

## **Grupo de Estudo de Subestações e Equipamentos de Alta Tensão-GSE**

### **Subestações Compactas em áreas urbanas: Soluções para as Interferências Eletromagnéticas**

**SANDRO DE CASTRO ASSIS(1); ANDRÉ MATIAS NUNES TEIXEIRA(2); EDINO BARBOSA GIUDICE FILHO(3);  
HENRIQUE CURATOLA NEVES(4); FARLEY ALVES PEREIRA(5); BRAULIO ROBERTO DE MELO  
COUTINHO(6);  
Cemig D(1);Cemig D(2);Cemig D(3);Cemig D(4);Cemig D(5);BRMC(6);**

#### **RESUMO**

Nos últimos anos a CEMIG DISTRIBUIÇÃO estabeleceu um padrão para expansão do sistema elétrico em sua área de concessão, tendo como premissa a adoção de equipamentos de alta confiabilidade, isolados a gás SF<sub>6</sub> e arranjos simplificados. Nesta proposta, as áreas dos pátios das subestações sofreram uma significativa redução de tamanho, e, como consequência, reduziu-se a área adquirida. A redução das áreas tem permitido a expansão dos sistemas com subestações desabrigadas em áreas urbanizadas próximas aos centros de cargas. Porém, a proximidade com a população, a reduzida área disponível e as leis ambientais criaram situações desafiadoras analisadas neste trabalho.

#### **PALAVRAS-CHAVE**

Interferências eletromagnéticas, Subestações Compactas, Áreas Urbanas, Aterramento, SF<sub>6</sub>

#### **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 e reduzindo as perdas técnicas de forma a obter um retorno sobre os ativos disponíveis para prestação do serviço público sobre sua responsabilidade. Para atender as exigências regulatórias definidas pela Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, associadas à prudência nos investimentos, remuneração de ativos, qualidade de atendimento a cargas, consumidores e acessantes [1][2] a CEMIG Distribuição estabeleceu seus padrões técnicos de expansão do sistema.

No caso de subestações de distribuição, foram definidos quatro novos padrões de configurações, com as seguintes características de tensões de operação e potências nominais [3]:

- Subestação GIS:
  - 138/13,8 kV - 2x40 MVA;
- Subestação Híbrida:
  - 138/13,8 kV – 1x25 MVA;
  - 138/23 kV – 1x25 MVA;
  - 138/34,5 kV – 1x25 MVA;
  - 138/13,8 kV – 2x25 MVA.
- Subestação Compacta Integrada - SECI:
  - 138/69-13,8 kV – 15 MVA;
  - 138-13,8 kV – 15 MVA
  - 138-34,5 kV – 25 MVA;
  - 34,5-13,8 kV – 10 MVA.

- Subestação de integração:
  - 138 kV - tem a função de conectar novos consumidores e acessantes, apenas com equipamentos híbridos de manobra.

Os novos padrões de subestação fazem uso intensivo de equipamentos isolados a SF<sub>6</sub>, com arranjos mais simples e confiáveis, eliminando etapas de ampliações futuras (a subestação é concebida para o horizonte de planejamento). A estratégia permite uma redução de custos de manutenção e operação - OPEX e um ganho no CAPEX com aquisições em escala e redução de área de implantação.

Neste informe técnico são analisados os campos eletromagnéticos gerados pelas instalações, soluções de aterramento, impacto visual e ruído audível para os novos padrões, que possuem equipamentos isolados a SF<sub>6</sub>, transformador de potência e são instalados de forma desabrigada:

- SE Híbrida (chamada de MTS - *Mixed-Technology Substation*)
- SECI (Subestação Compacta Integrada - que é uma subestação desabrigada ultra compacta que apresenta a maioria dos seus equipamentos em um chassi).

## 2.0 - DESENVOLVIMENTO

A redução da área disponível para elaboração do projeto eletromecânico e elétrico das subestações trouxe vários desafios. Um dos mais desafiantes foi controlar as tensões de passo e toque nestas instalações, devido às elevadas resistividades naturais do solo no estado de Minas Gerais. Preocupou-se ainda com os limites de campos eletromagnéticos gerados pela instalação, ruído audível e os aspectos usuais de integração destas instalações. Nos subitens a seguir são apresentadas parte da evolução dos projetos.

### 2.1 Redução dos Pátios

A adoção da tecnologia SF<sub>6</sub> nos equipamentos de manobra permitiu a compactação dos arranjos eletromecânicos. Com essa adoção, aliada a definição de não ampliação das subestações, o pátio pode sofrer significativa redução de tamanho.

A SECI se caracteriza por possuir vários equipamentos e sistemas integrados montados em uma única plataforma metálica (chassi). Dentre esses equipamentos temos os equipamentos de manobra, transformador de potência convencional com isolamento em óleo mineral, trafo de serviço auxiliar, saídas de média tensão, equipamentos de proteção, controle e rádio para telecomunicação. Detalhes podem ser obtidos em [4].

A Figura 1 apresenta uma comparação de área dos pátios de uma SE Convencional isolada a ar com arranjo padronizado pela CEMIG e uma SE com utilização do padrão SECI, ambas de mesma potência, implantada no ciclo de 2013-2017. A área da plataforma sofreu uma redução de 64,5%. A Figura 2 mostra uma foto de uma SE padrão SECI implantada no ciclo 2013-2017.

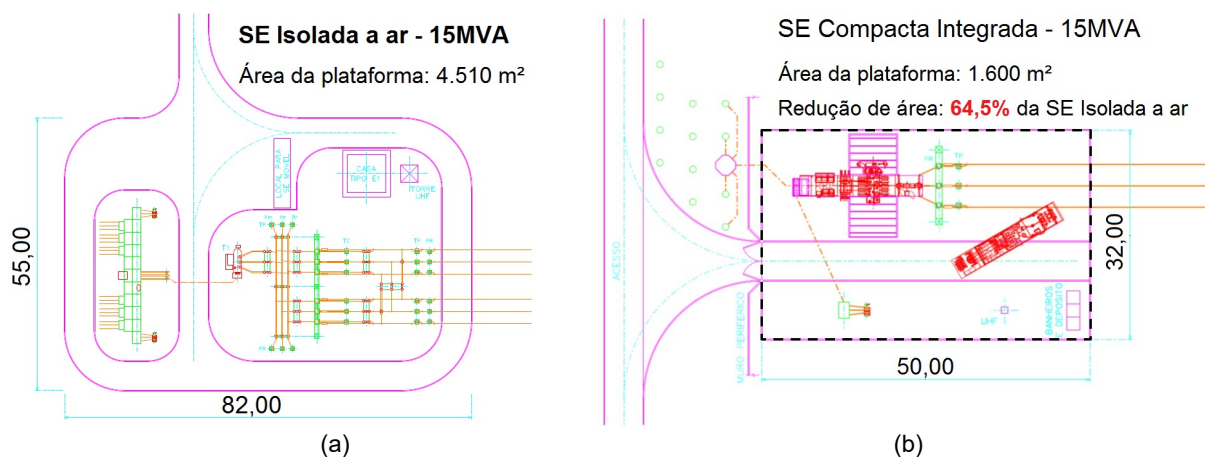


Figura 1 – Comparação de área das plataformas de uma SE convencional isolada a ar (a) e uma SECI (b) de mesma potência (15 MVA).



Figura 2 – Subestação padrão SECI implantada no ciclo 2013-2017

Para a comparação de áreas nas subestações híbridas considerou-se uma análise entre uma SE convencional isolada a ar com 2 saídas de linha e 2 transformadores. Essa configuração foi escolhida para comparação por apresentar a menor redução na área do pátio. A Figura 3 ilustra essa redução, que foi de 38%.

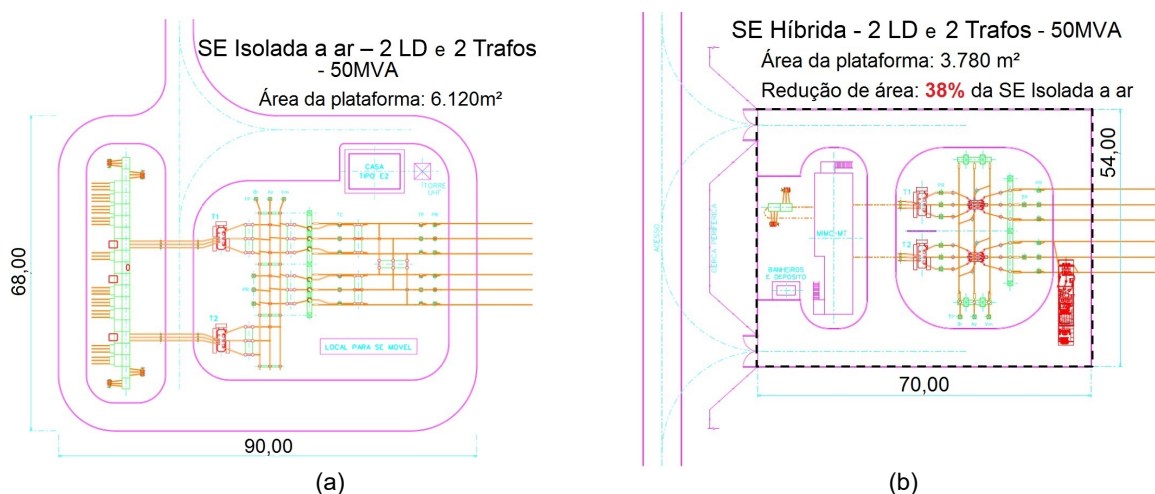


Figura 3 – Comparação de área das plataformas de uma SE convencional isolada a ar (a) e uma híbrida (b).

Os ganhos em construção civil, transporte, montagem e colocação em operação são significativos graças à compactação, alta modularidade e pré-comissionamento realizado na fábrica. Essa lógica foi utilizada não somente para o módulo híbrido, mas também na substituição da casa de controle tradicional por uma sala elétrica, denominada de MIMC-MT [5] (Módulo Integrado de Manobra e Controle de Média Tensão), composto por painéis de controle, painéis de MT, sala de bateria, serviço auxiliar, equipamentos de proteção e telecomunicação dentro de uma estrutura metálica modular.

Até o momento a CEMIG não energizou nenhuma instalação híbrida com 2 transformadores. A Figura 4 apresenta uma foto de uma SE híbrida energizada no ciclo 2013-2017 com 2 LDs e 1 trafo.



Figura 4 – SE Híbrida com 2 linhas e 1 Trafo

Foi prevista a instalação de subestações móveis, em caso de algum sinistro, em todos os arranjos compactos desabrigados desenvolvidos nesses novos padrões. Nas comparações de redução de espaço discutidas nesse item, foram utilizados os arranjos mais compactos do padrão de subestação convencional que vigorava na CEMIG (isolada a ar - A/S) para a mesma potência da instalação adotada no novo padrão.

## 2.2 Impacto Visual

A redução de área resultante da utilização dos novos padrões permitiram a construção de instalações mais próximas a centros urbanos. Logo, existe uma grande preocupação com o impacto visual, principalmente, para as cidades históricas, que apresentam exigências muito fortes.

Nas primeiras instalações aplicando estes novos padrões, adotava-se primariamente cercas para delimitação das subestações. A aplicação de muros em algumas instalações foi por questões de segurança de pessoal (será detalhado no item 2.3), prevenção de vandalismo, redução da percepção de ruído externo à instalação, contribuindo para a proteção dos equipamentos contra poeira no caso de proximidade com via de terra.

A experiência mostrou que a percepção de receptibilidade pela população quando a subestação possui muros é maior. Para redução ainda maior dos impactos visuais, pode-se pintar as ferragens e taludes concretados em verde para permitir uma camuflagem da subestação (Figura 5). Hoje, todas as novas instalações nos novos padrões são construídas com muros.



Figura 5 – Muro no entorno de uma SE SECI (a) e talude externo pintando na cor verde (b).

## 2.3 Soluções de Malha

Conforme comentado, a adoção da tecnologia SF<sub>6</sub> nos equipamentos de manobra permitiu a compactação dos arranjos eletromecânicos. Porém a área da SE deve acomodar não somente o arranjo físico, mas também os outros sistemas não visíveis. Dentre esses encontra-se o sistema de aterramento.

A redução do terreno implicou em pontos de atenção para a equipe projetista. A resistência de aterramento é proporcional ao valor da resistividade do solo e à área ocupada. Maiores valores de resistência de aterramento conduzem a valores mais elevados no pontencial da malha, quando da circulação de uma corrente de curto-circuito, podendo gerar maiores tensões de toque e passo nas instalações. Para efeito de comparação, considerando um solo com resistividade uniforme, a resistência de aterramento de uma malha em subestações do tipo SECI, apresenta uma resistência de aterramento 44% maior do que uma SE convencional. De forma geral, o estado de Minas Gerais possui resistividades do solo elevadas, sendo frequentemente medidos valores superiores a 3000 ohms.m.

De forma a permitir um controle nas tensões de passo e toque dentro das instalações, decidiu-se por prever a instalação de uma manta asfáltica no pátio das subestações do tipo SECI. Conforme indicado em [6][7], a resistividade do asfalto molhado é de, pelo menos, 10.000 ohms.m, valor 3 vezes superior ao da brita molhada. Essa adoção gera maiores valores admissíveis de tensões de passo e toque para as pessoas, devido ao incremento na resistência de contato do pé da pessoa com o solo. Adicionalmente, a manta asfáltica evita o crescimento de vegetação nas áreas internas das subestações, o que reduz o risco de trip acidental, além de reduzir os gastos com capina, seja ela química ou manual, bem como a presença de pessoas alheias ao sistema elétrico de potência realizando essa atividade.

Assim como o controle de potenciais de passo e toque no pátio das SEs, o controle desses potenciais na periferia das instalações também é desafiador. Em função das características do solo, valores de curto-circuito e distâncias entre a malha da SE e a divisa do terreno, em algumas situações foi necessário substituir a cerca metálica por muro de alvenaria, evitando que pessoas, externas à instalação, fossem submetidas a um potencial nocivo.

Em algumas subestações compactas que utilizaram cercas metálicas foi adotada a construção de um piso constituído de pedras de mão do tipo *gnaisse*. O objetivo dessa solução é garantir que terceiros estejam sob um piso de alta resistividade ao tocar a cerca metálica.



Conforme será apresentado no item 3, para o ciclo de investimento atual (2018-2022) foi implementada uma nova redução nos pátios em função de rearranjos e aprendizados obtidos na implantação inicial. Nesses projetos em andamento, todas as instalações terão muro na divisa das instalações. Em algumas situações a área do terreno adquirida será maior que o limite construído, permitindo intervenções junto ao muro para controlar eventuais tensões de passo induzidas pela malha de aterramento, com elaboração de um passeio com asfalto ou *gnaisse*.

## 2.4 Campos Elétricos e Magnéticos

Os campos elétricos e magnéticos gerados por instalações de alta tensão sempre foram uma preocupação das concessionárias de energia. Essa preocupação, porém, aumentou significativamente depois das Resoluções Normativas da ANEEL nº 398 de 2010 [8] e nº 616 de 2014 [9]. Essas resoluções definiram os valores limites em território brasileiro dos campos eletromagnéticos em baixa frequência. A experiência de CEMIG D [10][11] com cálculos e medições nessa área é que instalações com nível de tensão menor ou igual a 138 kV geram campos com valores inferiores aos limites atuais requeridos [9], logo é esperado que os novos padrões sigam essa tendência. Essa expectativa gerada levou em conta que:

- Os espaçamentos elétricos nos trechos isolados a ar possuem os valores tradicionalmente adotados pela concessionária;
- Que os limites de campo magnético estabelecidos são bem superiores aos gerados nos sistemas de 138 kV;
- Que os valores medidos e calculados nas áreas de circulação dos padrões isolados a ar, que eram adotados pela CEMIG na expansão do sistema até então, possuíam valores de campo elétrico, na área de circulação próximo ao pátio, inferiores aos limites da população em geral;
- Que os valores medidos e calculados nas áreas de circulação dos padrões convencionais isolados a ar, que eram adotados pela CEMIG na expansão do sistema até então, possuíam valores de campo elétrico na área de circulação próximo ao pátio inferiores aos limites da população geral.

Para comprovar o descrito, os novos padrões de subestação foram modelados no programa de cálculo de campo descrito em [10]. A primeira análise foi para público ocupacional. Os campos foram calculados nos limites dos pátios, de acordo com as figuras. As tensões consideradas na simulação são 5% maiores que as tensões nominais. No setor de alta tensão, foi considerado que todas as linhas conduzem sua potência de emergência, enquanto no setor de baixa, foi considerado que os transformadores fornecem 50% de sobrecarga. Considerando esses parâmetros, os valores máximos dos campos calculados para cada instalação estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Valores máximos de campos eletromagnéticos calculados na área de circulação conforme indicado nas Figuras 6 e 7.

Padrão	Campo elétrico máximo (kV/m)	Campo magnético máximo (μT)
SECI	1,63	14,29
Híbrida	0,98	5,69

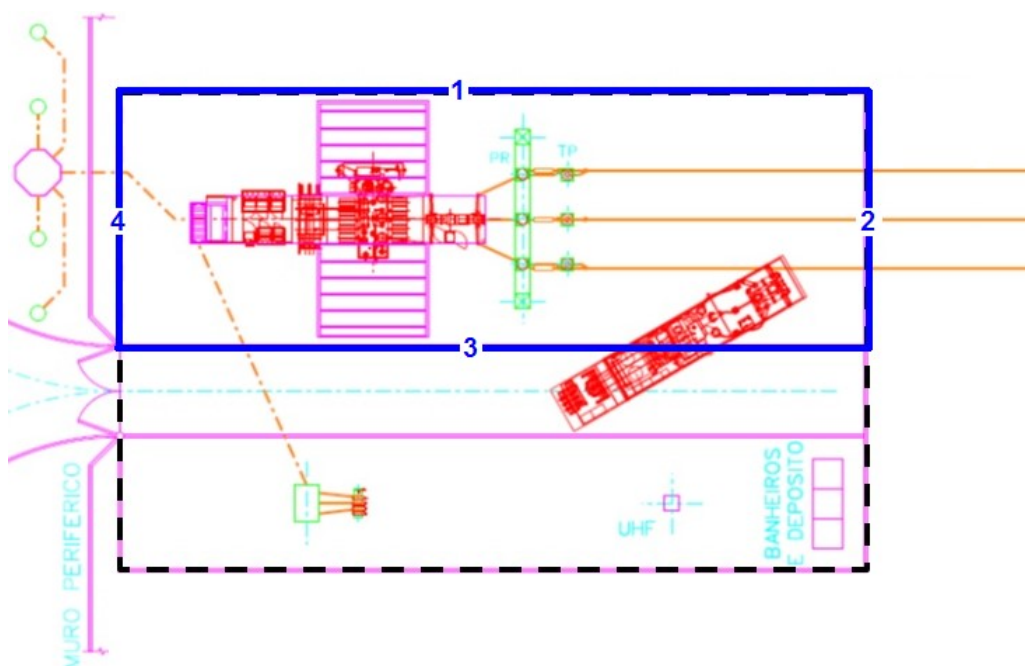


Figura 6 – Eixos de cálculo de campos elétricos e magnéticos no entorno do pátio de uma SE padrão SECI de 138 kV.

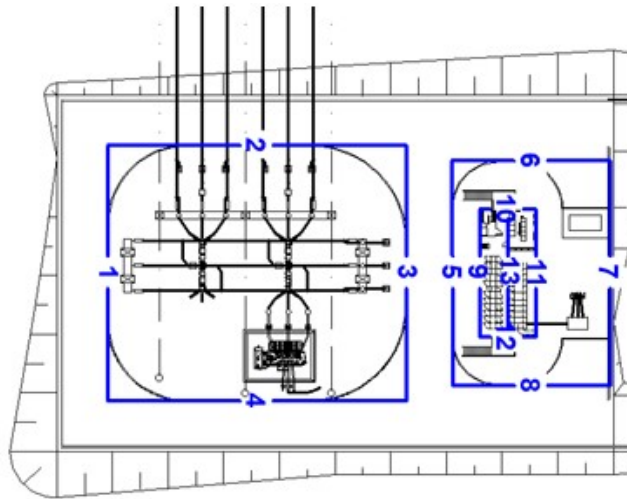


Figura 7 – Eixos de cálculo de campos elétricos e magnéticos no entorno do pátio de uma SE padrão híbrida.

Os valores de campo elétrico e de campo magnético para público ocupacional estão abaixo dos valores limites para público geral, como esperado para o nível de tensão de operação. Como os valores de campos gerados pela instalação para público geral são ainda menores que os valores apresentados nesse informe, não foram feitos eixos específicos para essa análise. Medições recentes do campo elétrico em uma SE híbrida, o maior valor medido foi abaixo de uma bucha do módulo híbrido. Este valor foi de 4,98 kV/m, valor ligeiramente superior ao limite para público geral (4,17 kV/m), mas adequado para o público ocupacional. A Figura 8 apresenta o local onde a medição foi realizada.



Figura 8 – Medição de campo elétrico internamente ao pátio de SE híbrida de 138 kV.

A intensidade de campos de alta frequência gerados pelos novos padrões, bem como suas consequências, como rádio interferência, TV interferência e corona, também não é maior do que instalações convencionais de 138 kV. Isso ocorre porque, apesar da diminuição de espaço das instalações, as distâncias elétricas foram mantidas, com a exceção dos equipamentos isolados a SF6, que são blindados.

## 2.5 Ruído Audível

Uma das preocupações com os padrões em análise neste informe é o nível de ruído audível produzido por eles, principalmente por se tratarem de instalações desabrigadas. Apesar das principais fontes de ruídos nessas instalações não se diferenciarem das fontes de subestações convencionais, a área reduzida implica numa proximidade maior entre um eventual vizinho e essas fontes, o que pode aumentar o impacto da subestação no ambiente a sua volta.

A referência [12] mostra que o nível de pressão sonora sobe aproximadamente 6 decibéis para cada vez que a distância cai pela metade, o que é bem próximo da situação dos novos padrões de instalações. Esse acréscimo esperado não é suficiente para que os limites de norma [13] sejam excedidos, mas, com objetivo de comprovar a adequação dessas instalações, foram realizadas medições de pressão sonora no local de instalação de uma subestação no padrão híbrido antes e depois da construção da mesma. As medições de nível de pressão sonora foram realizadas de acordo com [13] em quatro pontos ao redor de uma instalação localizada em área predominantemente industrial no interior de MG. O maior valor medido de nível de pressão sonora equivalente foi de 58 dB, muito abaixo do limite normativo. O dado mais importante, porém, foi a diferença entre os valores máximos medidos para as duas situações. Esse valor foi de apenas 3 dB, o que comprova que as instalações não têm impacto relevante no ambiente sonoro ao seu redor, como esperado.

## 3.0 - ANÁLISE DAS INTERFERÊNCIAS

Conforme apresentado no item 2, a adoção de padrões compactos de subestações para expansão do sistema de 69 kV e 138 kV apresentou dúvidas e desafios.

O maior desafio esteve relacionado ao sistema de aterramento que sofreu um incremento nos valores ôhmicos em função da redução da área ocupada. Nas instalações que fizeram uso da SECI, toda área interna foi recoberta com uma manta asfáltica, possibilitando um incremento nas tensões de passo e toque admissíveis pelo ser humano. Nas instalações híbridas, ainda permaneceu a adoção de camada de brita no pátio, uma vez que, mesmo com a redução da área total, não implicou em dificuldades de controlar tensões de passo e toque, tanto na área interna quanto na cerca, através de práticas padronizadas de projetos de aterramento.

Devido ao sucesso na implantação e as lições aprendidas nas primeiras instalações, para o ciclo atual de investimento 2018-2022, haverá uma nova redução das áreas dos pátios, permitindo uma redução adicional 28% para instalações do tipo SECI e de 16% para instalações híbridas, conforme ilustrado na Figura 9. Essa redução foi obtida com rearranjo das partes da subestação. A linha preta tracejada indicada na Figura 9, mostra o tamanho dos pátios adotados nas primeiras instalações, indicando a diferença para a nova plataforma.

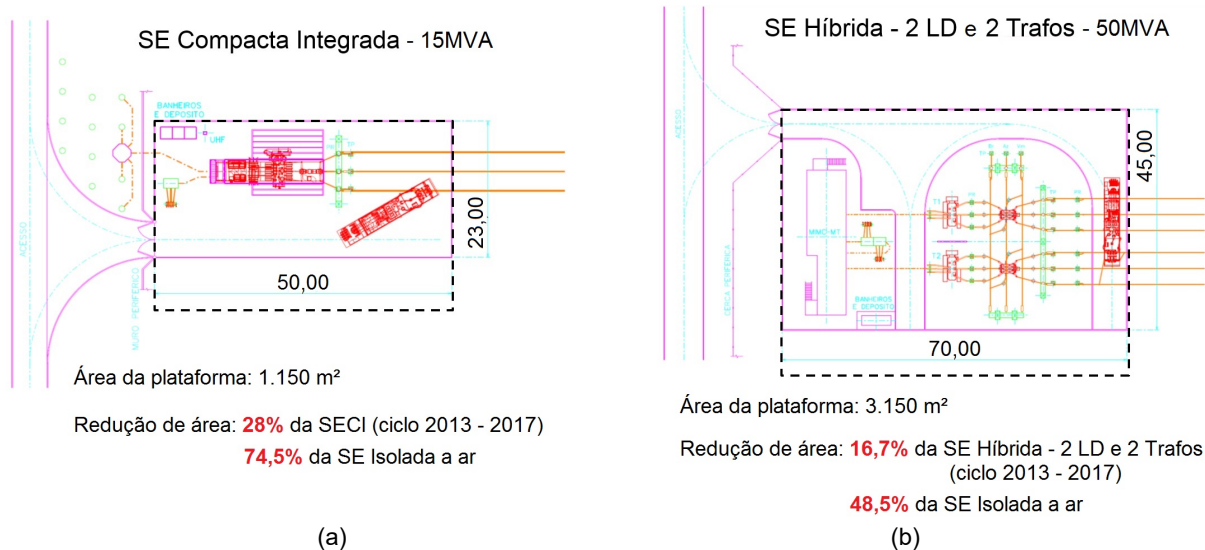


Figura 9 – Redução das áreas de subestações compactas para o ciclo 2018-2022 para as instalações SECI (a) e híbridas (b).

#### 4.0 - CONCLUSÃO

A quebra de paradigmas e de desafios no processo de expansão tem se tornado cada vez mais um processo contínuo e sem volta, exigindo criar soluções com inovação. É importante a observância da regulamentação que requer que os projetos caminhem para uma modicidade tarifária, sem, contudo, implicar em projetos de baixa qualidade e segurança.

Deve se ter em mente que a compactação de pátios não deve considerar apenas os arranjos físicos, mas também todos os sistemas que compõe a subestação, dentre eles, sistemas de aterramento, sistemas de drenagem, que não se apresentam visíveis para todos.

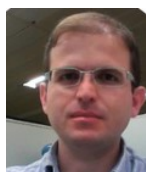
Os modelos de subestações, SE Híbrida e SECI, apresentaram outros aspectos positivos, como a redução no prazo de execução das obras e ganhos importantes na manutenção, visto que os módulos híbridos possuem alta confiabilidade, com excelente MTBF (*Mean Time Between Failures*), índice que mostra a média aritmética dos tempos decorridos entre as falhas durante a operação.

Por fim, a redução do impacto visual das aplicações é bastante relevante, principalmente para as cidades históricas, onde as exigências são maiores.

#### 5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) ANEEL, Nota Técnica nº 71 - Base de Remuneração Regulatória – Banco de Preços Referenciais – Metodologia Aplicada a Redes, Linhas e Subestações de Distribuição, 2015.
- (2) ANEEL - Módulo 8 – Qualidade de Energia Elétrica – Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST.
- (3) Alécio A. Moreira, Paulo R. F. C. Costa, “Padronização de Subestações da Cemig Distribuição” (Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica – SNPTEE – 2011).
- (4) Sandro C. Assis, Paulo R. F.C. Costa, Eduardo N. Carvalho, Marisa Lages Murta, Afonso V. N. Barbosa, Igor Luiz de Mello Motta, Leonardo R. Oliveira, “Subestação Compacta Integrada - SECI, Um Padrão Estratégico de Sucesso Para Expansão do Sistema Elétrico da Cemig” – XXV SNPTEE - GSE;
- (5) Sandro C. Assis, Paulo R. F.C. Costa, Eduardo N. Carvalho, Alécio M. Oliveira, Eduardo M. Raposo, Gildecio S. Aguiar, Leonardo R. Oliveira, “Novos Padrões de Subestações Compactas da Cemig D para Expansão do SISTEMA Elétrico no Estado de Minas Gerais” (Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica – SNPTEE – 2015).
- (6) ABNT NBR 15751 - Sistemas de Aterramento de Subestações - Requisitos, 2009;
- (7) IEEE Std 80 - IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding, 2013;
- (8) AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Resolução Normativa nº 398/2010, de 23 de maio de 2010.
- (9) AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Resolução Normativa nº 616/2014, de 01 de julho de 2014.
- (10) Sandro C. Assis, Roberto M. Coutinho, Eliilson E. Ribeiro, Letícia M. de Souza, “Cálculo e Medição de Campos Elétricos e Magnéticos em SEs E LTs”.(Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica – SNPTEE – 2011)
- (11) João Henrique M Almeida, Edino B. G. Filho, Rodrigo Otavio. C. Moreira, Sandro C. Assis, Yasmine D. J. Fonseca, “Desenvolvimento de Estratégias e Ferramentas Para Cálculo de Campos Elétrico e Magnético em Sistemas de Transmissão”.(Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica – SNPTEE – 2011)
- (12) Recent Contributions to Transformer Audible Noise Control, AIEE Winter General Meeting, New York, N. Y., January 31-February 4, 1955 WILLIAM B. CONOVER and ROBERT J. RINGLEE
- (13) NBR 10151/2003 – Acústica – Avaliação do ruído em áreas habitadas, visando o conforto da comunidade - Procedimento.

#### 6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



**Sandro de Castro Assis** possui graduação, mestrado e doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, Brasil, em 2004, 2006 e 2017, respectivamente. Atualmente é engenheiro sênior de projetos de sistemas elétricos de linhas de transmissão e subestações da CEMIG Distribuição e professor do IEC PucMinas no curso de Transmissão e Distribuição. 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.





**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 e professor do IEC PucMinas no curso de Transmissão e Distribuição



**Edino Barbosa Giudice Filho.** Mestrado em Engenharia Elétrica (UFMG). Atualmente trabalha como engenheiro de projetos de sistemas elétricos (CEMIG) com as atividades de estudos elétricos aplicados a linhas e subestações e em pesquisa e desenvolvimento nestas áreas.



**Henrique Curatola Neves.** Nascido em 1980 em Cruzília, MG. Engenheiro Eletricista formado pela Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF) em 2005. É engenheiro de projetos de sistemas elétricos de linhas e subestações da CEMIG Distribuição S.A. Tem experiência em estudos de viabilidade técnica de expansão e projetos eletromecânicos de subestações.



**Farley Alves Pereira.** Nascido em 1982 em Vespasiano, MG. Engenheiro Eletricista formado pela Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (PUC-MG) em 2011. Tem experiência em concepções de arranjos eletromecânicos de subestações para estudos de viabilidade técnica de expansão do sistema elétrico. Trabalha na CEMIG Distribuição desde 2006.



**Braulio Roberto de Melo Coutinho.** Nascido em 1985 em Belo Horizonte, MG. Engenheiro Eletricista formado pela Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (PUC Minas) em 2015, mestrando do grupo de pesquisa em Compatibilidade Eletromagnética e Qualidade da Energia (CEQE) da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Tem experiência em sistemas de aterramentos e projetos eletromecânicos de subestações.