XX Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica
SENDI 2012 - 22 a 26 de outubro
Rio de Janeiro - RJ - Brasil

denys lellys	Jose Giordane Silveira	Jose Victor Q. Juca
Alstom Brasil Ltda. - T&D	Companhia Energética do Ceará	Companhia Energética do Ceará
denys.lellys@alstom.com	giordane@coelce.com.br	victorjuca@coelce.com.br

Comparação do Desempenho da Proteção Diferencial de Linha em relação às Proteções Sobrecorrente Direcional e de Distância, aplicada em Linhas Curtas Experiência da COELCE

Palavras-chave

Curto-circuito
Diferencial
Faltas Múltiplas
Oscilografia
Simulação
Sobrecorrente

Resumo

Este artigo técnico tem como finalidade apresentar, de forma didática, um estudo comparativo entre o desempenho das proteções de sobrecorrente direcional / distância e a proteção diferencial de linha aplicadas em linhas de transmissão curtas que operam em regiões de alta salinidade nas proximidades do litoral.

Será apresentado também uma análise do fenômeno das faltas múltiplas bem como a experiência e a solução adotada em um caso real através da instalação da proteção diferencial de linha pela Companhia Energética do Ceará – COELCE nas linhas de 69 kV que interligam duas de suas subestações.

Ao final do trabalho serão apresentados os resultados comparativos de desempenho entre as proteções de sobrecorrente direcional / distância e a proteção diferencial de linha aplicada às linhas apresentadas neste artigo.

1. Introdução

Todo e qualquer sistema elétrico está sujeito a defeitos de natureza transitória ou permanente, apesar dos cuidados tomados durante a elaboração do projeto e execução das obras de instalação. Esses defeitos poderão ter conseqüências bastante danosas, dependendo da eficiência ou não do sistema de proteção

projetado para aquela instalação em particular. A proteção de qualquer sistema elétrico tem como finalidade isolar o mais rápido possível o menor trecho sob falha, evitando assim maiores danos aos equipamentos da instalação e protegendo as pessoas que por ventura estejam próximas ao sistema defeituoso. Além disso, as empresas fornecedoras de energia elétrica estão buscando a menor interrupção possível de seus serviços aumentando assim o grau de complexidade do sistema de proteção associado aos equipamentos de manobra.

A região estudada está localizada em Fortaleza, eixo Água Fria, próxima ao litoral, envolvendo cinco subestações de 69kV, sendo 03 (três) da Coelce – Companhia Energética do Ceará e 02 (duas) SE´s particulares. Este eixo é suprido pelas barras de 69 kV das subestações Delmiro Gouveia ou Fortaleza, ambas pertencentes a Companhia Hidroelétrica do São Francisco - CHESF.

As subestações avaliadas são: Água Fria (AGF); Moinho Dias Branco (MDB); Mucuripe (MCP); Papicu (PAP) e Petrobrás (PBR), todas interligadas por linhas paralelas formando um sistema em anel conforme ilustra a Figura 01.

Os detalhes do regional Delmiro Gouveia (DMG), avaliados neste trabalho, podem ser observados na Figura 02 onde é possível observar todas as SE´s que compõem o regional, bitola dos condutores, distância entre as SE´s, etc.

A situação bastante particular deste regional é a alta salinidade presente na região devido à proximidade das linhas com o litoral. Neste caso é levada em consideração a poluição presente nos isoladores ao longo das linhas que influenciam no comprometimento da isolação dos mesmos fazendo com que haja ruptura do dielétrico quando da existência de faltas que provoquem sobretensões no sistema contribuindo para que ocorram faltas múltiplas em pontos distintos.

A avaliação do desempenho das proteções existentes (sobrecorrente direcional / distância) será feita tomando como base a simulação de curtos circuitos através do software ANAFAS e da análise de ocorrências e oscilografias de faltas ocorridas no sistema da Coelce focando o eixo Água Fria pertencente ao regional Delmiro Gouveia.

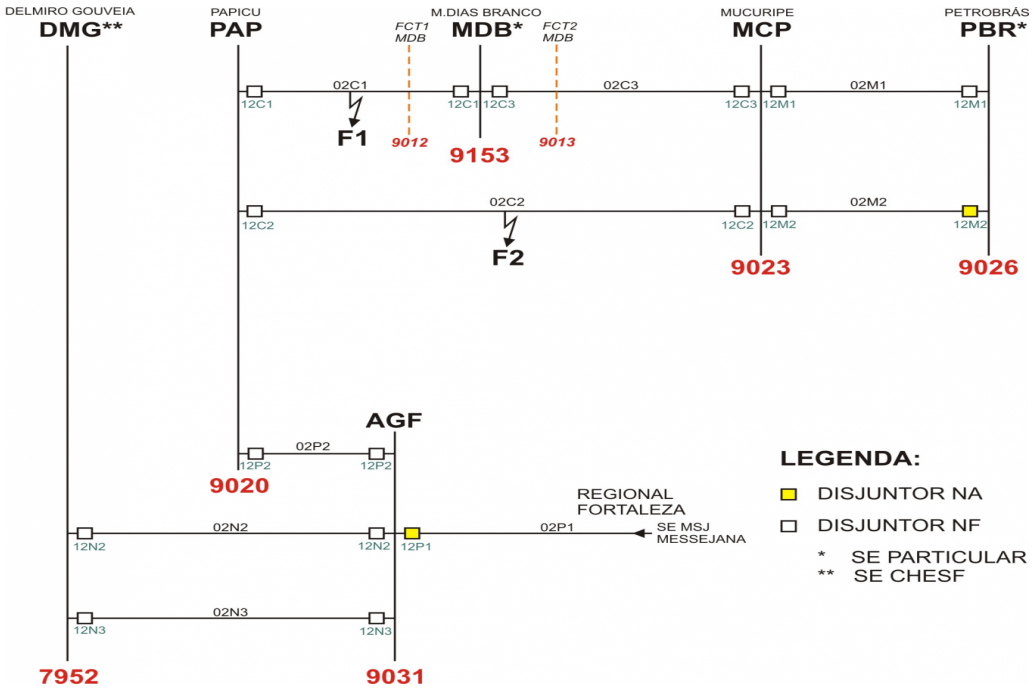

Figura 01 - Eixo Água Fria

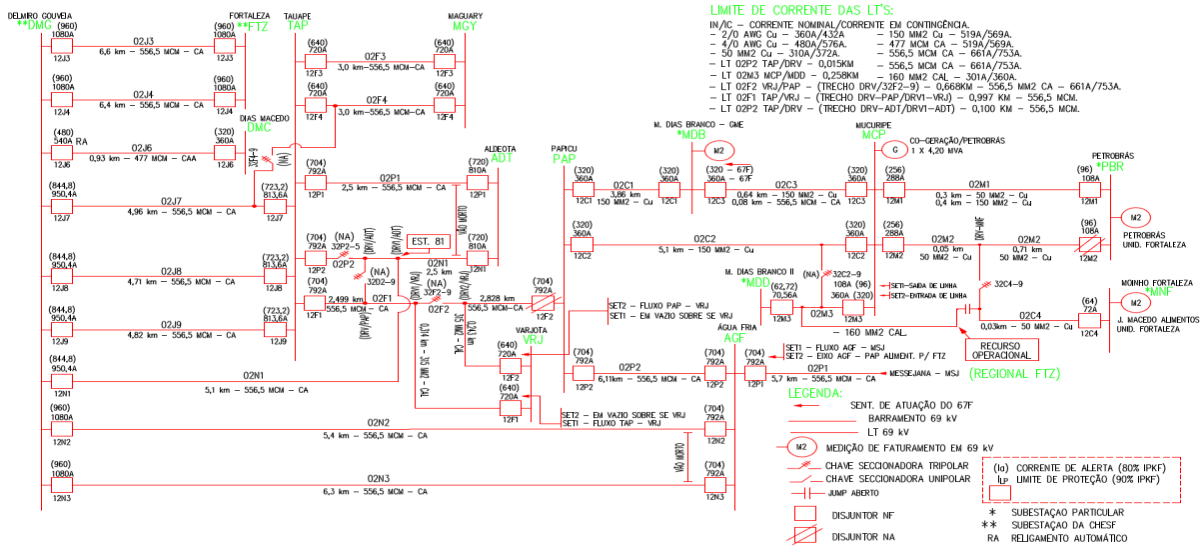

Figura 02 - Regional Delmiro Gouveia

2. Desenvolvimento

2.1. Histórico e Análise do Fenômeno das Faltas Múltiplas

As faltas múltiplas aconteciam com maior freqüência no período de setembro a dezembro quando a maior intensidades dos ventos poluem os isoladores mais severamente. Nesta condição, quando da ocorrência de um defeito monofásico em um ponto específico do sistema gerando sobretensões nas demais barras adjacentes de onde ocorreu o primeiro defeito originava assim vários outros pontos de defeito.

Isso se devia ao fato de que os isoladores estavam poluídos e sua tensão de isolação diminuía fazendo com que houvesse ruptura do seu dielétrico quando da presença de sobretensão nas fases sãs, ocasionando várias faltas fase-terra ao longo do eixo.

A seguir apresentamos um exemplo de uma ocorrência real que desencadeou uma série de faltas múltiplas no sistema.

De acordo com a Figura 03, inicialmente temos um curto-circuito no ponto 1 (Fase B-Terra) na subestação Aldeota (ADT).

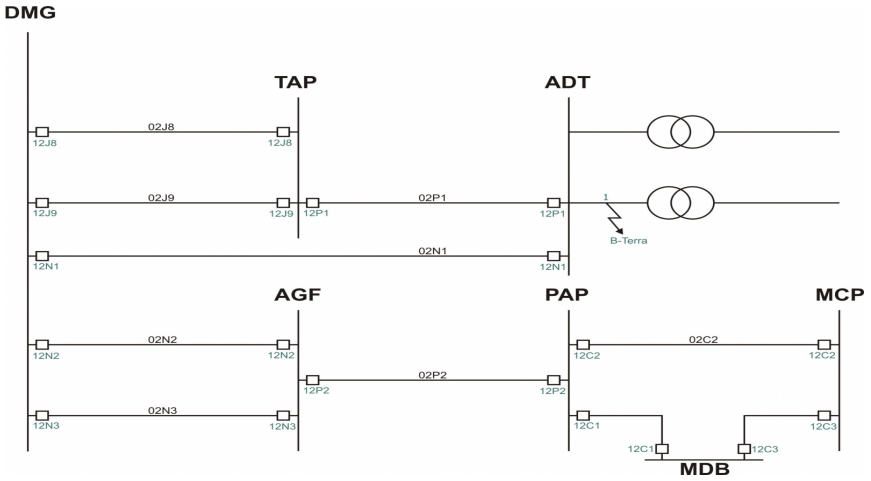

Figura 03 – Ocorrência de Faltas Múltiplas no Regional Delmiro Gouveia

Em seguida temos a atuação das proteções de sobrecorrente direcionais de fase e de neutro do relé de proteção associado ao disjuntor 12C1 da subestação MDB. Esta atuação foi devida a um curto-circuito fase-terra nas fases A e C ocasionado pela perda de isolação nas referidas fases geradas por sobretensões oriundas do primeiro defeito no ponto 1 conforme ilustra a Figura 04.

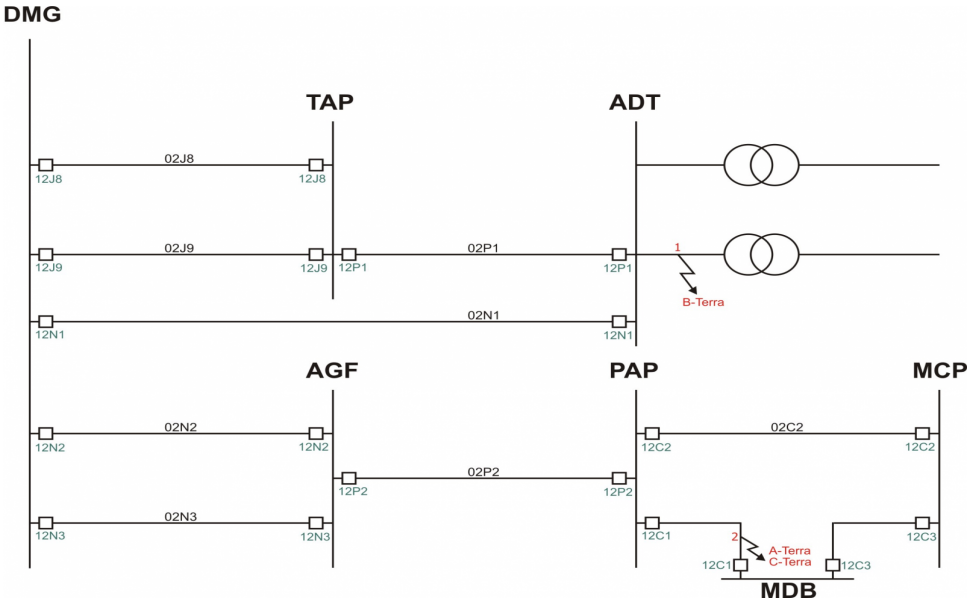

Figura 04 – Ocorrência de Faltas Múltiplas no Regional Delmiro Gouveia

Em seguida ocorreu abertura dos disjuntores 12P1 da subestação Tauape (TAP) pela atuação da Proteção de Distância Zona 2 (21) e 12P1 da subestação Aldeota (ADT) pela atuação da Proteção de Sobrecorrente Temporizado de Neutro (51N). Em seguida se deu a abertura dos disjuntores 12N2 e 12N3 da SE Água Fria (AGF) pela atuação da Proteção de Sobrecorrente Direcional de Neutro (67N). E por último, a abertura do disjuntor 12N1 da SE Aldeota (ADT) pela proteção de Sobrecorrente Temporizado de Neutro (51N). Todas essas aberturas estão em seqüência, ilustradas na Figura 05.

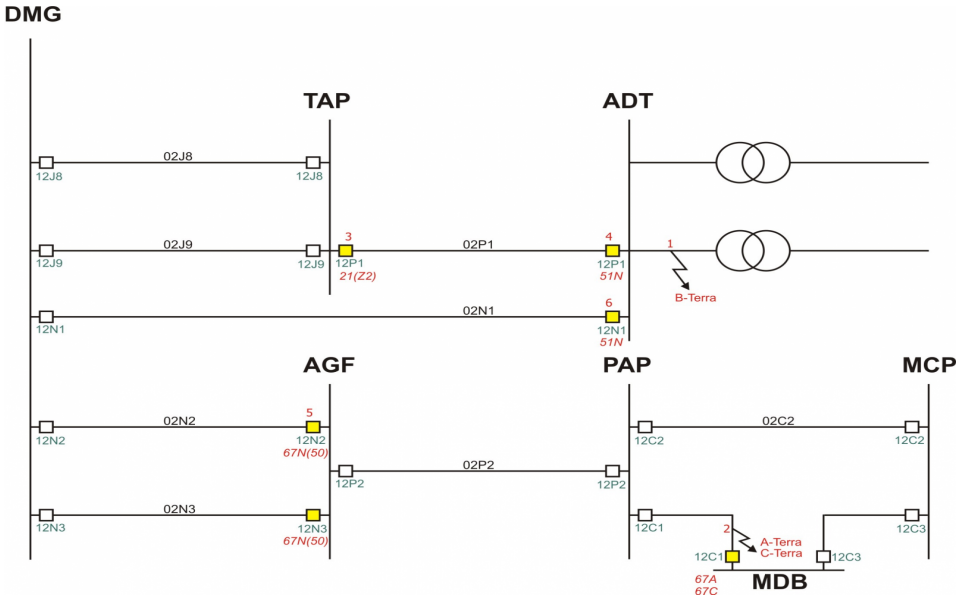

Figura 05 – Ocorrência de Faltas Múltiplas no Regional Delmiro Gouveia

Na Figura 06 temos a oscilografia de tensão e corrente coletada nesta ocorrência a partir do relé de proteção associado ao disjuntor 12N2 da subestação AGF. Dividimos a oscilografia em 05 momentos e a seguir

vamos descrever cada um deles.

No momento 1 temos as sobretensões (na ordem de 50kV) nas fases A e C e afundamento de tensão na fase B devido ao defeito em no ponto 1 (Figura 05). Como consequência destas sobretensões, temos a ruptura de isolação no ponto 2 (Figura 05) ocasionando curto-circuito das fases A e C para a terra.

No momento 2 temos uma diminuição das sobretensões nas Fases A e C devido a abertura do disjuntor 12C1 da subestação MDB (Figura 05) e partir deste ponto temos a sobrecorrente nas fases A e C devido a perda de isolação originada incialmente no ponto 2 (Figura 05). Vejamos que mesmo com a abertura do disjuntor 12C1 MDB (ponto 2) a sobrecorrente permanece confirmando assim o fenômeno das faltas múltiplas.

No momento 3 e 4 temos uma diminuição das sobretensões nas Fases A e C e uma leve recuperação na tensão da Fase B (defeito original) devido a abertura dos disjuntores 12P1 da subestação TAP e 12P1 da subestação ADT (pontos 3 e 4 – Figura 05).

No momento 5 temos a abertura do disjuntor 12N2 da subestação AGF (ponto 5) extinguindo por completo todas as faltas múltiplas ocasionadas pelo defeito original.

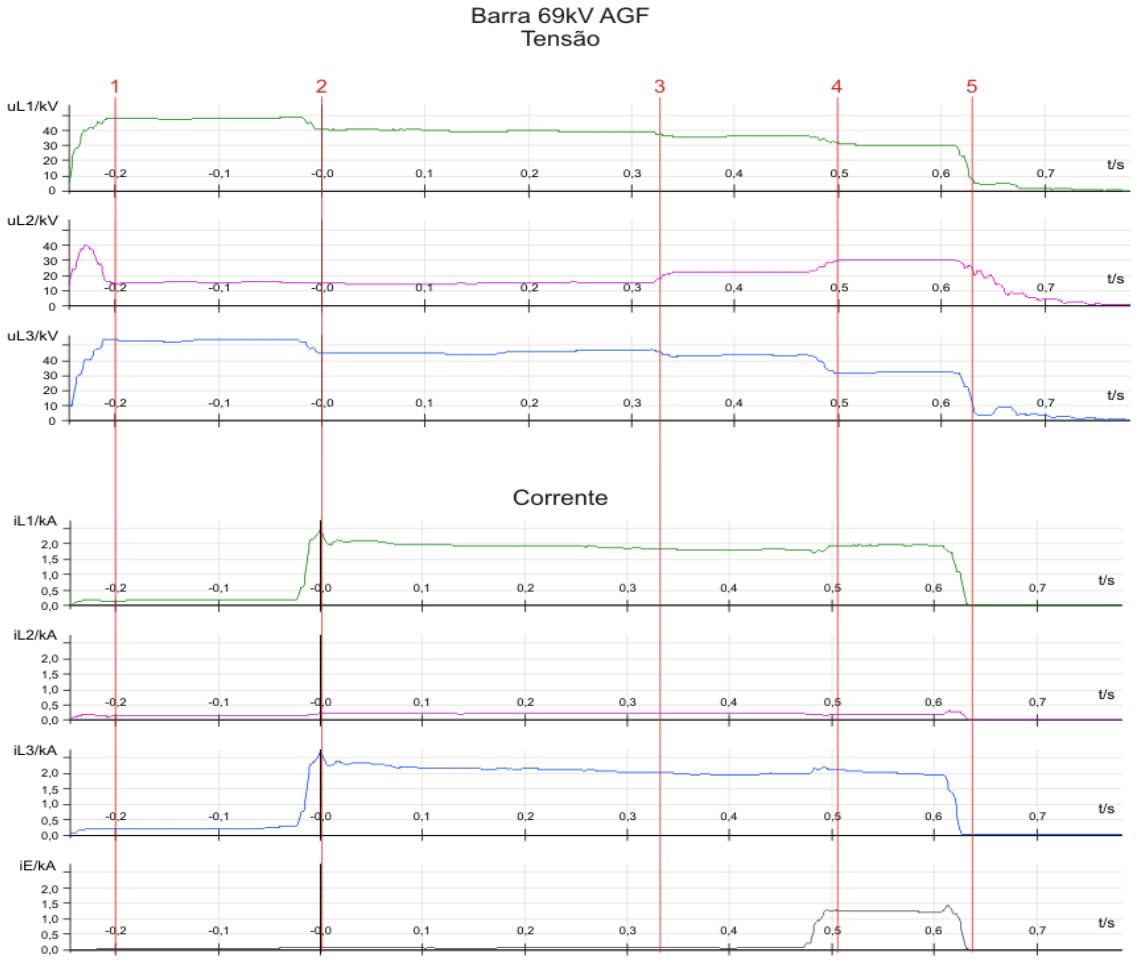

Figura 06 – Oscilografias de tensão e corrente do disjuntor 12N2 da SE AGF

Como foi possível observar, este tipo de falta é bastante danosa para o sistema elétrico, onde a partir de apenas um defeito é originado vários outros, aparentemente sem relação direta com o primeiro. Para resolver esse problema, foi adotada uma solução através de sistemas de proteção diferencial de linha cuja característica principal é a sua imunidade a faltas externas e tempo de operação rápida independente do tipo de falta, permitindo solucionar o fenômeno das faltas múltiplas e minimizando bastante o número de linhas que ficavam indisponíveis desde a implantação desta solução.

2.2. Procedimento de Simulação dos Curtos-Circuitos

Como citado anteriormente, as simulações de curto-circuito foram feitas utilizando o software ANAFAS desenvolvido pelo CEPEL. O ANAFAS é um programa computacional para cálculo de curtos-circuitos que permite a execução automática de grande número de faltas, inclusive deslizantes, e resultados orientados a pontos de falta ou de monitoração. Possui também serviços auxiliares como cálculo de equivalentes e estudo de superação de equipamentos.

O ANAFAS simula internamente os curtos-circuitos através de banco de dados fornecido pelo o usuário. No nosso caso, o banco de dados carregado no software, foi o do regional Delmiro Gouveia onde seu diagrama unifilar está ilustrado na Figura 02.

Além dos nomes e siglas de cada barra, elas possuem um número que as identificam no software, conforme podemos observar na Figura 01, cada barra tem seu número na parte inferior.

Em cada caso avaliado foram feito curtos-circuitos trifásico, bifásico e fase-terra. Como veremos a seguir, os detalhes de cada simulação vão estar explicitados, onde será possível avaliar as correntes e tensões no local da falta bem como nas demais barras adjacentes.

2.3. Simulação dos Curtos-Circuitos

O método utilizado para simulação do curto-circuito através do software ANAFAS, se dá através da solução orientada a ponto de falta onde o software determina a tensão e a corrente nos pontos de falta, a tensão nas barras de contribuição, a tensão nas barras vizinhas a elas e as correntes nos circuitos delas para as barras de contribuição.

A seguir iremos apresentar os resultados das simulações feitas nos pontos de falta F1 e F2 conforme ilustrado na Figura 01.

a) Avaliação da Proteção de Sobrecorrente Direcional

A proteção de sobrecorrente direcional (código ANSI 67) surge para solucionar os casos de faltas em linhas paralelas. A seguir iremos analisar o desempenho desta proteção para faltas no eixo Papicu-Mucuripe, relacionando as correntes de curto-circuito simuladas no software ANAFAS com os tempos de ajustes das proteções configuradas em cada relé de proteção. Podemos observar a partir da Figura 07, um curto-circuito trifásico no ponto F1, como ficam as tensões e as correntes em cada barra do eixo.

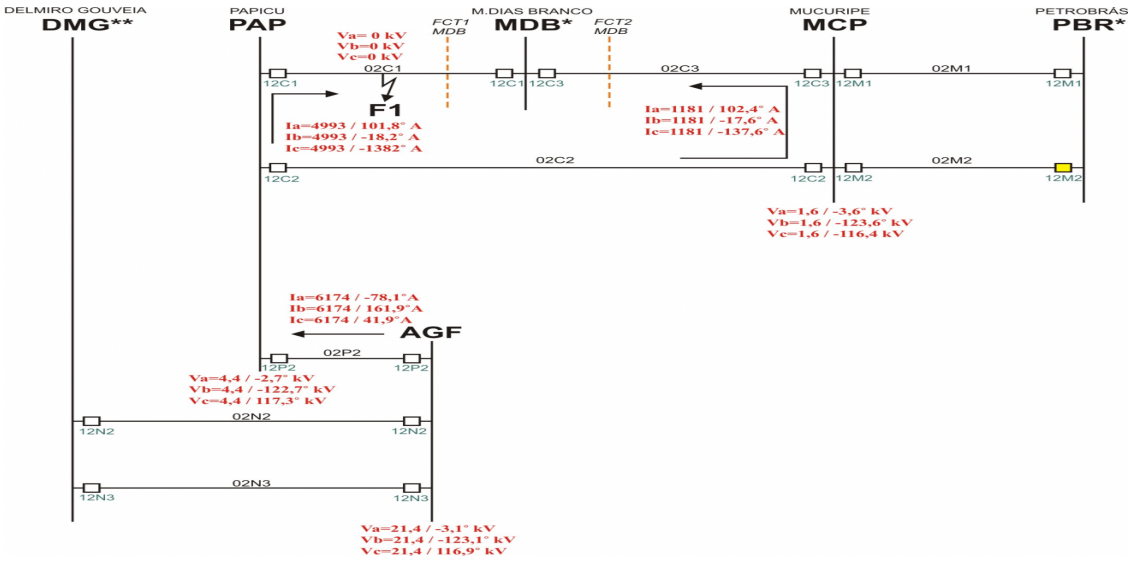

Figura 07 – Tensões e Correntes após curto-circuito trifásico no ponto F1

Para um curto-circuito no ponto F1 da Figura 07, a corrente de curto-circuito passante pelo disjuntor 12C1 PAP é de 4993 A fazendo com que sua proteção de sobrecorrente instantânea atue em um tempo de 0,7 segundos de acordo com o gráfico da Figura 08. A corrente passante pelo disjuntor 12C1 MDB do referido curto-circuito é de 1181 A fazendo com que sua proteção de sobrecorrente direcional atue instantaneamente (0s). Dessa forma o defeito é extinto retirando apenas a linha 02C1 deixando as demais SE´s supridas pela linha 02C2. Devemos ressaltar que para o valor de curto-circuito de 1181A no terminal da SE MDB, a proteção de sobrecorrente atuaria em um tempo de 4,3 segundos, bem maior do que o tempo da proteção de sobrecorrente direcional, funcionando assim como uma proteção de retaguarda, caso a proteção principal venha a falhar.

Do ponto de vista teórico e pratico o esquema de proteção seria perfeito, ou seja, para um curto-circuito no ponto F1 atuaria as proteções de sobrecorrente e sobrecorrente direcional isolando o trecho defeituoso. Mas o grande problema envolvido é o alto grau de poluição presente nos isoladores que pode ocasionar faltas múltiplas no caso de haver sobretensões no sistema conforme iremos ver adiante.

Vamos supor agora um curto-circuito monofásico (fase A-Terra) no ponto de falta F1 ilustrado na Figura 09.

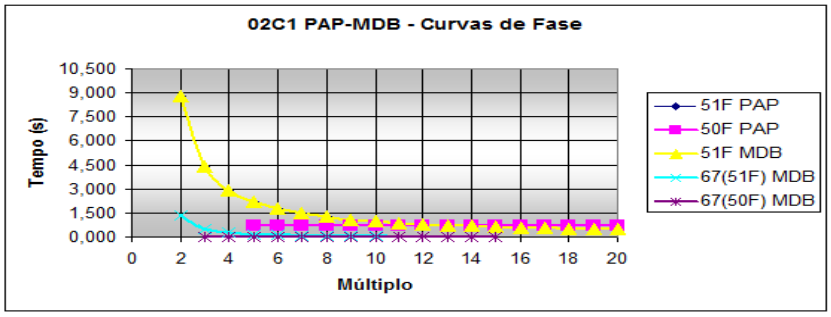

Figura 08 – Curvas das Proteções de Fase da LT 02C1 PAP-MDB

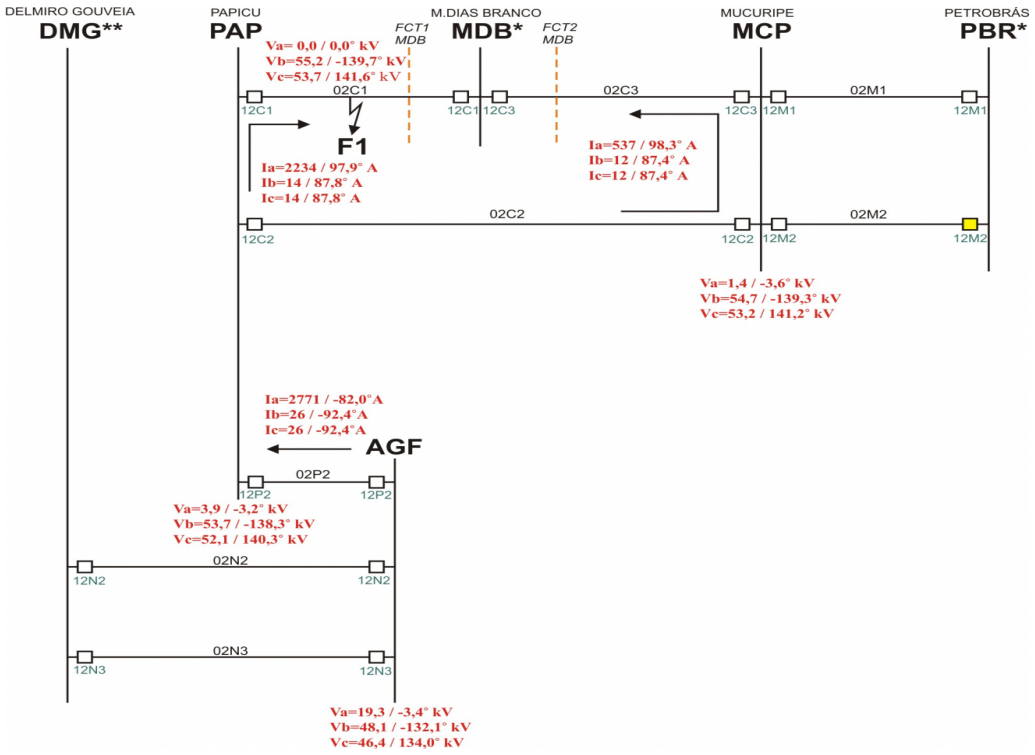

Figura 09 – Tensões e Correntes após curto-circuito monofásico no ponto F1

Após a análise da Figura 09, fica bastante claro que ocorre sobretensões nas fases sãs após um curto-circuito monofásico, tanto no local do defeito com nas barras próximas do mesmo. A análise do tempo das atuações das proteções em cada disjuntor seria idêntica ao visto anteriormente, apenas teria que considerar os tempos das proteções de neutro. Mas o que gostaríamos de salientar para o defeito fase-terra é que diante das sobretensões que fica submetido o sistema pertencente a uma região com alto índice de poluição ocorrerá faltas múltiplas implicando a perda das outras LT´s não envolvidas com a falta inicial. Posteriormente apresentaremos dados históricos que comprovam esta afirmação.

b) Avaliação da Proteção de Distância

A proteção de distância (código ANSI 21), assim como a proteção sobrecorrente direcional é aplicável tanto em sistemas radiais como em sistemas anelados. Tem uma vantagem sobre a proteção sobrecorrente direcional que são os parâmetros configurados no relé, uma vez que os parâmetros requeridos são os próprios parâmetros das linhas de transmissão, ou seja, qualquer modificação que aconteça no sistema elétrico, não interfere no parâmetro daquela linha de transmissão específica onde está instalada a proteção de distância.

Iremos avaliar a proteção de distância, com base nos resultados de um curto-circuito trifásico no ponto F2 ilustrado na Figura 10.

A partir da configuração das proteções ajustadas em cada relé associado ao disjuntor envolvido com a falta no ponto F2, desenvolvemos o gráfico da Figura 11 onde é possível analisar a coordenação das proteções.

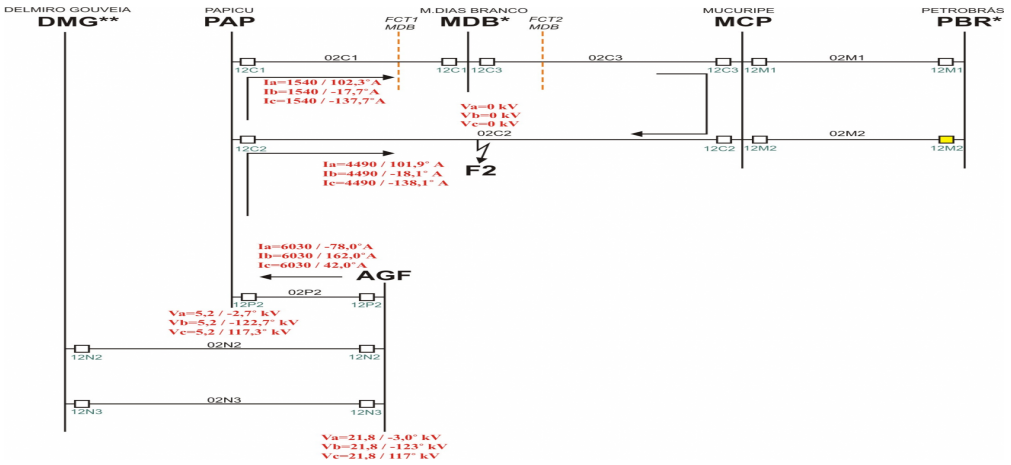

Figura 10 – Tensões e Correntes após curto-circuito trifásico no ponto F2

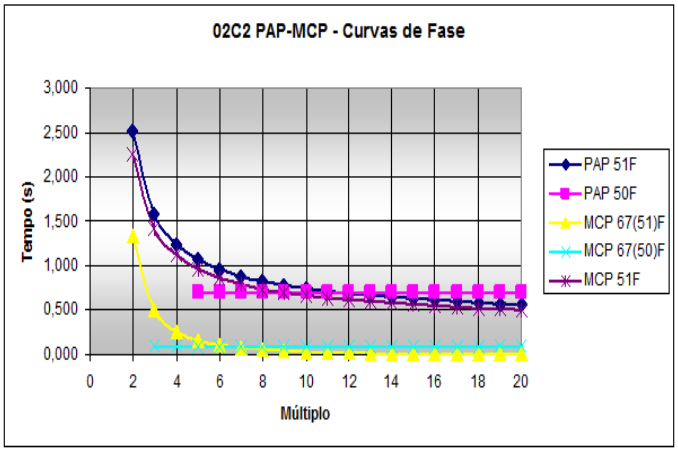

Figura 11 – Curvas das Proteções de Fase da LT 02C2 PAP-MCP

Para um curto-circuito trifásico no ponto F2 da Figura 10, a corrente passante pelo disjuntor 12C2 da SE PAP é de 4490A. Com esses dados faremos a análise abaixo para a proteção de distância.

Temos que Icc=4490A e V_{PAP}=5200V, logo:

$$Zprim = \frac{5200}{4490}$$
$$Zprim = 1{,}158\Omega$$

Transformando para valores secundários, temos que:

$$Z\sec = Zprim.\frac{RTC}{RTP}$$
$$Z\sec = 1{,}158.\frac{160}{600}$$
$$Z\sec = 0{,}309\Omega$$

Como o ângulo da linha é de 75º, temos que calcular o valor da reatância de falta vista pelo relé, daí:

$$Z\sec = 0,309\angle 75^{\circ}$$
$$Z\sec = (0,080 + j0,298)\Omega$$

Logo, a reatância vista pelo relé do disjuntor 12C2 PAP no momento da falta é de 0,298?, ou seja, a falta se localiza na Zona 1 atuando com tempo de 0s de acordo com a tabela 1.

A corrente passante pelo disjuntor 12C2 da SE MCP é de 1540A fazendo atuar a Proteção de Sobrecorrente Direcional em 0,0635s de acordo com o gráfico da Figura 11.

Como podemos conferir pelo gráfico da Figura 11 que os tempos das Proteções de Sobrecorrente são bem superiores fazendo com que as referidas proteções sirvam de retaguarda caso as proteções principais venham a falhar.

A coordenação seria perfeita, eliminando apenas a LT com defeito, no caso a 02C2 (PAP-MCP). O único problema desse esquema de proteção é que dependendo do nível do curto-circuito, poderá ocorrer uma demora da Proteção de Sobrecorrente Direcional no disjuntor 12C2 MCP onde pode ser verificado a partir do gráfico da Figura 11. Se nesse caso houver sobretensões no sistema, poderá desencadear faltas múltiplas em outros pontos do eixo devido a poluição presente nos isoladores. A seguir iremos apresentar o fenômeno das faltas múltiplas.

2.4. Implementação e Avaliação da Proteção Diferencial de Linha

Uma solução encontrada para melhorar o desempenho da proteção de linhas de transmissão paralelas foi a instalação da Proteção Diferencial de Linha. Uma grande vantagem em relação as proteções analisadas anteriormente, é sua capacidade de restringir a zona de proteção somente a linha de transmissão protegida entre os dois disjuntores. Qualquer falta no interior da zona protegida, ou seja, ao longo da linha de transmissão protegida, os dois disjuntores abrirão instantaneamente, sem retardo de tempo, isolando o trecho defeituoso e não afetando as demais linhas.

O problema das faltas múltiplas que aconteciam com as proteções de Sobrecorrente Direcional e de Distância ficam aqui solucionadas, pois mesmo que haja sobretensão no sistema devido à defeitos fase-terra, o tempo de isolação do trecho defeituoso é instantâneo, assim evita-se a ruptura do dielétrico dos isoladores nos demais pontos do sistema.

Podemos observar através da Figura 12, o esquema de ligação da proteção diferencial. No eixo Papicu-Mucuripe foi instalado os relés Diferenciais de Linha em tela.

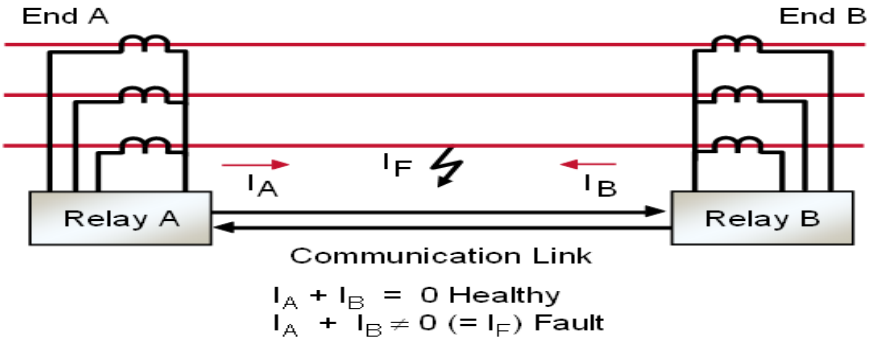

Figura 12 – Esquema de ligação do Relé Diferencial de Linha.

Com a implementação deste esquema de proteção, podemos contar com as seguintes vantagens:

- Não necessita de TP;
- Aplicável a multi-terminais de linhas (2 a 3 linhas);
- Atuação com alta resistência de falta;
- Imune a Power Swings;
- Tempo de Trip Uniforme (25 a 30ms);
- Imune ao efeito da compensação série;
- Discriminação de Fases;
- Compensação das Correntes Capacitivas;
- Medida contínua do tempo de atraso da propagação e compensação da sincronização de fasores.

A Figura 13 ilustra o esquema de funcionamento da interface de comunicação através do canal digital via fibra ótica.

Caso haja falha de comunicação via fibra ótica o relé diferencial de linha se transforma automaticamente em um relé de distancia convencional ou de sobrecorrente direcional não deixando a linha de transmissão desprotegida. Neste caso é necessário alimentação de TP´s e TC´s.

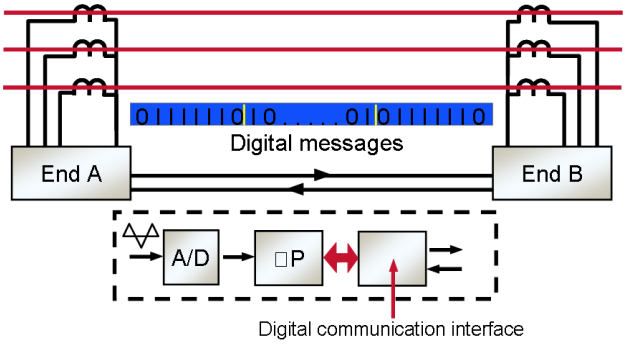

Figura 13 – Interface de Comunicação via canal digital.

A proteção diferencial longitudinal é atualmente um dos métodos mais recomendado e preferido para a proteção das linhas de transmissão de alta e extra alta tensão, em especial devido à imunidade deste método de proteção ao fenômeno de “power swing”, efeito da compensação série, sensibilidade para faltas de alta impedância. Esta técnica só foi possível avançar devido ao desenvolvimento e melhoria da tecnologia das fibras ópticas, permitindo proteger linhas de transmissão de até 80 km, através de link óptico direto entre os relés no modo longitudinal ou proteger linhas longas, com comprimento acima de 80 km, utilizando interface apropriada de comunicação.

A implantação da proteção diferencial de linha ocorreu em Setembro de 2008, e vem-se monitorando seu desempenho até os dias de hoje, e até a presente data as suas atuações foram perfeitas onde se extinguiu completamente o fenômeno das faltas múltiplas. A Figura 14 ilustra o desempenho das proteções do eixo Papicu-Mucuripe onde se relaciona atuações corretas (OK) e atuações indevidas ou incorretas (NOK). É possível ver claramente que após a instalação dos relés diferenciais de linha (2008.2) as atuações das proteções do eixo analisado estão todas corretas.

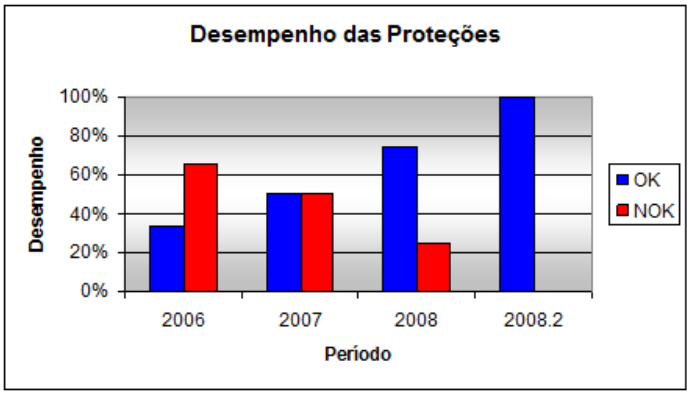

Figura 14 – Desempenho das Proteções no Eixo Papicu-Mucuripe.

3. Conclusões

O objetivo deste trabalho foi apresentar de maneira clara e objetiva o desempenho dos principais esquemas de proteção aplicados em linhas de transmissão.

A apresentação do fenômeno das faltas múltiplas serviu de base para a migração de um novo esquema de proteção a fim de resolver este inconveniente do sistema estudado

Foram abordados de forma prática os esquemas de proteção utilizados nas subestações da Coelce que através de análises de ocorrências e simulações foi possível chegar a conclusão de qual melhor proteção a ser adotada nesta situação, bastante particular, que é a operação de linhas curtas em região de alta salinidade.

Com bases nos dados históricos e estatísticas apresentadas pela Coelce foi possível confirmar que a proteção diferencial de linha foi sem dúvida a melhor solução para este caso.

4. Referências bibliográficas

ARAÚJO, Carlos Andre S. Proteção de Sistemas Elétricos. Editora Interciência, 2ª edição, Rio de Janeiro, 2005.

ALSTOM GRID - MICOM P54X CURRENT DIFFERENTIAL PROTECTION – Technical Guide. Volume 1, Paris, 2005.

CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica. ANAFAS – Análise de Faltas Simultâneas – Manual do Usuário. Versão 5.0, Rio de Janeiro, 2008.

KINDERMANN, Geraldo. Proteção de Sistemas Elétricos de Potência. Editora UFSC, 2ª edição, Florianópolis, 2005.

KINDERMANN, Geraldo. Curto-Circuito. Editora UFSC, 4ª edição, Florianópolis, 2007.

STEVENSON, William D. Elementos de Análise de Sistemas de Potência. Editora McGraw-Hill, 1ª edição, São Paulo, 1978.