



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

BR/GSE/13  
13 a 16 de Outubro de 2013  
Brasília - DF

**GRUPO – VIII**

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

**AValiação de SOBRETENSÕES EM SUBESTAÇÕES ISOLADAS A SF6 INTERCONECTADAS POR CABOS SUBTERRÂNEOS**

**Rafael C. Galera de Azevedo(\*)**  
**ABB**

**José Geraldo B. M. De Andrade**  
**ABB**

**Marta Lacorte**  
**ABB**

**RESUMO**

A expansão do sistema elétrico de forma a garantir o atendimento ao crescimento da carga exige constantes investimentos. Em grandes centros urbanos, onde há limitação de espaço físico para construção de novas subestações e linhas de transmissão, é crescente a necessidade de implantação de instalações que utilizem menos espaços e ao mesmo tempo mantenham os níveis de confiabilidade e disponibilidade exigidos pelo agente regulador. Tal cenário explica, em parte, o aumento significativo da aplicação de Subestações Isoladas a SF6 (GIS) e de linhas de transmissão subterrâneas.

No entanto, a utilização da tecnologia GIS pode impor níveis diferenciados de sobretensões aos equipamentos localizados em sua proximidade (normalmente isolados a ar) quando da ocorrência de descargas atmosféricas e/ou surtos de manobra. Este trabalho apresenta os resultados provenientes de um estudo para instalação de uma nova subestação isolada a SF6 conectada através de cabos subterrâneos na região sudeste do Brasil.

**PALAVRAS-CHAVE**

GIS (Subestações Isoladas a Gás), Sobretensões, Linhas de Transmissão Subterrâneas.

**1.0 - INTRODUÇÃO**

A expansão do sistema elétrico para atendimento ao crescimento da carga exige constantes investimentos com objetivo de garantir a disponibilidade do serviço de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. Neste sentido os investimentos em novas instalações, principalmente nos grandes centros urbanos, estão em contraposição à disponibilidade de espaço físico para construção de novas linhas de transmissão e subestações. Desta forma, em regiões de espaços físicos reduzidos, é inevitável a implantação de instalações que utilizem menos espaço e, ao mesmo tempo, mantenham os níveis de confiabilidade e disponibilidade exigidos pelo agente regulador. Tal cenário explica, em parte, o aumento significativo da aplicação de Subestações Isoladas a Gás SF6 (GIS) e de linhas de transmissão subterrâneas em todo mundo.

Por outro lado, sabe-se que a aplicação da tecnologia GIS pode impor níveis diferenciados de sobretensões aos equipamentos localizados em sua proximidade (normalmente isolados a ar) quando da ocorrência de descargas atmosféricas e/ou surtos de manobra. Neste contexto, este trabalho apresenta os resultados provenientes de um estudo para a instalação de nova subestação na região sudeste do Brasil. Esta instalação abrigará três linhas de transmissão subterrâneas em 138 kV e deverá contar com a implantação de quatro transformadores 138-13,8 kV, 60 MVA, cada. O setor de 13,8 kV será composto por quarenta e dois alimentadores, cada um deles parte desta subestação segundo uma configuração subterrânea e, a partir de determinado comprimento, afloram do solo avançando em sentido à carga segundo uma configuração aérea. Convém ressaltar que apenas a subestação de

Esse trabalho apresenta os modelos dos equipamentos e os resultados de simulações digitais realizadas utilizando o programa de cálculo de transitórios (ATP – Alternative Transient Program) [9].

## 2.0 - MODELAGEM EMPREGADA

## 2.1 Linhas subterrâneas

A modelagem dos cabos que compõem as linhas de transmissão subterrâneas em 138 kV e os alimentadores em 13,8 kV, até o ponto em que tornam-se aéreos, foi realizada através da rotina CABLE CONSTANTS do programa ATP. Foram consideradas as características da seção transversal dos cabos (condutor, blindagem, armadura e isolações), assim como a disposição geométrica dos cabos e circuitos.

A figura 01 apresenta a seção transversal do cabo isolado de 200 mm<sup>2</sup> que compõe a linha de transmissão em 138 kV.

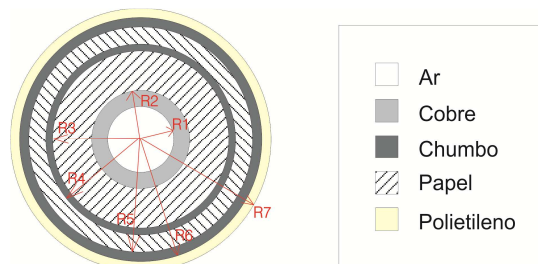


Figura 01 – Seção transversal de cabo isolado representado no ATP

## 2.2 Barramento GIS

A modelagem do barramento 138 kV (GIS) da subestação foi realizada a partir das características de impedância de surto e velocidade de propagação do meio. Os principais equipamentos que compõem as instalações do setor GIS, tais como disjuntores, desconectores, para-raios e transformadores de potência foram representados por capacitâncias equivalentes.

A figura 02 apresenta o diagrama unifilar simplificado da subestação para facilitar o entendimento das simulações efetuadas, assim como as configurações adotadas no estudo.

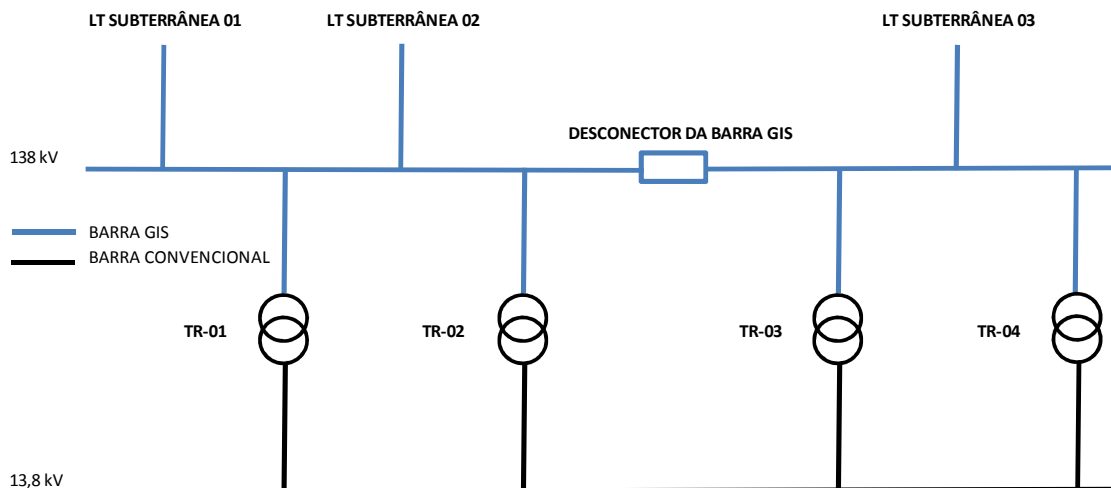


Figura 02 – Diagrama unifilar simplificado da GIS 138 kV

### 3.0 - SIMULAÇÕES

De forma a avaliar o desempenho da nova subestação frente a sobretensões, foram realizadas simulações com descargas atmosféricas atingindo as linhas de transmissão conectadas a SE (*backflash*) e ainda simulações de surtos de manobra dentro da instalação GIS.

Chaveamentos de chave seccionadora em subestações com a tecnologia GIS podem resultar em sobretensões com frente de onda muito rápida, denominadas Sobretensões Transitórias Rápidas (VFTO - Very Fast Transient Overvoltage). Uma chave seccionadora padrão, de subestação isolada a SF6, é projetada para manobrar uma pequena corrente capacitiva. Como a velocidade de contato é baixa, um grande número de reignições de arcos ocorre durante a manobra e cada reignição resulta em sobretensões de alta frequência [6].

Os estudos foram realizados utilizando o programa de cálculo de transitórios ATP. A modelagem da subestação segue a localização dos equipamentos a partir de desenhos de suas plantas e cortes da subestação.

Os cabos que compõem as linhas de transmissão subterrâneas do setor de 138 kV e os trechos subterrâneos dos alimentadores do setor de 13,8 kV foram modelados a partir das características geométricas de sua seção transversal através da rotina CABLE CONSTANTS do ATP.

Os trechos aéreos dos alimentadores de 13,8 kV, assim como os trechos de barramentos SF6 da GIS, foram modelados através de suas impedâncias características e velocidade de propagação. Os para-raios foram representados a partir de suas curvas características V/I.

#### 3.1 Descargas atmosféricas

Para simulação das descargas atmosféricas foi considerada a ocorrência de um surto indireto nas linhas de transmissão (*backflash*) [1], onde a descarga atinge o cabo-guarda e ocorre rompimento na cadeia de isoladores transferindo o surto para o condutor de fase.

Foi adotada representação monofásica da instalação para aplicação do surto atmosférico. As descargas atmosféricas incidentes em linhas de transmissão conectadas ao barramento de uma subestação segundo [2] são representadas por uma fonte de impulso de tensão de  $1,2 \times 50 \mu s$  em série com uma impedância.

Os equipamentos de manobra foram representados por chaves ideais e capacitancias para terra, conforme apresentado em [3].

Os transformadores de potência 4x138-13,8 kV / 60 MVA, foram representados pelo modelo para altas frequências adequado para transferir o surto de um setor da subestação para o outro [4].

As figuras 03 e 04 apresentam a sobretensão e energia no para-raios no setor de 138 kV (GIS) para descarga atmosférica atingindo uma das linhas de transmissão 138 kV conectada a GIS em avaliação.

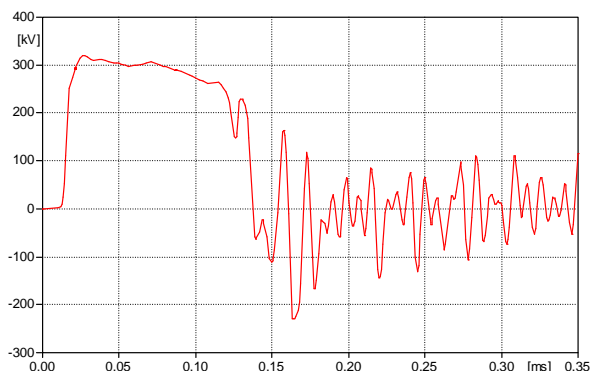


FIGURA 3 – Sobretensão no para-raios da LT sob surto

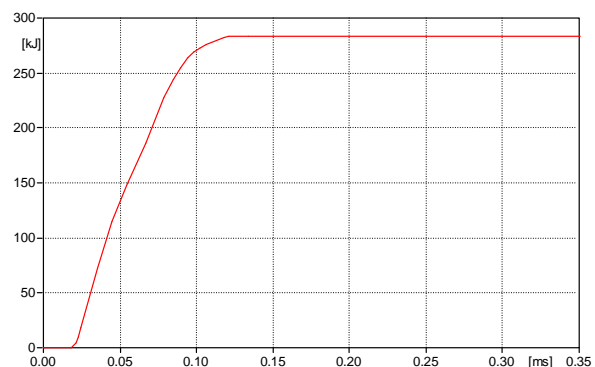


FIGURA 4 – Energia no para-raios da LT sob surto

Verifica-se que o pico mais elevado da sobretensão atingido pela descarga atmosférica no setor de 138 kV foi de 320 [kV], originando uma descarga no para-raios com energia em torno de 284 [kJ].

Os gráficos apresentados nas figuras 5 e 6 demonstram que as sobretensões resultantes nos equipamentos da GIS e nos transformadores estão abaixo dos níveis de isolamento, NBI, dos equipamentos, com margem de segurança de até 51%

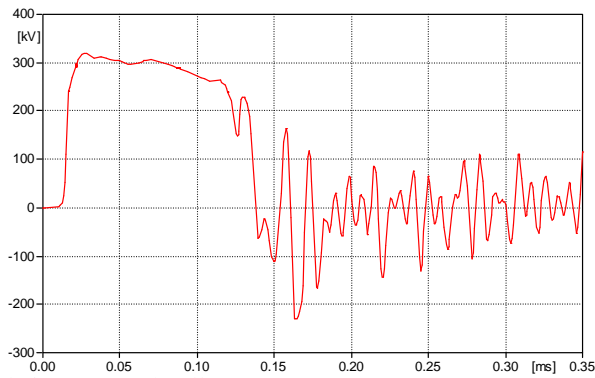


FIGURA 5 – Sobretensão no barramento GIS

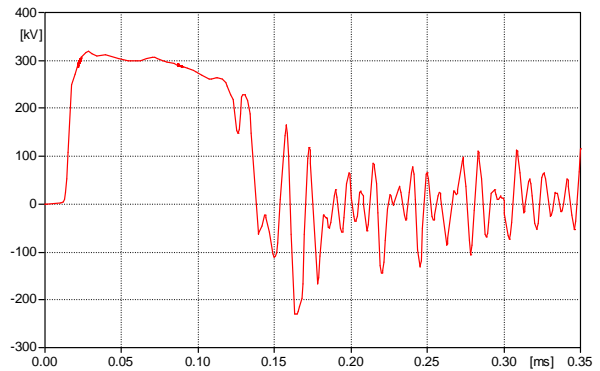


FIGURA 6 – Sobretensão no lado de alta tensão TR-01

De forma a verificar a transferência do surto atmosférico de um setor ao outro da subestação, as figuras 07 e 08 apresentam as sobretensões e energia no para-raios do transformador 01, no lado de 13,8 kV, que surgem devido a descarga atmosférica atingindo uma das linhas de transmissão 138 kV conectada a SE em avaliação.

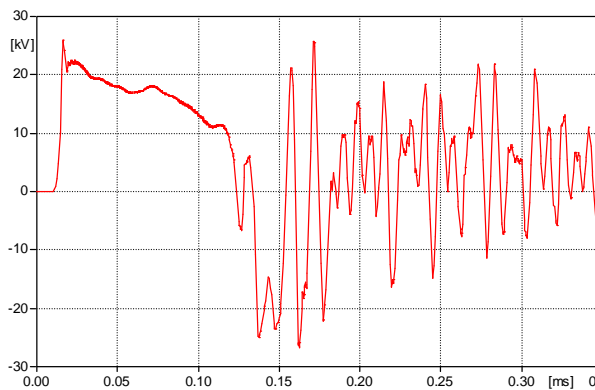


FIGURA 7 – Sobretensão no para-raios 13,8 kV do TR-01

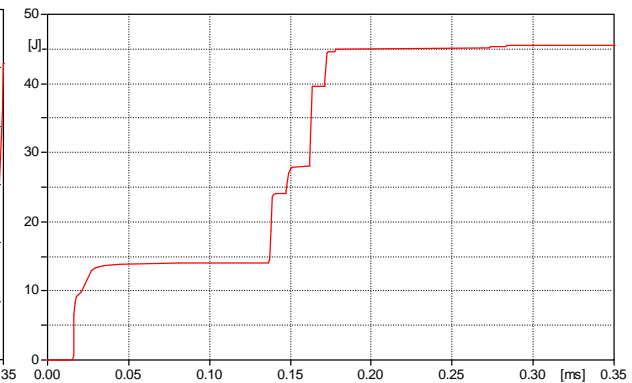


FIGURA 8 – Energia no para-raios 13,8 kV do TR-01

Verifica-se a atenuação da sobretensão quando a mesma atravessa os transformadores de potencia. O pico mais elevado da sobretensão no setor de 13,8 kV quando da ocorrência de descarga atmosférica no setor de 138 kV foi de 25,31 [kV], originando uma descarga no para-raios em torno de 0,039 [kJ].

Uma análise de sensibilidade da margem de segurança do NBI dos equipamentos pertencentes ao setor 13,8 kV em função do comprimento do trecho de cabo subterrâneo foi realizada. Os comprimentos do cabo subterrâneo a partir da entrada do alimentador (AL) até o ponto de conexão com o cabo aéreo considerados foram de 50 m, 500 m e 1000 m.

As figuras 09 e 10 apresentam as sobretensões na entrada do alimentador (AL) sob surto e a energia no para-raios da junção cabo isolado-rede aérea, para condição de disjuntor do AL aberto. Verifica-se que com o aumento do trecho de cabo isolado, há maior amortecimento das sobretensões.

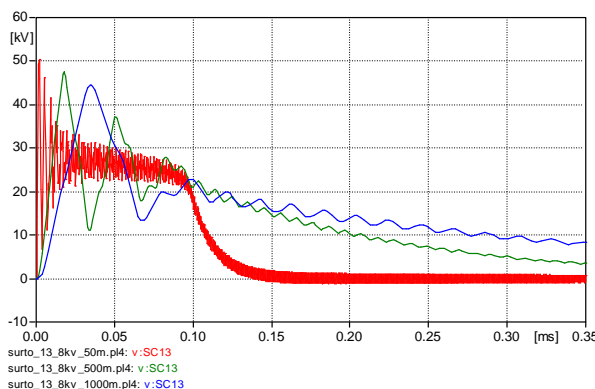


FIGURA 9 – Sobretensão na entrada do AL sob surto

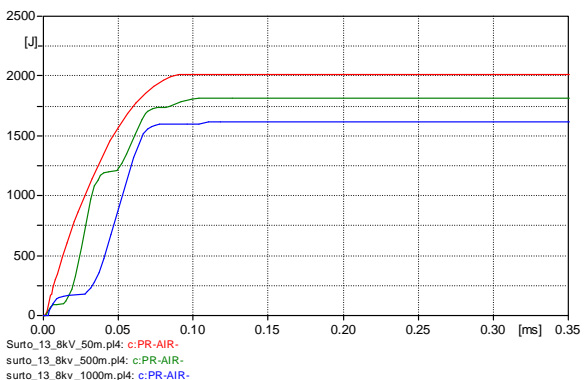


FIGURA 10 – Energia no para-raios da junção CB-RA

O pico mais elevado da sobretensão resultante da descarga atmosférica no setor de 13,8 kV foi de 51 [kV], originando uma descarga no para-raios com energia em torno de 2,0 [kJ].

As figuras 11 e 12 apresentam os resultados da simulação de descarga atmosférica para o caso mais severo verificado na figura 09 (50 m de cabo subterrâneo), no entanto considerando disjuntor do AL fechado, através da sobretensão indicada na chave seccionadora do alimentador e a energia no para-raios instalado na junção cabo isolado-rede aérea do alimentador sob surto.

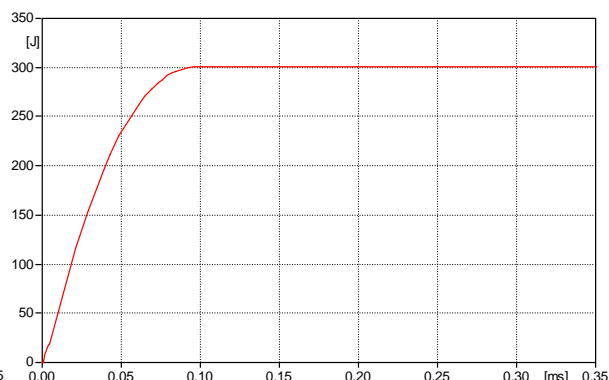
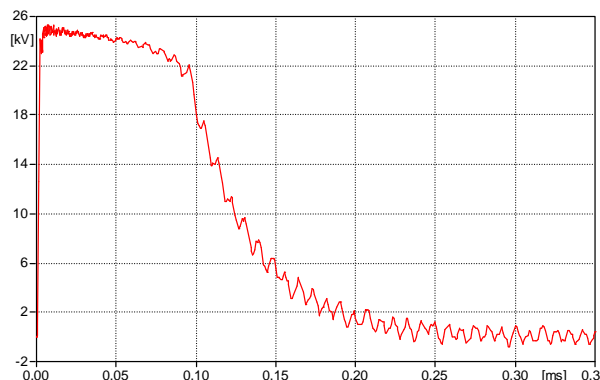


FIGURA 11 – Sobretensão na seccionadora do AL sob surto FIGURA 12 – Energia no para-raios da junção CB-RA

O pico mais elevado da sobretensão atingido pela descarga atmosférica no setor de 13,8 kV foi de 25 [kV], originando uma descarga no para-raios em torno de 0,3 [kJ].

Os gráficos apresentados nas figuras 09 e 11 demonstram que as sobretensões resultantes nos equipamentos pertencentes ao setor 13,8 kV estão abaixo dos níveis de isolamento, NBI, com margem de segurança de até 54%.

### 3.2 Surtos de Manobras – Transitórios Muito Rápidos (VFT)

Para simulação das sobretensões oriundas de manobras nos desconectores pertencentes a GIS considerou-se representação trifásica do sistema equivalente desenvolvido no ATP. A modelagem do sistema equivalente empregada considerou uma fonte conectada ao barramento vizinho da subestação em análise. As tensões pré-evento do sistema equivalente foram ajustadas para o limite máximo permitido em regime permanente (1,05 pu) [5].

Os equipamentos que compõem as conexões com a barra GIS foram representados através de suas capacitâncias características baseadas em diversos projetos já desenvolvidos.

O barramento da GIS foi modelado por uma impedância de surto de 60 Ohms com seu comprimento correspondente. Os demais equipamentos foram representados por capacitâncias [2].

Foram realizadas diversas simulações com manobras de fechamento dos desconectores da GIS considerando diferentes configurações da GIS. As sobretensões mais elevadas são verificadas para configurações com menor quantidade de equipamentos conectados ao barramento GIS.

A figura 13 apresenta a sobretensão no disjuntor do transformador 04 para simulação de fechamento do disjuntor do transformador 03. Neste caso, apenas uma das linhas de transmissão subterrâneas 138 kV está conectada ao barramento. Além disso, apenas o transformador 04 encontra-se energizado, conforme apresentado na figura 14.

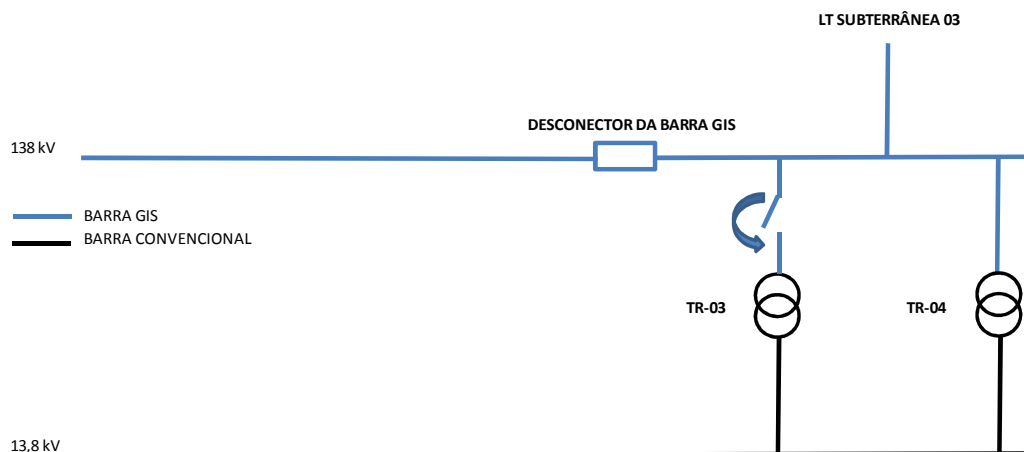


Figura 14 – Diagrama unifilar para manobra de fechamento do disjuntor do TR-03

A figura 15 apresenta a sobretensão no desconector do transformador 03 para simulação de fechamento do desconector no barramento da GIS. Neste caso, apenas uma das linhas de transmissão subterrâneas 138 kV está conectada ao barramento. Além disso, apenas o transformador 03 encontra-se energizado, conforme apresentado na figura 16.

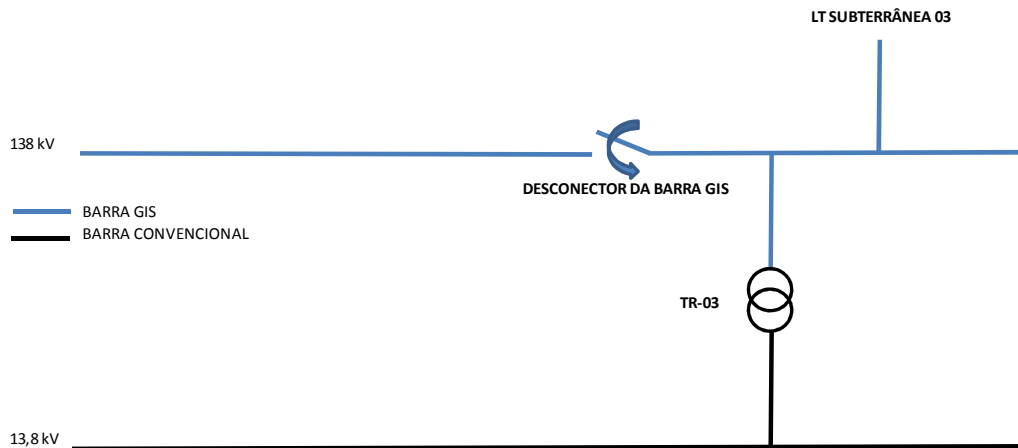


Figura 16 – Diagrama unifilar para manobra de fechamento do desconector da barra GIS

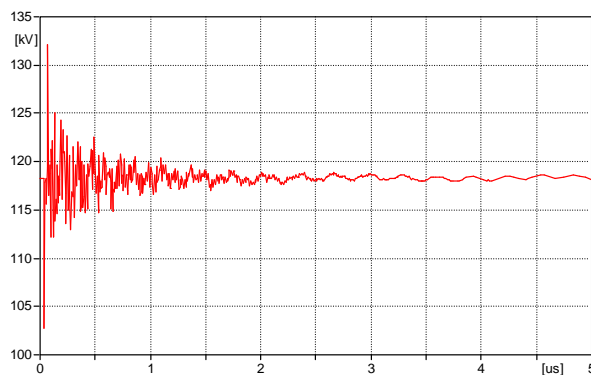


FIGURA 13 – Sobretensão no desconector do TR-04

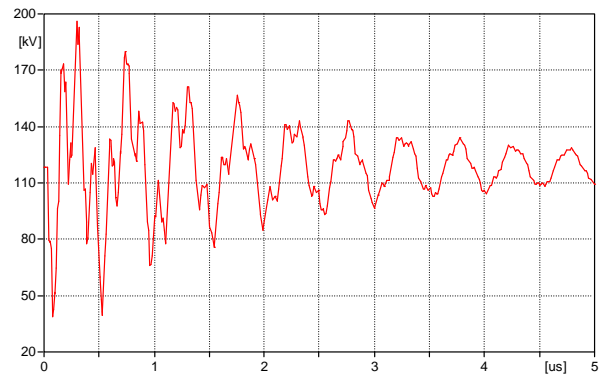


Figura 15 – Sobretensão no desconector do TR-03

O pico mais elevado da sobretensão resultante da manobra de fechamento do desconector do barramento GIS foi de 196 [kV]. No entanto, a frequência mais elevada ocorreu na simulação de fechamento do desconector do transformador 03, com valor em torno de 17 MHz.

Os valores de sobretensão resultantes de manobras dos desconectores da GIS estão muito abaixo dos níveis de suportabilidade dielétrica dos equipamentos GIS e dos transformadores, com uma margem de segurança de 69% em relação ao NBI.

Porém, a frequência elevada dos surtos e a ocorrência de muitos surtos em uma manobra dos desconectores da GIS podem resultar em falhas de transformadores [8].

Assim, é de extrema importância realizar estudos de manobra dos desconectores para subestações GIS e submetê-los a avaliação do fabricante do transformador. O transformador deve ser projetado de forma a não sofrer os efeitos resultantes de manobras dos desconectores.

#### 4.0 - CONCLUSÃO

A utilização da tecnologia de subestações isoladas a SF6 - GIS tem sido largamente utilizada, principalmente, em grandes centros urbanos. No entanto, é importante verificar os efeitos que esta instalação podem causar ao dimensionamento dos demais equipamentos que devem compor a subestação.

Um estudo de coordenação de isolamento para subestação GIS deve ser composto de simulações de surtos atmosféricos e de manobras dos desconectores.

Segundo os resultados das simulações o nível básico de isolamento dos equipamentos que devem compor a

instalação estão adequados, uma vez que as sobretensões resultantes foram muito mais baixas que os níveis de isolamento dos equipamentos. E também, a energia dissipada pelos para-raios estão adequadas às características nominais dos para-raios.

Entretanto, apesar das sobretensões resultantes dos estudos de manobra dos desconectores serem de baixa amplitude e não representar um perigo para os equipamentos GIS, a alta frequência dos surtos podem provocar falhas nos transformadores conectados a GIS.

Portanto, os resultados dos estudos de manobra dos desconectores devem ser apresentados para avaliação do fabricante do transformador.

O transformador deve ser projetado de forma a não sofrer os efeitos resultantes de manobras dos desconectores.

## 5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Hileman, R. A. – Insulation Coordination for Power Systems, 1999.
- (2) IEEE1313.2-1999, Guide for the Application of Insulation Coordination.
- (3) IEEE Std-C37.011-2011.
- (4) Das, J. C. – Transients in Electrical Systems.
- (5) Critérios e procedimentos de Rede - 23.3 - Diretrizes e critérios para estudos elétricos – ONS 2010.
- (6) Subestação Elevadora 550 kV Isolada a Gás SF6 – Simulações de VFT como suporte no Projeto de Transformador. XVI SNPTEE – Outubro de 2001 – Campinas / SP.
- (7) Very Fast Transient Overvoltages (VFTO) in Gas-Insulated UHV Substations – Cigre Working Group D1.03 / December 2012.
- (8) Transitórios Elétricos e Coordenação de Isolamento – aplicação em sistemas de potencia, Furnas – Editora Universitária, Universidade Federal Fluminense
- (9) ATP Rule Book

## 6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Rafael C. Galera de Azevedo, engenheiro eletricitista com ênfase em Sistemas de Energia graduado na Universidade Santa Cecília em 2008. Especialista em Sistemas Elétricos pela UNIFEI (Universidade Federal de Itajubá) graduado em 2011. Atuou na área de Planejamento da Expansão do Sistema Elétrico da CTEEP desenvolvendo estudos de ampliação da rede elétrica. Participou ainda dos estudos de projeto básico para implantação do sistema HVDC (Transmissão em Corrente Contínua em Alta Tensão) do Rio Madeira. Atualmente na ABB Brasil, equipe de Consulting, desenvolve estudos de projeto básico para empreendimentos da transmissão de energia licitados pela ANEEL e de acesso ao sistema elétrico. Além disso, participa da equipe de estudos para projetos HVDC".



José Geraldo B. M. de Andrade nasceu em São Paulo em 1974. Concluiu a Graduação, Mestrado e Doutorado em Engenharia Elétrica, com ênfase em Sistemas de Potência, respectivamente em 1999, 2001 e 2008, todos pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP). Atuou como pesquisador nos seguintes grupos da EPUSP: L-Prot/USP, Enerq/USP e GAGTD/USP. Atualmente coordena o grupo de estudos de sistemas elétricos de potência da ABB Consulting Brasil.



Marta Lacorte. Nascida em 19 de Julho de 1961 no Rio de Janeiro- RJ, Brasil. Engenheira Eletricista pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro em 1983. Mestre em Engenharia Elétrica pela Coordenação de Programas de Pós-graduação em Engenharia da universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE-UFRJ, em 1988. Pesquisadora do CEPEL, de 1984 a 1991, tendo atuado na área de pesquisa em equipamentos de manobra e proteção contra sobrecorrentes. Em 1992, transferiu-se para a ABB Suíça, onde trabalhou até 2001 no Departamento de Subestação Isolada a Gas SF6 (GIS) como suporte técnico. Em 2002 retornou ao Brasil como representante da fábrica de disjuntores de gerador da ABB Suíça para América Latina. Desde 2011 é responsável técnica pelos equipamentos de Alta Tensão da ABB Brasil.