



**XXIII SNPTEE  
SEMINÁRIO NACIONAL  
DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA**

FI/GSE/07  
18 a 21 de Outubro de 2015  
Foz do Iguaçu - PR

**GRUPO – VIII**

**GRUPO DE ESTUDO DE SUBESTAÇÕES E EQUIPAMENTO DE ALTA TENSÃO - GSE**

**AValiação de Disjuntores de Alta Tensão Utilizando Sinais de Radiofrequência**

**Jose E. M. Cereja(\*)  
Fernando T. Flores  
Marcel V. Fischer  
Leandro B. Puchale  
CEEE-GT**

**Thair I. Mustafa  
Ciro A. Pitz  
Hugo D. Almaguer  
FURB**

**José V. Santos  
UNISINOS**

**RESUMO**

O presente trabalho apresenta resultados parciais de um projeto de pesquisa e desenvolvimento - P&D celebrado entre a Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, a Companhia Estadual de Geração e Transmissão de Energia Elétrica – CEEE-GT e a Universidade Regional de Blumenau - FURB. O objetivo do projeto é investigar e desenvolver técnica para avaliação de disjuntores de alta tensão a partir medições dos sinais de radiofrequência emitidos no processo de manobra de tais equipamentos. Foram realizadas medições de campo em disjuntores, classe de tensão 242kV, de reator de barra e de banco de capacitores em subestações pertencentes a CEEE-GT.

**PALAVRAS-CHAVE**

Disjuntores, Alta tensão, Radiofrequência

**1.0 - INTRODUÇÃO**

As recentes alterações regulatórias no setor elétrico causaram impactantes mudanças na rotina de manutenção das concessionárias de transmissão, principalmente as não-licitadas, anteriores a 1999. Dentre as alterações destacam-se a extinção das franquias para aplicação de parcela variável, por meio da resolução ANEEL N°512/2012 e a Lei N°12.783/2013 que estabeleceu diretrizes para renovação das concessões, quando reduziu de forma brusca a receita dos agentes de transmissão. Tais fatos tornaram ainda mais evidente a necessidade de investimento em técnicas de manutenção não invasivas e otimizadas. Considerando o exposto, a Companhia Estadual de Geração e Transmissão de Energia Elétrica – CEEE-GT em parceria com a Universidade Regional de Blumenau – FURB, por meio de um projeto P&D regulado pela ANEEL, está buscando a avaliação de disjuntores de alta tensão a partir de medições de radiofrequência. A ideia é extrair conclusões a partir do conteúdo em radiofrequência emitido durante o processo de manobra dos disjuntores. Ressalta-se que o projeto encontra-se em andamento e o presente trabalho visa apresentar os resultados parciais da pesquisa.

**2.0 - SISTEMA DE MEDIÇÃO**

A literatura mostra que durante a manobra de disjuntores, impulsos de radiofrequência são irradiados (1). Tais impulsos podem ser captados a partir de um conjunto de medição adequado, fornecendo a vantagem de ser não invasivo, ou seja, sem qualquer contato físico com o disjuntor. O conjunto de medição desenvolvido é semelhante ao utilizado em (1) e (2), sendo composto por quatro antenas dispostas ao nível do solo, abaixo das fases do disjuntor. Uma das antenas é um dipolo eletromagnético de alta frequência que exerce a função de disparador para determinação do início de aquisição dos sinais. As demais antenas possuem formato cilíndrico inteiriço e, fazem uso do acoplamento capacitivo existente entre as próprias antenas e os circuitos de potência de cada fase do disjuntor. A Figura 1 ilustra esquematicamente o acoplamento capacitivo existente entre as antenas e um circuito trifásico hipotético. Sendo o circuito de potência representado pelos pontos A, B e C e as antenas representadas

(\*) Av. Joaquim Porto Villanova, n° 201 – sala 205 - Bloco F – CEP 91.410-400 Porto Alegre, RS, – Brasil  
Tel: (+55 51) 3382-5183 – Fax: (+55 51) 3382-4395 – Email: cerejaeduardo@gmail.com

por X, Y e Z. Percebe-se que uma determinada antena possui acoplamento capacitivo tanto com a fase imediatamente superior quanto com as demais fases, tal comportamento foi confirmado nas medições de campo. A Figura 2 mostra a medição em campo destacando as antenas supracitadas. O sinal de cada uma das antenas é levado individualmente a um osciloscópio multicanais, onde o canal 1 recebe o sinal de disparo e os demais canais recebem os sinais das antenas associadas as fases, de acordo com o faseamento existente na subestação.

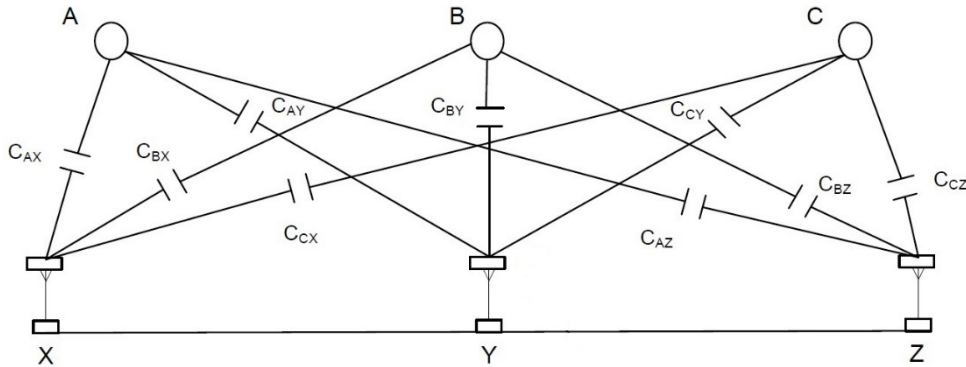


FIGURA 1 – Diagrama Esquemático do Acoplamento Capacitivo do Conjunto de Medição (fonte: (1))



FIGURA 2 – Antenas de Acoplamento Capacitivo (esquerda) e de Disparo (direita)

## 2.1 Medições de Campo

Medições de campo foram realizadas nas subestação Gravataí II 230kV 380 MVA, localizada na região metropolitana de Porto Alegre – RS e, também na subestação de Quinta 230kV 455 MVA, localizada no município de Rio Grande - RS. Devido a alta cadência de manobras, disjuntores associados a função transmissão - FT de controle de reativo foram escolhidos para execução das medições. Na subestação Gravataí II disjuntores dos bancos de capacitores BC-3 230kV 100MVar e BC-6 230kV 123Mvar e na SE Quinta no disjuntor do reator de barra RB-1 230kV 25MVar. As medições foram realizadas com os disjuntores manobrando carga, ou seja, durante a energização e desenergização dos referidos equipamentos de compensação reativa.

## 3.0 - RESULTADOS

### 3.1 Medições em Banco de Capacitores

A seguir têm-se os sinais captados durante o fechamento do disjuntor do BC-6 por meio da antena de alta frequência, (ver Figura 3-(a)), e também os sinais captados pelas demais antenas localizadas abaixo de cada fase do disjuntor. As medições realizadas no BC-3 foram semelhantes às do BC-6, possuem o mesmo disjuntor, por isso esse trabalho apresentará os resultados apenas desse último. Para a operação em questão o disjuntor possui dispositivo de manobra controlada parametrizado para fechamento no zero da tensão de cada fase, ou seja, a cada 60° elétricos ou 2,77ms para sistemas trifásicos de 60Hz. Nota-se que a diferenças entre os impulsos

detectados assemelha-se a defasagem teórica dos zeros de tensão. Dessa forma, há indícios que as diferenças entre os pulsos de RF representam a simultaneidade do disjuntor. Considerando os sinais captados pelas antenas de acoplamento capacitivo, os quais foram normalizados, percebe-se na prática o ilustrado na Figura 1, ou seja, a influência de variações de campo elétrico não somente na antena imediatamente abaixo da fase, mas também nas antenas das fases adjacentes. Observando-se detalhadamente os sinais da Figura 3-(d) é possível identificar a sequência de fechamento das fases, uma vez que após a ocorrência do primeiro impulso a tensão na antena da fase C não se alterou, indicando que tal variação do sinal foi causada por outra fase. Contudo, após o segundo impulso a tensão sofre variação assumindo o comportamento característico de um sinal com frequência fundamental de 60Hz, sugerindo que a fase C foi a segunda a fechar. Uma análise semelhante pode ser aplicada aos sinais captados pelas demais antenas afim de identificar a sequência de fases, no entanto, essa análise é simplificada e mais direta a partir da aplicação de técnica de processamento de sinais, nesse caso, a transformada de *Wavelet*.

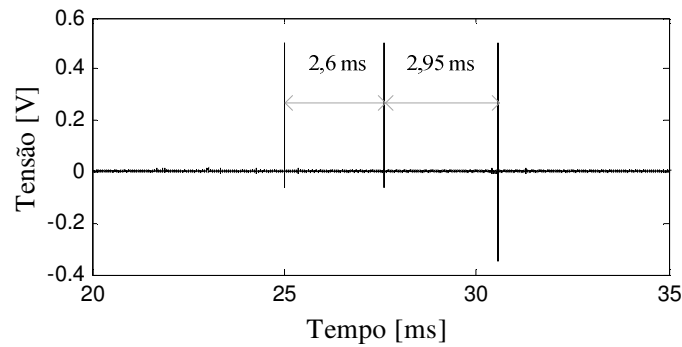


FIGURA 3-(a) Impulsos de Radiofrequência captados no fechamento do disjuntor

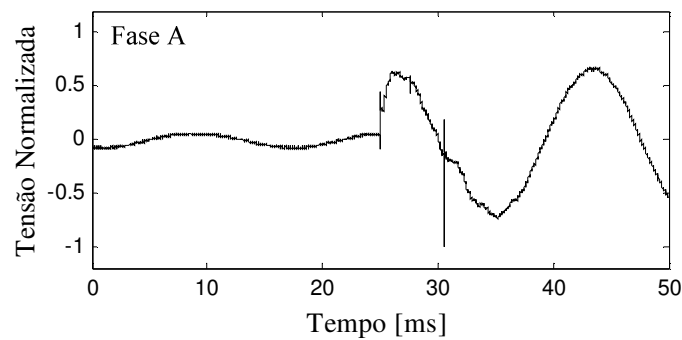


FIGURA 3-(b) Sinal captado pela antena de acoplamento capacitivo Fase A

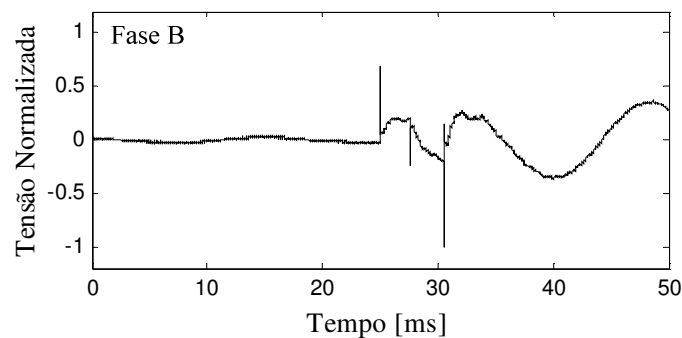


FIGURA 3-(c) Sinal captado pela antena de acoplamento capacitivo Fase B

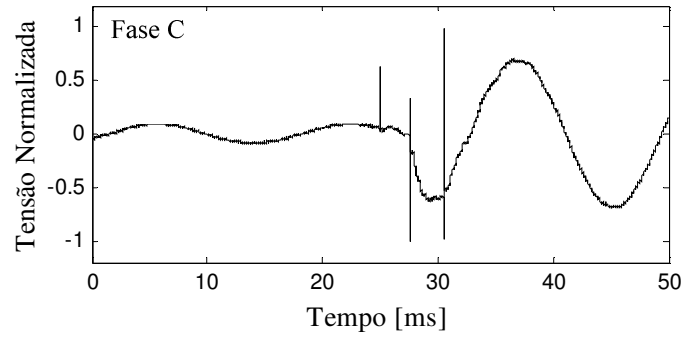


FIGURA 3-(d) Sinal captado pela antena de acoplamento capacitivo Fase C

A transformada de *Wavelet* é uma ferramenta matemática para análise de sinais similar a transformada de Fourier, possuindo a vantagem de apresentar representações locais no domínio do tempo e da frequência ao invés de representações globais do sinal como no caso da transformada de Fourier (5). O detalhamento da transformada de *Wavelet* fuge do escopo desse trabalho, os autores recomendam a referência (3) para estudo aprofundado.

O resultado da aplicação da transformada de *Wavelet* é ilustrado nas Figuras 4-(a), (b) e (c), onde fica evidente que a sequência de fase no fechamento foi A-C-B. Ressalta-se que o dispositivo de manobra controlada, mencionado anteriormente, utiliza como referência a tensão da fase A que, consequentemente define a sequência de fechamento das fases, passagem pelo zero de tensão. Dessa forma, o resultado alcançado pelo sistema de medição proposto para identificação da sequência de fechamento de fases, foi validado a partir da parametrização existente no dispositivo de manobra controlada.

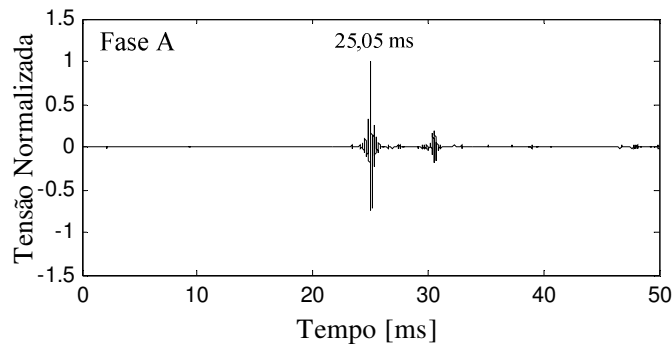


FIGURA 4-(a) Transformada de *Wavelet* Sinal Fase A

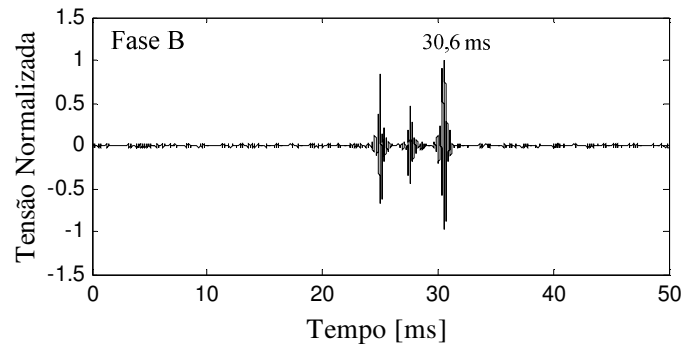
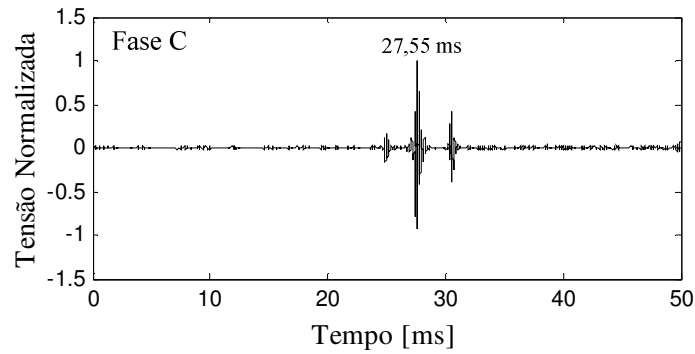


FIGURA 4-(b) Transformada de *Wavelet* Sinal Fase B

FIGURA 4-(c) Transformada de *Wavelet* Sinal Fase C

As medições para a manobra de abertura do disjuntor não obtiveram sucesso devido a não sensibilização do dipolo eletromagnético na desenergização do banco de capacitores.

### 3.2 Medições em Reator

A Figura 5 ilustra os sinais captados durante o fechamento do disjuntor do reator da Subestação Quinta. Novamente as diferenças entre os impulsos de radiofrequência proporcionam um indicativo da simultaneidade do disjuntor, no entanto, logo após a ocorrência do segundo impulso um novo aparece, caracterizando uma possível reignição do arco de acordo com (1). O mesmo fenômeno é percebido após impulso próximo ao instante de 52ms. Por análise dos sinais das antenas de acoplamento capacitivo, fica evidente que a primeira fase a fechar é a C, por assumir tensão imediatamente após o primeiro impulso. Para distinguir de forma mais exata qual a segunda fase é necessário uso da transformada de *Wavelet*, ver Figura 6.

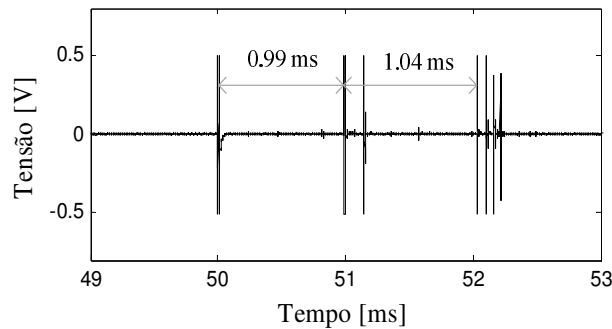


FIGURA 5-(a) Impulsos de Radiofrequência captados no fechamento do disjuntor de Reator

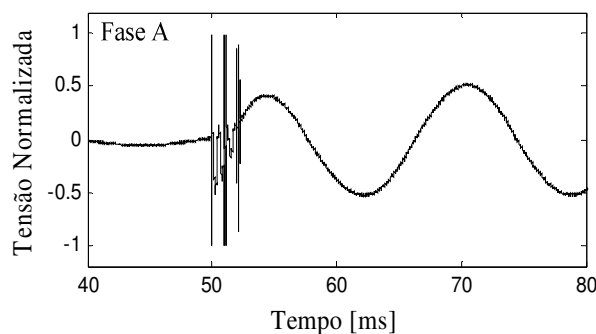


FIGURA 5-(b) Sinal captado pela antena de acoplamento capacitivo Fase A

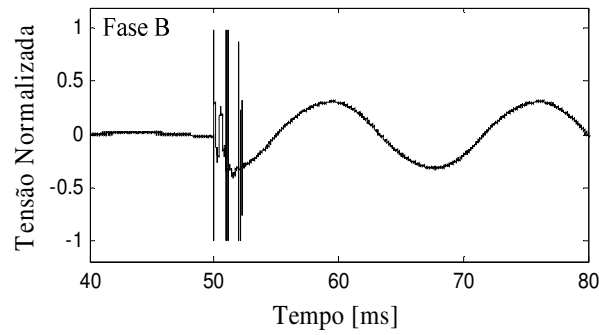


FIGURA 5-(c) Sinal captado pela antena de acoplamento capacitivo Fase B

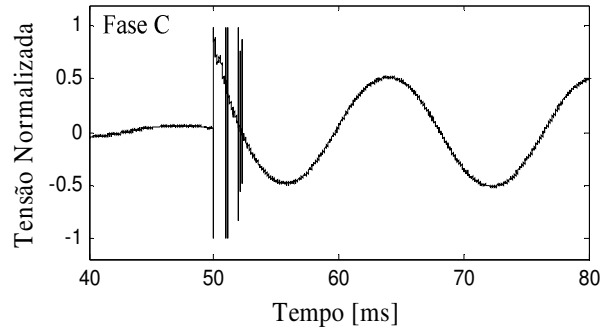
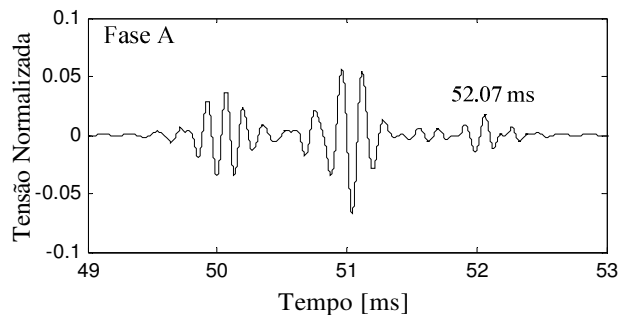
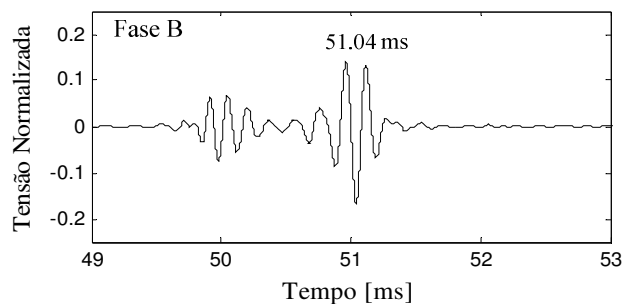


FIGURA 5-(d) Sinal captado pela antena de acoplamento capacitivo Fase C

A partir das Figuras 6 (a) e (b), conclui-se que a sequência de fechamento identificada foi C-B-A, infelizmente o disjuntor atrelado ao reator não possui dispositivo de controle de manobra associada para permitir validação do resultado.

FIGURA 6-(a) Transformada de *Wavelet* Sinal Fase AFIGURA 6-(b) Transformada de *Wavelet* Sinal Fase B

Por fim, segue abaixo os sinais captados na manobra de abertura do reator, percebe-se que os impulsos de radiofrequência possuem amplitude reduzida em comparação com os impulsos da manobra de fechamento, tal aspecto dificulta a extração de informações, por exemplo, o impulso que disparou o início da aquisição das antenas associadas as fases não é claramente identificável na Figura 7(a), no entanto, as Figuras 7(c) e (d)

mostram que o disparo foi antes de 50ms. De qualquer maneira com a aplicação de *Wavelet* foi possível identificar ao menos a sequência de abertura, C-B-A.

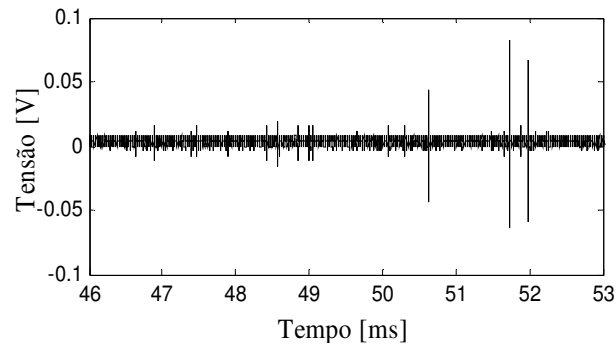


FIGURA 7-(a) Impulsos de Radiofrequência captados na abertura do disjuntor de Reator

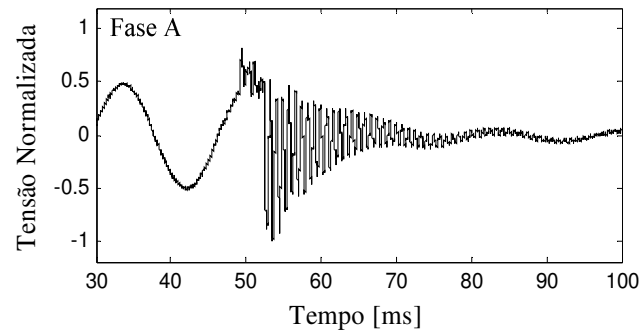


FIGURA 7-(b) Sinal captado pela antena de acoplamento capacitivo Fase C

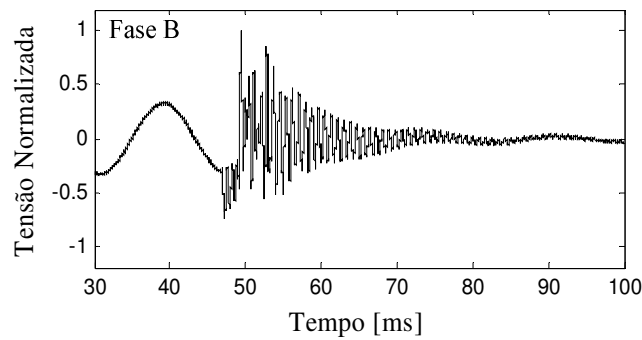


FIGURA 7-(c) Sinal captado pela antena de acoplamento capacitivo Fase B

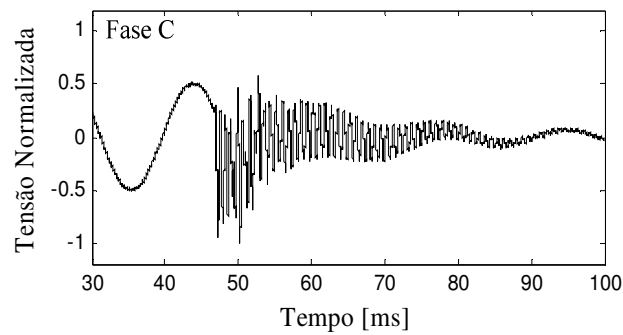


FIGURA 7-(d) Sinal captado pela antena de acoplamento capacitivo Fase C

#### 4.0 - CONCLUSÕES

Neste trabalho foram apresentados resultados parciais de medições realizadas em disjuntores de alta cadência de manobra, conectados a equipamentos de compensação reativa, por meio uso de manobras naturais do sistema elétrico. O sistema de medição proposto é não invasivo e mostrou-se capaz de estimar a simultaneidade entre polos e, sequência de fases na abertura e no fechamento dos disjuntores. Destaca-se que as medições no banco de capacitor foram validadas a partir das parametrizações existentes no dispositivo de manobra controlada. Limitações também foram identificadas na tentativa de aquisição dos sinais oriundos da manobra de abertura de banco de capacitores, devido a não sensibilização da antena de disparo. A fim de promover maior confiabilidade aos resultados, novos conjuntos de medições estão previstos ao longo projeto, não somente fazendo uso de manobras naturais do sistema, mas também com a tentativa de efetuar medições na eliminação de curto circuito da rede, por exemplo, abertura de disjuntor mediante a defeito transitório em linha de transmissão. Espera-se com isso obter maiores informações a respeito de transitórios, cita-se tempos de arco, tensão de restabelecimento transitório –TRT, e reacendimentos.

Em resumo, para caracterização da metodologia de medição por radiofrequência como proposta de técnica de manutenção ou até mesmo de monitoramento faz-se necessário um acentuado número de medições. A equipe do projeto espera também aprimorar a aplicação de técnicas de processamento de sinais, para extrair maiores informações a respeito dos fenômenos durante a manobra dos equipamentos. Assim como adequações na antena de disparo, a fim dessa ser sensibilizada em qualquer condição de manobra do disjuntor.

#### 5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) S. Ramli, D. Birtwhistle, J. L. Roldan and T. Tang, “ EHV circuit breaker condition monitoring using antenna-based coupling methods”, International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, Beijing, China, April 2008.
- (2) P. J. Moore, “Radiometric measurement of circuit breaker interpole switching times”, *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 19, pp. 987-992, Jul. 2004
- (3) M. Weeks, Digital Signal Processing Using MATLAB and Wavelets, ISBN: 0-9778582-0-0, Infinity Science Press, LLC, 2007;
- (4) T. I. Mustafa, C. A. Pitz, H. D. Almaguer, D. W. P. Thomas, J. V. Santos, F. T. Flores, J. E. Cereja, L. H. Puchale, “An analysis of the performance of 245 kV circuit breakers applying the radiometric monitoring and the Wavelet Transform” in Proc. of the International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC Europe 2014), Gothenburg, Sweden, pp 1058-1062;
- (5) Julio C. Ferreira, “Utilização da Transformada de Wavelet para Detectar Variações Anormais de Frequência em Sistemas de Geração Distribuída”, Universidade Federal de Uberlândia Dissertação Mestrado, Uberlândia 2009.
- (6) Siemens Power Transmission and Distribution, “ Manual de Instruções de Operação Dispositivo de Comando PSD02”, Berlin 1992

#### 6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



José Eduardo Malvestio Cereja;  
Nascido em Presidente Prudente-SP em 1985;  
Graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE- Foz do Iguaçu em 2009;  
Mestrando da Universidade Regional de Blumenau – FURB;  
Trabalha na área de Planejamento de Controle da Transmissão da CEEE-GT desde 2011.

Fernando Timm Flores;  
Nascido em Santa Maria-RS em 1962;  
Graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Maria - UFSM em 1989;  
Trabalha na Engenharia de Equipamentos da Transmissão da CEEE-GT desde 2005.

Marcel Vinicius Theissen Fischer;  
Nascido em Santa Maria-RS em 1983;  
Graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Maria - UFSM em 2010;  
Trabalha na Engenharia de Equipamentos da Transmissão da CEEE-GT desde 2011.



Leandro Henrique Bona Puchale;  
 Nascido em Santa Maria – RS, em 1981;  
 Especialista em Engenharia de Manutenção pela PUCRS em 2011 e graduado em Engenharia Elétrica Universidade Federal de Santa Maria - UFSM em 2003;  
 Trabalha na Engenharia de Linhas de Transmissão da CEEE-GT desde 2005.

Thair Ibrahim Abdel Hamid Mustafa;  
 Nascido em Santa Maria – RS, em 1967;  
 Graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Maria - UFSM em 1990;  
 Doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina -UFSC Florianópolis em 2004;  
 Trabalha como Professor Universitário na Universidade Regional de Blumenau FURB Blumenau – SC.

Ciro André Pitz;  
 Nascido em Gaspar-SC em 1985;  
 Graduado em Engenharia de Telecomunicações pela Universidade Regional de Blumenau – FURB – Blumenau em 2008;  
 Mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Regional de Blumenau – FURB – Blumenau em 2010;  
 Trabalha como Professor Universitário na Universidade Regional de Blumenau – FURB Blumenau – SC;

Hugo Armando Domínguez Almaguer;  
 Nascido em Santiago de Cuba - CUBA, em 1971;  
 Graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade de Oriente CUBA, em 1994;  
 Doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina -UFSC Florianópolis em 2003;  
 Trabalha como Professor Universitário na Universidade Regional de Blumenau FURB Blumenau – SC.

José Vicente Canto dos Santos;  
 Nascido em Santa Maria – RS, em 1966;  
 Graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Maria - UFSM em 1990  
 Doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP em 1998;  
 Trabalha como Professor Universitário na Universidade do Vale dos Sinos São Leopoldo –RS.