

Avaliação de Interferências Eletromagnéticas em Subestação de 69/13.8 kV da CELPE

Luiz H. A. de Medeiros

UFPE

lhm@ufpe.br

Anderson A. Lopes

UFPE

anderson.lopes@ufpe.br

German U. P. Alvarenga

UFPE

ulisesalvarenga@yahoo.com.br

George M. da Fonseca

CELPE

george.fonseca@celpe.com.br

Zanoni D. Lins

UFPE

zdl@ufpe.br

Bergson J. V. de Souza

UFPE

bergson.souza@ufpe.br

José Mário de S. Melo

CELPE

jmarios@celpe.com.br

Heldermárcio L. Ferreira

CELPE

heldermarcio@celpe.com.br

Pedro A. C. Rosas

UFPE

pedro.rosas@ufpe.br

Fabiano da R. Bastos

UFPE

fabiano.bastos@ufpe.br

Nilson G. Santos

CELPE

ngsantos@celpe.com.br

PALAVRAS CHAVE:

**compatibilidade eletromagnética,
medições em subestações,
transitórios eletromagnéticos.**

Resumo

Este trabalho apresenta transitórios eletromagnéticos registrados em operações de manobras em subestações do sistema de distribuição. Os transitórios foram registrados em subestações no nível de 69kV e os mesmos tem causado a queima e a má operação do sistema de proteção próximos as chaves manobradas. A interferência causada pela simples abertura de uma chave seccionadora sem carga que está ligada diretamente ao transformador de corrente usado na proteção da saída de linha tem causado os fenômenos transitórios tanto na tensão AC em 69kV medida através do TP, como na corrente mensurada pelo TC manobrado, assim como na tensão em corrente continua dos serviços auxiliares da SE. Os transitórios de tensão do TP apresentam níveis da ordem de 5kV (de pico) em escalas de tempo de 50 milissegundos com várias repetições de fenômenos que são caracterizados em uma escala de 10 microssegundos. O artigo finaliza apresentando um estudo em frequência caracterizando os elementos tanto na tensão como na corrente mensuradas.

1. Introdução

Estudos de compatibilidade eletromagnética iniciam com uma definição sobre o problema que pode ser entendido quando um equipamento se torna sensível a um ruído eletromagnético estranho que normalmente é caracterizado como interferência. Isto poderá provocar operação inadequada do equipamento e até mesmo a sua falha, resultando em má operação e bloqueio de suas funções, ou até mesmo falha permanente com a conseqüente queima do equipamento.

Diversos dispositivos eletro-eletrônicos instalados nas subestações constituem-se equipamentos altamente sensíveis e vulneráveis às solicitações elétricas e magnéticas do processo elétrico, seja em condição de regime permanente, seja em condições transitórias.

DADOS DA EMPRESA:

Nome: *LCMag* - DEESP - UFPE

Endereço: Av. Acadêmico Hélio Ramos, s/n

Telefone/fax: (81) 21267101

E-mail: lhm@ufpe.br

A crescente automação das subestações das concessionárias tem levado a um acentuado incremento no número de sistemas digitais, dispositivos e equipamentos sensíveis presentes na planta. Este fato torna o ambiente das subestações mais sujeito às interferências de natureza eletromagnética, produzidas pelos chaveamentos de disjuntores, chaves seccionadoras e religadores, além de surtos de tensão provocados por transitórios diversos ou por descargas atmosféricas. Estes fatos constituem razões, que podem causar níveis potencialmente elevados de Interferência Eletromagnética (IEM) de alta frequência.

Esta IEM pode acoplar com equipamentos eletrônicos e circuitos de controle de baixa tensão a menos que estes sejam convenientemente protegidos.

Existem três fatores para se produzir um problema de interferência eletromagnética:

- Uma fonte ruidosa;
- Um canal de acoplamento;
- A suscetibilidade do receptor.

Uma fonte importante de ruído é a conexão e a desconexão de uma chave seccionadora no ar (manobras de abertura e fechamento) devido a elementos capacitivos e indutivos conectados às barras de elevada tensão.

Existem três formas primárias ou canais de acoplamento que a energia ruidosa é captada pelo cabeamento de controle ou pelo próprio equipamento:

- Acoplamento de campo magnético e elétrico radiado;
- Acoplamento conduzido através de Transformadores de Corrente (TC) e Transformadores de Potencial (TP);
- Diferença de potencial pela malha de aterramento.

O acoplamento elétrico através de circuitos secundários pode ocorrer dentro de TC's, TP's e Transformadores de Potencial Capacitivo em altas frequências. É causado pelo acoplamento capacitivo e indutivo dentro do equipamento onde a blindagem está inadequada para altas frequências.

Do ponto de vista prático, a melhor maneira de avaliar a intensidade destes campos eletromagnéticos é através de medições realizadas in loco, sob condições de regime transitório, de forma a identificar e classificar os diversos fenômenos eletromagnéticos presentes na subestação.

Fenômenos dessa natureza têm sido encontrados em subestações do sistema de distribuição da Companhia Energética de Pernambuco – CELPE, onde o chaveamento de seccionadoras em vazio tem apresentado índices de interferência elevados em diversos equipamentos nas proximidades das chaves. As principais interferências, devido à disposição da subestação, têm se concentrado nos relés de proteção, os quais são instalados próximos aos equipamentos manobrados.

Transitórios de correntes e campos eletromagnéticos de amplitudes significativas e frequências elevadas podem surgir quando chaveamentos de alta tensão são realizados [1][2][3][4]. Os principais ruídos eletromagnéticos presentes em uma subestação se propagam via conduzida pelos cabos de alimentação e controle, entretanto, estudos recentes revelam que a interferências eletromagnéticas (IEM) radiada tende a se tornar importante à medida que novos sistemas de automação distribuída são introduzidos nas subestações [5][6][7].

Este artigo apresenta as medições e as análises dos registros realizados em fenômenos transitórios causados pelo chaveamento de seccionadoras em 69kV e sua propagação e interferência em equipamentos na subestação Arcoverde da CELPE. Os resultados apresentados indicam a presença de fenômenos radiados e conduzidos que tem resultado em má operação de diversos equipamentos de proteção. As frequências envolvidas nos estudos e comentários sobre os fenômenos de interferência são apresentados nas conclusões.

2. Metodologia Utilizada

A subestação Arcoverde – CELPE foi escolhida com base em ocorrências de operação inadequada e até queima de equipamentos eletrônicos quando da realização de manobras em determinadas chaves seccionadoras de 69kV. O diagrama unifilar do sistema de 69kV da SE Arcoverde está apresentado na Fig. 1. A SE tem duas entradas provenientes da SE Pesqueira (02P4 e 02P5) com distância de aproximadamente 50 km cada e três saídas de linha para suprimento das SEs Sertânia (02M3), Ibimirim (02M2) e Buíque (02M1).

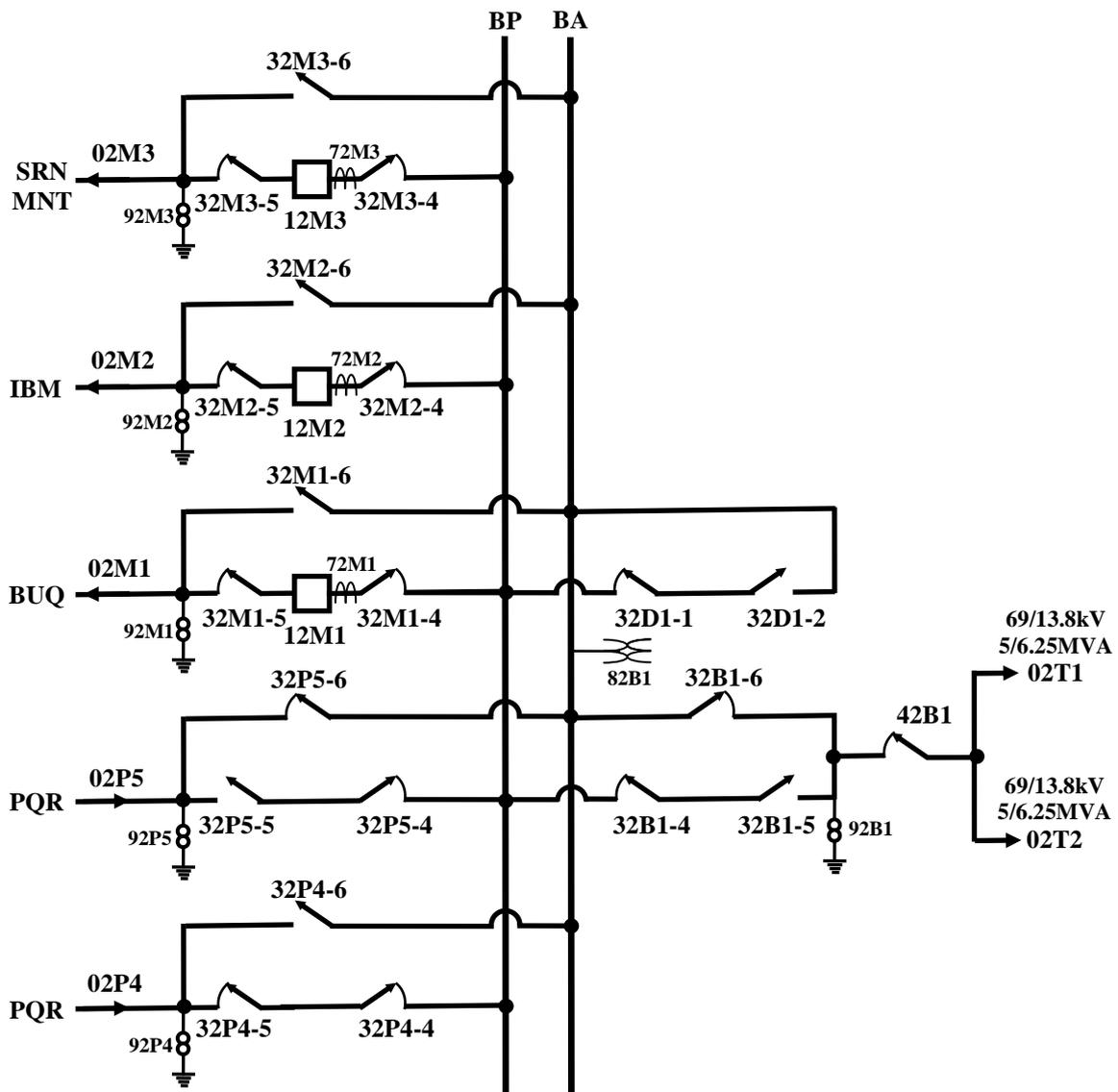


Fig. 1. Diagrama Unifilar 69kV da SE Arcoverde.

Na SE Arcoverde, os relés escolhidos para os registros das grandezas foram aqueles que têm apresentado problemas de queima e operação indevida. Para a avaliação dos fenômenos transitórios nessa subestação, e suas relações com a compatibilidade eletromagnética dos equipamentos instalados, foram realizadas diversas campanhas de medição. As campanhas de medição tiveram como base a medição das formas de onda transitórias das tensões e correntes na alimentação dos relés de proteção tanto dos sinais provenientes dos TPs e dos TCs como também, dos serviços auxiliares em corrente contínua quando da realização de manobras nas chaves seccionadoras (32-4, 32-5, 32-6) e disjuntor 12, conforme apresentado na Fig. 2.

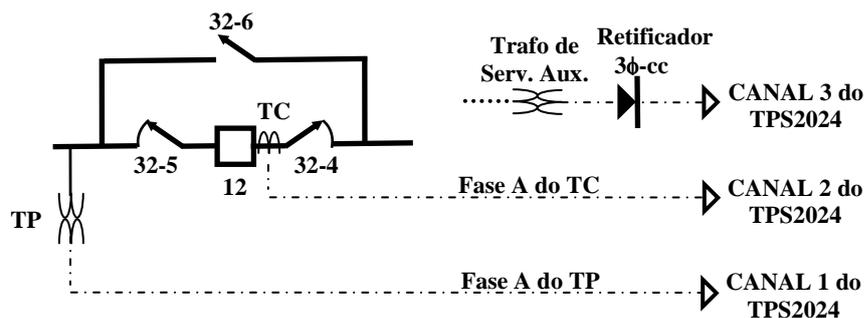


Fig. 2. Diagrama unifilar de sistema padrão de transferência de disjuntor.

Como pode ser observado na Fig. 1, existem três sistemas (12M1, 12M2 e 12M3) que representam as saídas de linha da subestação Arcoverde. Foram realizadas medições em cada uma das chaves seccionadoras e nos respectivos disjuntores desses sistemas, resultando basicamente em 48 manobras entre abertura e fechamento em duas diferentes escalas de tempo (3 sistemas x 3 chaves + 1 disjuntor x 2 escalas de tempo x 2 operações – abertura e fechamento).

As escalas de tempo usadas foram de 50 milissegundos e de 10 microssegundos. A escala de 50 milissegundos foi utilizada para registrar toda extensão dos fenômenos transitórios decorrentes do chaveamento. A escala de 10 microssegundos serviu para registrar o comportamento de cada pico transitório encontrado.

Para essas medições foi utilizado o Osciloscópio Tektronix® TPS2024. Esse osciloscópio tem os quatro canais isolados e possui taxa de amostragem de até 2GS/s, com capacidade simultânea de armazenamento de registro de 2500 amostras por canal. Durante alguns chaveamentos das chaves seccionadoras, a tensão na saída do TP alcança níveis de pico de até 4kV por este motivo, foi utilizada ponta de prova de tensão especial com isolamento para 20kV modelo P6015A e uma convencional modelo P5120. Os transdutores de corrente usados são o modelo A622 da Tektronix®.

Para o disparo (*trigger*) das medições sincronizadas nos três canais foi utilizado o nível de tensão do canal que registra a tensão do TP (canal 1). Sendo o valor de disparo especificado em 96V para as medições em escala temporal maior e 1kV para as escalas de tempo pequenas. As escolhas dos valores de disparo residem na intenção de se registrar as grandezas com maior clareza, i.e. para as escalas de tempo maiores o interesse era registrar toda a extensão e dessa maneira foi escolhido um valor de disparo muito próximo do nominal, entretanto na escala de tempo menor, o interesse era de se registrar com clareza e boa definição um dos eventos transitórios por isso foi escolhido um valor de disparo bem elevado na intenção de se registrar o transitório mais severo.

3. MEDIÇÕES REALIZADAS

Apesar de terem sido feitas medições em todas as chaves e disjuntores dos três sistemas, somente serão apresentadas as medições realizadas no sistema 12M2, em particular para a chave 32M2-4 visto que, neste sistema e nesta chave foram encontrados os maiores níveis de transitórios. Vale ressaltar que as chaves próximas aos respectivos TCs apresentaram os mais altos níveis de transitórios durante manobras que foram capazes de sensibilizar o osciloscópio. Assim, do total de registros coletados na SE Arcoverde, serão apresentados neste trabalho apenas quatro para cada uma das grandezas registradas, embora tenham sido realizadas diversas medições para a averiguação dos fenômenos de interferência presentes nessa subestação.

A seguir, são apresentados os registros da manobra de abertura e de fechamento da chave seccionadora 32M2-4.

3.1. Abertura da Chave 32M2-4

Através do uso do sistema de aquisição de dados apresentado anteriormente, a tensão proveniente da fase A do TP disponível no quadro de relés foi registrada em relação à terra durante a manobra de chaveamento de abertura da Chave 32M2-4 e está apresentada na Fig. 3.

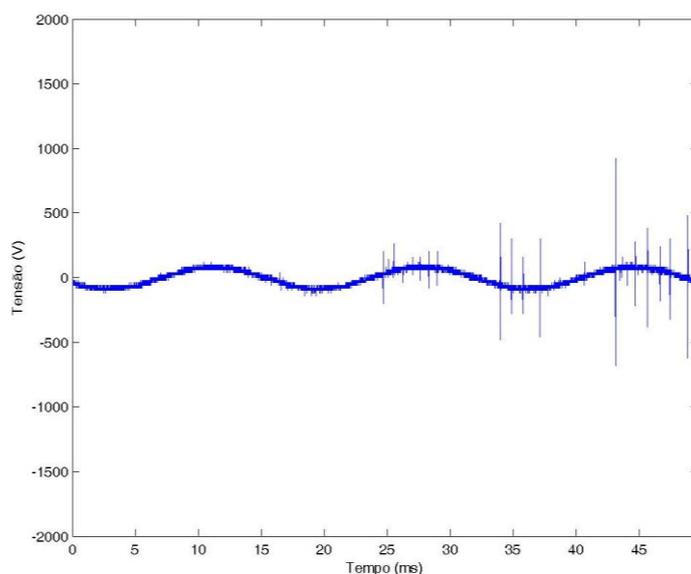


Fig. 3. Transitório da tensão do TP fase A (Abertura da chave 32M2-4).

A partir de outras medições realizadas e conforme a medição apresentada na Fig.3, observou-se que os picos transitórios são crescentes e, normalmente limitados ao tempo de 40 milissegundos. O transitório da corrente proveniente da manobra de desligamento do próprio TC (manobra abertura da chave seccionadora 32M2-4) apresenta também diversos picos conforme pode ser verificado na Fig.4.

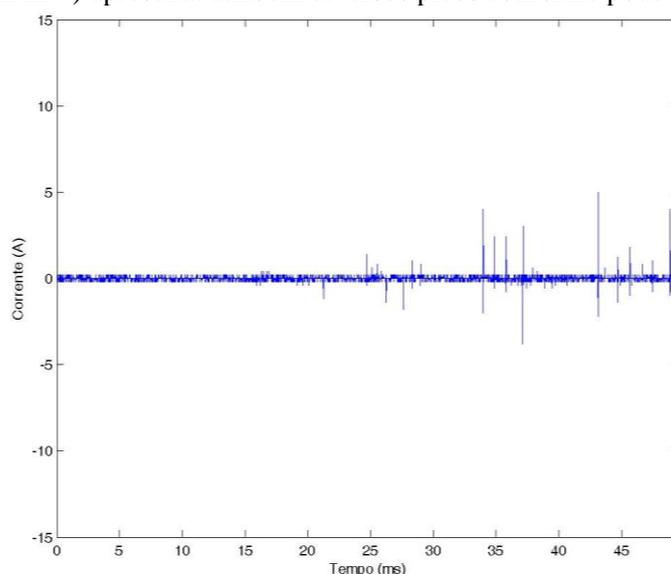


Fig. 4. Transitório da corrente TC fase A (Abertura da chave 32M2-4).

De maneira similar aos transientes de tensão AC registrados, os picos transitórios de corrente também estão presentes e são crescentes na manobra de abertura do circuito. Entretanto, não se verifica a ocorrência de fenômenos transitórios na escala de tempo adotada (50ms por janela do osciloscópio) na tensão CC de alimentação do relé durante manobra de abertura da chave seccionadora 32M2-4 conforme está apresentada na Fig. 5.

Vale ressaltar, que a taxa de amostragem – nesta escala de tempo – poderá não reproduzir níveis de tensões dos transientes em intervalos de tempo inferiores a 20 microssegundos (50ms/2500 amostras) isto porque, a taxa de amostragem do osciloscópio é de 2500 amostras por janela. Assim, nesta escala de tempo não é possível afirmar a não ocorrência de variações muito rápidas nos níveis de tensão e/ou corrente de determinada grandeza medida com a utilização deste osciloscópio.

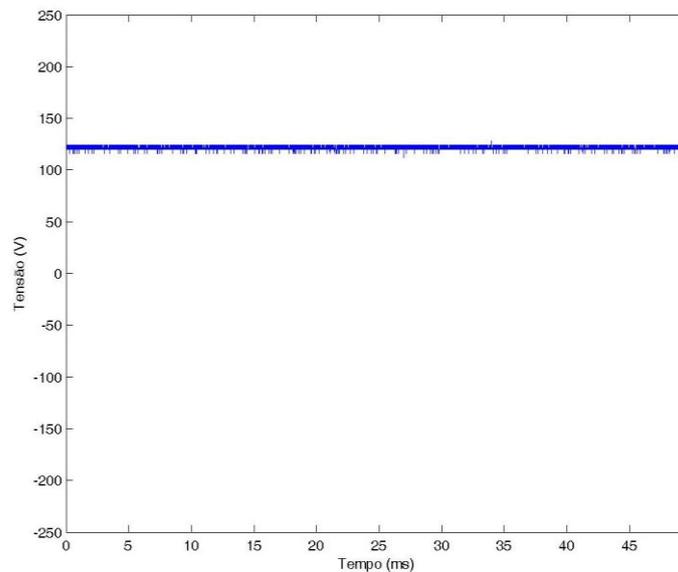


Fig. 5. Transitório da tensão CC de alimentação do relé (Abertura da chave 32M2-4).

Observando atentamente os gráficos anteriores, verifica-se a existência de fenômenos transitórios de alta frequência que para sua compreensão é realizada uma ampliação na escala de tempo, passando-se a registrar janelas com 10 microssegundos. Na escala de tempo de 10 microssegundos cada pico transitório apresentado nos gráficos anteriores é então registrado com melhor resolução permitindo assim, uma análise do fenômeno transitório. Uma vez que existe limitação da memória do osciloscópio (capacidade máxima de registro total por janela), somente o primeiro pico que atinge o valor de disparo ajustado será registrado. A Fig. 6 apresenta a forma de onda de tensão transitória registrada na fase A resultante da manobra de abertura da chave seccionadora 32M2-4 na escala de 10 microssegundos por janela do osciloscópio.

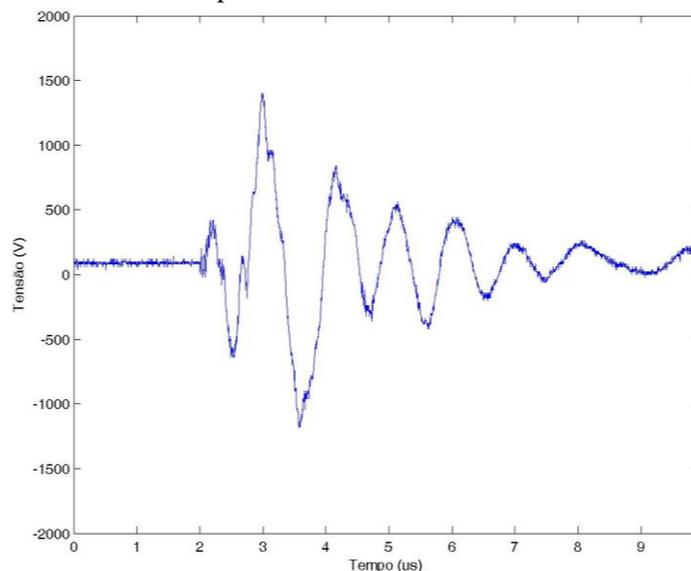


Fig. 6. Transitório da tensão AC do TP fase A (Abertura da chave 32M2-4).

Observa-se que a abertura da chave seccionadora resulta em um transitório de tensão com a presença de diversas componentes de alta frequência com valores de tensão chegando a variações de pico a pico de 2,5kV. Apesar do curtíssimo tempo de aplicação desta tensão de alimentação ao relé, os valores significativos e a considerável variação da tensão observada pode causar mau funcionamento dos relés de proteção

De maneira similar, verifica-se que existe forte presença de componentes de alta frequência na corrente durante a abertura da chave seccionadora da 32M2-4, conforme apresentado na Fig. 7.

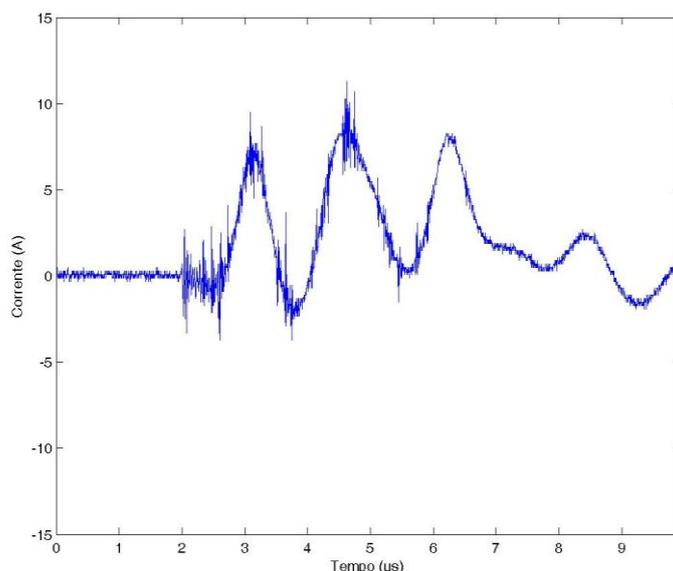


Fig. 7. Transitório da corrente TC fase A (Abertura da chave 32M2-4).

Os transitórios de tensão CC na escala de 10 microssegundos por janela do osciloscópio puderam ser visualizados com definição conforme apresentado na Fig. 8. Pode-se constatar que durante a abertura da chave seccionadora 32M2-4 que os níveis desta tensão variam de aproximadamente 80 volts (de aproximadamente 80 a 160 volts).

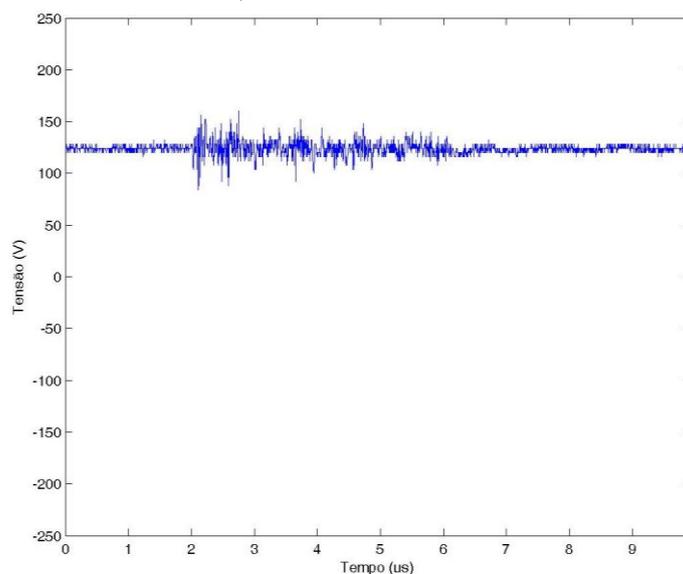


Fig. 8. Transitório da tensão CC de alimentação do relé (Abertura da chave 32M2-4).

3.2. Fechamento da Chave 32M2-4

De maneira análoga aos registros provenientes das manobras de abertura da chave 32M2-4, nesta seção são apresentadas as tensões e correntes relacionadas com as manobras de fechamento. A tensão proveniente da tensão da fase A do TP durante manobra de fechamento da chave seccionadora 32M2-4 está apresentado na Fig. 9.

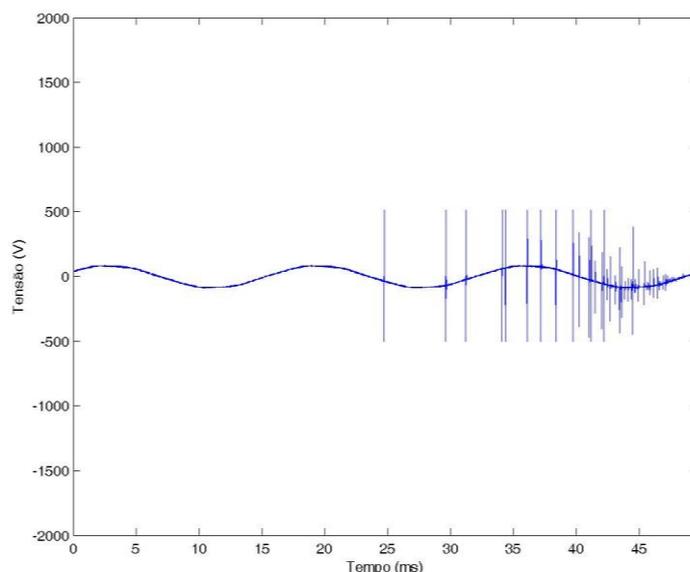


Fig. 9. Transitório da tensão AC do TP fase A (Fechamento da chave 32M2-4).

A partir de diversas medições, observou-se que os picos transitórios na manobra de fechamento da referida chave são decrescentes e, normalmente limitados ao tempo de 25 milissegundos. Nesta medição, utilizou-se ponta de prova de tensão de baixa tensão que saturou no nível de 500V e por este motivo, os picos de transitórios apresentam este nível de tensão máxima. Entretanto, nesta medição pode-se averiguar a duração e o comportamento do transitório durante a manobra de fechamento da chave seccionadora 32M2-4.

O transitório de corrente proveniente da manobra de fechamento da chave seccionadora 32M2-4 apresenta também significativos valores de picos, conforme pode ser verificado na Fig. 10.

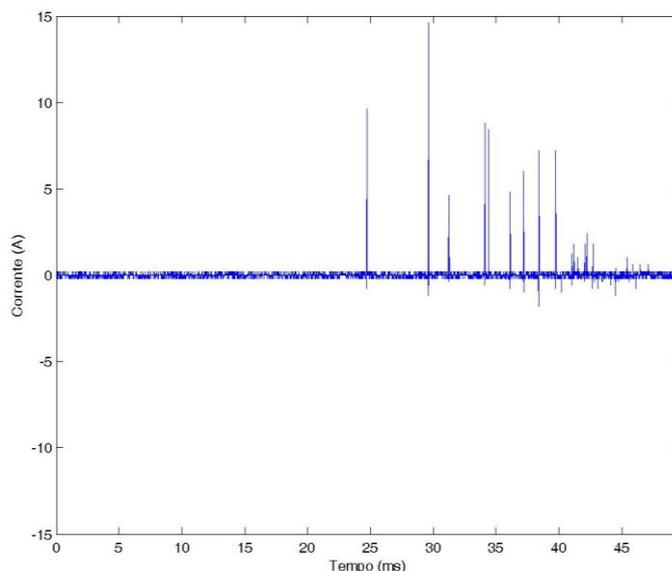


Fig. 10. Transitório da corrente TC fase A (Fechamento da chave 32M2-4).

Novamente não se visualiza a ocorrência de fenômenos transitórios na escala de tempo adotada (50ms por janela do osciloscópio) na tensão CC de alimentação do relé durante manobra de fechamento da chave seccionadora 32M2-4 conforme pode ser observado na Fig. 11.

Conforme anteriormente abordado, nesta escala de tempo não é possível afirmar a ocorrência de variações muito rápidas nos níveis de tensão e/ou corrente de determinada grandeza medida com a utilização deste osciloscópio.

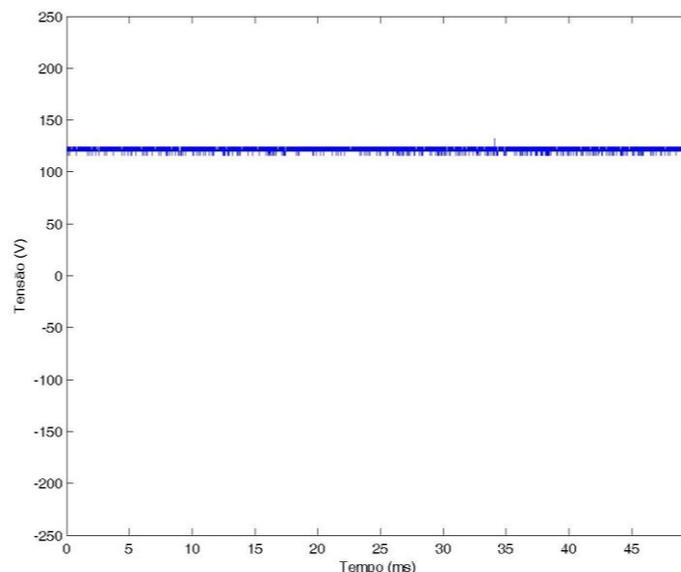


Fig. 11. Transitório da tensão CC de alimentação do relé (Fechamento da chave 32M2-4).

A Fig. 12 apresenta forma de onda registrada de transitório da tensão na fase A da manobra de fechamento da chave seccionadora 32M2-4 na escala de 10 microssegundos por janela do osciloscópio.

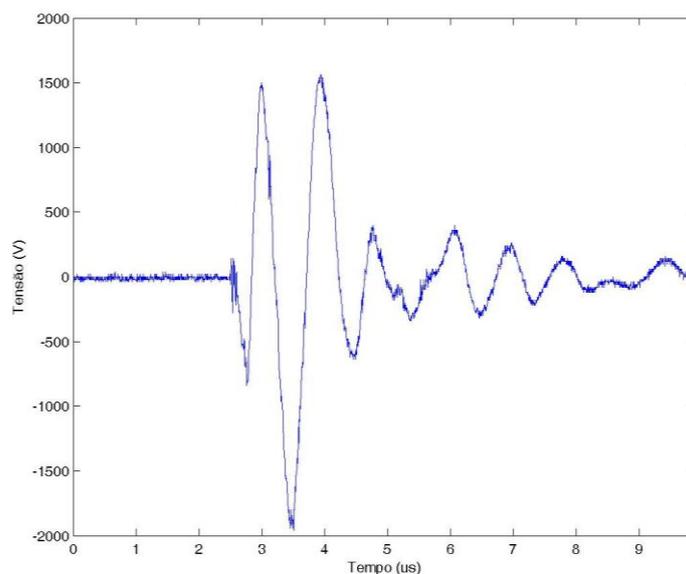


Fig. 12. Transitório da tensão AC do TP fase A (Fechamento da chave 32M2-4).

Pode-se observar, a partir da Fig. 12 que esse transitório apresenta diversas componentes de alta frequência (este tópico será melhor apresentado na seção 3.3) e valores de pico que atingem aproximadamente os valores de -2 kV e 1,5 kV, apesar do curtíssimo tempo de aplicação desta tensão ao relé, uma significativa variação da tensão é observada que pode causar mau funcionamento do relé de proteção. Também, observando o transitório da corrente (Fig. 13), verifica-se que este formato de onda resulta na presença de componentes de alta frequência.

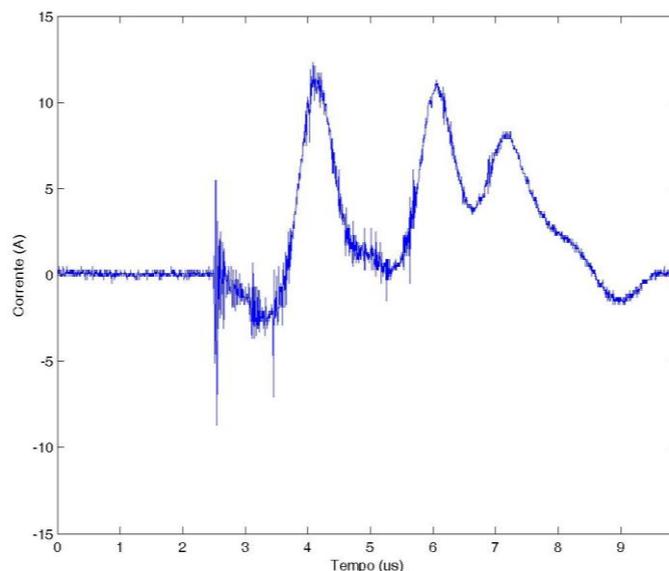


Fig. 13. Transitório da corrente TC fase A (Fechamento da chave 32M2-4).

Os transientes de tensão CC na escala de 10 microssegundos por janela do osciloscópio puderam ser mais bem visualizados conforme apresentado na Fig. 14.

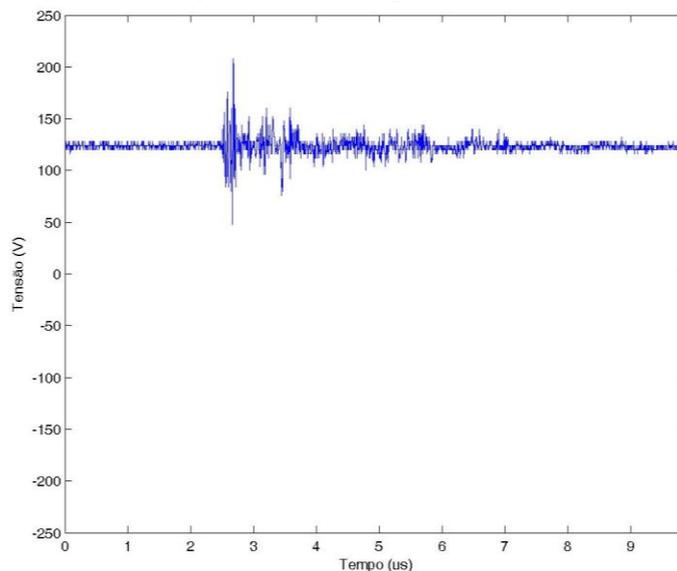


Fig. 14. Transitório da tensão CC de alimentação do relé (Fechamento da chave 32M2-4).

Pode-se constatar que durante o fechamento da chave seccionadora 32M2-4 que os níveis desta tensão variam de aproximadamente 150 volts (de aproximadamente 50 a 200 volts).

3.3. Análise em frequência das medições

A análise em frequência é importante para a caracterização do ambiente eletromagnético onde está inserido o equipamento eletrônico sensível e para a determinação de filtros para mitigar os problemas.

O registro transitório da tensão AC do TP (fase A) obtido durante a abertura e fechamento da chave seccionadora 32M2-4 (apresentados na Fig. 6 e Fig. 12 respectivamente) foram utilizados para obtenção das componentes em frequência através da FFT (*Fast Fourier Transform*). Estas componentes em frequência estão apresentadas na Fig. 15 onde a parte A apresenta a manobra de abertura e B a de fechamento.

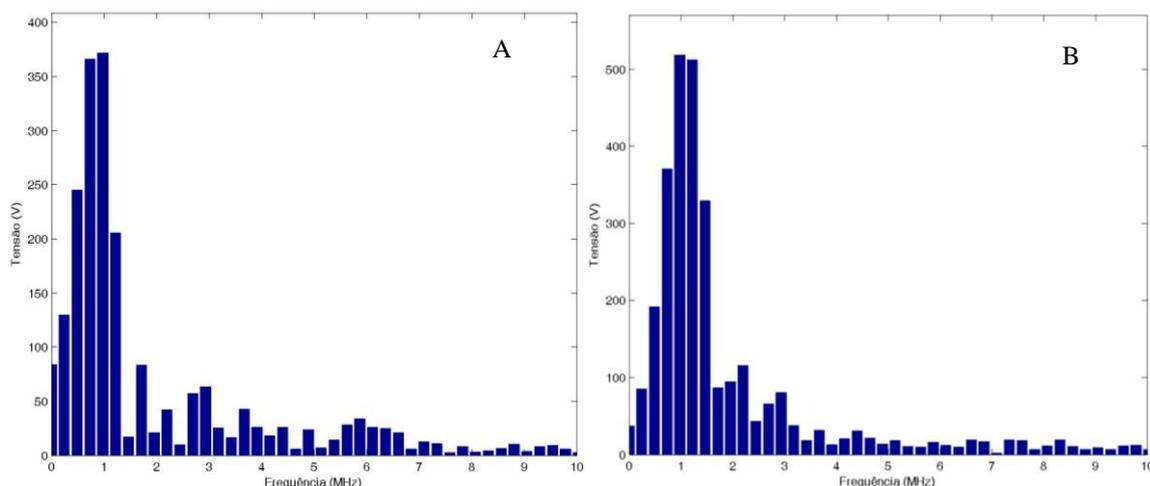


Fig. 15. Análise em frequência da tensão transitória AC (Abertura da chave 32M2-4).

Observa-se que as frequências envolvidas tanto na manobra de abertura como na de fechamento na tensão AC são da ordem de 1Megahertz (um pouco inferior). A completa caracterização das frequências envolvidas para o estabelecimento da frequência de corte do filtro a ser projetado exige levantamento estatístico devido ao caráter aleatório do arco durante as manobras de abertura e fechamento da chave seccionadora.

4. CONCLUSÕES

Manobras sem carga em chaves seccionadoras próximas aos transformadores de corrente têm ocasionado o desligamento indevido da subestação Arcoverde da CELPE devido a problemas de interferência eletromagnética. Investigações realizadas em campanhas de medição indicaram que durante manobras de fechamento e abertura dessas chaves seccionadoras durante operações normais de retirada de equipamento para manutenção, as tensões transferidas aos relés através dos transformadores de potencial e de acoplamentos eletromagnéticos atingem níveis de aproximadamente 4kV pico a pico, o que tem sido relacionado com o problema de compatibilidade encontrado nas subestações. Adicionalmente, as correntes registradas na entrada dos relés de proteção atingem níveis de aproximadamente 20A pico a pico. Além disso, durante essas manobras, a tensão em corrente contínua dos serviços auxiliares que alimenta o sistema de proteção apresenta variações de amplitude.

Esses transitórios têm se apresentado com valores significativos no chaveamento de seccionadoras próximas aos transformadores de corrente em manobras sem carga, mostrando assim que a presença deste equipamento propicia um circuito ressonante que possui diversas componentes com característica estocástica relacionada com o arco elétrico e também com os acoplamentos elétricos e magnéticos.

As interferências eletromagnéticas encontradas são de naturezas conduzidas e radiadas e se propagam para aos equipamentos de proteção envolvidos causando operações indevidas.

A instalação de filtros adequados nos circuitos de alimentação dos relés possibilitará uma redução nos ruídos conduzidos permitindo um bom funcionamento do sistema de proteção. Adicionalmente, recomenda-se para atenuação dos problemas radiados o uso de cabos blindados com aterramento em ambas terminações.

AGRADECIMENTOS

Os autores deste trabalho agradecem à CELPE pelo apoio no projeto de Pesquisa e Desenvolvimento no ciclo 2006/2007.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] D. E. Thomas, C. M. Wiggins, F. S. Nickel, C. D. Ko, Prediction of electromagnetic field and current transients in power transmission and distribution systems, IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 4. No. 1, January 1989.

- [2] C. M. Wiggins, F. S. Nickel, A. J. Haney, S. E. Wright, Measurement of switching transients in a 115 kV substation, *IEEE Transaction on Power Delivery*, Vol. 4. No. 1, January 1989.
- [3] C. M. Wiggins, S. E. Wright, Switching transient fields in substations, *IEEE Transaction on Power Delivery*, Vol. 6. No. 2, April 1991.
- [4] C. M. Wiggins, D. E. Thomas, F. S. Nickel, S. E. Wright, Transient electromagnetic interference in substations, *IEEE Transaction on Power Delivery*, Vol. 9. No. 4, October 1994.
- [5] C S Barrack, B M Pryor, The measurement of fast transient electromagnetic interference within power system substations. *Developments in Power System Protection*, 25-27th March 1997, Conference Publication No. 434, IEE, 1997.
- [6] Silveira, C. A.; Fonseca, G. M.; Costa, Caiuby Alves da; Aquino, Ronaldo Ribeiro Barbosa de; de Medeiros, L. H. A.. Analyzing Low Frequency Couplings In Substations Under Steady-State Conditions. 2004 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2004, São Paulo - Brasil. *PROCEEDINGS*, 2004. v. 1. p. 737-742.
- [7] Silveira, C. A.; Fonseca, G. M.; Aquino, Ronaldo Ribeiro Barbosa de; de Medeiros, L. H. A.. Analyzing Low Frequency Couplings In Substations Under Steady-State Conditions - PART II. 2004 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2004, São Paulo - Brasil. *PROCEEDINGS*, 2004. v. 1. p. 731-736.