



RESULTADO DA APLICAÇÃO DE PADRÕES ESTRATÉGICOS DE SUCESSO NA EXPANSÃO DE SUBESTAÇÕES NO SISTEMA ELÉTRICO DA CEMIG

D

Tema: Subestações de Distribuição

Autores: Sandro de Castro Assis

Co-Autores: Juliana Souza Nunes; Marisa Lages Murta; Fernanda do Amaral Vinseiro; Rafael Carneiro Motta; Cássio Bruno de Araujo; Rodrigo Rennó Nunes

Empresa: Cemig Distribuição S. A.

Resumo

A aplicação de subestações compactas isoladas a gás SF6 é uma proposta viável no cenário regulatório atual e tem se mostrado vantajosa em diversos aspectos, tanto na fase de implantação quanto durante sua operação e manutenção. Neste artigo são apresentados os resultados obtidos pela CEMIG DISTRIBUIÇÃO na aplicação dos padrões de subestações compactas que utilizam equipamentos isolados a gás SF6, frente à utilização de soluções convencionais conhecidas como AIS (*air insulated substation*). É apresentada a comparação de CAPEX e OPEX para as soluções de Subestações Híbridas e Subestações Compactas Integradas (SECI), visto que estas são os padrões mais adotados na expansão do sistema elétrico de Minas Gerais e atendem as regras regulatórias, com alta confiabilidade operacional, simplicidade de arranjo elétrico, redução no prazo de implantação, nos custos adicionais e aumento da vida útil, utilizando a estratégia de implantação de várias subestações no mesmo padrão. Este trabalho apresenta a experiência na implantação desta solução, considerando características técnicas, motivadores, premissas e ganhos em relação as soluções convencionais similares.

1. Introdução

Desde o início dos anos 2000, as concessionárias brasileiras de distribuição de energia elétrica seguem regras regulamentadoras mais exigentes. As exigências regulatórias, definidas de acordo com resoluções normativas, notas técnicas e procedimentos específicos são estabelecidas pela Agência Nacional de energia elétrica – ANEEL – e estão fortemente associadas a prudência nos investimentos, remuneração de ativos, qualidade de atendimento a cargas, consumidores e acessantes, dentre outros [1][2].

Desde então, a CEMIG DISTRIBUIÇÃO tem adequado os seus padrões técnicos de linhas de distribuição, redes de distribuição e subestações para atender a nova regulamentação.

Particularmente para as subestações (SE) de distribuição, foram definidos 4 (quatro) padrões de configurações, com as seguintes características de tensões de operação e potências nominais [3]:

- Subestação GIS:
 - o 138/13,8 kV - 2x40 MVA;

- Subestação Híbrida:
 - o 138/13,8 kV – 1x25 MVA;
 - o 138/23 kV – 1x25 MVA;
 - o 138/34,5 kV – 1x25 MVA;
 - o 138/13,8 kV – 2x25 MVA.
- Subestação Compacta Integrada - SECI:
 - o 138/69-13,8 kV – 15 MVA;
 - o 138-13,8 kV – 15 MVA
 - o 138-34,5 kV – 25 MVA;
 - o 34,5-13,8 kV – 10 MVA.
- Subestação de integração:
 - o 138 kV - tem a função de conectar novos consumidores e acessantes, apenas com equipamentos híbridos de manobra.

Estas soluções foram estudadas e concebidas com base no atendimento às regras regulatórias e as seguintes premissas básicas[4]:

- Prudência e reconhecimento do investimento na tarifa de energia elétrica;
- Redução do custo de implantação (CAPEX) para a viabilização de um maior número de subestações, permitindo a redução do comprimento das redes de MT e consequente melhoria nos índices de DEC/FEC;
- Redução dos custos de manutenção e operação (OPEX);
- Redução dos prazos de execução e dos custos adicionais (serviços) para a implantação;
- Subestações compactas, mais simples e confiáveis, utilizando o estado da arte da tecnologia de equipamentos compactos e de soluções integradas de equipamentos pré-comissionados em fábrica;
- Eliminação de ampliações / adequações futuras;
- Implementação de soluções de automação com arquiteturas otimizadas.

Os padrões de subestações utilizados atualmente aplicam integralmente equipamentos compactos de manobra na alta e média tensões, de tecnologia a gás SF₆, com diversas funcionalidades integradas, em substituição a seccionadores, disjuntores e TIs convencionais, atendendo ao conceito mundial de otimização de ativos e confiabilidade com alto desempenho operacional [5-8]. Atualmente, já existe um conjunto de subestações do tipo SECI, Híbrida e de Integração em operação no sistema elétrico da CEMIG DISTRIBUIÇÃO, demonstrado ganhos técnicos e financeiros expressivos em função do seu conceito inovador e alto nível de compactação.

Sendo assim, o objetivo é apresentar as principais características e diferenciais destas soluções em comparação as subestações isoladas a ar similares bem como os ganhos verificados.

2. Desenvolvimento

Os padrões de subestação fazem uso intensivo de equipamentos isolados a SF₆, com arranjos mais simples e confiáveis, eliminando etapas de ampliações futuras (a subestação é concebida para o horizonte de

planejamento). A estratégia permitiu uma redução de custos de manutenção e operação – OPEX – e um ganho no CAPEX com aquisições em escala e redução de área de implantação.

Redução dos Pátios

A adoção da tecnologia SF6 nos equipamentos de manobra permitiu a compactação dos arranjos eletromecânicos. Isto, combinado ainda à estratégia de não se preverem ampliações futuras das subestações, resultou numa significativa redução de tamanho dos pátios das Subestações.

A redução da área disponível para elaboração do projeto eletromecânico e elétrico das subestações trouxe vários desafios. Um dos mais significativos foi o controle das tensões de passo e toque nas instalações, sobretudo em razão das 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. 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, transformador de serviço auxiliar, saídas de média tensão, equipamentos de proteção, controle e rádio para telecomunicação. Detalhes podem ser obtidos em [9].

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. A área da plataforma sofreu uma redução de 64,5%. A Figura 2 mostra uma foto de uma SECI.

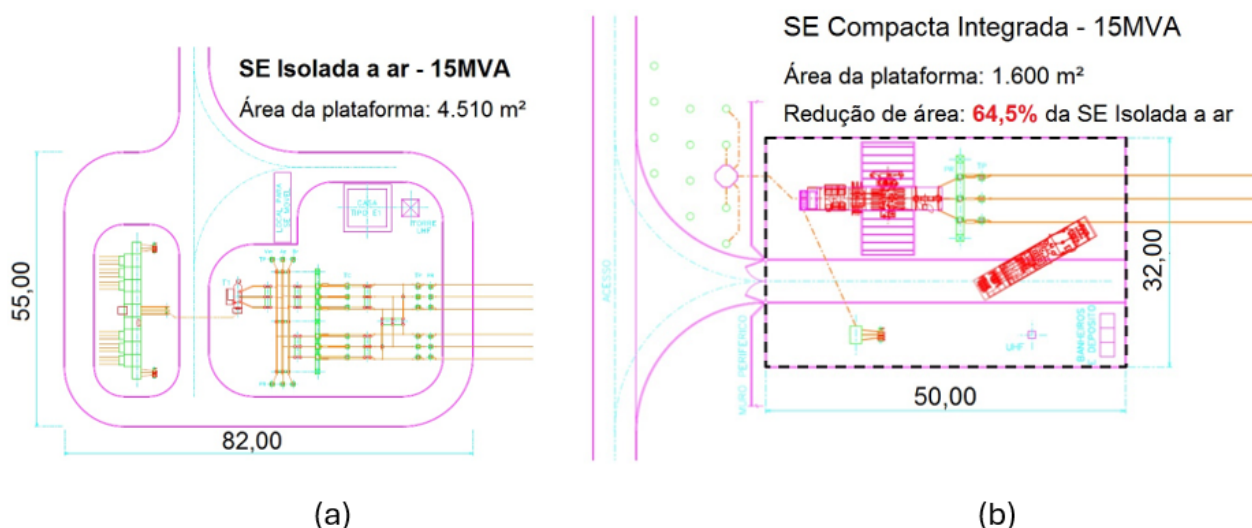


Figura 1 – Comparação de área das plataformas de uma SE convencional isolada a ar (a) e uma SECI (b) de mesma potência (15 MVA).



Figura 2 – Subestação padrão SECI implantada

Para a comparação de áreas entre as subestações híbridas e as convencionais, foi considerado o arranjo formado por 2 saídas de linha e 2 transformadores. Essa configuração foi escolhida por apresentar a menor redução na área do pátio, dentre as diferentes configurações do tipo híbrida. A Figura 3 ilustra essa redução, que foi de 38%.

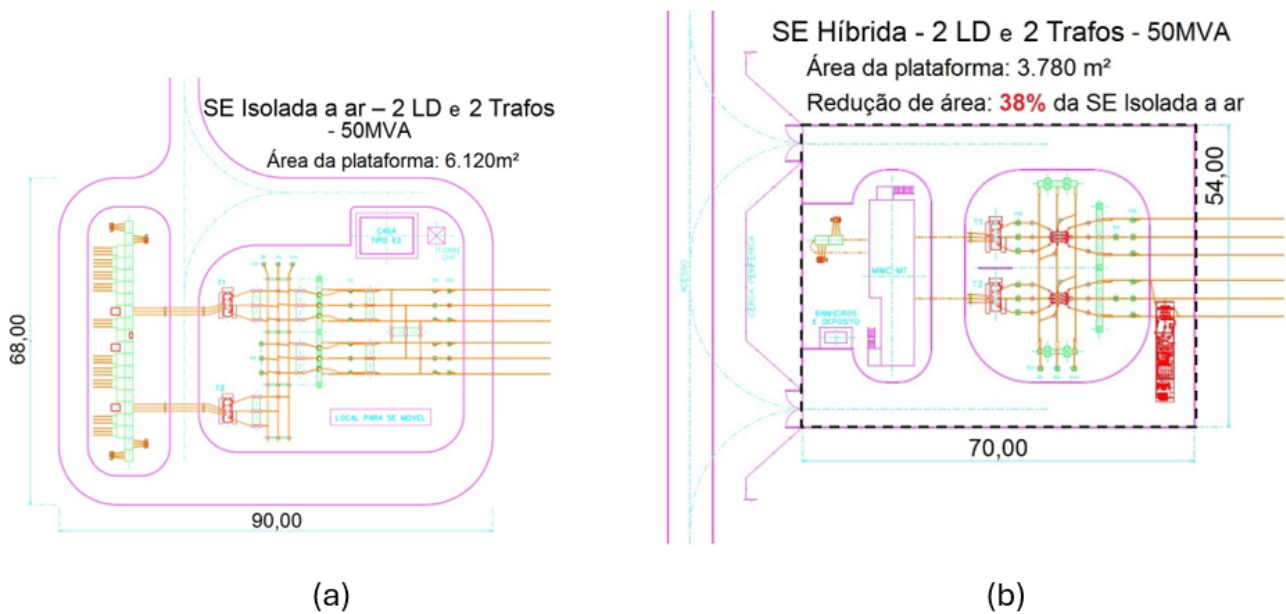


Figura 3 – Comparação de área das plataformas de uma SE convencional isolada a ar (a) e uma híbrida (b).

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 [4] (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.



Figura 4 – SE Híbrida com 2 linhas e 2 Transformadores

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 isolada a ar – A/S – da CEMIG para a mesma potência da instalação.

Impacto Visual

A redução de área resultante da utilização dos padrões permitiu a construção de instalações mais próximas a centros urbanos. Logo, existiu uma grande preocupação com o impacto visual.

A aplicação de muros está padronizada nos projetos, tendo sido adotada tanto por questões de segurança de pessoal, prevenção de vandalismo e redução da percepção de ruído externo à instalação e por contribuir para a proteção dos equipamentos contra poeira no caso de proximidade com via de terra. Outro fator é a percepção obtida da maior receptibilidade da população quando a subestação possui muros. Para maior redução dos impactos visuais, pode-se pintar as ferragens e taludes concretados em verde para permitir uma camuflagem da subestação (Figura 5).



(a)



(b)

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

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 [10] e nº 915 de 2021 [11]. Essas resoluções definiram os valores limites em território brasileiro dos campos eletromagnéticos em baixa frequência. A experiência de CEMIG D [12][13] 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 [13], o que se manteve para os padrões atuais de subestações. Este resultado foi obtido uma vez que a compactação da instalação aconteceu através do uso dos equipamentos isolados a SF6. Os espaçamentos elétricos nos trechos isolados a ar possuem os valores tradicionalmente adotados pela concessionária.

Ruído Audível

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 [14] 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 não tem se mostrado suficiente para que os limites de norma [15] sejam excedidos.

Acréscimo de disponibilidade de atendimento de cargas

O uso intensivo dos padrões atuais tem permitido forte expansão do número de subestações da CEMIG D. A Figura 6 apresenta a realização da implantação das subestações do tipo Híbrida e SECI, que propiciaram um aumento de potência instalada de 1.430 MVA de 2017 a 2024.

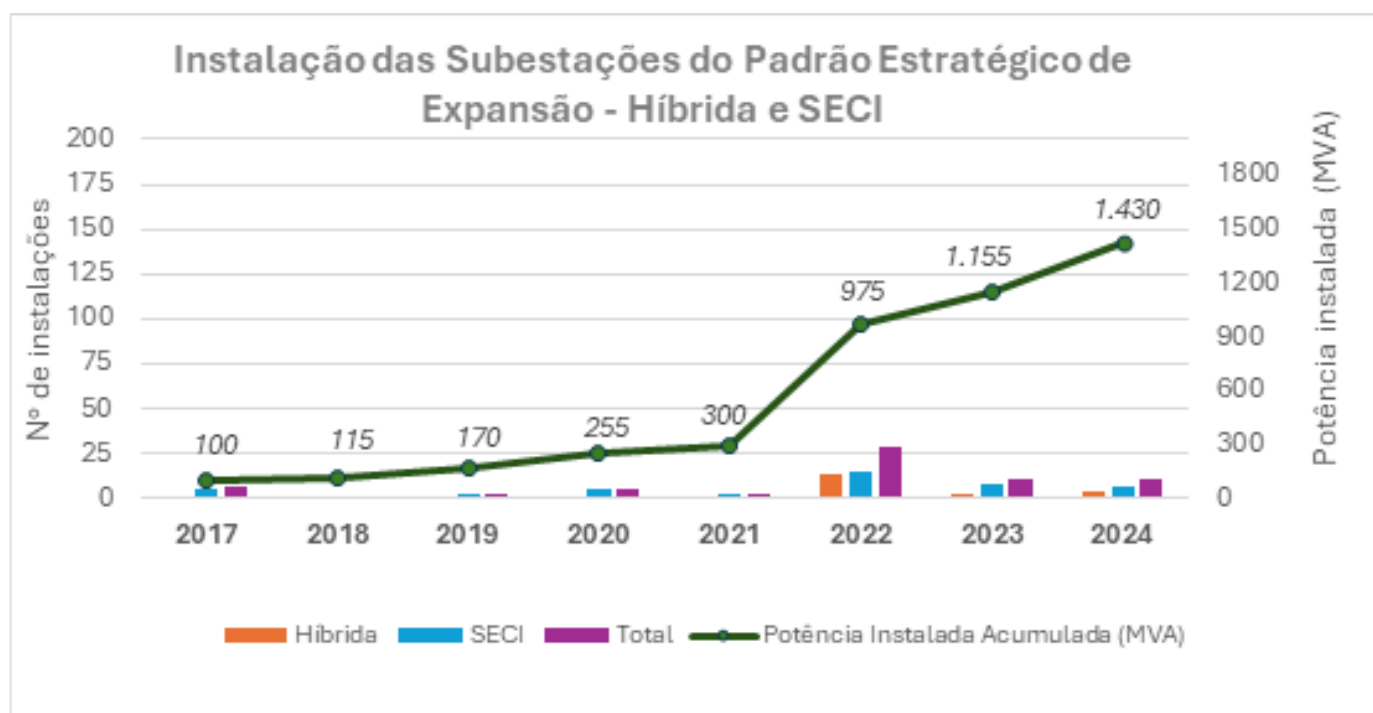


Figura 6 – Implantação de instalações do tipo Híbrida e SECI na Cemig D

O mapa da Figura 7 indica locais onde já foram instaladas as SEs no padrão SECI e Híbrida, abrangendo todo o Estado de Minas Gerais, para atendimento com qualidade aos clientes da concessionária.

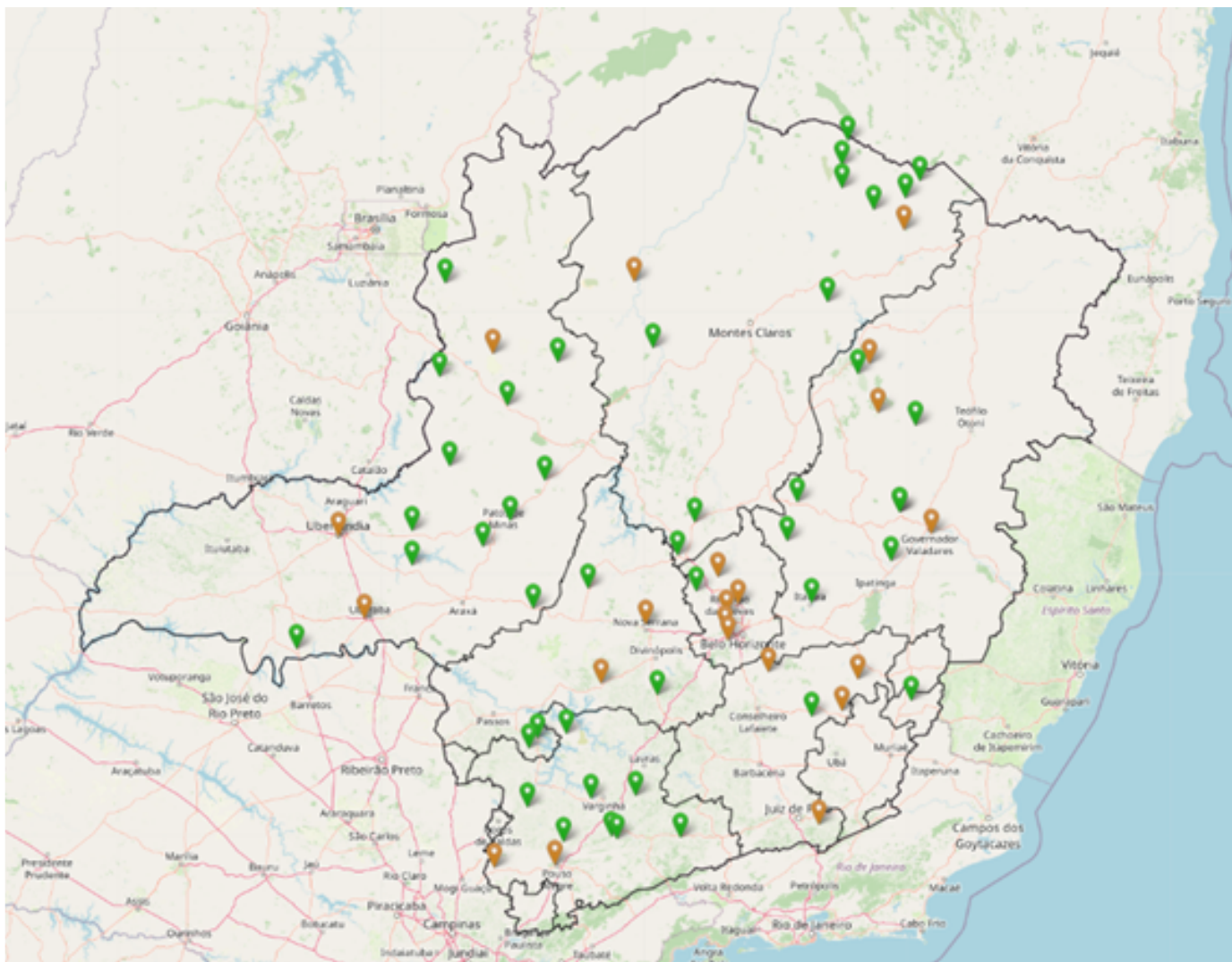


Figura 7 – Mapa com a localização das subestações do padrão estratégico de expansão Redução do OPEX

Apesar de poucos anos de implantação e ainda da vivência da “curva da banheira”, o uso intensivo dos arranjos confiáveis e dos equipamentos isolados a SF6 já geram uma significativa redução de custos de manutenção e operação - OPEX.

A curva da banheira (*Bathtub hazard rate curve*) é um conceito utilizado na manutenção e confiabilidade de equipamentos para representar a taxa de falhas ao longo do tempo [16]. O gráfico tem esse nome devido ao formato da curva, que se assemelha a uma banheira, com três fases distintas:

- Período de falha prematura (*Burn-in period*): Alta taxa de falhas no início da vida útil do equipamento, geralmente devido a falhas associadas aos componentes (defeitos de fabricação) ou de forma combinada por falha nos processos de especificação, controle de qualidade, instalação e comissionamento;
- Vida útil (*Useful life period*): Período de estabilidade, onde a taxa de falhas é relativamente baixa e constante;
- Desgaste (*Wear-out period*): Aumento da taxa de falhas final da vida útil do equipamento, devido ao envelhecimento natural.

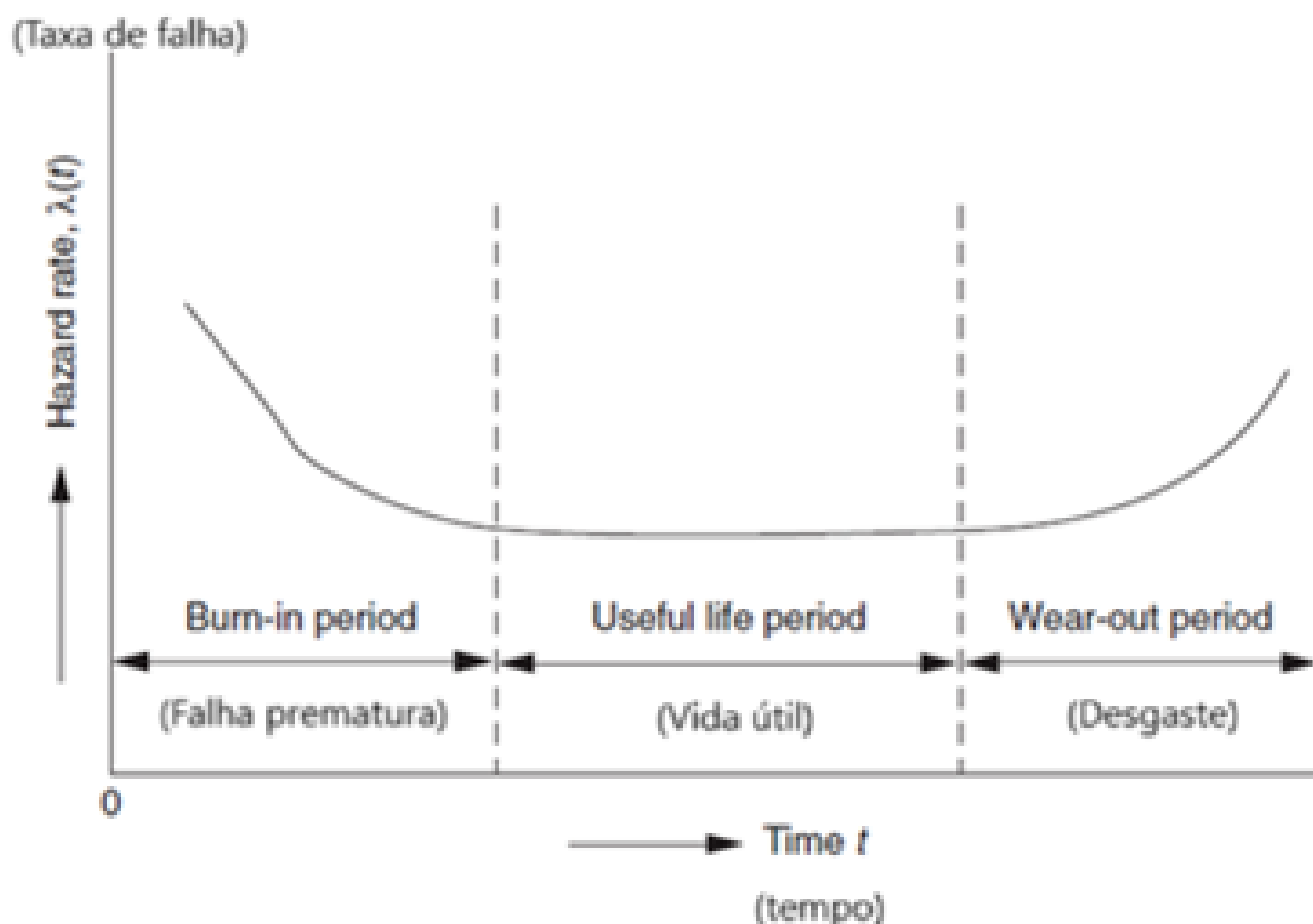


Figura 8 – Curva da Banheira (*Bathtub hazard rate curve*)

A Tabela 1 apresenta os resultados apurados de redução de OPEX das instalações do tipo SECI e Híbrida entre os anos 2020 e 2023, comparando-se com o OPEX médio das instalações convencionais isoladas a ar de mesma potência.

Tabela 1 – Redução percentual de OPEX em relação às subestações convencionais

Tipo de Instalação	Potência	Redução % OPEX
SECI	15 MVA	66,2%
	25 MVA	73,5%
Híbrida	25 MVA	57,8%
	50 MVA	78,8%

Observa-se um excelente resultado na redução do OPEX já nos primeiros anos de vida da instalação. A expectativa é que este resultado apresente uma melhor performance nos próximos anos, quando as instalações já tiverem vencido o período de falha prematura, também conhecido como mortalidade infantil. Conforme mostrado na Figura 6, um grande número de instalações entrou em operação a partir de 2022 e algumas falhas de montagem em casos particulares influenciaram de forma relevante o resultado do OPEX médio por tipo de instalação.

Melhoria de Desempenho – Redução de DEC (Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora)

A aplicação dos padrões na expansão do sistema elétrico da CEMIG D tem propiciado uma contínua melhoria no atendimento ao cliente, com redução do DEC da alta tensão na janela de 2011 a 2024. Na Figura 9, o resultado do DEC de AT em 2011 foi tomado como referência de 100%. Os demais anos apresentam os resultados em comparação ao ano de 2011.

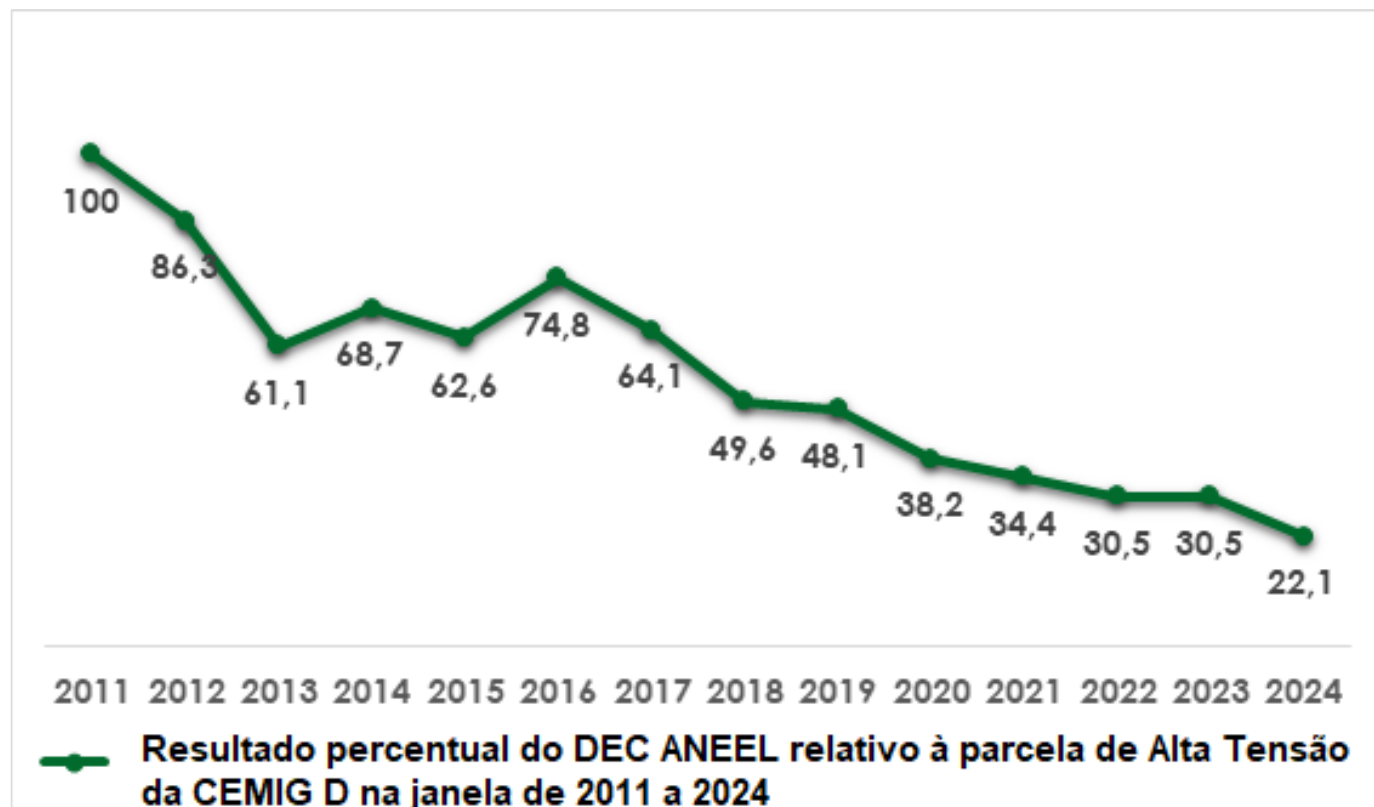


Figura 9 – Evolução do resultado percentual do DEC ANEEL relativo à parcela de Alta Tensão da Cemig D (2011-2024)

3. Conclusão

O uso de equipamentos compactos isoladas a gás SF₆, confiáveis e com diversas funcionalidades combinadas, é forte direcionador para o sucesso de aplicação dos novos padrões de subestações da CEMIG DISTRIBUIÇÃO, tendo a sua viabilidade econômica associada a estratégia de escala de aquisição, atendendo as regras regulatórias e com alta confiabilidade operacional.

O desempenho operacional permanece sendo acompanhado e as melhorias e adequações que possam ser implementadas estão sendo avaliadas. Espera-se que a redução de OPEX atinja patamares superiores a 80%, à medida que grande parte das instalações ultrapassem o período de falha prematura da Curva da Banheira. Além disso, devido ao alto grau de confiabilidade dos equipamentos implementados nas subestações compactas, espera-se uma contribuição ainda mais relevante para a redução do DEC em todo o Estado, para atendimento aos limites regulatórios cada vez mais desafiadores e para melhor satisfação dos clientes.

Ressalta-se que os padrões SECI e Híbrido apresentam alta compactação dos arranjos, associado a simplicidade dos requisitos técnicos, alta confiabilidade operacional e com os ganhos reais para sua implantação, sendo o grande diferencial deste produto.

4. 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, 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);
- (5) CIGRÉ 532 WG B3-23, “Substation Uprating and Upgrading”, 2013;
- (6) CIGRÉ 381 WG B3-17, “GIS State of Art 2008”, 2008;
- (7) IEEE Std C37.122 – “High Voltage Gas-Insulated Substations Rated Above 52kV”, 2010;
- (8) PSERC Publication 10-17, “Substation of the Future: A Feasibility Study”, October 2010
- (9) 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;
- (10) AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Resolução Normativa nº 398/2010, de 23 de maio de 2010.
- (11) AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Resolução Normativa nº 915/2021, de 23 de fevereiro de 2021.
- (12) Sandro C. Assis, Roberto M. Coutinho, Elilson E. Ribeiro, Leticia 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)
- (13) 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)
- (14) 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
- (15) NBR 10151/2019 – Acústica – Avaliação do ruído em áreas habitadas, visando o conforto da comunidade - Procedimento.
- (16) B.S. Dhillon, “*ENGINEERING MAINTENANCE, A Modern Approach*”, 2002.