



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

CB/GDS/11

22 a 25 de outubro de 2017  
Curitiba - PR

**GRUPO - X**

**GRUPO DE ESTUDO DE DESEMPENHO DE SISTEMAS ELÉTRICOS- GDS**

**SOLUÇÕES DE COORDENAÇÃO DE ISOLAMENTO EM SUBESTAÇÕES COMPACTAS INTEGRADAS - SECI.**

**Sandro de Castro Assis(\*)  
CEMIG DISTRIBUIÇÃO**

**Paulo Roberto Freitas Carvalho Costa  
CEMIG DISTRIBUIÇÃO**

**André Nunes Teixeira  
CEMIG DISTRIBUIÇÃO**

**Roberto Márcio Coutinho  
CONSULTOR**

**Marcos Antônio de Brito Júnior  
LOGIX's/CEMIG D**

**RESUMO**

A aplicação da Subestação Compacta Integrada (SECI) de alta confiabilidade, utilizando equipamentos isolados a gás SF<sub>6</sub> e equipamentos padronizados pela concessionária, é uma estratégia da CEMIG DISTRIBUIÇÃO para expansão do seu sistema, utilizando mais subestações e menores comprimentos de alimentadores. Em função da concepção eletromecânica e das características dos locais de atendimento/installação (como limitação de linhas conectadas na SE) problemas relacionados à coordenação de isolamento do transformador foram detectados na etapa de projeto.

Este trabalho apresenta estudo de coordenação de isolamento realizado para as SECIs, detalhes da modelagem e alternativas para controle das sobretensões sobre o transformador de potência.

**PALAVRAS-CHAVE**

Subestação Compacta Integrada, ATP/EMTP, Coordenação de isolamento, Para-raios, Módulo Híbrido

**1.0 - INTRODUÇÃO**

O objetivo das concessionárias distribuidoras e transmissoras de energia elétrica é de atender seus clientes com qualidade adequada, maximizando a eficiência na transmissão, reduzindo as perdas técnicas de forma a se obter um retorno sobre os ativos disponíveis para prestação do serviço público sobre sua responsabilidade. Na busca do aumento da qualidade do fornecimento de energia o sistema elétrico vem passando por uma transformação estrutural, que reforça todo o sistema propiciando flexibilidade operativa para alimentação das cargas distribuídas. A expansão do sistema elétrico deve ainda respeitar as regras regulatórias definidas pelos órgãos reguladores, se caracterizando como um investimento prudente com baixo risco de glosa para a empresa concessionária. Recentemente a CEMIG DISTRIBUIÇÃO divulgou e começou a implantar um conjunto de novos padrões de subestações [1][2], buscando aumentar o número de subestações abaixadoras no sistema e diminuir o número / comprimento de redes de distribuição [3]. Um importante objetivo é obter a melhoria na qualidade de fornecimento de energia elétrica para os consumidores atendidos pelas novas soluções. Nestes novos padrões é feito uso sistemático de equipamentos isolados a gás SF<sub>6</sub> (hexafluoreto de enxofre), e substituição da casa de controle tradicional por Módulos Integrados de Manobra e Controle (também chamado de salas elétricas) de média tensão construídos e testados em fábrica.

A Subestação Compacta Integrada – SECI é uma das soluções desenvolvidas, tendo na sua concepção as premissas a seguir:

- demandar área reduzida;
- alimentar cargas de até 15 MVA;

(\*) Avenida Barbacena, n° 1200 – 8º Andar - Ala B2 – CEP 30.190-131 Belo Horizonte, MG – Brasil  
Tel: (+55 31) 3506-2967 – Fax: (+55 31) 3506-2948 – Email: sandro.assis@cemig.com.br

- ser fornecida de fábrica montada em um skid ( chassi metálico);
- ter custos de operação e manutenção reduzidos;
- não ter ampliações futuras.

A Subestação Compacta Integrada é composta na alta tensão por um transformador de 15 MVA, módulo de manobra híbrido, isolado a gás SF6. No lado de baixa tensão há um transformador de serviço auxiliar, pósito de 13,8 kV e chaves interruptoras de saídas dos alimentadores, além dos cubículos de controle. Toda essa estrutura fica montada em um *skid* de, no máximo, 19 m x 3,5 m. Demais equipamentos, tais como banco de capacitores, transformadores de potencial e para-raios são construídos de maneira tradicional, sendo agregados ao arranjo geral da Subestação.

Dessa forma, a Subestação Compacta Integrada – SECI é encarada como equipamento que irá compor a subestação. A Figura 1 apresenta um corte da SECI. Na Figura 2 é apresentado o diagrama unifilar básico da instalação, contendo o arranjo elétrico das barras e equipamentos principais.

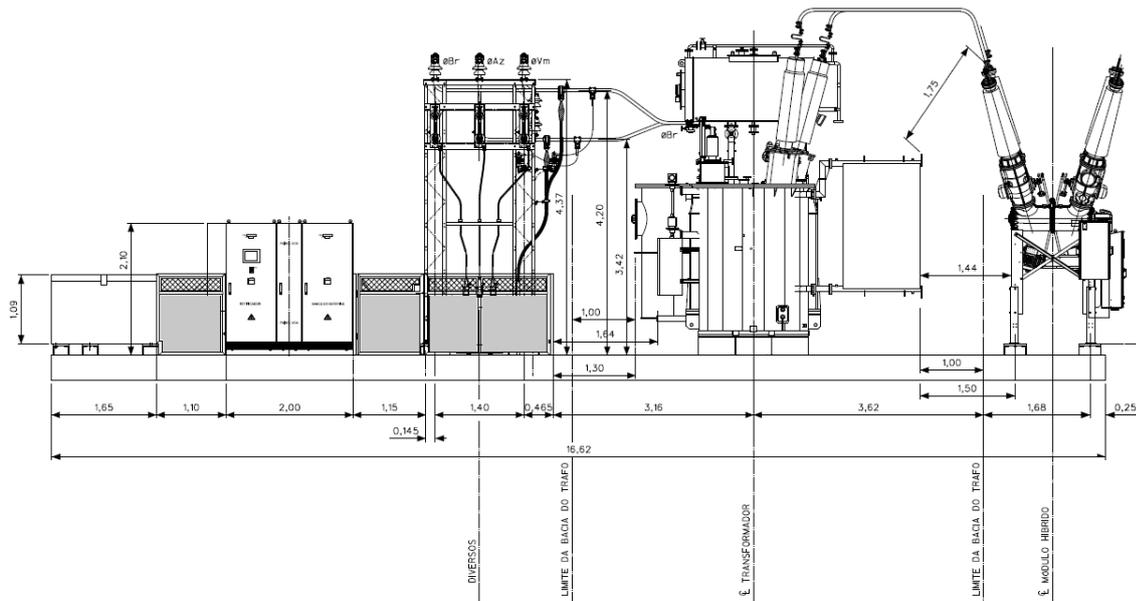


FIGURA 1 – Corte da SECI – Equipamentos montados sobre um chassi.

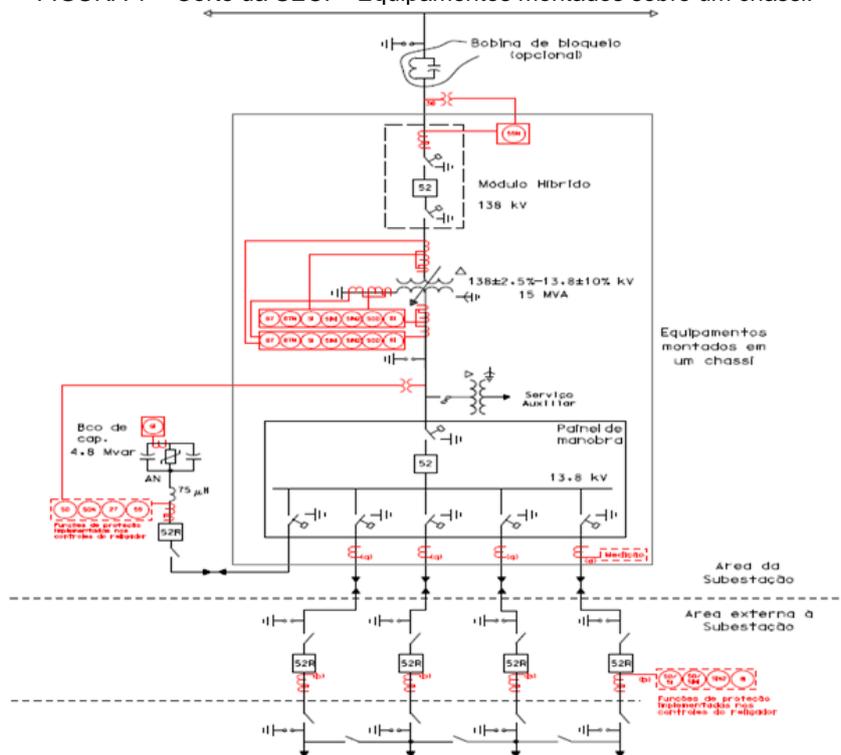


FIGURA 2 – Diagrama unifilar para SE no padrão SECI.

A utilização da SECI se caracteriza como uma solução de expansão de acordo com as regras regulatórias, tendo como meta um maior controle na construção, proporcionando redução do prazo de construção, além de redução de custos de mão de obra em projeto, gerenciamento, montagem e fiscalização, utilizando a estratégia de implantação de várias subestações no mesmo padrão. Porém, em função da concepção eletromecânica e das características dos locais de atendimento / instalação (como limitação de linhas conectadas na SE), a posição física dos equipamentos apresentou um desafio técnico relacionado à coordenação de isolamento do transformador de potência.

A instalação de um conjunto de para-raios entre o módulo integrado e o transformador aumentaria as dimensões do chassi, o que contrariava uma das premissas de projeto em função da compactação desejada. O arranjo definido para o equipamento SECI não permite a instalação de para-raios entre o módulo de manobra e o transformador. Apesar de alguns transformadores permitirem a instalação de para-raios acoplados a sua carcaça, essa prática não é adotada na CEMIG devido ao risco de, em havendo explosão do para-raios, danificar as buchas no transformador. Em subestações móveis os para-raios são articulados de forma que, no transporte ficam recolhidos e em operação são projetados para fora do chassi para manutenção de distâncias de segurança entre equipamentos para operação. Objetivo da SECI é não ter intervenção em campo, sendo encarado como equipamento que necessita apenas ser ligado à rede de alta tensão para funcionamento (*plug and play*).

Na topologia desenhada para a SECI, o para-raios de proteção do transformador de potência fica instalado na entrada da linha que alimenta a SECI, não sendo possível um arranjo eletromecânico que permita sua conexão entre o módulo híbrido e o transformador. Originalmente, o arranjo pensado contemplava, a partir da entrada de linha, os para-raios, TP e a SECI (módulo de manobra isolado a SF<sub>6</sub>, transformador de potência e equipamentos de 13,8 kV). Apesar da reduzida distância elétrica entre o para-raios e o transformador (menor do que 25 m elétricos), em função da limitação de linhas e das diferentes impedâncias de surto (proporcionadas pela mescla de trechos aéreos e isolados a SF<sub>6</sub>) a margem de proteção nos transformadores foi reduzida.

Adequações de ordem eletromecânica e soluções não convencionais de proteção de surtos foram estudadas. Nos casos avaliados foram respeitadas a premissa de permitir manutenção na instalação, bem como o alinhamento de solução técnica à lógica regulatória, de forma a não inviabilizar a aplicação do padrão desenvolvido. A seguir será apresentada a modelagem utilizada na análise, bem como discutidas as soluções obtidas de forma a aumentar a margem de proteção nos transformadores para sobretensões atmosféricas.

## 2.0 - MODELAGEM DO SISTEMA

A seguir são apresentados os modelos utilizados para os componentes do sistema, considerando os surtos de tensão de frente rápida incidentes nas linhas de transmissão de 138 kV, que alimentam as SEs que possuem SECI em seus arranjos. São apresentadas as configurações analisadas, bem como melhorias para redução dos sobretensões no transformador.

### 2.1 Impedâncias de surto dos barramentos

Os barramentos blindados, rígidos e flexíveis são representados por meio de suas impedâncias de surto, e comprimentos, de modo a permitir a análise do problema através de ondas trafegantes. As impedâncias de surto dos trechos aéreos foram calculadas considerando a equação (1):

$$Z_{surto} = 60 \ln \left( \frac{2h}{r} \right) \quad (1)$$

Onde:

$Z_{surto}$  é a impedância de surto em ( $\Omega$ )

$h$  é a altura do barramento em (m)

$r$  é o raio do barramento (m)

A Tabela 1 apresenta os valores das impedâncias de surto e os comprimentos elétricos obtidos para cada trecho, considerando o arranjo proposto.

### 2.2 Capacitâncias dos equipamentos

Os equipamentos que compõem a subestação foram modelados utilizando suas capacitâncias para terra. A Tabela 2 apresenta os valores das capacitâncias para cada equipamento.

### 2.3 Para-raios de óxido de zinco (ZnO)

Os para-raios foram modelados através de suas curvas v-i, conforme apresentado na Figura 3. A conexão do para-raios até o sistema de aterramento foi modelada através de uma indutância de 1  $\mu$ H/m.

Tabela 1 – Impedância de surto obtida para cada trecho da SE.

Trecho	Condutor	Diâmetro do barramento (m)	h (m)	$Z_{surto}$ ( $\Omega$ )
Entrada da LT	336 MCM	0,01831	10,91	467
LT	336 MCM	0,01831	10,91	467
Entrada Módulo Híbrido Bucha de AT	336 MCM	0,01831	4,37	412
Módulo Híbrido				60*
Saída Módulo Híbrido Transformador de AT	Tubo de alumínio - 1,5"		5,53	382

\*Para fins de simulação, o módulo híbrido foi considerado com valor típico de impedância de surto, igual a 60  $\Omega$  (valor entre buchas de entrada e saída do módulo híbrido).

Tabela 2 – Capacitância dos equipamentos na SE

Equipamento	Condição	Capacitância
Transformador de Potencial (1)	-	300 pF
Secionador com LT (2)	Aberto	30 a 200 pF
Secionador com LT (2)	Fechado	80 a 250 pF
Disjuntor e bucha (2)	Aberto	25 a 150 pF
Disjuntor e bucha (2)	Fechado	50 a 300 pF
Transformador (1)	-	1000 a 4000 pF

(1) valores típicos

(2) informações fornecidas pelo fabricante

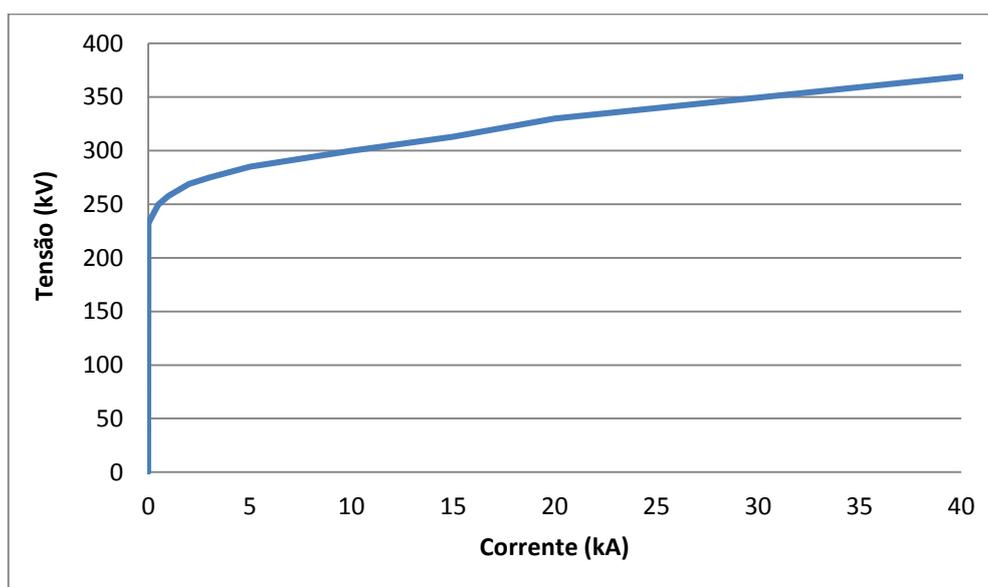


FIGURA 3 – Característica V (kV) x I (kA) do para-raios.

Tensão Nominal: 120 kV

Corrente Nominal de descargas atmosféricas: 10 kA

Máxima Tensão Contínua de Operação (MCOV): 96 kV

Máxima Tensão Residual para impulso com frente de onda de 1 $\mu$ S e valor de crista 10 kA : 300 kV

#### 2.4 Tensão suportável a impulso atmosférico – NBI

Todos os equipamentos de alta tensão possuem NBI igual à 550 kV, exceção é o módulo híbrido, que por padrão de fabricação possui uma tensão suportável de impulso atmosférico de 650 kV.

#### 2.5 Forma de onda da sobretensão

A forma de onda da sobretensão foi modelada através de uma onda triangular, com valor de pico de tensão injetada na SE igual à máxima tensão suportável pela cadeia de isoladores da linha de transmissão. Tempo de frente igual à 1  $\mu$ s e tempo de cauda de 50  $\mu$ s.

### 3.0 - SIMULAÇÕES DO SISTEMA

As simulações e análises envolveram o cálculo das tensões transitórias geradas no sistema quando da incidência de descargas atmosféricas na linha de transmissão de 138 kV que alimenta a SE. Essas tensões foram comparadas com os níveis suportáveis pelos isolamentos dos diversos equipamentos do sistema de 138 kV. A análise foi conduzida através de simulações no ATP – *Alternative Transients Program*, software de simulação de transitórios eletromagnéticos.

As premissas para essa avaliação foram:

- Considerou-se apenas a incidência de descargas na linha de 138 kV, pois a SE possui um sistema de proteção contra descargas diretas;
- A descarga atmosférica atinge apenas uma das fases;
- O tempo de frente dos surtos incidentes na SE é maior ou igual a  $1\mu\text{s}$ ;
- A tensão suportável de impulso atmosférico (NBI) para os equipamentos de 138 kV é de 550 kV, exceto o módulo de manobra isolado à SF<sub>6</sub>, que possui 650 kV.
- O surto incidente na SE, a partir da linha está limitado à máxima suportabilidade a impulso atmosférico das cadeias de isolamento das linhas (Ref.[4]):

$$U_{\max LT} = U_{50\%} * (1 + 3\sigma)$$

onde:

$U_{\max LT}$  é a máxima tensão suportável pela cadeia de isoladores;

$U_{50\%}$  é a tensão de descarga disruptiva a 50%;

$\sigma$  é o desvio convencional, igual ao desvio padrão se assumida uma distribuição gaussiana, sendo que aqui se adotou um valor de 3%;

Para linhas de 138 kV é considerado que a  $U_{\max LT} = 1028$  kV.

### 3.1 Casos analisados

Serão analisadas 3 configurações de arranjo da subestação.

- Caso base, apresentado na Figura 4. Nessa Figura tem-se o corte da SE considerando a SECI no arranjo inicialmente pensado.
- Alternativa 1- Alteração no arranjo da SE, com a instalação do conjunto de para-raios após o TP e dentro do pórtico de 138 kV, conforme apresentado na Figura 5;
- Alternativa 2 – Igual ao caso base, com instalação adicional de para-raios na primeira torre da linha de transmissão na saída da SE, conforme apresentado na Figura 6.

A Tabela 3 sintetiza as sobretensões e margens de proteções obtidas para os equipamentos considerando os casos descritos.

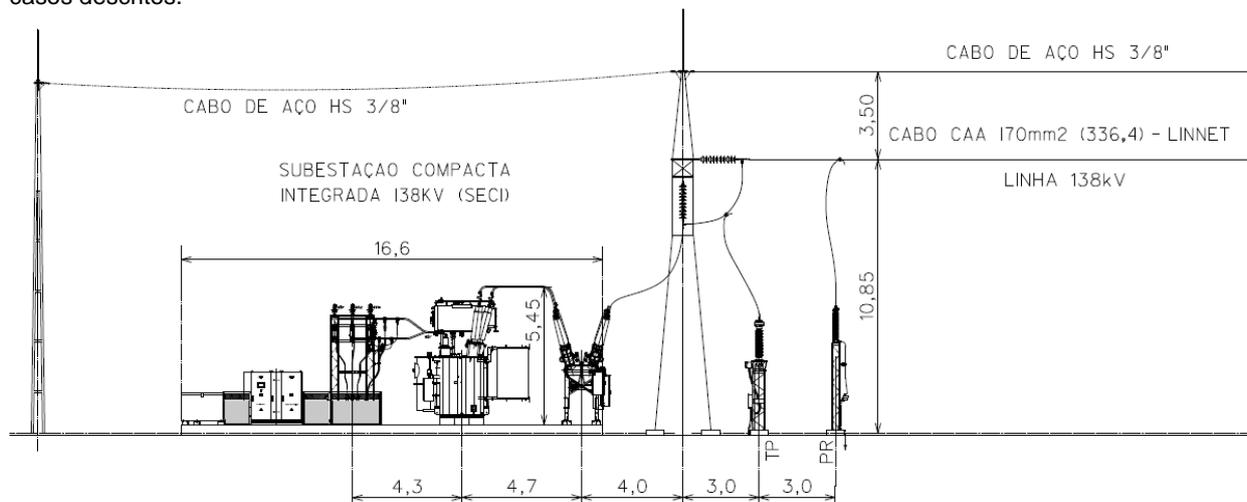


FIGURA 4 – Corte da SE com SECI – Proposta inicial - Caso base.

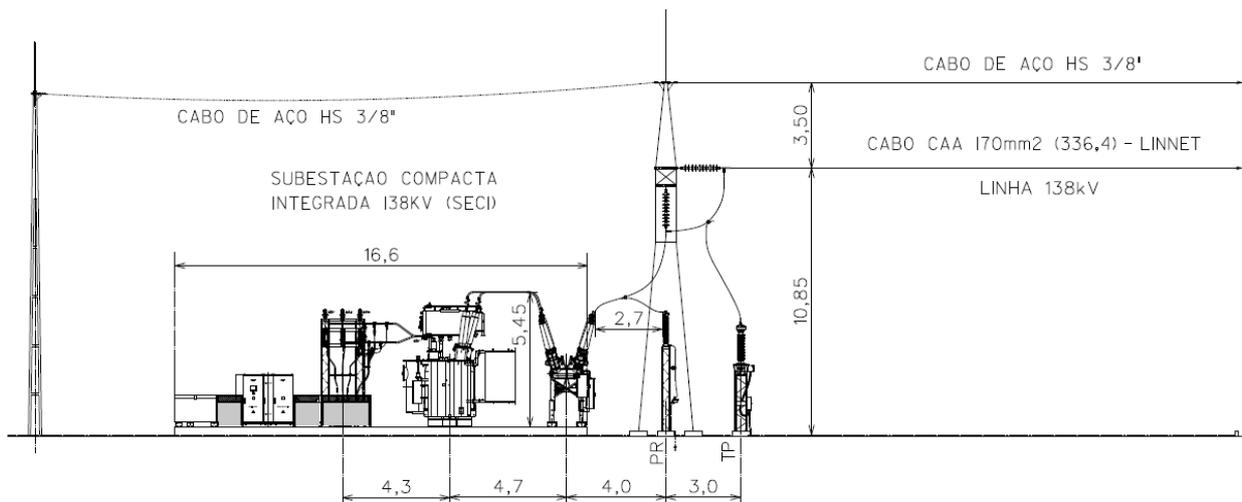


FIGURA 5 – Corte da SE com SECI – Proposta alternativa 1, com instalação de para-raios após o TP.

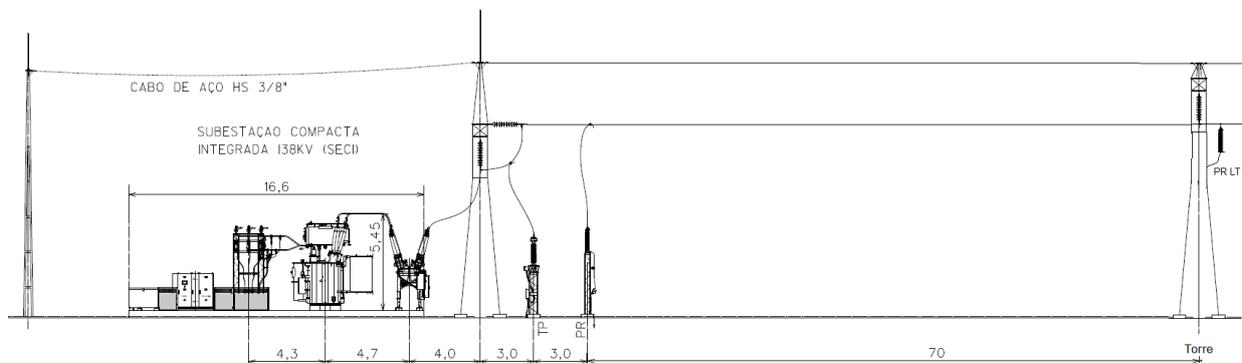


FIGURA 6 – Corte da SE com SECI – Proposta alternativa 2, com instalação de para-raios na primeira torre da linha de transmissão.

Tabela 3 – Sobretensões e margem de proteção sobre os equipamentos da SE para os arranjos base e alternativos.

Caso analisado	Transformador de Potencial		Bucha de entrada Módulo Híbrido		Bucha de saída Módulo Híbrido		Transformador	
	Tensão (kV)	MP (%)	Tensão (kV)	MP (%)	Tensão (kV)	MP (%)	Tensão (kV)	MP (%)
Base	392	40,3	458	41,9	465	39,8	495	11,1
Alternativa 1	366	50,3	373	74,3	383	69,7	420	31,0
Alternativa 2	346	59,0	376	72,9	380	71,1	400	37,5

### 3.2 Análise dos resultados

A tensão sobre o transformador para o caso base é de 495 kV. A margem de proteção, considerando o NBI de 550 kV fica em 11,1%, valor relativamente baixo. A referência [3] indica que a margem de proteção para surtos atmosféricos deve ser de, no mínimo, 15%, quando de um dimensionamento realizado através de simulação digital rigorosa e com fonte de surto de reduzida probabilidade de ocorrência. As alternativas de arranjo 1 e 2 permitem um aumento da margem de proteção no transformador.

A análise de todas as sobretensões resultantes para a subestação completa indica que uma onda incidente de 1028 kV com tempo de frente de  $1 \mu\text{s}$  é um evento muito severo, visto que 95% das primeiras descargas de retorno possuem tempo de frente acima de  $1,8 \mu\text{s}$  [3]. Adicionalmente, considera-se uma descarga de retorno incidente na primeira torre próximo à SE. Para um tempo de frente de  $2 \mu\text{s}$  no arranjo do caso base, a margem de proteção para o transformador é de 34%.

A proteção sobre o transformador pode ser aumentada com a instalação de para-raios na linha. Esse aumento pode ser determinante na obtenção de margem de proteção adequada para a instalação construída. A instalação do para-raios na linha é feita de forma a manter o arranjo da SE compacto, sem a necessidade de aumentar a área da subestação. Neste caso o para-raios da linha tem a função principal de prover proteção para a SE e não para melhorar o desempenho da linha frente a descargas atmosféricas.

#### 4.0 - CONCLUSÃO

A mudança no arranjo inicial, com a troca de posição física entre o para-raios e o TP, resultando em uma aproximação elétrica entre o trafo e o para-raios, permitiu a obtenção de uma margem de proteção de 31% para o caso com frente de onda de  $1\mu\text{s}$ , frente a 11,1%.

O conjunto de para-raios instalado na entrada de linha possui função de proteção do transformador e em nenhuma hipótese pode-se prescindir de sua existência, não cabendo para esse tipo de instalação a utilização de centelhadores em substituição aos para-raios de ZnO.

A instalação de para-raios na linha produz uma redução dos valores das tensões máximas no transformador, visto que a tensão residual sobre o para-raios da subestação será menor. Essa redução ocorre devido à reduzida sobretensão existente na subestação (nessa situação) justificada pela presença de um conjunto de supressores de surto na linha. Nesse caso, a solução de para-raios na linha tem a função principal de aumentar a margem de proteção sobre o transformador e não de atuar na melhora do desempenho da linha frente a descargas atmosféricas.

A utilização de um transformador com NBI de 650 kV apresenta um custo maior que as demais soluções propostas e, adicionalmente, não é um equipamento padrão da empresa. Em caso de sinistro do transformador de 650 kV a substituição iria contemplar um trafo reserva de 550 kV.

#### 1.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Assis, S.C., Costa, P.F.F., Carvalho, E.N., Oliveira, A.M., Raposo, E.N., Aguiar, G.S., Oliviera, L.R., Novos padrões de subestações compactas da CEMIG D para expansão do sistema elétrico no estado de Minas Gerais, XXIII SNPTEE, Foz do Iguaçu, 2015;
- (2) ND-2.14, Norma de Distribuição, Instalações Básicas de Subestações de Distribuição de 34,5 kV a 138 kV, CEMIG-D.
- (3) Menezes, T.V., Fonseca, B.Q.A, Silva, B.E., Catão, B.H.A., Projeto mais subestações menos redes uma estratégia inovadora para a expansão do sistema elétrico da CEMIG-D, XXII SNPTEE – Brasília, 2013
- (4) D'Azuz, Ary e Outros (1987) "Transitórios Elétricos e Coordenação de Isolamento - Aplicação em Sistemas de Potência de Alta Tensão"- Editora Universitária da UFF.
- (5) CIGRE TB 549, Lightning Parameters for Engineering Applications, WG C4.407, 2013.

#### 2.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



**Sandro de Castro Assis.** Nascido em Coronel Fabriciano, estado de Minas Gerais em 1980. Possui graduação (2004), mestrado (2006) e doutorado em engenharia elétrica (2017) pela Universidade Federal de Minas Gerais (2006). Atualmente é engenheiro sênior de projetos de sistemas elétricos de linhas de transmissão e subestações da CEMIG DISTRIBUIÇÃO S.A. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Transmissão de Energia Elétrica, Estudos Elétricos em SEP, inclusive em área industrial. É membro dos comitês de estudo CE-C4 - Desempenho de Sistemas Elétricos, CE-B3 – Subestações, CE-B2 – Linhas de Transmissão do Cigré Brasil. Produção acadêmica disponível em <http://lattes.cnpq.br/5361372425238294>



**Paulo Roberto F. C. Costa.** Nascido em Belo Horizonte, estado de Minas Gerais, Brasil, em 21 de dezembro de 1966. Curso de graduação em Engenharia Elétrica com ênfase em Sistemas Elétricos de Potência pela Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Pós-graduação em Sistemas Elétricos de Potência pela Universidade Federal de Minas Gerais. Ocupa o cargo de Engenheiro Sênior da CEMIG DISTRIBUIÇÃO S.A., Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil, desde 1991, com experiência em Estudos elétricos e projetos de Linhas de transmissão e Subestações de Distribuição e Transmissão, especializado em estudos de concepção de subestações compactas.



**André Matias Nunes Teixeira.** Nascido em 1985 em Belo Horizonte, MG. É graduado e mestre em engenharia elétrica pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, Brasil, em 2008 e 2010, respectivamente. É engenheiro de projetos de sistemas elétricos de linhas e subestações da CEMIG DISTRIBUIÇÃO S.A.



**Roberto Márcio Coutinho.** Nascido em 1952 em Belo Horizonte, MG. Engenheiro eletricitista pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) em 1978. Pós-graduado em sistemas elétricos de potência em 1985 pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). É consultor em projetos de sistemas elétricos de linhas e subestações.



**Marcos Antônio de Brito Júnior.** Nascido em 1989 em São Vicente, SP. É formado em Eletrotécnica pela Escola Politécnica de Minas Gerais (POLIMIG), Belo Horizonte, Brasil, em 2011, cursando 7º período de Engenharia Elétrica na Faculdade Pitágoras, Belo Horizonte, Brasil. É técnico de projetos eletromecânico de subestações a serviço da CEMIG DISTRIBUIÇÃO S.A. desde 2011.