



## XIX Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica

SENDI 2010 – 22 a 26 de novembro

São Paulo - SP - Brasil

### **Avaliação e Análise de Alternativas para Ajustes do Sistema de Proteção da ENERSUL em Regiões de Baixa Densidade de Carga**

<b>Alden Uehara Antunes</b>	<b>Fernando Locks Lange</b>	<b>Ademir Sintaro Nakazato</b>
<b>DAIMON</b>	<b>DAIMON</b>	<b>ENERSUL</b>
alden@daimon.com.br	lange@daimon.com.br	ademir.nakazato@enersul.com.br

<b>Antônio P. R. Coura</b>	<b>Eduardo L. C. Marques</b>	<b>Renato O. Guimarães</b>
<b>ENERSUL</b>	<b>ENERSUL</b>	<b>ENERSUL</b>
antonio.padua@enersul.com.br	eduardo.cassamale@enersul.com.br	renatoguimaraes@enersul.com.br

#### **PALAVRAS-CHAVE**

Ajuste da proteção  
Faltas de alta impedância  
Sistema MRT

#### **RESUMO**

Este artigo aborda a proteção de redes primárias que atendem áreas rurais. São enfocados os principais aspectos que caracterizam a distribuição de energia elétrica nestas regiões como o suprimento por alimentadores de elevado comprimento que incluem derivações em configuração MRT e que apresentam baixa potência de curto-circuito, baixa densidade de carga, e desequilíbrio da carga. Em particular, aborda-se o curto-circuito fase-terra de alta impedância que apresenta possibilidade efetiva de ocorrência dado o tipo de solo. São apresentados estudos específicos referentes a análise da proteção convencional nestas áreas e em alimentadores de 3 subestações que suprem regiões com estas características. Com base nos resultados e avaliações efetuadas são indicadas ações que visam mitigar os problemas advindos da ocorrência de faltas de alta impedância em áreas rurais e propiciar melhor eficiência de atuação do sistema de proteção na detecção destes defeitos.

#### **1. INTRODUÇÃO**

Neste artigo apresenta-se uma análise do tópico de ocorrências de curto-circuitos do tipo fase-terra nas áreas rurais da ENERSUL, em particular, referente as faltas de alta impedância, e discute-se um conjunto de alternativas viáveis para simulação, detecção e mitigação deste problema.

Em linhas gerais, o sistema de distribuição da ENERSUL que atende áreas rurais é constituído por alimentadores de elevado comprimento, apresentando grandes derivações em ramais monofásicos integralmente em configuração MRT – Monofilar com Retorno pela Terra.

Não obstante a relevância do sistema de distribuição monofásico em configuração MRT – utilizado em um número expressivo de distribuidoras brasileiras [18] – a modelagem correspondente para cálculo elétrico ainda não foi consolidada de modo apropriado em softwares comerciais de simulação, o que se constitui numa lacuna do setor, dado a avaliação requerida na determinação das correntes referenciais

de ajuste do sistema de proteção referente às condições de carga em operação normal (dada pelas simulações de fluxo de potência) e em condições de falta (dada pelas simulações de curto-circuito) dos circuitos.

No que tange ao ajuste do sistema de proteção dos alimentadores primários da ENERSUL, há dois tópicos analíticos que tem relevância central nas avaliações correlatas às áreas rurais: A reduzida potência de curto-circuito no sistema de distribuição; Os solos predominantes tendem a apresentar uma resistividade elétrica superior ao usual, propiciando a ocorrência das “faltas de alta impedância”.

Desta forma, a corrente elétrica resultante do curto-circuito neste tipo de evento apresenta magnitude reduzida, em geral, inferior às de carga em condição normal, tornando ineficaz a atuação dos dispositivos usuais de proteção que operam segundo o princípio de ocorrência de sobrecorrente.

O problema do curto-circuito de alta impedância constitui-se num dos mais complexos vinculados ao ajuste dos sistemas de proteção de redes primárias. A ocorrência deste evento depende de alguns fatores específicos (basicamente vinculados as condições climáticas, tipo de solo, duração e dinamicidade do evento) e que tendem a ter grande influência na magnitude das correntes elétricas de falta.

Há, ademais, outro aspecto a ser ponderado no contexto de operação do sistema de distribuição da ENERSUL: O desequilíbrio acentuado da carga em alguns alimentadores que atendem áreas rurais constitui-se num problema adicional concernente aos requisitos para uma calibração eficaz da proteção, dado que as correntes elétricas referenciais de pick-up de neutro são ajustadas em patamar mais alto que o usual.

Dentro deste quadro, o artigo aborda os seguintes tópicos principais de análise.

## **2. O SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO EM CONFIGURAÇÃO MRT**

Sabe-se que os investimentos requeridos para fornecimento elétrico em regiões periféricas da área de concessão, o que em muitas ocasiões impõe a construção de ramais de média tensão bastante longos, representam montantes elevados, muitas vezes vinculados ao atendimento de um número reduzido de consumidores.

Tal situação ocorre com frequência em áreas rurais, que se caracterizam por apresentar uma grande distância entre o consumidor e a subestação de distribuição; um espaçamento elétrico normalmente elevado entre os transformadores que atendem os consumidores (comparando-se com a área urbana); além de uma baixa densidade de carga. Tal contexto reflete a situação atual de atendimento presente nas áreas rurais da ENERSUL.

De modo a viabilizar o atendimento elétrico a todos os consumidores, e em conformidade com as características expostas, os sistemas em configuração MRT tornam-se economicamente vantajosos para os investimentos, dado que não requerem um cabo de retorno (fase ou neutro).

Normalmente, o retorno da corrente elétrica segue um caminhamento pelo solo até a malha de aterramento da subestação.

O sistema de distribuição MRT pode apresentar diversas configurações construtivas. Entre elas destacam-se [18]:

- ✓ Sistema Monofilar;
- ✓ Sistema Monofilar com Transformador de Isolamento;
- ✓ Sistema MRT na versão Neutro Parcial.

A configuração mais utilizada nos Sistemas MRT é a Monofilar, onde uma ramificação de um circuito trifásico originado de uma subestação com o lado secundário das transformações em estrela aterrada viabiliza o atendimento dos transformadores de distribuição monofásicos conectados a jusante deste ponto de derivação, a partir do caminhamento elétrico respectivo.

Cada transformador de distribuição monofásico será conectado entre o condutor de fase e a terra mediante a instalação de um aterramento elétrico individualizado. Em particular, essa configuração é a utilizada no sistema de distribuição da ENERSUL. A Figura 1 ilustra esta configuração.

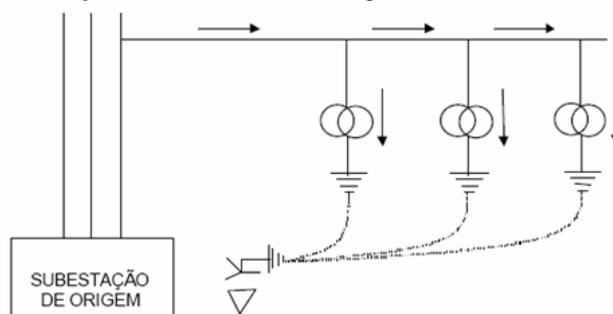


Figura 1. Representação de um sistema MRT

### 3. O CURTO-CIRCUITO DE ALTA IMPEDÂNCIA

Conforme mencionado, o curto-circuito de alta impedância constitui-se num fenômeno de grande complexidade, dependente de alguns aspectos, entre os quais: Umidade e temperatura ambientes, natureza do solo, extensão do contato da fase com a terra, características do contato (dinamismo do condutor no solo), duração do evento, entre outros.

Alguns estudos pesquisados indicam que há tipos de solo que favorecem a ocorrência de curtos-circuitos de alta impedância podendo, inclusive (dependendo das condições), caracterizá-lo como um meio isolante, entre eles [18]: asfalto seco; concreto; areia seca, entre outros.

As faltas de alta impedância apresentam algumas características básicas embora seja muito difícil uma generalização, dado a imprevisibilidade da ocorrência deste fenômeno [14]: Não linearidade (ou seja, não puramente senoidal) dada a formação do arco-elétrico (caracterizando o sinal pela fundamental e algumas harmônicas); Variação aleatória dos picos de corrente; Assimetria entre os ciclos negativos e positivos.

Em geral, as faltas assim caracterizadas apresentam correntes elétricas extremamente baixas (muito inferiores as correntes de carga) o que impede um ajuste eficaz do sistema de proteção convencional que se fundamenta na ocorrência de sobrecorrente.

Neste contexto, a grande maioria dos equipamentos de proteção desenvolvidos comercialmente para tratamento deste tipo de ocorrência (relés de alta impedância) apoia-se nas características qualitativas do sinal referente ao curto-circuito e não na sua intensidade.

O levantamento bibliográfico indicou que o princípio de atuação da grande maioria dos equipamentos apoia-se na existência do arco-elétrico.

Entretanto, esta característica é prejudicada pelo aspecto de que há alguns tipos de cargas especiais que também injetam harmônicas no sistema de distribuição de ordem e características similares as das faltas de alta impedância, o que dificulta a generalização de algoritmos de detecção que se apóiem primordialmente neste parâmetro (não obstante existirem pesquisas correlatas e técnicas propostas fundamentadas no conteúdo harmônico).

Entre as técnicas encontradas na literatura para detecção das faltas de alta impedância (algumas delas implementadas na lógica de relés de alta impedância comerciais) incluem-se [21]:

- ✓ Sistemas especialistas fundamentados no princípio de indução;
- ✓ Decomposição do sinal referente a corrente de falta a partir da Transformada de Wavelet;
- ✓ Modelos heurísticos fundamentados em árvores de decisão;
- ✓ Modelos fundamentados em Lógica Fuzzy;
- ✓ Modelos estatísticos;
- ✓ Monitoramento do desequilíbrio de tensão;
- ✓ Modelos fundamentados em redes neurais artificiais;

- ✓ Análise do arco elétrico e conteúdo harmônico;
- ✓ Outras técnicas fundamentadas na lógica dos relés tradicionais.

#### **4. MODELO DE CÁLCULO ELÉTRICO**

Em linhas gerais, o algoritmo consiste numa variante do Método de Gauss (largamente utilizado em aplicações de cálculo elétrico de sistemas de potência) adaptado para redes de distribuição radiais ou fracamente malhadas.

##### **4.1. MÉTODO DE GAUSS ADAPTADO**

Para aplicação do Método de Gauss Adaptado na simulação de cálculo elétrico de alimentadores primários, inicialmente devem ser tecidas considerações específicas concernentes ao modelo de representação da rede e da carga.

Referentes ao modelo de representação da rede são considerados.

- ✓ Trechos de rede representados pelo modelo de linha média (hipótese relevante no contexto operativo dos alimentadores primários da ENERSUL que atendem áreas rurais, caracterizados por uma grande extensão);
- ✓ Cálculo dos elementos da matriz de impedâncias considerando-se as seguintes hipóteses: Circuitos com até 3 condutores de fase e um de neutro, com ou sem transposição; Condutores singelos; Neutro aterrado no início dos circuitos;
- ✓ Cálculo das impedâncias próprias e mútuas utilizando-se o Método das Imagens;
- ✓ No cálculo das impedâncias são considerados os seguintes dados: Configuração dos condutores no poste (altura em relação ao solo e distância entre as fases); Resistência ôhmica ( $\Omega/\text{km}$ ) de cada condutor para uma determinada temperatura de referência; Raio médio geométrico (RMG) de cada condutor; Comprimento do trecho.

A representação da carga é efetuada considerando-se o consumo dos clientes, as respectivas curvas de cargas típicas (levantadas nos ciclos tarifários revisionais a partir de procedimento atualmente estabelecido no Módulo 2 – “Planejamento da Expansão do Sistema de Distribuição” do PRODIST [17]) e respectiva agregação nos transformadores de distribuição.

A caracterização da demanda é dada por patamares diários (madrugada, manhã, tarde e noite). Em relação aos transformadores de consumidores primários consideram-se o tipo (convencional ou horo-sazonal) e as demandas contratadas ou registradas. Também se considera a medição de potência no início do circuito ou as correntes em pontos específicos dos alimentadores para ajuste das demandas diversificadas.

Neste contexto, o algoritmo de fluxo de potência pode ser resumido da seguinte forma.

- a. Inicializam-se as tensões nas barras de carga, usualmente com tensão de 1 pu e fase nula;
- b. Calculam-se, em função do modelo de carga utilizado, as correntes impressas nas respectivas barras;
- c. Por meio de equação matricial, determinam-se as tensões nodais das barras de carga;
- d. Calculadas as tensões nodais determina-se, para cada barra, o desvio resultante entre duas iterações consecutivas.
- e. Caso alguma barra apresente o respectivo desvio superior a um valor de tolerância pré-fixado, repetem-se os passos b, c e d a partir das tensões nas barras de carga determinadas na última iteração;
- f. Encerra-se o processo iterativo de determinação das tensões nodais quando os desvios de todas as barras do alimentador forem inferiores ao valor pré-fixado de tolerância.

No modelo de cálculo implementado, o dado da impedância de aterramento dos transformadores monofásicos conectados ao sistema MRT constitui-se em dado configurável por região elétrica suprida pelo respectivo alimentador, de modo a refletir uma possível diversidade de valores efetivos avaliados

em compatibilidade ao perfil de área atendida (e constituição física dos solos).

#### **4.2. MODELO DE CÁLCULO DE CURTO-CIRCUITO**

Considerando-se as mesmas hipóteses adotadas no modelo de fluxo de potência concernentes à representação da rede e da carga pode-se sumarizar o modelo de cálculo de curto-circuito implementado a partir dos seguintes aspectos.

- ✓ Devem ser fornecidas as potências de curto-circuito trifásico e fase-terra referentes ao equivalente do sistema a montante da subestação, bem como os valores referenciais de impedância de falta configuráveis por região visando a simulação de curto-circuitos que envolvam contato entre condutor e solo. Desta forma, determinam-se as impedâncias equivalentes correspondentes;
- ✓ Calculam-se as impedâncias equivalentes de seqüência zero e direta no circuito utilizando-se a ordenação da rede;
- ✓ Calculam-se as correntes de defeito, além da sobretensão nas fases sãs, por barra, para curto-circuitos fase-terra, trifásico (apenas para os trechos trifásicos) e dupla-fase (para trechos trifásicos e bifásicos).

Desta forma, os modelos de cálculo elétrico abordados permitem um estabelecimento apropriado das correntes referenciais de proteção com base nos diferentes tipos de faltas (a partir do modelo de curto-circuito) e das condições de carregamento em operação normal (avaliadas a partir do modelo de fluxo de potência) em compatibilidade com o sistema de distribuição da ENERSUL que apresenta elevado desequilíbrio da carga, sistema de distribuição em configuração MRT, possibilidade efetiva de ocorrência de faltas de alta impedância e baixa potência de curto-circuito.

#### **5. MEDIÇÃO DAS IMPEDÂNCIAS DE FALTA**

Visando subsidiar estudos aprofundados que permitam um ajuste mais preciso dos sistemas de proteção no que tange a atuação em eventos de curto-circuito fase-terra foram pesquisados métodos na literatura técnica que viabilizassem a medição das impedâncias de faltas.

Destaca-se que no setor, concernente às análises de proteção de redes primárias, normalmente utilizam-se valores de impedâncias de falta situados numa faixa entre 20 e 40  $\Omega$ , constituindo-se em dados referenciais que carecem de um respaldo mais apurado [8].

A concepção inicial que orientou a pesquisa previa o estabelecimento de uma faixa de impedâncias de falta vinculadas ao tipo de solo, condições climáticas, extensão do contato, entre outros aspectos, determinada mediante a realização de ensaios específicos ou a partir de modelos apropriados de simulação.

Neste contexto, foram pesquisados os seguintes métodos de avaliação das impedâncias de falta.

- ✓ Método indireto: Consistindo na determinação do valor de impedância de falta que propiciasse, para cada evento de curto-circuito fase-terra levantado, a convergência dos valores de correntes resultantes de cálculo elétrico com os efetivamente aferidos por medição;
- ✓ Método de ensaio em laboratório: Execução num ambiente controlado da queda de um condutor (fase) operando em média tensão num conjunto específico de tipos de solo. Se possível, dever-se-ia avaliar a viabilidade de utilização de uma fonte de alimentação apropriada, de modo a se operar com uma potência de curto-circuito minimamente aceitável;
- ✓ Método direto: Execução de um ensaio real de curto-circuito, a partir da queda de uma fase de um alimentador primário ao solo.
- ✓ Métodos de medição em campo: Considerando-se adaptações de métodos clássicos de medição de resistência de aterramento ou de resistividade do solo.

Dos métodos citados, dada a imprevisibilidade da evolução da falta conforme levantado em pesquisa bibliográfica anterior, optou-se pela respectiva avaliação a partir da execução de ensaios em campo, consistindo numa adaptação do Método de Volt-Amperímetro [5] utilizado nas medições de

impedância de aterramento.

Desta forma, propôs-se uma adaptação do arranjo tradicional empregado neste método [19] conforme ilustrado na figura 4, de modo a reproduzir uma condição próxima a da ocorrência de um curto-circuito do tipo fase-terra.

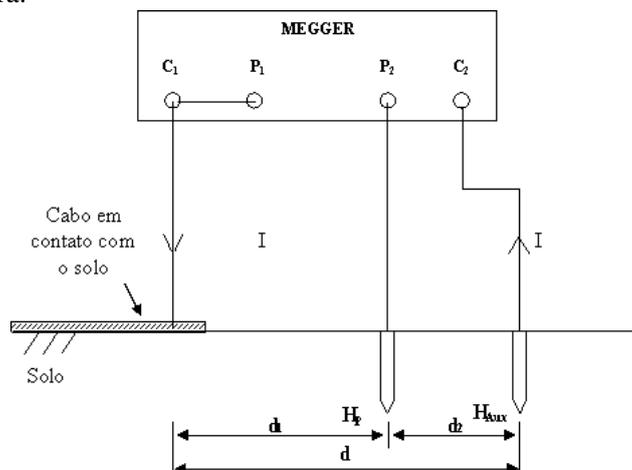


Figura 4. Arranjo adaptado para medição de impedância de falta

Na figura 4 são definidos os seguintes termos.

- ✓  $C_1, C_2$ : Terminais de injeção e retorno da corrente elétrica;
- ✓  $P_1, P_2$ : Terminais de potencial, onde é medida a respectiva diferença de tensão.
- ✓  $H_{aux}$ : Haste auxiliar com a função de propiciar o retorno da corrente de defeito;
- ✓  $H_p$ : Haste de potencial na qual é medida a tensão em relação à haste  $H_{AT}$ ;
- ✓  $I$ : Corrente elétrica injetada no solo pela fonte de corrente;
- ✓  $d_1$ : Espaçamento entre o ponto de medição e a haste  $H_p$ ;
- ✓  $d_2$ : Espaçamento entre as hastes  $H_p$  e  $H_{aux}$ ;
- ✓  $d$ : Espaçamento entre o ponto de medição e a haste  $H_{aux}$ .

Neste contexto, foram efetuados dois ensaios buscando obter a impedância de falta referente à simulação de um curto-circuito dado por um condutor singelo (representando uma fase), com cabo do tipo 4/0 CA (usualmente utilizado no tronco dos alimentadores de distribuição da ENERSUL) em contacto com o solo.

O primeiro ensaio foi efetuado em área situada próximo ao Mini-Anel de Campo Grande, entre a saída das cidades de Dourados e Três Lagoas, no período da manhã num ambiente seco e de muito calor. Seguem os dados gerais referentes a esse ensaio.

- ✓ Data de realização: 27/11/2008
- ✓ Período do dia: Manhã
- ✓ Tipo de solo: Terra (argila arenosa)
- ✓ Temperatura ambiente: 35 graus
- ✓ Clima: Seco e ensolarado
- ✓ Extensão do contato: 84 m

Efetuaram-se 4 medições variando-se a haste de potencial visando aferir a influência no resultado de impedância de falta que, entretanto, apresentou pouca variação oscilando entre 1.477,0 e 1.510,0 ohms.

A Figura 5 ilustra o condutor utilizado no ensaio referente à simulação de curto-circuito fase-terra e a Figura 6 ilustra o aparelho utilizado na medição, o Megger.



Figura 5. Ensaio I: Conductor no solo simulando um curto-circuito fase-terra



Figura 6. Aparelho utilizado nas medições

O segundo ensaio foi realizado num campo de treinamento situado na própria sede da ENERSUL no mesmo dia do primeiro ensaio, porém, no período da tarde em ambiente seco e de calor ainda intenso (embora menor que no período da manhã). Seguem os dados gerais referentes ao segundo ensaio realizado no mesmo dia do primeiro, com o mesmo cabo e extensão do contato.

- ✓ Período do dia: Tarde
- ✓ Tipo de solo: Grama e argila arenosa
- ✓ Temperatura ambiente: 28 graus
- ✓ Clima: Seco e ensolarado

Com o mesmo procedimento adotado no primeiro ensaio, efetuaram-se 4 medições variando-se a haste de potencial que, novamente, apresentou pouca variação oscilando entre 1.536,0 e 1.591,0 ohms.

Cabe destacar, ademais, que visando complementar os ensaios realizados e aumentar a confiabilidade das medições efetuadas a partir do Medidor Megger, foi utilizada uma placa metálica como superfície de contato com o solo obtendo-se uma resistência medida superior a 20.000,0 ohms, praticamente isolando o meio de contato.

Não obstante o número reduzido de ensaios efetuados e de algumas limitações do método empregado (baixa potência de curto-circuito; condição de contato estática; baixo nível de tensão de simulação utilizado; entre outros), os valores obtidos de impedância de falta vinculam-se a condições plausíveis de ocorrência.

Neste contexto, concluiu-se que não se fazia necessário um número maior de experimentos, bem como a utilização de métodos alternativos visando futuras comparações e/ou validações concernentes aos valores de impedância de falta obtidos.

## 6. ANALISE DA PROTEÇÃO CONVENCIONAL

Foram estudados alguns eventos específicos de ocorrências de curtos-circuitos de alta impedância na área de concessão da ENERSUL em 2009, com destaque para casos verificados nas localidades de São Gabriel D'Oeste, Coxim, Costa Rica, Bataiporã e Jardim [20].

O procedimento adotado consistiu em pesquisa ao banco de dados de ocorrências da ENERSUL denominado CRO – Consulta de Registro de Operação que contém as informações vinculadas a todos os eventos de desligamentos aferidos pela distribuidora.

Nesta pesquisa efetuou-se um filtro das ocorrências que se vinculavam o rompimento de cabos e onde a proteção não atuou. Destaca-se que no levantamento dos casos, eventualmente procedeu-se a um contato telefônico direto com as equipes que efetuaram o reparo da ocorrência visando dirimir dúvidas e corrigir possíveis desvios nas informações registradas.

A seguir, detalha-se a ocorrência levantada na Localidade de São Gabriel D'Oeste, que se constitui num caso típico bastante característico das dificuldades encontradas pela distribuidora no que tange ao

tratamento de faltas de alta impedância. O caso descrito ocorreu no dia 10 de julho de 2009, por volta das 19 hs.

Esta região é suprida pelo alimentador SGO-03 pertencente à subestação São Gabriel D'Oeste (SGO). A seguir, ilustram-se os principais dados qualitativos deste alimentador.

- ✓ Tensão de operação: 13,8 kV
- ✓ Demanda máxima: 3,5 MVA
- ✓ Extensão total (tronco e ramais): 88,2 km
- ✓ Total de transformadores atendidos: 162

O evento se deu em trecho de ramal constituído por cabo 2 AWG CA que se rompeu numa ponte sobre um córrego. O local situa-se na área urbana da cidade sendo que o vão da travessia interliga a região central com o bairro e é utilizado por veículos e pedestres.

O lado fase ficou sobre o corrimão de concreto e o lado carga sobre o asfalto. Destaca-se que no momento do rompimento não havia circulação de pedestres, veículos ou animais na ponte.

A figura 9 ilustra o diagrama esquemático do circuito destacando-se o ponto de ocorrência do curto-circuito (barra 4).

A figura 10 ilustra o traçado topológico do alimentador SGO-03 destacando-se os itens de interesse (localização da subestação e do ponto de defeito).

Observa-se na figura 9 que os dados estimados por cálculo elétrico das correntes referenciais de curto-circuito trifásico, fase-terra franco e fase-terra com impedância de defeito (admitindo-se um valor de  $40,0 \Omega$  de resistência de contato entre condutor e solo) no ponto são, respectivamente, 1820 A; 1385 A e 488 A.

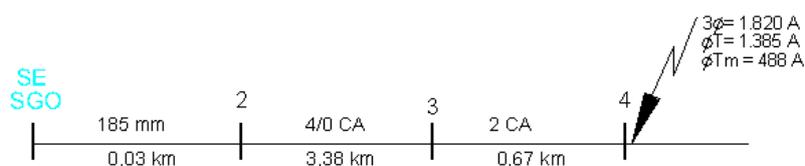


Figura 9. Diagrama esquemático do alimentador SGO-03

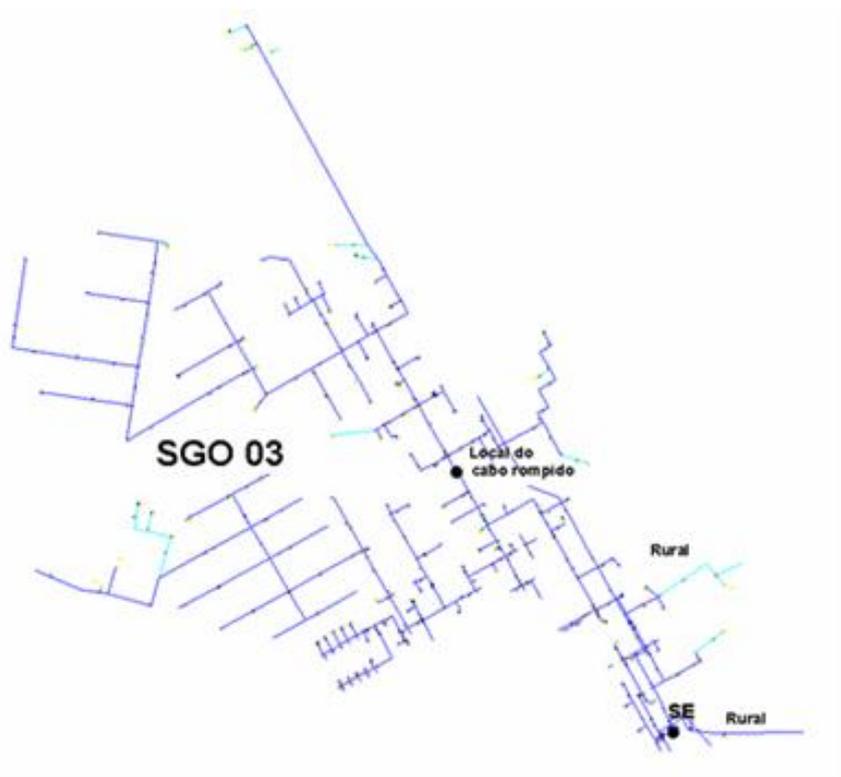


Figura 10. Traçado topológico do alimentador SGO-03

A proteção do trecho em análise é efetuada, basicamente, pelo relé da subestação que conta com os seguintes ajustes.

- ✓ Partida de fase: 300 A
- ✓ Ajuste de atuação (Fase): Adota-se a curva ANSI - Very Inverse (muito inversa)
- ✓ Partida de Neutro: 48 A
- ✓ Ajuste de atuação (Neutro): Adota-se a curva ANSI - Very Inverse (muito inversa)
- ✓ Outros ajustes: Unidades instantâneas de fase e de neutro bloqueadas.

A oscilografia deste evento indicou a seguinte seqüência de operação.

- ✓ Primeira atuação: Fase C para a terra em 1246 A;
- ✓ Segunda abertura: Fase C para a terra em 1269 A;
- ✓ Seqüência: Após o 2º religamento a corrente trifásica momentânea reduziu-se para um patamar menor, em 427 A, registrando logo em seguida uma queda acentuada para níveis normais em torno de 130 A, com isso, não propiciando desligamento definitivo.

Uma característica marcante deste evento em particular, e da grande maioria dos casos registrados refere-se a evolução qualitativa do curto-circuito que, em geral, apresenta uma corrente elétrica inicial elevada que pode até sensibilizar a proteção e viabilizar a seqüência de operação (religamentos), mas com uma tendência de redução drástica num curto espaço de tempo motivado pela formação do arco elétrico e vitrificação do solo e a conseqüente elevação repentina da impedância de falta.

Desta forma, ao final ter-se-á uma corrente de curto-circuito baixa e que não sensibiliza a proteção.

Alinha-se a essa característica a dificuldade de calibração da proteção de neutro para tratamento de eventos de curto-circuitos fase-terra decorrente do desequilíbrio acentuado da carga, tal como pode ser visto na análise deste caso onde a corrente de ajuste para o alimentador analisado foi fixada num patamar de 48 A.

## **7. SOFTWARE DE SIMULAÇÃO E ESTUDO DE CASO**

Com base nos estudos de curto-circuito em áreas rurais, desenvolveu-se uma série de aplicativos computacionais agregados a um software de análise de sistemas de proteção de redes primárias de distribuição denominado Interprote.

Em particular, destacam-se as seguintes funcionalidades.

- ✓ Implementação do aplicativo de fluxo de potência segundo o Método de Backward-Forward Sweeps para tratamento sistemas de distribuição que atendem áreas rurais em configuração MRT;
- ✓ Recursos de configuração específica dos valores de resistência de aterramento para os transformadores monofásicos, sendo configuráveis por área de atendimento (ou, no limite, editável por transformador);
- ✓ Recursos de configuração das impedâncias de falta por área de atendimento visando simulação de curto-circuitos fase-terra;
- ✓ Recursos de visualização gráfica no coordenograma das curvas de tempo x corrente dos diversos equipamentos de proteção visando análises de coordenação e seletividade.

Neste contexto, efetuou-se um estudo específico em área piloto contemplando alimentadores de 3 subestações que atendem áreas rurais com as características desejadas: Elevado comprimento (algumas centenas de quilômetros incluindo tronco e ramais); baixa densidade de carga; rede monofásica integralmente em configuração MRT; baixa potência de curto-circuito; solos que favorecem a ocorrência de faltas de alta impedância (inclusive, com registros progressos deste tipo de evento).

As subestações escolhidas foram: Aquidauana, Mimoso e Coxim que incluem, respectivamente, 4, 1 e 4 alimentadores operando em 13,8 kV (a análise não contemplou os circuitos destas subestações que operam em 34,5 kV).

Um aspecto notável (já mencionado no item de análise da proteção convencional) é a elevada

calibração das correntes de ajuste de neutro (devido ao desequilíbrio acentuado da carga) que oscila entre 20 A (para alimentadores com baixo carregamento, em torno de 1 MVA) a 120 A (para 1 alimentador da subestação Aquidauana com carregamento superior a 5 MVA). Destaca-se que para 6 dos 9 circuitos contemplados, a partida da proteção de neutro é fixada em 60 A.

De uma forma geral, para uma impedância de falta fixada em  $40,0 \Omega$  (referência padrão no setor concernente aos estudos de proteção de redes primárias), para todos os 9 alimentadores consegue-se viabilizar a atuação da proteção, mesmo nos pontos mais periféricos dos respectivos ramais, mediante ajuste adequado dos dispositivos que combinam os equipamentos principais (relés e religadoras instaladas na saída e/ou no tronco dos circuitos) e os que protegem as derivações de rede (elos fusíveis), auferindo-se no mínimo uma condição de seletividade.

Ressalta-se, entretanto, que devido aos elevados comprimentos dos alimentadores e seus respectivos ramais, nem sempre é possível auferir a coordenação efetiva dos elos fusíveis dispostos em série.

Dada a possibilidade efetiva de ocorrência de faltas de alta impedância, considerando-se uma faixa mais crítica de possíveis valores de resistência de contato entre condutor e solo de até  $100 \Omega$  (ou seja, 150% acima do valor de referência fixado em  $40 \Omega$ ), ter-se-ia ainda a possibilidade de uma atuação da proteção para os alimentadores das subestações Aquidauana e Coxim (o alimentador de Mimoso, devido a corrente de curto-circuito estimada inferior a 10A, provavelmente já não viabilizaria a detecção da falta por meio da proteção convencional).

Esta constatação denota a predominância da impedância da rede sobre a da falta, aspecto compatível com os elevados comprimentos dos circuitos, bem como a existência de alguns trechos longos com condutor de pequena bitola (entre eles, o cabo S04).

Admitindo-se valores de impedância de falta superiores a  $100 \Omega$ , em geral, para os 9 alimentadores estudados já se caracterizariam curto-circuitos de alta impedância, impedindo uma atuação eficaz do sistema de proteção convencional de redes primárias que se fundamenta no princípio de ocorrência de sobrecorrente elétrica.

Dentro deste quadro, o estudo mostra, ademais, que diretrizes plausíveis podem ser adotadas visando mitigar os problemas advindos da ocorrência de faltas de alta impedância em áreas rurais, entre as quais.

- a. Busca por ações de otimização que visem minorar o desequilíbrio da carga, o que permitiria alterar as correntes de ajuste da proteção de neutro para patamares menores.
- b. Estudo de alternativas que viabilizem o aumento da potência de curto-circuito dos alimentadores primários. Entre elas, destaca-se a possibilidade de instalação de transformadores de isolamento em pontos estratégicos dos circuitos de média tensão e compatíveis com redes de distribuição em configuração MRT o que viabilizaria esse aumento a jusante do ponto de instalação. Em particular, a figura 11 mostra o diagrama esquemático de um sistema MRT suprido por transformador de isolamento;
- c. Exploração mais efetiva dos dispositivos de proteção alternativos, principalmente, os relés comerciais de alta impedância, que embutem lógicas inteligentes e se fundamentam na identificação do defeito a partir de aspectos qualitativos do sinal referente às grandezas elétricas (conteúdo harmônico, características do arco-elétrico, monitoramento do desequilíbrio de tensão, entre outros);
- d. Para o caso dos alimentadores que apresentam quantidade relativamente elevada de registros de faltas de alta impedância, uma alternativa cabível seria privilegiar a seletividade ao invés da coordenação, favorecendo a queima de fusíveis antes da atuação dos religadores e relés. Esta premissa é compatível com o aspecto relatado no item VI (“Análise da proteção convencional”) onde, normalmente, o primeiro contato da fase com o solo não caracteriza uma falta de alta impedância, mas, com a formação do arco-elétrico e a vitrificação do solo, o desdobramento do curto-circuito evolui para esta condição indesejável. Há, certamente, um prejuízo da confiabilidade

dos circuitos (que será captado na mensuração dos indicadores de continuidade regulados). Entretanto, deve-se ponderar com prioridade a questão da segurança na busca do melhor compromisso entre este aspecto e a qualidade de atendimento.

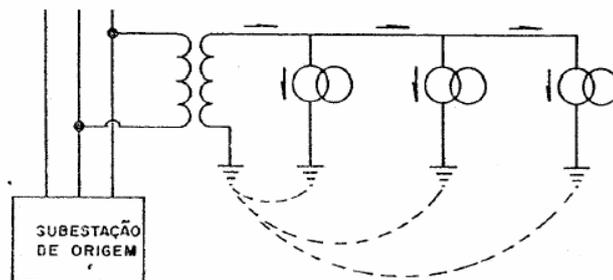


Figura 11 – Sistema Monofilar com Transformador de Isolamento

### 7.1. AJUSTE EM UMA ÁREA DE BAIXA DENSIDADE DE CARGA

Visando demonstrar um ajuste da proteção em uma área de baixa densidade de carga da Enersul, fora utilizado o circuito AQU01 por se tratar de um alimentador com características de carregamento baixo (aproximadamente 30 A no trecho que está localizado a chave religadora, ver Figura 12), e por se tratar de um circuito bastante longo, do ponto de curto-circuito da simulação até a saída do circuito, é percorrida uma distância elétrica de 95 km, e a distância elétrica do ponto de defeito até a chave religadora que será ajustada é de 61 km.

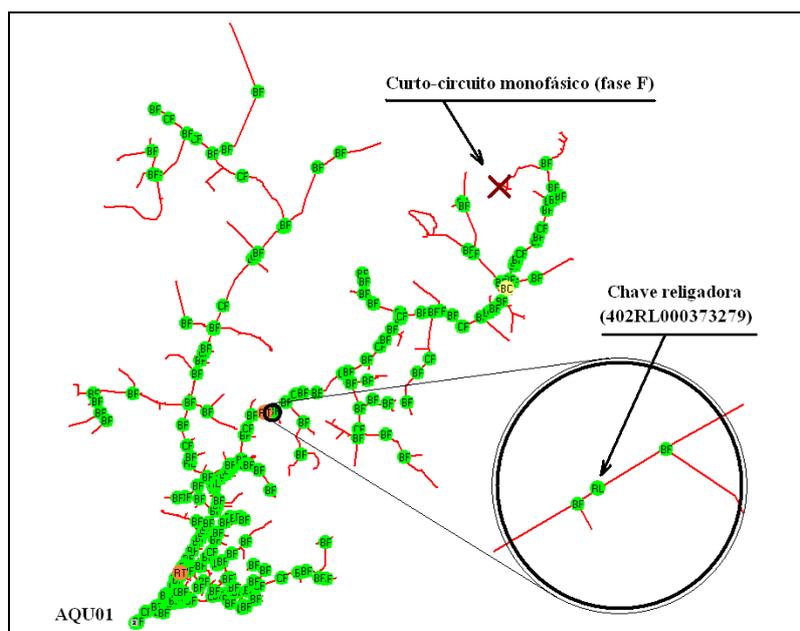


Figura 12 - Circuito AQU01 escolhido para o ajuste do dispositivo de proteção do tipo chave religadora digital.

Tabela 1 – Dados de ajustes sobre a chave religadora 402RL000373279.

Numero do Eq.		Identificação		Alimentador		Tipo de Equipamento	
402RL000373279		Fazenda Carolina		AQU 01		Nulec WSOS	
Ajustes							
Fase				Neutro			
I Pickup	Curva	Dial	Instantânea	I Pickup	Curva	Dial	Instantânea
50 A	IEC EI	0.1	OFF	15 A	IEC MI	1.0	OFF

Com o auxílio do Interprete, pôde-se efetuar o ajuste da chave religadora no software e aferir os resultados diante da condição de falta. A Figura 13 e 14 mostram os ajustes realizados no software. No

qual os trips 1 e 2 da chave religadora buscam “salvar” o elo fusível próximo ao ponto de defeito (método *fuse-save*).

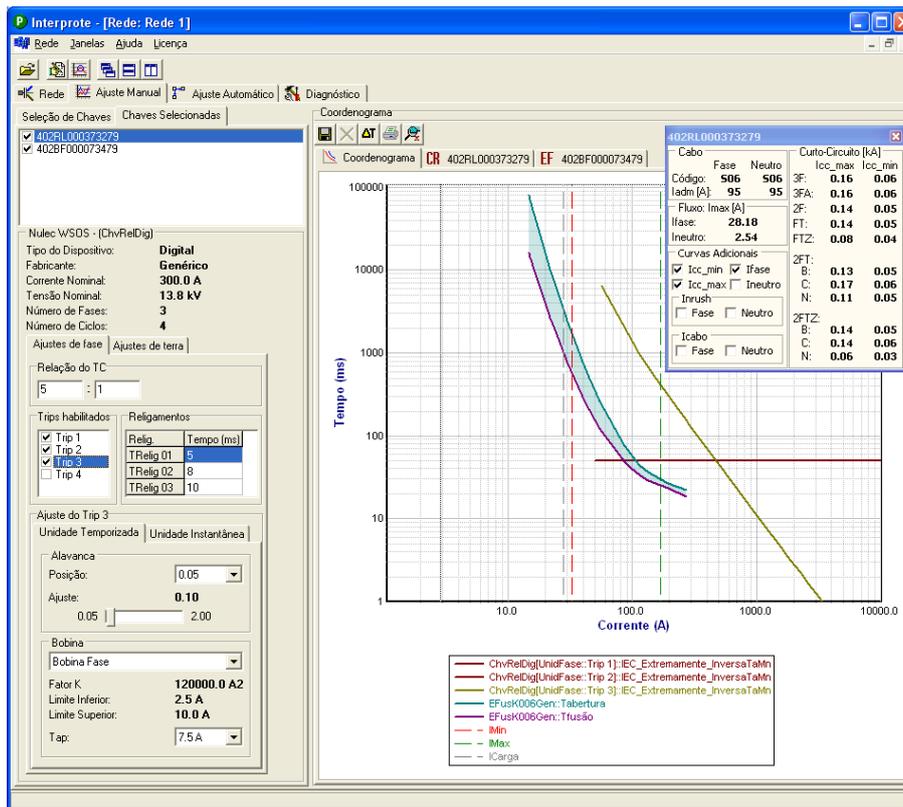


Figura 13 - Coordenação proteção da chave religadora com e um elo fusível tipo K6.

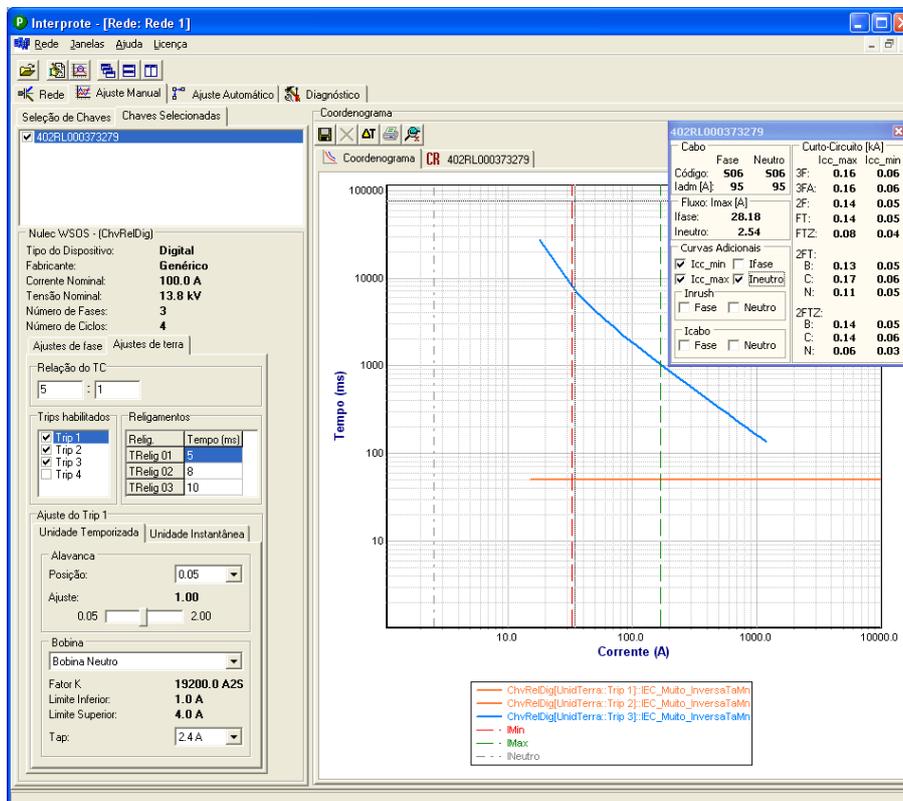


Figura 14 - Ajuste da unidade de terra do religador.

No ajuste da unidade de fase (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**13) se observa que os *trips* instantâneos 1 e 2 da chave religadora atuará se circular uma corrente acima de 50 A, todavia os níveis

de curto-circuito do ramal protegido pelo elo K6 não chega a 50 A e, nesse caso, nunca irá sensibilizar a unidade de fase do religador para essa contingência. Todavia pelo ajuste da unidade de terra seria sensibilizado, para a resistência de defeito de 40  $\Omega$ , evitando a queima do fusível.

## 7.2. VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA DE DEFEITO

Para demonstrar se a proteção definida será sensibilizada mediante a variação da resistência de defeito no ponto escolhido de curto-circuito, será alterada de 40  $\Omega$  para 100  $\Omega$  e depois para 1000  $\Omega$ .

Pelas Figuras 15 e 16, pode-se observar que, com a variação da resistência de defeito de 40  $\Omega$  para 100  $\Omega$ , a corrente de curto-circuito mínima se altera de 26 A para 19 A, portanto continuaria a sensibilizar a chave religadora pelo ajuste da unidade de terra, que possui a corrente de pick-up ajustada em 15 A.

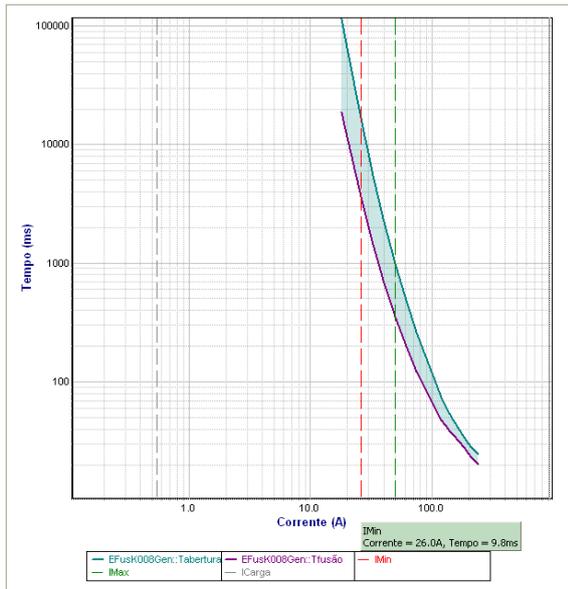


Figura 15. Curto-circuitos mínimo e máximo (resistência de defeito de 40  $\Omega$ )

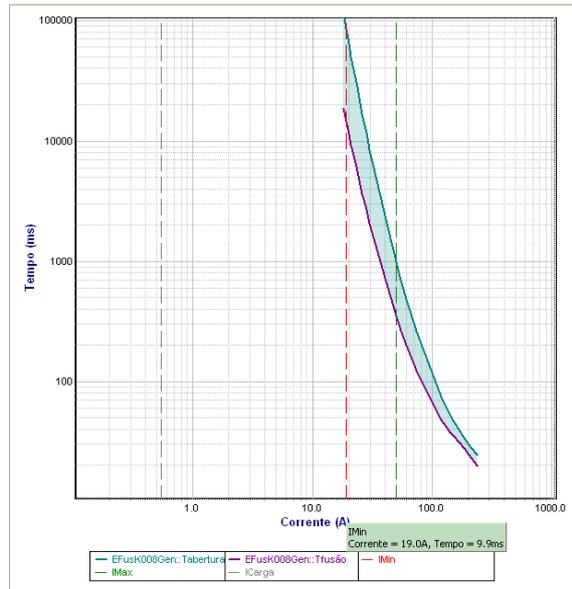


Figura 16. Curto-circuitos mínimo e máximo (resistência de defeito de 100  $\Omega$ ).

No entanto, quando se varia a resistência de defeito para 1000  $\Omega$ , a corrente de curto-circuito mínima (envolvendo a terra) se altera para 3,6 A, assim não sensibilizará a proteção e caracterizará uma falta de alta impedância, sito Figura 17.

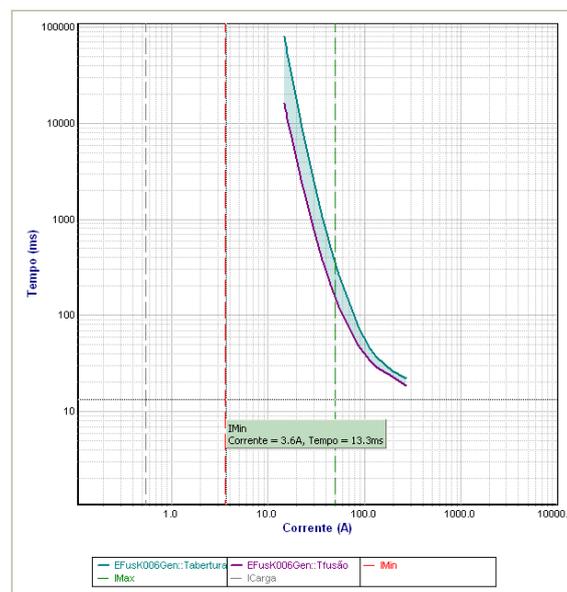


Figura 17. Curto-circuitos mínimo e máximo (resistência de defeito de 1000  $\Omega$ ).

## 8. CONCLUSÃO E COMENTÁRIOS FINAIS

Neste artigo foram abordados os principais tópicos influentes no que tange as análises de proteção de redes primárias que atendem áreas rurais.

Foram destacadas as principais características de atendimento destas áreas bem como as peculiaridades presentes no sistema de distribuição da ENERSUL constituído por alimentadores de elevado comprimento, incluindo derivações de rede monofásica de grande extensão em configuração MRT e que apresentam, em geral, uma baixa potência de curto-circuito ao longo dos circuitos.

Ademais, os alimentadores primários que atendem estas áreas registram um desequilíbrio da carga mais acentuado que o usual, impondo a necessidade de ajuste da proteção de neutro em patamares mais elevados de correntes de pick-up. Referente a este contexto, um aspecto complicador vincula-se ao perfil dos solos que caracterizam as áreas rurais da ENERSUL, que por sua natureza e constituição propiciam a ocorrência efetiva de faltas de alta impedância.

Neste contexto, efetuaram-se estudos específicos concernentes ao modelo de cálculo elétrico (visando melhor representação e simulação de alimentadores que incluam derivações em configuração MRT), a caracterização do curto-circuito de alta impedância (com destaque para a formação do arco-elétrico) e a medição da impedância de falta a partir da adaptação adequada de um método clássico (“Volt-Amperímetro”) utilizado na medição da resistência de aterramento (na qual foi possível verificar a possibilidade efetiva do elevado valor resultante).

Abordaram-se, ademais, estudos específicos de análise da proteção convencional em áreas rurais da ENERSUL e de alimentadores primários de 3 subestações que atendem regiões com estas características.

À luz dos estudos efetuados foram indicadas algumas ações efetivas visando mitigar os problemas advindos da ocorrência de faltas de alta impedância e propiciar melhor eficácia de atuação do sistema de proteção na detecção destes eventos que podem acarretar prejuízos incomensuráveis à segurança de pessoas, animais e ao sistema de distribuição.

O exemplo demonstrado com o software Interprote no último capítulo provou que faltas de alta impedância não podem ser sensibilizadas por critério de sobrecorrente e, sensibilizar o ajuste de terra reduzindo a corrente de pick-up para um valor mais próximo da corrente de defeito mínima detectada poderia ser uma solução que comprometesse a confiabilidade do sistema, visto que sistemas MRT apresentam um desequilíbrio de carga acentuado, podendo ter corrente de retorno pela terra com valores maiores do que os simulados.

Os tópicos abordados, estudos efetuados e conjuntos de aplicativos desenvolvidos e agregados ao software de proteção utilizado nas avaliações constituem uma relevante contribuição ao tópico de análise de faltas de alta impedância (com foco específico neste trabalho nas áreas rurais), provavelmente, o mais complexo concernente às análises de proteção de redes primárias de distribuição.

## 9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Esta seção deve apresentar as referências bibliográficas que deram suporte técnico e/ou científico ao trabalho. São apresentados, a seguir, alguns formatos corretos para vários tipos de referências.

*Periódicos:*

- [1] HOROWITZ, S. H.; PHADKE, A. G., THORP, J. S. “Adaptative Transmission System Relaying” IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 3, Nº4, October 1998.
- [2] D. Shirmohammadi, H. W. Hong, A. Semlyen e G. X. Luo. “A compensation-based power flow method for weakly meshed distribution and transmission networks”. IEEE Transactions on Power Systems, v.3, n.2, p.753-762. 1988.

- [3] Tinney, W. F. "Compensation Methods for Network Solutions by Triangular Factorization". PICA Conference. Boston, Mass. May 24-26, 1971. p.
- [4] G. X. Luo e A. Semlyen "Efficient load flow for large weakly meshed networks". IEEE Transactions on Power Systems, v.5, n.4, p.1309-1316. 1990.

*Livros:*

- [5] G. Kindermann; J. M. Campagnolo, "Aterramento Elétrico". 4ª edição – Porto Alegre – RS, Brasil, 1998. Editora Sagra Luzzatto."

*Artigos em Anais de Conferências (Publicados):*

- [6] F. S. Santos; D. Karlsson; S. Lindahl; J. Zakonjsek, "Oportunidades, Desafios e Preocupações na Proteção Sistêmica". XVIII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. Curitiba - PR, Brasil, 2005.
- [7] R. L. Valadão; C. Pereira; E. P. Cardoso; H. M. Veloso; J. C. M. Lima, "SISLOC – Nova Versão de Sistema de Localização de Falhas para Linhas e Redes de Distribuição e sua Aplicação a Casos Reais e Simulados". XVIII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. Curitiba - PR, Brasil, 2005.
- [8] A. U. Antunes; C. C. B. Oliveira; J. C. Guaraldo; A. P. Cunha; D. P. Duarte; H. P. Schmidt; D. Prioli; R. Queiroga; H. G. B. Souza, "Avaliação de Desempenho e Possíveis Ajustes do Sistema de Proteção para Sistema Desequilibrado com Neutro Multi-Atterrado". IV CITENEL - Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica, Araxá – MG, Brasil, 2007.
- [9] H. M. JABR; A. I. MEGAHED "A Wavelet-FIRANN Technique for High-Impedance Arcing Faults Detection in Distribution Systems" IPST '05 - Montréal, Canada, June 19-23, 2005.
- [10] C. G. WESTER "High Impedance Fault Detection On Distribution Systemss". Rural Electric Power Rural Conference, Papers Presented at the 42nd Annual Conference, Pages C5 – 1-5, April 26-28, 1998.
- [11] S. A. Kunsman, "System for Detection of High Impedance Fault". 19th International Conference on Electricity Distribution, CIRED, Paper 0876, Viena, May 21-24, 2007.

*Dissertações e Teses:*

- [12] E. Rufato Júnior, "Viabilidade Técnica e Econômica da Modernização do Sistema de Proteção da Distribuição," Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 2006.
- [13] Nanni, M. "Estimador de Estado Robusto Baseado no Método da Mínima Mediana". Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2009.
- [14] M. Moreto "Localização de Falhas de Alta Impedância em Sistemas de Distribuição de Energia: Uma Metodologia Baseada em Redes Neurais Artificiais" Dissertação de mestrado, Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – RS, Brasil, 2005.
- [15] D. A. Oliveira Junior "Falhas de Alta Impedância: Detecção e Localização de Rompimento de Condutores em Circuito Primário de Redes Aéreas de Distribuição Baseado em Desequilíbrio de Tensão". Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte – MG, Brasil, Maio de 2006.
- [16] C. V. S. Malagodi, "Sistema de Proteção para Falhas de Alta Impedância". Dissertação de mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo – SP, Brasil, 1997.

*Normas:*

- [17] ANEEL - PRODIST – Procedimentos de Distribuição, Módulo 2 – “Planejamento da Expansão do Sistema de Distribuição”. ANEEL Agência Nacional de Energia Elétrica. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br>.

*Relatórios Técnicos:*

- [18] A. U. Antunes, D. Antonelli, R. H. L. Trindade, "Pesquisa Bibliográfica sobre Procedimentos de Ajuste da Proteção". Relatório Técnico Daimon Engenharia e Sistemas / ENERSUL, São Paulo, 2008.
- [19] A. U. Antunes, F. L. Lange, "Avaliação das Impedâncias de Falta em Áreas de Baixa Densidade de Carga da ENERSUL". Relatório Técnico Daimon Engenharia e Sistemas / ENERSUL, São Paulo, 2008.
- [20] A. U. Antunes, F. L. Lange, A. S. Nakazato "Avaliação da Proteção Convencional em Áreas de Baixa Densidade de Carga da ENERSUL ". Relatório Técnico Daimon Engenharia e Sistemas / ENERSUL, São Paulo, 2009.
- [21] A. U. Antunes, F. L. Lange. “Software computacional para dimensionamento e ajuste do sistema de proteção da ENERSUL em áreas de baixa densidade de carga”. Relatório Técnico Daimon Engenharia e Sistemas / ENERSUL, São Paulo, 2010.

*Artigos Apresentados em Conferências (Não publicados):*

- [22] DAQING, HOU. “**Detecção de Falhas de Alta Impedância nos Sistemas de Distribuição de Energia**”. Artigo Técnico da SEL, Schweitzer Engineering Laboratories, Inc., Setembro, 2006.