{c1} = (18,67 + j14) \Omega$
 $Z_{a2} = Z_{b2} = Z_{c2} = (96 + j32) \Omega$
 $Z_{a3} = Z_{b3} = Z_{c3} = (101,3 + j64) \Omega$
 $R_v = 0 \Omega, 24, 48, 96, 196, 300, 395 \Omega$

Em 97% dos 331 pontos medidos, os valores da relação I_2/I_1 obtidos foram inferiores a 0,1. Foram obtidos valores superiores a 0,1 em apenas 10 casos e superiores a 0,2 em apenas 3 casos.

Essa é uma informação importante, considerando que quando ocorre um curto para terra em uma fase do alimentador a relação I_2/I_1 tende ao valor de 0,5. Esse é o princípio que torna essa relação um parâmetro com grande potencial para ser utilizado na identificação da falta. Resultados de um estudo teórico simples mostrando a variação da relação I_2/I_1 em função das correntes de fase, para um sistema trifásico com ângulo entre as fases de 120° , é apresentado na Figura 5.

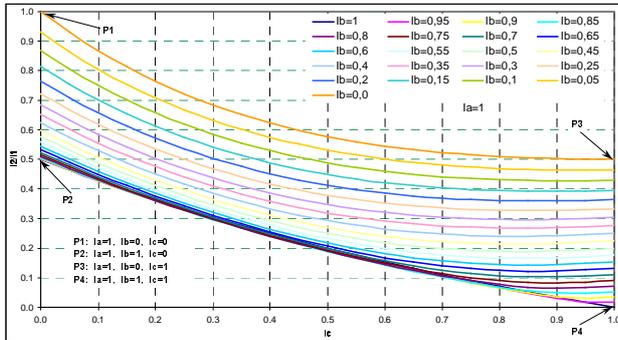


Figura 5 – Variação de I_2/I_1 em função das correntes de fase defasadas de 120° , $I_a = 1$ pu.

5.2. Medições de desequilíbrio realizadas pelo CEPEL

Com objetivo de obter mais informações sobre o desequilíbrio natural dos sistemas de distribuição das regiões da Capital e do Interior do Ceará, foi feita uma programação em duas etapas para medições das correntes, tensões e defasagens em alimentadores selecionados pela COELCE. A primeira etapa foi realizada no período de 29/08 a 13/09/2001 nas subestações de Aracati, Crateus, Itapipoca, Itapajé, Jaguaruana, Limoeiro do Norte, Nova Russas, São João do Jaquiribe e Sobral. A segunda etapa foi realizada no período de 08/01 a 25/01/2002 nas subestações de Água Fria (Fortaleza), Araripe, Bonsucesso (Fortaleza), Cedro, Distrito Industrial I e II (Fortaleza), Iguatú, Juazeiro do Norte e Taupe (Fortaleza).

Durante as medições realizadas na etapa 1, observou-se que as instalações somente dispunham de dois TP's com secundários conectados em delta aberto com um ponto aterrado. As remotas utilizadas nessas medições foram conectadas diretamente nos secundários dos transformadores de instrumentos (TP e TC) instalados nos alimentadores. Com esse arranjo somente foi possível medir tensões e correntes em módulo e um ângulo médio de defasagem entre tensões e correntes.

Para as medições realizadas durante a etapa 2, o CEPEL instalou transformadores 220/110V nos secundários dos transformadores de serviços auxiliares das SE's e conectou os sinais obtidos por esses transformadores nos canais das remotas. Com isso, foi possível também medir os ângulos entre tensão e corrente e foram obtidos resultados que possibilitaram uma análise mais detalhada e confiável, conforme apresentado nas Figuras de 6 a 9

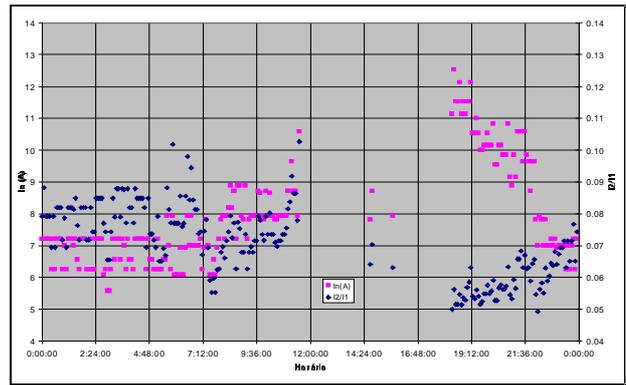


Figura 6 - Nova Russas, 01N2, Relação I_2/I_1 e I_n

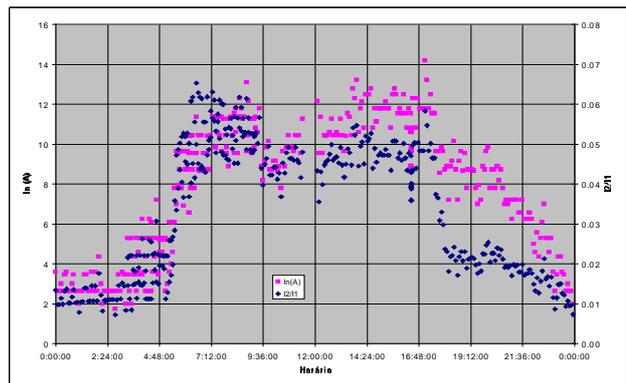


Figura 7 - Sobral, 01S6, Relação I_2/I_1 e I_n

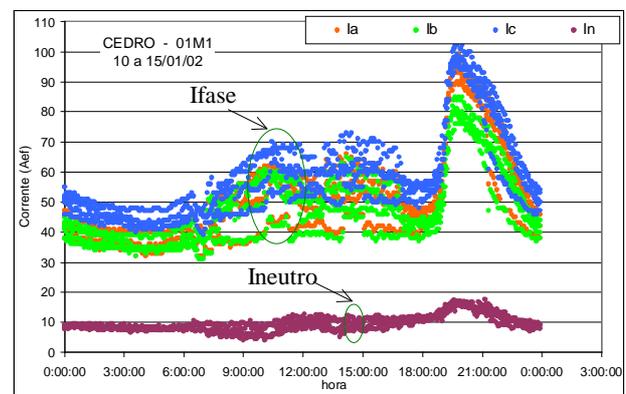


Figura 8 - Cedro 01M1, I_{fases} (I_a , I_b e I_c) e I_{neutro} (I_n)

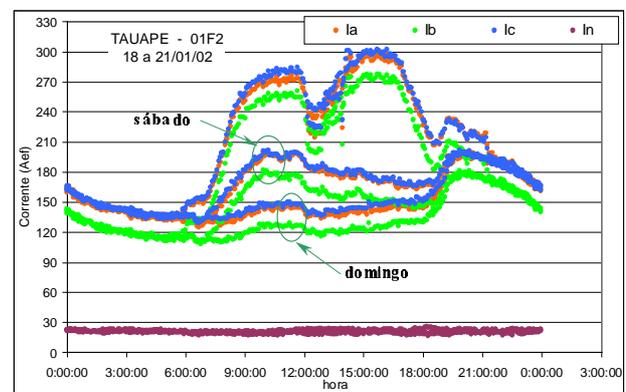


Figura 9 - Tauape 01F2, I_{fases} (I_a , I_b e I_c) e I_{neutro} (I_n)

Na Tabela 2 está apresentado um resumo dos resultados da análise das medições de desequilíbrio. A partir dessas informações, a COELCE pôde avaliar a necessidade de remanejamento de cargas, visando melhorar as condições de desequilíbrio e possibilitar melhor sensibilidade na parametrização das proteções baseadas nos valores de I_n e I_2/I_1 .

Como pode ser visto na Tabela II, a relação I_2/I_1 máxima apresenta-se inferior 0,1, sendo que em apenas três alimentadores esse valor foi ligeiramente ultrapassado. Já a corrente de neutro máxima foi superior a 10 A para a maioria dos alimentadores.

TABELA II – Resultados da análise das medições de desequilíbrio nos alimentadores da COELCE

ALIMENTADOR	Mínimo		Máximo		Média		Desvio Padrão	
	I_2/I_1	I_n	I_2/I_1	I_n	I_2/I_1	I_n	I_2/I_1	I_n
NVR-21N2	0,049	5,568	0,103	12,530	0,071	7,923	0,011	1,550
NVR-21N3	0,000	0,000	0,038	6,928	0,019	2,535	0,008	1,345
NVR-21N5	0,044	6,000	0,095	22,913	0,068	10,575	0,008	3,620
SBU-01S3	0,002	1,000	0,031	7,810	0,014	4,404	0,005	1,297
SBU-01S6	0,007	1,732	0,065	14,177	0,034	8,042	0,017	3,225
ITE-01I3	0,032	3,606	0,106	27,713	0,064	10,209	0,017	5,164
ITE-01I4	0,039	4,359	0,071	13,115	0,056	7,363	0,007	1,758
ITK-01I2	0,000	0,000	0,047	7,211	0,016	2,480	0,008	1,237
ART-01N3	0,051	8,660	0,091	22,517	0,067	12,561	0,007	3,100
ART-01N6	0,007	2,000	0,026	11,790	0,018	7,774	0,003	1,686
JGA-01N3	0,004	1,732	0,037	6,928	0,010	3,095	0,006	0,947
LMN-01N1	0,033	9,165	0,056	18,330	0,039	13,345	0,005	2,153
LMN-01N4	0,027	9,644	0,073	18,735	0,053	12,413	0,011	2,087
BFG-01N4	0,000	0,000	0,059	8,185	0,026	3,971	0,013	1,543
AGF – 01I7	0,012	6,999	0,034	15,715	0,023	10,525	0,004	1,748
ARP – 01M1	0,036	3,608	0,082	13,458	0,059	6,654	0,009	1,460
BNS – 01S1	0,032	18,665	0,086	26,605	0,059	22,812	0,013	1,571
BNS – 01S3	0,023	16,508	0,051	25,922	0,034	21,997	0,005	1,630
CDR – 01M1	0,023	3,997	0,097	17,509	0,062	9,553	0,014	2,538
CDR – 01M2	0,000	0,001	0,116	1,999	0,059	1,052	0,014	0,222
DID I – 01I6	0,002	0,997	0,024	9,990	0,011	4,544	0,004	1,553
DID II – 01F6	0,000	0,001	0,017	6,994	0,007	3,365	0,002	1,400
IGT – 01M6	0,010	1,728	0,094	23,044	0,050	11,459	0,020	5,409
IGT – 01M8	0,022	2,996	0,083	14,526	0,050	4,971	0,013	1,004
JNT – 01M2	0,000	0,001	0,016	6,077	0,005	2,005	0,003	0,994
JNT – 01M7	0,066	11,349	0,099	24,539	0,082	14,774	0,007	3,333
TAP – 01F4	0,000	0,000	0,018	7,002	0,007	3,132	0,003	1,116
TAP – 01F2	0,023	16,824	0,060	26,232	0,042	20,818	0,009	1,602

Observou-se também uma tendência de aumento da relação I_2/I_1 com o aumento da carga durante cada período de medição, indicando que o período mais significativo em termos de desequilíbrio é o período de carga máxima, validando assim a análise feita com base nos resultados obtidos pela COELCE para os alimentadores da Capital.

6. ENSAIOS EM LABORATÓRIO

Com base nos resultados das medições de desequilíbrio e das simulações, foram realizados ensaios utilizando-se os três relés no laboratório de Alta Potência do CEPTEL, situado na Unidade de Adrianópolis, Rio de Janeiro.

Procurou-se reproduzir nos ensaios as condições de corrente de curto-circuito e de carga observadas nos alimentadores, incluindo o desequilíbrio. Foram representadas também condições reais de faltas de alta impedância que trazem maior risco a pessoas e propriedades, quando há rompimento do cabo de uma das fases do alimentador e sua queda ao solo, com formação ou não de arco elétrico, dependendo do tipo e características do solo existente (asfalto, terra seca ou úmida, grama, etc.).

Esses ensaios foram realizados em duas etapas. Na primeira etapa, realizada em Outubro e Novembro de 2001, todas as funções principais dos relés foram consideradas. Na segunda etapa, realizada em Janeiro de 2002, a função HiZ do relé GE foi explorada em casos de representação de queda de condutor ao solo.

Para representar o efeito da impedância de seqüência zero real (Z_{0-real}) dos alimentadores no circuito de parâmetros concentrados utilizado nos ensaios, conforme diagramas apresentados nas Figuras 2 e 4, foi adotada a seguinte metodologia para cada caso:

- Mediu-se a impedância do circuito de ensaio inicialmente montado com as três fases curto-circuitadas ($Z_{med-preliminar}$);
- Calculou-se o valor de $Z_{0-preliminar} = 3 \times Z_{med-preliminar}$;
- Comparou-se o valor encontrado com o valor de impedância de seqüência zero desejável para o circuito (Z_{0-real}), obtendo-se sempre um resultado maior para Z_{0-real} ;
- Calculou-se $\Delta Z_0 = (Z_{0-real} - Z_{0-preliminar})$;
- Adicionou-se 1/3 de ΔZ_0 no caminho da corrente de neutro do circuito de ensaio ($Z_{n-adicional}$);
- Mediu-se novamente a impedância de acordo com a), porém incluindo os elementos no ramo de neutro ($R_{n-adicional}$ e $L_{n-adicional}$) correspondentes ao 1/3 de ΔZ_0 , obtendo-se $Z_{med-final}$;
- Calculou-se o valor de $Z_{0-final} = 3 \times Z_{med-final}$ para confirmar o valor da impedância de seqüência zero do circuito resultante.

Essa metodologia, bem como o circuito de parâmetros concentrados utilizado nos ensaios, mostraram-se válidos quando foram comparados os resultados obtidos para o alimentador completo e para o circuito de ensaio com os valores de correntes medidos durante os ensaios. Um exemplo dessa concordância pode ser visto comparando-se os resultados apresentados na Tabela I e na Tabela III.

Em todos os casos ensaiados, foram registrados os sinais de tensão e corrente nas fases do lado da fonte, as correntes no ramo de falta e no neutro. Esses sinais registrados foram medidos com sistemas de medição independentes dos utilizados para envio dos sinais aos relés conectados ao circuito de ensaio.

Os relés foram ajustados para atuação ou não de acordo com o interesse em cada caso. Nos casos de representação de queda de cabo em diferentes terrenos, o relé da GE foi ajustado para operar com a função HiZ.

Resumos dos valores de corrente obtidos na primeira etapa de ensaios, para circuitos representativos dos circuitos simulados computacionalmente, são apresentados nas Tabelas III e IV.

TABELA III – Resumo dos resultados obtidos nos ensaios para o alimentador ARP01M1. Ponto de ocorrência do curto monofásico = 43, circuito equilibrado, $V_{fonte} = 12,6 \text{ Kv}$

Z_{falta} (Ω)	Corrente na fonte (A_{ef})		Corrente de curto (A_{ef})
	Antes	Após	
0	88,2	124,3	41,1
10	88,6	121,6	39,3
42	86,6	115,9	32,6
106	89,6	108,8	23,9
144	89,9	109,4	21,6
194	90,3	103,9	17,8
244	89,0	101,5	15,2

TABELA IV – Resumo dos resultados obtidos nos ensaios para o alimentados ARP01M1. Ponto de ocorrência do curto monofásico = 16, circuito equilibrado, $V_{fonte} = 13,3 \text{ Kv}$

Z_{falta} (Ω)	Corrente na fonte (A_{ef})		Corrente de curto (A_{ef})
	Antes	Após	
0	120,0	173,0	95,4
24	120,2	176,0	82,2
48	120,3	171,0	66,7
96	122,8	162,0	46,3
196	122,4	146,0	24,9
300	122,6	138,0	13,0
395	121,7	134,0	11,3

Considerando-se os limites estabelecidos para desequilíbrio natural no sistema da COELCE, 15 A, os relés tiveram atuação dentro do esperado para Z_{falta} de até $\approx 250 \Omega$, para o alimentador representado nos ensaios com a falta para a terra no ponto 43.

Sempre que os limites parametrizados foram ultrapassados, todos os relés operaram adequadamente nas suas funções convencionais.

Nos casos de representação de queda de cabo em diferentes terrenos, foi utilizado somente o circuito equilibrado para simulação de FTAZ no ponto 43, com alguns parâmetros modificados em relação aos ensaios anteriores. As modificações foram necessárias em função de limitações de suportabilidade dos elementos do circuito, considerando o maior tempo de duração do ensaio. O circuito utilizado está apresentado na Figura 10.

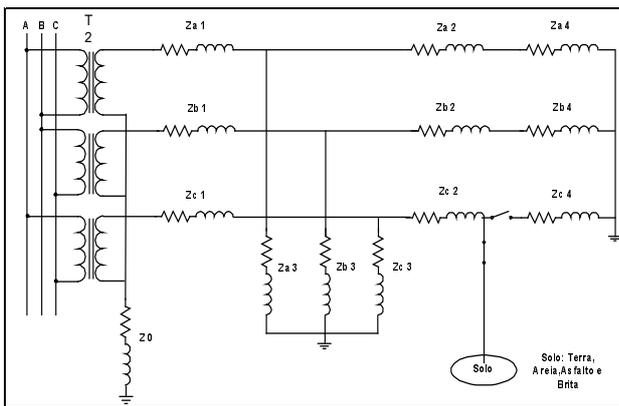


Figura 10 - Circuito de ensaio, defeito no ponto 43, ARP01M1, equilibrado, condutor ao solo
 $Z_0 = (6 + j38) \Omega$
 $Z_{a1} = Z_{b1} = Z_{c1} = (18,65 + j13,6) \Omega$
 $Z_{a2} = Z_{b2} = Z_{c2} = (72 + j32) \Omega$
 $Z_{a3} = Z_{b3} = Z_{c3} = (42,6 + j47,76) \Omega$
 $Z_{a4} = Z_{b4} = Z_{c4} = (500 + j94) \Omega$

Os solos diferentes da terra existente no local dos ensaios foram representados, conforme mostrados na foto da Figura 11, por meio de dois buracos medindo aproximadamente 2m x 2m x 1,5m (profundidade) onde foi colocada areia em um e brita no outro. No caso da terra apenas a superfície de grama foi retirada. Foi utilizado também uma parte pavimentada com asfalto e outro local coberto com concreto. As resistividades medidas para cada terreno utilizado nos ensaios está mostrada na Tabela V.

Para a primeira etapa de ensaios representando condições de queda de cabo ao solo, realizada até 05/11/2001, que contou com a presença de pessoal de apoio da ALSTOM, ZIV e COELCE, não houve atuação de nenhum relé, inclusive o da GE na função HiZ. Foi observada e registrada a ocorrência de arco elétrico com duração de até 2 minutos nesses casos. Vários ajustes de parâmetros HiZ foram tentados sem sucesso. Nesses casos, considerou-se inicialmente que o nível reduzido da corrente de curto distorcida pelo arco não foi suficiente para gerar componentes harmônicas significativas na corrente da fonte vista pelo relé. Essa é uma condição onde as características dos parâmetros do circuito do

alimentador não possibilitam variações sensíveis na corrente ou tensão da fonte durante a falha, representando o que ocorre na realidade de FATZ na COELCE.

Nessa primeira fase de ensaios no laboratório, os ajustes utilizados para os relés, dentro dos limites orientados pela COELCE para evitar atuação indevida, não foram eficazes para possibilitar a detecção de falhas do tipo queda de cabo em diferentes terrenos, para um alimentador com as características do ARP01M1. Esses ensaios, porém, tiveram um aproveitamento limitado pela falta do pessoal de apoio da GE, que tem conhecimento mais detalhado sobre a parametrização específica do módulo HiZ.



Figura 11 – Terreno onde foram simuladas as condições de queda de cabo

TABELA V – Resistividade dos terrenos utilizados

Terreno	Resistividade ($\Omega.m$)
Terra seca	409
Terra úmida	39
Areia úmida	837
Brita úmida	14380

Na segunda etapa de ensaios com queda de cabo ao solo, realizada de 14 a 18/01/2002, com a presença da GE, foram realizados ensaios com duração de até 70 segundos. O circuito utilizado foi o mesmo da etapa anterior, apresentado na Figura 10. As correntes nas fases foram da ordem de 100 A e a corrente no neutro variou de 5 a 15 A, antes da falta. Durante a falta, a corrente na fase falhada aumentou de 3 a 15% e a corrente de neutro aumentou de 3 a 4 vezes.

Por causa da chuva que ocorreu durante o período de ensaios nessa segunda etapa, os terrenos estavam molhados ou úmidos, como pode ser visto na foto mostrada na Figura 12. Apenas o ensaio no asfalto foi feito em condição seca.



Figura 12 – Cabo caído na terra molhada.

Os ensaios com o cabo caído na terra molhada foram os que apresentaram mais atividade visível de arco, mesmo considerando que parte dessa atividade foi devida a queima do isolamento do cabo. Nessas condições, o relé GE passou a operar quando a duração do ensaio foi superior a 40 segundos, com o parâmetro “arc sensitivity” no máximo (10), o que implica em menor nível de confiança, e com a parametrização da corrente primária do TC reduzida de 500 para 100, pelo menos no módulo HiZ (M1).

Para os ensaios no asfalto seco, como é previsto pela própria GE, o relé não operou e não foi observado ocorrência de arco elétrico na representação da falta em laboratório.

Para o ensaio na areia e na brita molhadas, o relé não atuou e observou-se muito pouca atividade de arco. Houve formação de fumaça, possivelmente pela queima da proteção isolante do cabo.

Para o ensaio no cimento molhado, houve intensa atividade de arco mas o relé não atuou. Nessa aplicação foi feita uma experiência na parametrização da corrente primária do TC para o módulo M1, que foi reduzida de 100 para 25 A. Foi atribuída a esse fato a não atuação do relé.

7. ENSAIOS EM ALIMENTADOR DA COELCE

Os ensaios de campo foram realizados no alimentador 2114 da subestação de Beberibe. As atividades foram acompanhadas pelos representantes da ALSTOM, GE e ZIV que fizeram também apresentações técnicas ao pessoal da COELCE. Nessas apresentações foi enfocada principalmente a parte de parametrização. Os relés foram parametrizados pelos seus representantes, juntamente com o pessoal da COELCE, e foram também testados em bancada, antes de serem levados ao campo.

A COELCE selecionou previamente três pontos do alimentador para simulação de FTAZ em terrenos de asfalto, areia e terra.

Os relés foram instalados simultaneamente na subestação de Beberibe e cada parametrização foi verificada, bem como as medições de corrente.

A COELCE preparou toda a operação interna e externa necessária para a realização das faltas, com ênfase na parte de cuidados específicos com a segurança de pessoal.

Para cada ponto escolhido, foi previsto realizar a manobra de abertura do alimentador a jusante do ponto e queda do cabo ao solo, com permanência da falha por 1,5 min. Se alguma proteção atuasse, primeiramente a falha seria fisicamente limpa pelo pessoal de apoio no local e, em seguida, o alimentador seria religado. Nesse caso, havendo atuação de um dos relés, estava prevista também a realização do ensaio com a queda do cabo pelo lado da carga. Se nenhum relé atuasse, a falha seria limpa pela atuação da COELCE após decorrido o tempo de 1,5 min e o circuito seria restabelecido no menor tempo possível. Uma foto mostrando a preparação para o ensaio com queda de cabo sobre o asfalto está apresentada na Figura 13.



Figura 13 – Preparação para ensaio no campo.

Para o ponto sobre a terra, como experiência adicional ao projeto, foi previsto também realizar uma operação simulando condições de aterramento forçado do alimentador, utilizada no caso de realização de manutenção no campo. Além dos aspectos de proteção, essa condição foi realizada com o objetivo de avaliar aspectos de segurança com relação à tensão desenvolvida no ponto aterrado. Esse ponto, em condições reais, está acessível ao pessoal que participa da manutenção.

7.1. Ensaio de queda de cabo no campo

Os ensaios de queda de cabo foram iniciados pelo ponto sobre o asfalto. Nesse caso não foi observada nenhuma atividade de arco e nenhuma alteração significativa em qualquer parâmetro elétrico medido do alimentador,

principalmente nas correntes e tensões. Por isso, nenhuma função dos relés foi sensibilizada e não houve atuação.

Houve um caso no qual o cabo caído saiu ao lado do asfalto, passando sobre a terra. Nesse caso houve pequena atividade de arco, como pode ser visto na foto da Figura 14, mas nenhum parâmetro foi sensibilizado e não houve condições para atuação dos relés.



Figura 13 – Detalhe do cabo caído ao lado do asfalto.

Como o ponto previamente escolhido sobre a areia era ainda mais distante, a jusante do ponto do asfalto, e havia expectativa de impedância ainda maior, resolveu-se realizar o ensaio no ponto sobre a areia, próximo ao ponto do asfalto. O ensaio foi realizado e houve pouca atividade de arco, sem atuação dos relés.

O ensaio no ponto sobre a terra foi realizado da mesma forma. Foi observada pouca atividade de arco e também não houve atuação dos relés. O solo nesse ponto é do tipo semi-árido com vegetação típica da região. Não havia no local solo de terra vermelha.

Em todos os casos do ensaio no campo, as alterações nos valores de corrente no alimentador em função da falha foram muito pequenas. Observou-se inclusive uma diminuição do desequilíbrio natural do alimentador durante a falha. Isso ocorreu porque a fase que foi levada ao solo tinha corrente pré-falha inferior às correntes das outras fases. Durante a falta ocorreu aumento da ordem de 10% nessa corrente, tendendo a diminuir o desequilíbrio do alimentador. Nessas condições, nenhuma função dos relés foi sensibilizada.

Durante os ensaios no campo os representantes da GE estiveram em contato com especialistas estrangeiros sobre o módulo HiZ do relé. Vários ajustes de parâmetros, incluindo a mudança da ligação do módulo M1 da entrada de 5 A para a de 1A, foram orientados e realizados sem sucesso. Nessas tentativas, houve casos que o relé da GE atuou indevidamente por causa dos harmônicos naturais presentes nas correntes do alimentador. Provavelmente, se houvesse tempo para

“treinamento” do relé nas condições naturais do alimentador, essa atuação não ocorreria.

7.2. Ensaios de aterramento no campo

Um condutor de cobre de 70 mm² foi utilizado para aterrar uma fase do alimentador no ponto sobre a terra. A haste foi aterrada a uma profundidade de 0,6 m, em condições representativas das utilizadas por ocasião de serviços de manutenção no campo, e o circuito foi energizado. A tensão medida no local, por meio de instrumento indicador com resolução de 1 kV, foi superior a 8,0 kV. Nos instrumentos de medição da subestação, incluindo a parte de tensão dos relés ALSTOM e GE, foram medidas tensões de até 8,2 kV na fase fisicamente aterrada no ponto sobre a terra.

Considerando apenas os resultados dessa medição, ficou caracterizado condição de aterramento não efetivo e, portanto, de risco quanto à segurança de pessoal de manutenção que porventura venha a adotar esse procedimento de aterramento em terreno de alta impedância. O risco desse fato já havia sido alertado pela COELCE por ocasião dos ensaios realizados no CEPTEL, quando qualquer falta para a terra com impedância diferente de zero levava ao desenvolvimento de tensão no ponto da falta, resultante de $Z_{falta} \times I_{falta}$.

8. COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES

O trabalho realizado no âmbito desse projeto, que teve como objetivo principal identificar e avaliar, por meio de ensaios em laboratório e no campo, as possíveis soluções existentes para proteção eficaz em casos de FTAZ, teve a oportunidade de ser pioneiro no país e seus resultados são apresentados também como base para outras concessionárias que têm sistemas similares aos da COELCE.

Os resultados obtidos nas medições de desequilíbrio dos alimentadores da COELCE e nos ensaios em laboratório e no campo, bem como os resultados da análise realizada sobre essas informações, são de grande importância para subsidiar a COELCE na melhoria do desempenho dos sistemas de proteção de seus alimentadores.

Os resultados experimentais do projeto confirmaram a dificuldade de atuação dos sistemas de proteção atualmente disponíveis, e também dos que estão em desenvolvimento pelos fabricantes de relés, incluindo os de maior inovação tecnológica, nos casos de faltas a terra com alta impedância.

Dentre os relés atualmente disponíveis e em desenvolvimento estudados nesse projeto, o relé digital da GE, modelo F60, é único que tem um módulo mais especificamente dedicado a FTAZ em alimentadores. Esse módulo tem características de hardware e principalmente de software avançadas, e utiliza recursos de algoritmos inteligentes e técnicas de processamento de

sinais baseadas em “wavelets”, concentrando-se nas componentes não fundamentais da corrente.

As tentativas de se encontrar soluções para proteção em casos de FTAZ começaram por volta de 1970 e somente nos anos 90 ocorreram as primeiras patentes baseadas na análise das componentes não fundamentais da corrente, atualmente utilizada pela GE. O grande interesse motivador dessa busca de soluções deve-se ao risco muito elevado de acidentes envolvendo vidas humanas, causados por FTAZ. Por isso, é reconhecido que os sistemas de proteção com desenvolvimento específico para casos de FTAZ são destinados a proteger pessoas e propriedades, enquanto que as proteções convencionais baseadas em sobrecorrente são destinadas a proteger os sistemas elétricos.

Especificamente para o sistema de distribuição operado pela COELCE, a maior dificuldade para atuação da proteção em casos de FTAZ está nas características intrínsecas das cargas nos pontos extremos dos alimentadores, principalmente dos alimentadores do interior do estado. Esses pontos extremos podem atender cargas com correntes da ordem de 5% da corrente na saída do alimentador. A queda de um cabo a terra nesses pontos, ficando em condições de alta impedância para a terra, não provoca alterações sensíveis nas correntes ou tensões, de fase ou de neutro, medidas na saída do alimentador, onde estão instalados os relés de proteção e religadores. Nesse caso não há possibilidade de distinção entre a falta e uma variação normal de carga.

No caso dos alimentadores do interior, ocorre também que os transformadores podem trabalhar com carga baixa, introduzindo naturalmente harmônicos no sistema. Essa condição deve ser considerada na lógica baseada nas componentes não fundamentais da corrente, para evitar operação indevida. No caso do relé da GE, faz parte de seu software, que utiliza algoritmo inteligente, um aprendizado sobre as condições normais do sistema, incluindo as piores condições de conteúdo harmônico natural nas correntes do alimentador. Essas condições são utilizadas como limites inferiores para processamento dos harmônicos que podem estar associados a FTAZ.

Pela análise das medições de desequilíbrio realizadas no âmbito desse projeto, observou-se que o sistema da COELCE tem muitos casos com correntes de neutro acima do valor desejado. (Tabela II). Manter a corrente de neutro baixa, ou seja, manter boas condições de equilíbrio no alimentador, é desejável porque isso permite uma parametrização mais sensível da proteção de neutro ou de fase aberta. A COELCE utiliza muito o suprimento de cargas nos extremos dos alimentadores com retorno pela terra, sobrecarregando uma ou duas das três fases e, conseqüentemente, desequilibrando o alimentador em níveis indesejados.

Visando melhorar as condições dos sistemas de proteção nos alimentadores e minimizar os riscos de acidentes

envolvendo pessoas e propriedades, e com base nos resultados obtidos nesse trabalho, a COELCE já está atuando ou considerando a possibilidade de tomar as seguintes providências:

- Desenvolver e implementar um procedimento de controle e correção do desequilíbrio natural dos alimentadores, tendo como meta reduzir a corrente máxima de neutro para 10 A, e parametrizar a corrente de pick up para a proteção de neutro em 15 A. Pela experiência obtida nos ensaios em laboratório, essa condição atenderia, com sensibilidade suficiente, aos casos de faltas a terra com impedâncias de falta até $\approx 250 \Omega$;
- Instalar TC's toroidais nos neutros dos alimentadores para prover mais sensibilidade e independência na parametrização da proteção neutro sensível;
- Utilizar relés com o recurso da função fase aberta ou “broken conductor”, parametrizada pela relação I_2/I_1 , principalmente nos alimentadores da capital, onde as correntes são maiores e há maior probabilidade de obter-se sensibilidade com essa função para os casos de FTAZ. Nesse caso, é importante que a parametrização por I_2/I_1 não seja condicionada a nenhum outro parâmetro, de tal maneira que a proteção atue sempre que o valor limite parametrizado para essa relação seja excedido;
- Instalar religadores distribuídos ao longo dos alimentadores de tal maneira a ter sempre um religador mais próximos dos pontos de falta. Essa ação atenderia principalmente aos casos de FTAZ nos alimentadores do interior, diante da ineficácia das tecnologias de proteção atualmente existentes em detectar falhas que levam à queda de cabos energizados sobre terrenos de alta impedância, ficando expostos ao alcance de pessoas;
- Revisar os procedimentos já existentes de inspeção e manutenção preventiva ao longo dos alimentadores, especificamente com o objetivo de minimizar a possibilidade de rompimento e queda de condutores nos sistemas de distribuição;
- Disponibilizar pontos efetivos de aterramento com baixa impedância por meio de cabos conectados ao neutro do transformador e instalados ao longo do alimentador;
- Revisar os procedimentos de segurança utilizados nas atividades de manutenção em linha morta ou em linha viva no campo, especificamente com o objetivo de ter metodologias direcionadas a evitar os riscos de acidentes por contato de pessoas com pontos energizados.

9. TRABALHOS FUTUROS

Tendo em vista que os resultados obtidos, nos quais estão baseadas as ações indicadas acima, não levaram a soluções plenas para a proteção em casos de FTAZ, considera-se necessária a continuidade desse trabalho com os seguintes focos:

- Acompanhamento das implantações das ações indicadas e avaliação do nível de melhoria obtido com as implementações;
- Avaliação das condições das instalações em trechos de alimentadores com mais de 30 anos;
- Levantamento, classificação e registro contínuo dos casos de queda de cabo que podem resultar em FTAZ;
- Investigação sobre a eficácia de religadores instalados em diferentes pontos ao longo dos alimentadores;

- Investigação sobre possíveis soluções a serem adotadas para garantir a segurança em atividades de manutenção em linha morta ou linha viva no campo;
- P&D buscando inovações tecnológicas que possam ser incorporadas aos relés ou a outros dispositivos instalados nos alimentadores para detectar faltas com as características peculiares das FTAZ, tais como as que ocorrem no sistema COELCE.

10. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à COELCE pelo apoio disponibilizado durante os trabalhos realizados no campo e pelo fornecimento de informações relevantes nas diferentes etapas do projeto, à equipe do laboratório de alta potência do CEPTEL, AP2, em Adrianópolis, pelo empenho na preparação e realização dos ensaios, aos representantes dos fabricantes dos relés que participaram e colaboraram nos ensaios em laboratório e no campo e à ANEEL pela aprovação e apoio que tornaram possíveis a realização desse importante projeto.