



**SNPTTE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

GCQ 22
14 a 17 Outubro de 2007
Rio de Janeiro - RJ

**GRUPO XIII
GRUPO DE ESTUDO DE INTERFERÊNCIAS, COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA E QUALIDADE DA
ENERGIA ELÉTRICA - GCQ**

**AVALIAÇÃO DE DISTÚRBIOS NO SISTEMA ELÉTRICO COMO SUPORTE TÉCNICO AS
SOLICITAÇÕES DE RESSARCIMENTOS DE DANOS**

Nelson Clodoaldo de Jesus*

AES SUL – DISTRIBUIDORA GAÚCHA DE ENERGIA

RESUMO

Desde a publicação da resolução sobre ressarcimento de danos elétricos pela ANEEL, tem-se generalizado a determinação de procedências por sobretensões em sistemas de distribuição. Com o objetivo de dar suporte as análises dos casos, foram realizadas diversas simulações de distúrbios a partir da modelagem do sistema no programa de transitórios eletromagnéticos ATPDRAW. Os resultados apresentados neste trabalho são relacionados às variações de tensão de curta duração (VTCD) e transitórios típicos de energização em sistemas de distribuição.

PALAVRAS-CHAVE

Ressarcimento de Danos, Distúrbios, Sobretensões, Simulação.

1.0 - INTRODUÇÃO

No momento atual, com a utilização maciça de dispositivos semicondutores e circuitos integrados nos aparelhos e equipamentos eletro-eletrônicos industriais, comerciais e residenciais, ocorre naturalmente uma maior probabilidade de falhas à medida que os mesmos se tornam mais sensíveis. Os danos que, predominantemente, têm afetado aos equipamentos dos consumidores podem ser desde uma falha operacional até a falha permanente, quando de possíveis avarias e/ou queimas de componentes dos equipamentos. O tema é relacionado às perturbações na qualidade de energia em função dos fenômenos eletromagnéticos. Este problema tem sido objeto de crescente atenção do setor elétrico em nível mundial devido à difusão de dispositivos eletro-eletrônicos e seu grau de vulnerabilidade frente às perturbações na tensão de alimentação. Salienta-se que a questão de ressarcimento por danos elétricos perpassa por aspectos técnicos, legais e econômicos, além de ser dependente de inúmeras variáveis na determinação das causas e conseqüências. Enquanto vários países já implementaram, regras claras que definem responsabilidades pelo provimento de sistemas de proteção, no Brasil, ainda não foram estabelecidas estas responsabilidades, sendo alvo de formulação questões de determinação em termos de deferimento ou não, sem evidências de ações direcionadas a redução dos índices de danos pela agência reguladora (2). Por outro lado, seria oportuno direcionar os esforços no sentido de trilhar para condições que pudessem esclarecer as principais questões, como quais os casos indenizáveis ou não, com máximo embasamento técnico, como exemplo, por uma classificação adequada das causas prováveis, dependendo das condições e características dos eventos, como sugerido na referência (3). Recentemente foi publicada a resolução da ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica (Resolução N° 61 de 29/04/2004), a qual trata das disposições relativas ao ressarcimento de danos elétricos em equipamentos instalados em unidades consumidoras, causados por perturbação ocorrida no sistema elétrico (1). Observa-se que não foram estabelecidos critérios técnicos sob quais os eventos seriam indenizáveis ou não. Basicamente, quanto a dano nas condições da resolução, pode-se visualizar as sobretensões como fenômeno principal, a qual é utilizada

(*) Rua Presidente Roosevelt, 68 – CEP 93010-060 – São Leopoldo, RS – Brasil
Tel: (+55 51) 3590-7563 – Fax: (+55 51) 3590-7587 – Email: nelson.jesus@aes.com

muitas vezes de forma cabal pelo órgão regulador, a partir de reclamações de consumidores, especialmente usando-se a frase “Os danos são ocasionados por interrupção de fornecimento de energia elétrica devido a uma possível sobretensão quando a energia é religada”. Com o intuito de auxiliar na interpretação dos casos, sem portanto, proceder de maneira a generalizar o impacto de sobretensões, este trabalho mostra uma análise das perturbações, cuja base serve também para desmistificar energizações em redes de distribuição, bem distintas do ponto de vista de armazenamento de energia e amortecimentos se comparados a sistemas de transmissão, incluindo resultados de monitoramento com analisadores de qualidade de energia. Os eventos relacionados a surtos de tensão decorrentes de descargas atmosféricas estão incluídos na resolução específica como responsabilidade das empresas concessionárias, sem entretanto, estarem abrangidos no escopo deste trabalho.

2.0 - SIMULAÇÃO DE DISTURBIOS

A seguir, apresentam-se a análise de diversas perturbações no sistema elétrico que resultam em solicitação as cargas consumidoras conectadas ao sistema de distribuição com o uso do programa ATPDRAW4. Outros distúrbios como curtos-circuitos na rede de média tensão ou abertura de fase não mostraram elevações significativas de potencial na baixa tensão e, portanto, sem relação direta com danos em equipamentos eletrônicos, motivo pelo qual os respectivos resultados não estão apresentados. Eventos transitórios decorrentes de descargas atmosféricas e energizações de circuitos não são tratados especificamente neste trabalho. Intenta-se mostrar os reais impactos das ocorrências e os tipos de perturbações que apresentam nexos causal com as possíveis avarias em equipamentos.

2.1 Abertura do Condutor Neutro no Ramal de Ligação ou na Rede de Baixa-Tensão (BT)

Este caso tem como objetivo apresentar os principais resultados de simulações para análise do distúrbio de abertura do condutor neutro no ramal de ligação ou na rede de baixa-tensão (BT), de modo a obter os comportamentos das tensões no sistema para a avaliação técnica deste tipo de perturbação quanto as solicitações por ressarcimento de equipamentos conectados a rede de distribuição secundária. Neste sentido, considerou-se a abertura do condutor neutro tanto na rede de baixa-tensão como no ponto de conexão com a carga. A abertura do condutor neutro é realizada através de sua interrupção aos 0,2 segundos de simulação. Este tipo de distúrbio apresenta sobretensões e/ou subtensões dependendo das características de carregamento e configuração do sistema em análise. A figura 1 ilustra o diagrama básico utilizado para análise deste tipo de distúrbio.

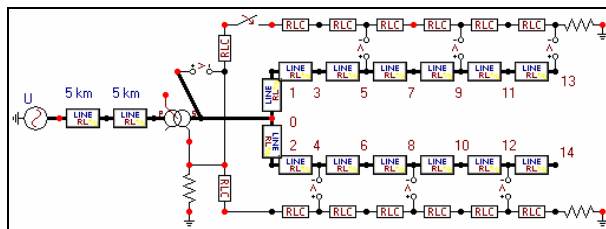


FIGURA 1 - Sistema proposto para simulação de abertura do neutro

São apresentados os resultados das simulações da abertura do condutor neutro em ramal trifásico, pois é o caso mais crítico dentre os possíveis para este tipo de distúrbio. Observa-se pelas simulações que a pior situação é a utilização de cargas fortemente desequilibradas, a qual causa sobretensões no sistema, tendo um valor máximo de tensão de 1,73 pu. Porém, dependendo do carregamento e impedâncias das cargas, o sistema apresenta sobretensões e subtensões com amplitudes diferenciadas, como pode ser visto na figura 2. Para o caso analisado, tem-se uma carga trifásica desequilibrada, onde os níveis de sobretensões encontradas na fase A para este sistema foi próximo a 1,55 pu e para a fase C foi de 1,43 pu, já na fase B, tem-se uma subtensão de 0,30 pu.

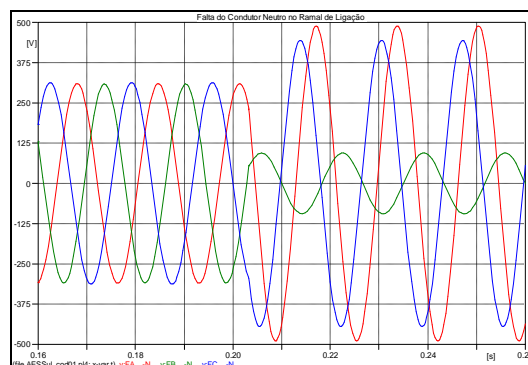


FIGURA 2 - Tensões instantâneas na carga

2.2 Inversão de uma Fase na Rede de Baixa-Tensão (BT) ou no Ramal de Ligação com o Condutor Neutro

Este caso tem como objetivo apresentar os principais resultados de simulações para análise do distúrbio de inversão de fase na rede de baixa-tensão (BT) ou no ramal de ligação, de modo a obter os comportamentos das tensões no sistema para a avaliação técnica deste tipo de ocorrência quanto a possíveis impactos na operação de equipamentos conectados em unidades consumidoras. Neste sentido, considerou-se a inversão da fase C com o neutro em 0,11 segundos. Este tipo de distúrbio apresenta severas solicitações para o sistema elétrico, uma vez que as fases são submetidas à sobretensões com valores de tensão fase neutro equivalentes aos valores entre fases. O sistema adotado para análise deste tipo de perturbação é mostrado na figura 3.

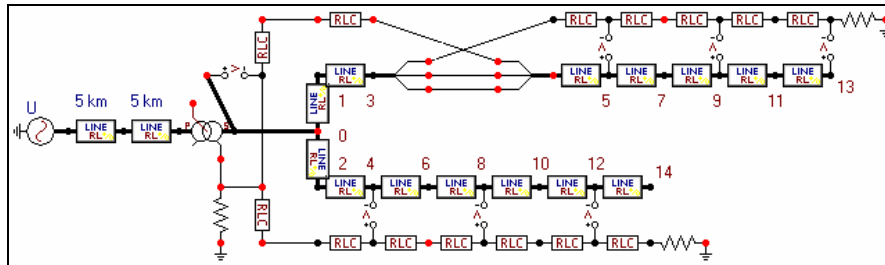


FIGURA 3 - Sistema proposto para simulação de inversão entre fase e neutro

A inversão de uma fase com o condutor neutro resulta em defasagem angular de 180° na fase envolvida e sobretensões nas demais fases, pois as tensões passam a ter o mesmo valor da tensão entre fases. Na medida do potencial das fases em relação à terra só haverá alteração na fase invertida a qual tende a ser zero em um sistema equilibrado. As sobretensões impostas as cargas para esse caso, são apresentadas na figura 4, quando da inversão do neutro com a fase C da rede de BT. Observa-se que os ângulos das tensões sofrem alterações, estando de acordo com as tensões entre fases se comparados. As sobretensões nas fases não envolvidas com o distúrbio equivalem a 1,73 pu.

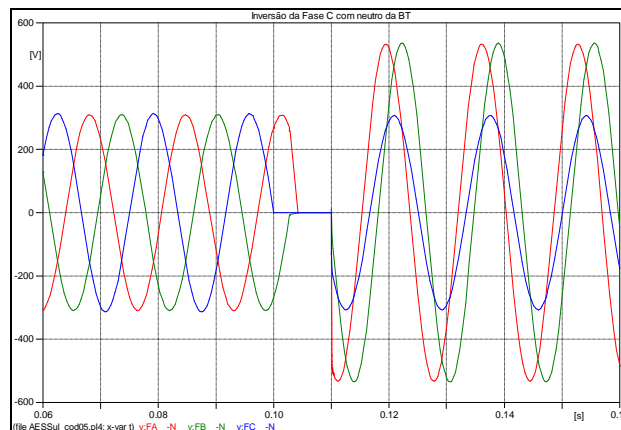


FIGURA 4 - Tensões instantâneas para uma inversão de fase com neutro

as tensões de linha aplicadas às cargas, verifica-se subtensões com amplitudes de 1,73 vezes menor que o valor nominal para as tensões envolvendo a fase invertida com o neutro, tendo seus ângulos alterados e, tensão normal entre fases nas fases sãs com ângulo normal, conforme verificado nas simulações. Destaca-se que não há qualquer influência por parte do consumidor possuir ou não aterramento, bem como o mesmo possuir configuração monofásica ou trifásica. Observa-se, a partir dos resultados das simulações, que haverá sobretensões com níveis de 1,73 pu nas fases não envolvidas com o defeito e tensão nominal na fase invertida com oposição de orientação. A presença ou não de aterramento na entrada da unidade consumidora não modificou os resultados encontrados, onde se verificou também alterações nos ângulos das tensões.

2.3 Curto-Circuito na Rede Secundária (BT) ou no Ramal de Ligação

Analizou-se casos de faltas e os níveis de tensão que a rede e os consumidores conectados a ela ficam submetidos para os tipos de faltas entre fase-neutro, fase-terra, bifásica, fase-fase-neutro e trifásica. O circuito da rede de baixa-tensão padrão simulado é apresentado na figura 5. As faltas foram simuladas na rede de baixa tensão, mais especificadamente, no ponto 7. Todos os curtos-circuitos terão resistência de falta igual à zero. Serão apresentadas somente as faltas envolvendo o neutro e que resultaram em sobretensões.

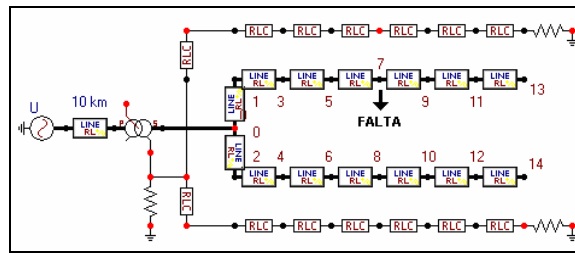


FIGURA 5 - Sistema proposto para simulação de faltas na rede secundária

2.3.1 Curto-Circuito Fase-Neutro

Para um curto-circuito entre a fase e o neutro na rede secundária, as tensões instantâneas fase-neutro são apresentadas na figura 6, sendo que os níveis de tensão verificados, após o curto-circuito em 0,1 segundos, foram de falta de energia na fase A, para o ponto de curto-circuito e subtensões para os demais pontos da rede de distribuição tanto a jusante quanto a montante. Para a fase B a tensão verificada foi de 1,44 pu e para a fase C 1,35 pu, ou seja, sobretensões medidas no ponto de curto-circuito. A jusante tem-se sobretensões com níveis menores, mas a montante as tensões não sofrem variações para as fases não envolvidas na falta. As tensões entre as fases do sistema são apresentadas na figura 7, onde o valor da tensão entre as fases A e B foi de 0,77 pu e das fases B e C de 0,81 pu, ou seja, subtensões, já para a tensão entre as fases não envolvidas no defeito a tensão permanece com valores normais. As subtensões são menos acentuadas no decorrer da rede de distribuição secundária. As tensões fase-terra para este distúrbio apresentaram valores de sobretensões de 1,43 pu e 1,35 pu para as fases B e C, respectivamente, além de valor nulo para a fase sob falta como esperado.

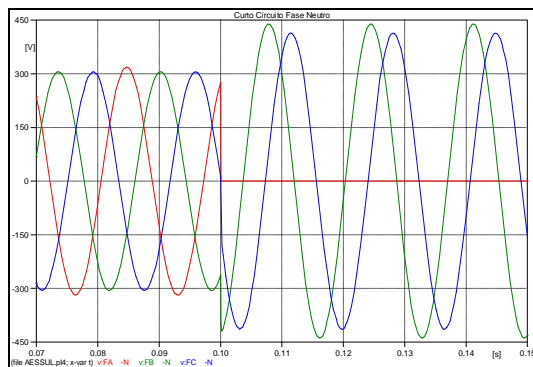


FIGURA 6 - Tensões fase-neutro

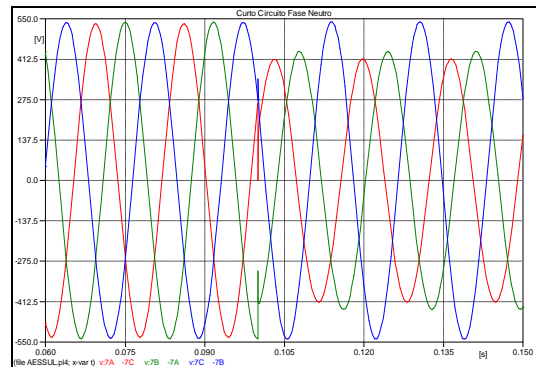


FIGURA 7 - Tensões fase-fase

Este tipo de curto-circuito apresenta sobretensões para fase-neutro e fase-terra, e subtensões entre as fases, apresentando consequentemente desequilíbrio de tensão no caso de alimentação de sistemas trifásicos.

2.3.2 Curto-Circuito Fase-Fase-Neutro

Esse tipo de curto-circuito se caracteriza pelo contato entre duas fases e o neutro na rede secundária de distribuição. Para as tensões fase-neutro verificou-se a ocorrência de falta de energia nas fases envolvidas, fases A e B e, sobretensões de 1,38 pu para a fase C, conforme a figura 8.

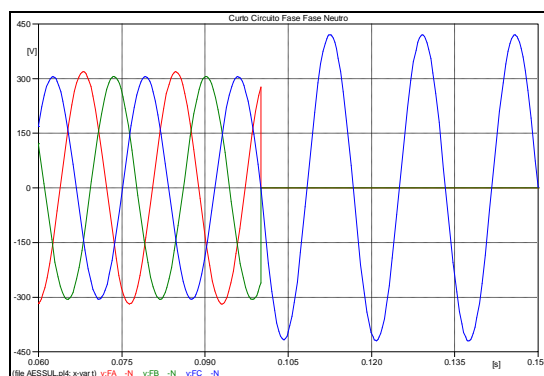


FIGURA 8 - Tensões fase-neutro

2.4 Abertura em Sequência Não-Natural para Curtos-Circuitos na Rede Secundária (BT)

Neste item, analisam-se os níveis de tensões da rede secundária para uma abertura em seqüência não-natural, em decorrência de falhas de atuação dos elos fusíveis de proteção quando da ocorrência de curtos-circuitos na rede de BT. A falta que apresenta as características mais adequadas para análise desse tipo de defeito é do tipo bifásico. Sendo assim, este será simulado utilizando um sistema padrão adotado para a rede de BT, conforme figura 9.

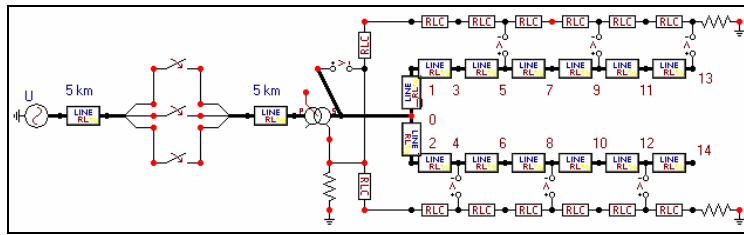


FIGURA 9 - Sistema proposto para abertura não-natural de elos fusíveis

A simulação apresenta contato entre duas fases da rede, fazendo-se a abertura da fase de menor corrente, caracterizando, assim, o mau funcionamento dos elos fusíveis de proteção. A falta foi simulada aos 0,1 segundos onde as correntes são observadas na figura 10, com níveis de correntes relativamente elevados em comparação ao regime normal de operação. Esses níveis de correntes são suficientes para a abertura dos elos fusíveis de proteção. Como é verificado na figura 10, a fase com maior magnitude é a fase A, porém, na simulação, abre-se a fase B, em 0,2 segundos, sendo considerada, assim, uma atuação não-natural dos elos fusíveis de proteção, situados no lado da MT, conforme resultado na mesma figura 10.

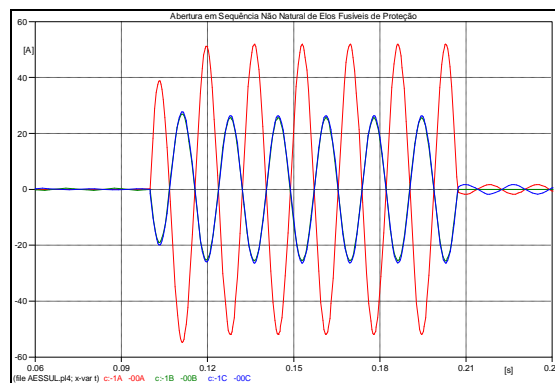


FIGURA 10 - Correntes nas fases da MT antes, durante e após o curto-circuito bifásico

As correntes retornam a valores bem inferiores após a atuação do elo fusível de proteção irregular da fase B. Pode-se observar que as tensões fase-neutro através da figura 11. De 0,1 a 0,2 segundos verificam-se níveis de tensões compatíveis com o tipo de curto-circuito bifásico. Aos 0,2 segundos ocorre a abertura do elo fusível da fase B e, em função disso, as fases A e B retornam aos seus valores nominais, porém ficando em fase. Na outra fase ocorre sobretensões com níveis de 1,98 pu, ocorrendo defasamento de 180° em relação as demais fases. As tensões entre fase e terra são apresentadas na figura 12.

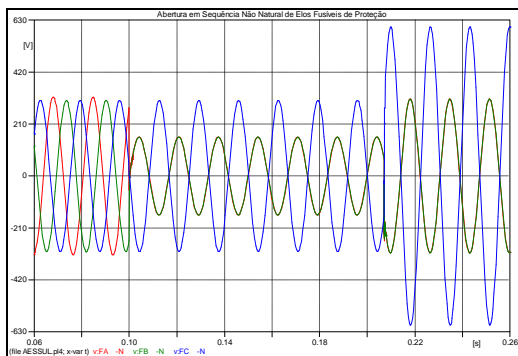


FIGURA 11 - Tensões instantâneas fase-neutro

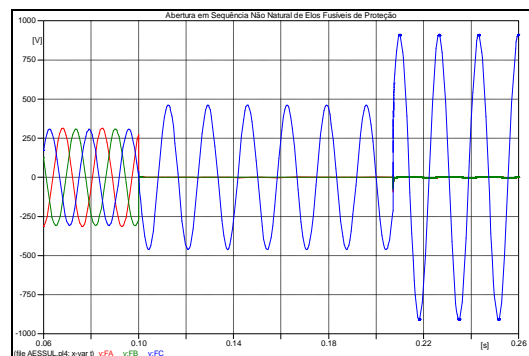


FIGURA 12 - Tensões instantâneas fase-terra

Os níveis de tensão observados durante o curto-circuito foram de 1,5 pu para uma das fases e, subtensões tendendo a zero para as demais. Após a abertura irregular do elo fusível a fase que estava em sobretensão atinge níveis de 2,98 pu, praticamente dobrando o nível de tensão no ponto de falta, permanecendo as demais fases com tensões tendendo a interrupção, dependendo do ponto do circuito analisado. A abertura de elos fusíveis de proteção em seqüência não natural causa sobretensões envolvendo todo o sistema se o curto-circuito se mantiver. Se o curto-circuito for extinto o sistema apresenta um comportamento de abertura de fase na rede de MT.

2.5 Curto-Circuito Simultâneo entre Média e Baixa Tensão (MT/BT)

A análise do curto-circuito simultâneo nos lados da média e baixa tensão foi realizada para os casos relevantes. Apresentam-se a seguir algumas características próprias deste tipo de defeito, que mostra elevação significativa das tensões entre neutro e terra do sistema. Para o primário, este tipo de distúrbio apresenta características semelhantes à falta entre fase e terra. Os casos de simulação referem-se a contato da fase A primária com o neutro e fase na rede de BT, apresentando resultados semelhantes.

2.5.1 Curto-Circuito com o Neutro

Na figura 13, verificam-se as tensões fase neutro para esse tipo de defeito. Observa-se que ocorreram subtensões nas fases A e C, e sobretensão na fase B. Esse distúrbio apresenta elevação do potencial do neutro, causando desbalanço em sistemas elétricos.

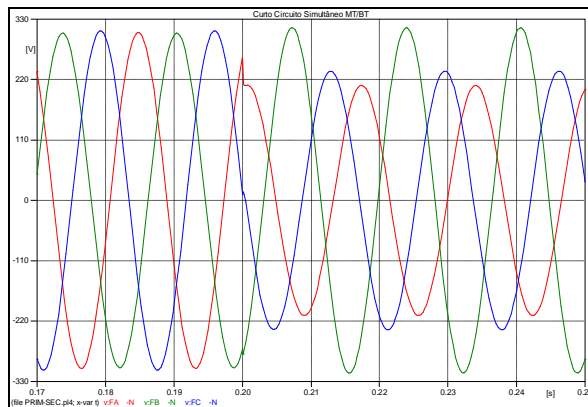


FIGURA 13 - Tensões instantâneas fase-neutro na carga

Na figura 14, a tensão resultante entre a fase e terra observada apresenta níveis de tensões significativamente elevados após o curto-circuito, com valores de 17,17 pu, provenientes da elevação da tensão neutro-terra. Este tipo de defeito eleva o potencial do neutro, o qual determina praticamente os valores resultantes das tensões fase-terra no lado de BT. A corrente e tensão neutro-terra são mostradas na figura 15, onde o valor de tensão pico foi de 5024 V e a corrente de pico de 503 A, para uma resistência de aterramento de 10 ohms. Para uma falta envolvendo uma fase da média (MT) com uma fase da baixa tensão (BT), verifica-se que os níveis das tensões fase-terra são semelhantes ao caso anterior, conforme os resultados obtidos em diversas simulações deste tipo de perturbação.

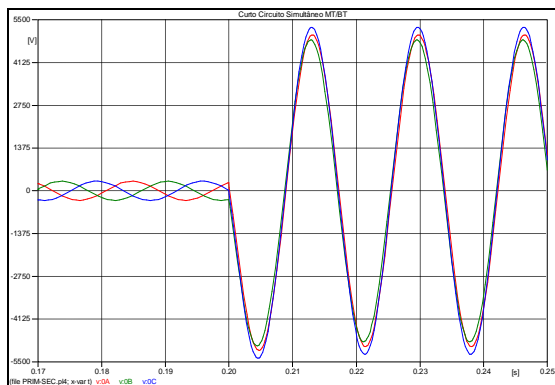


FIGURA 14 - Tensões fase- terra na carga

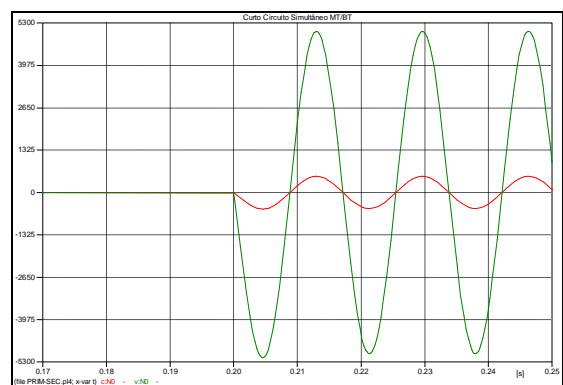


FIGURA 15 - Tensão e corrente neutro-terra

2.6 Transitórios de Energização

2.6.1 Energização de Alimentadores

Este item apresenta os resultados obtidos em simulações, analisando os níveis de sobretensões encontrados na simulação de energização de alimentadores. Considerando um sistema elétrico típico para a energização de alimentadores, foi simulado o mesmo sob a presença de bancos de capacitores na subestação e ao longo do alimentador, localizado eletricamente próximo à carga. Os bancos inseridos possuem uma potência de 1,8 MVAR na fonte e 600 kVAR próximo ao ponto de acoplamento comum, conforme a figura 16. A título de comparação das tensões entre os sistemas com um e dois bancos de capacitores, apresenta-se na figura 17 o gráfico das tensões fase-neutro para os dois casos. Para o caso com os dois bancos, as tensões fase-neutro na carga resultaram em um valor máximo de pico instantâneo equivalente a 2,15 pu em relação ao valor nominal. Para o caso de compensação de reativos utilizando apenas o banco de capacitor próximo ao alimentador, os valores máximos diminuem, resultando em tensões instantâneas de pico iguais a 1,48 pu. Ressalta-se que em ambos os casos o tempo de amortecimento do transitório permaneceu praticamente inalterado e inferior a um ciclo.

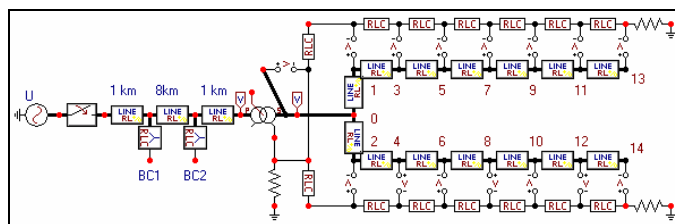


FIGURA 16 - Sistema proposto para simulação de energização de alimentadores com compensação de reativos

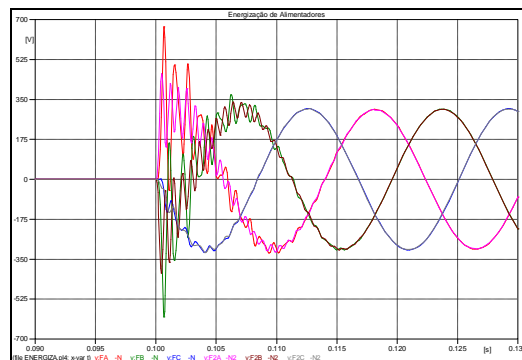


FIGURA 17 - Tensões transitórias oscilatórias

2.6.2 Manobra de transformadores

Este caso representa a condição de energização nos terminais dos transformadores. Como exemplo, pode-se citar a intervenção na rede de baixa tensão em situações de manobras programadas após a manutenção do sistema. A figura 18 ilustra os transientes resultantes de manobra manual nas chaves de conexão do transformador.

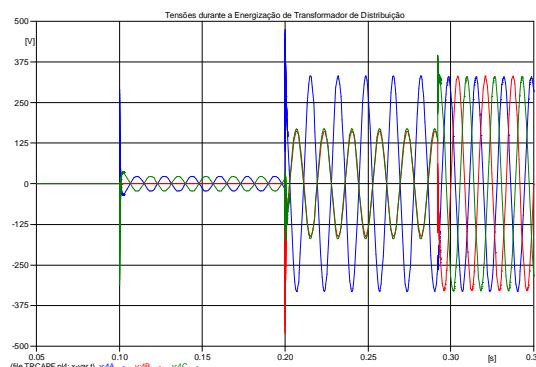


FIGURA 18 - Tensões durante manobra monopolar de transformador de distribuição

Neste caso específico, foram comparados os resultados obtidos em campo com os de simulação através da representação do sistema equivalente na condição de energização de um transformador de 30 kVA. As figuras a seguir mostram os dados obtidos para manobra real e a simulação deste tipo de energização em redes de distribuição. As figuras 19 e 20 destacam o instante de fechamento da terceira chave de conexão do transformador, onde tem-se comportamentos semelhantes entre os dados obtidos em medições e por meio das simulações do sistema.

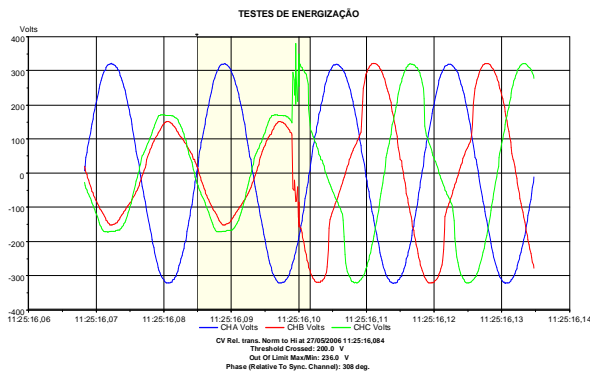


FIGURA 19 - Medição das tensões durante manobra

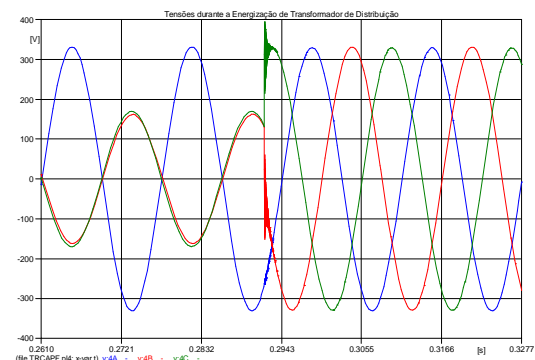


FIGURA 20 - Simulação das tensões durante manobra

3.0 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho objetivou fazer uma reflexão sob os aspectos envolvidos na problemática de ressarcimentos de equipamentos conectados a rede elétrica em função de possíveis perturbações no sistema elétrico. Outros pontos de igual ou maior importância devem ser considerados como descargas atmosféricas diretas e induzidas, bem como um maior detalhamento de religamentos de sistemas de distribuição, comparando-se aos limites de operação de equipamentos. Visando fornecer subsídios e contribuição, foram apresentados diversos casos de simulações de perturbações no sistema elétrico, especialmente aqueles com real possibilidade de sobretensões e impactos a operação dos equipamentos. Estas análises não podem ser descartadas levando-se em consideração somente à resolução específica, que generaliza e cita as possíveis sobretensões de manobra como decisivas na análise dos casos de deferimento ou indeferimento. Não está mencionado que equipamentos podem apresentar falhas internas, especialmente de componentes eletrônicos, mesmo na fonte de entrada e que tem uma vida útil equivalente, podendo vir a se danificar naturalmente, mesmo na energização. Alguns desses pontos devem ser melhor discutidos, com um embasamento técnico, sobre o risco de não mais de analisar tecnicamente casos envolvendo solicitações de ressarcimento. Saliencia-se para todos os agentes envolvidos, que não pode existir qualidade de energia sem instalação de qualidade e, sendo assim, o problema é dependente de modo conjunto. A conscientização de fabricantes, concessionárias, consumidores e do próprio órgão regulador, deveria ter consonância, de modo a esclarecer que o ônus do ressarcimento deve ser preferencialmente reduzido com alternativas técnica e economicamente viáveis para ambas as partes. Neste aspecto, a consulta das principais referências sobre o tema, bem como iniciativas já implantadas em nível mundial mostram alguns caminhos possíveis para o equacionamento do problema, com regras claras quanto as reais alternativas na busca pelo equilíbrio tão desejado entre consumidores e concessionárias. De qualquer forma, a metodologia de simulação pode contribuir de modo fundamental ao estabelecimento de análises mais completas e não genéricas para estabelecimento dos níveis de tensão quando da ocorrência de perturbações no sistema de distribuição.

4.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) ANEEL. Resolução N° 61 ANEEL. Ressarcimento de Danos Elétricos em Equipamentos Elétricos Instalados em Unidades Consumidoras, Causados por Perturbação Ocorrida no Sistema Elétrico. 29 de Abril de 2004.
- (2) Jucá, A. S. Avaliação do Relacionamento entre Consumidores e Concessionárias na Solução de Conflitos por Danos Elétricos: Proposta de Adequação, Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP), São Paulo, 2003.
- (3) Souza, J. R. A., Cunha, J. G., Modena, J., Contribuição Técnica - Audiência Pública N° 029 ANEEL, Brasília, Outubro de 2003.
- (4) MANUAL EMTP/ATPDraw - Alternative Transients Program, versão 3.5, agosto/2002