



Metodologias de contabilização de emissões fugitivas de SF₆ em equipamentos do sistema elétrico para elaboração de Inventário de Gás de Efeito Estufa

Andrew Lucas Manger, Caio Marcelo F. G. de Oliveira, Guilherme Carvalho Queiroz de Oliveira, João Carlos Oliveira da Silva, Levi Mendes da Silva, Luiz Paulo Henrique Moreira e Mayra Cristina de Oliveira Machado

andrew.manger23@gmail.com

guilhermecqo@gmail.com

joaocarlos.dasilva@hotmail.com

levi.silva@outlook.com

luizpaulohenriquem@gmail.com

caio-marcelo@hotmail.com

mayra-cristina17@outlook.com

Professor orientador: Davidson Andreoni Rocha

Coordenação de curso de Engenharia Elétrica

Resumo

Este trabalho busca apresentar uma metodologia de contabilização das emissões fugitivas de gás SF₆¹. São mencionados métodos para determinar a massa fugitiva deste gás para diferentes equipamentos e situações do sistema elétrico. Os dados obtidos vão para elaboração dos Inventários de GEE². Esses documentos seguem padrões estabelecidos por normas, porém apresentam lacunas referentes ao roteiro de levantamento dos dados. O SF₆, é um gás que possui características que o tornam um dos dielétricos mais eficientes para uso em equipamentos de manobra e para compactação de instalações do setor elétrico de potência. No entanto, em virtude do alto potencial de efeito estufa desse gás existem cobranças por parte da comunidade internacional, dos governos e da sociedade para que as empresas do setor elétrico diminuam ou zerem as emissões. O aprimoramento da precisão na contabilização contribui para aumentar a conscientização das empresas no sentido de mitigar essas emissões de SF₆ e buscar alternativas mais ecológicas para sua substituição

Palavras-chave: SF₆. Equipamentos do Sistema Elétrico. Inventário de GEE. Contabilização de Massa Fugitiva.

1. INTRODUÇÃO

Os inventários de GEE são documentos elaborados por organizações e empresas com objetivo de informar as fontes e quantidade de gases de efeitos estufa lançados na atmosfera por elas. Um desses gases é o SF₆ que é amplamente usado no sistema elétrico de potência.

A principal característica deste material que o torna interessante para o sistema elétrico é sua incrível rigidez dielétrica. Além da característica isolante o gás não é tóxico, não é poluente e é muito estável, isso significa que não se recombina facilmente. Entretanto, o gás apresenta um alto potencial de efeito estufa. Mas o aumento contínuo de uso desse gás vem chamado a atenção dos órgãos ambientais, das empresas do setor elétrico e dos fabricantes de equipamentos, sobretudo depois da assinatura do protocolo de Quioto, no sentido de buscar maneiras de reduzir sua emissão e ou de substituí-lo por outro material (STOLLER et al, 2018, p.1).

¹ Hexafluoreto de enxofre

² Gases de Efeito Estufa

O Programa Brasileiro de *GHG Protocol*³ e a norma NBR ISO 14064 especificam roteiros e métodos de cálculo de emissão para os inventários de GEE. A própria norma ressalta que existem outras metodologias conhecidas e cabe a cada empresa avaliar a melhor maneira de acordo com suas necessidades (NBR ISO 14064, 2015, p.1). Mas a elaboração dos inventários em acordo com a norma padroniza o formato e os métodos de informação entre as diferentes organizações e permite o acompanhamento das emissões ao longo de tempo e o desenvolvimento qualitativo do conjunto das emissões.

Este trabalho pretende salienta a importância da elaboração do Inventário de GEE como instrumento de autoconscientização das organizações para mitigar as emissões. Também objetiva abordar e propor metodologias de contabilização das emissões fugitivas de SF₆ em nível operacional, uma lacuna que não é coberta nem pela ISO 14064, nem pela ferramenta de cálculo disponibilizado pela *GHG Protocol*, nem pela literatura técnica consultada.

A mitigação ocorre por meio de duas abordagens paralelas: aprimorar a qualidade das manutenções dos equipamentos por meio de tecnologias e materiais alternativos ao SF₆. Depois de apresentar a metodologia de contabilização de emissões fugitivas de SF₆, será abordada experiência da Cemig D⁴, a partir das informações dos Inventários de GEE de 2020 até 2022.

Essa análise permitirá avaliar o impacto das ações de mitigação adotadas pela empresa e identificar oportunidades de melhoria. Ao conscientizar as organizações sobre as emissões de SF₆ e incentivar a busca por soluções alternativas, esse trabalho contribui para soluções mais sustentáveis no setor elétrico de potência e para a preservação da natureza, promovendo a transição para uma economia de baixo carbono.

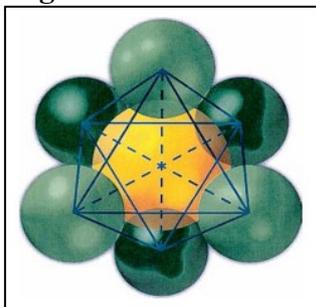
2. REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo serão tratadas: as características do gás SF₆, conceitos relacionados ao efeito estufa, os equipamentos de sistema elétrico que o utilizam e o Inventário de GEE.

2.1 Características físico-químicas e elétricas do gás

Segundo a NBR 16902 o hexafluoreto de enxofre, ou SF₆, é um gás sintético e quando puro é “insípido, incolor, atóxico, não inflamável bastante estável e inerte” formado por uma molécula de enxofre e seis de flúor, como mostra a Figura 1, apresenta uma estrutura octaédrica regular de simetria perfeita com ligações covalentes, seu peso molecular é de 146,05 g/mol. É um gás muito denso, cerca de 5 vezes mais que o ar em condições normais de temperatura e pressão.

Figura 1 – Estrutura molecular do hexafluoreto de enxofre



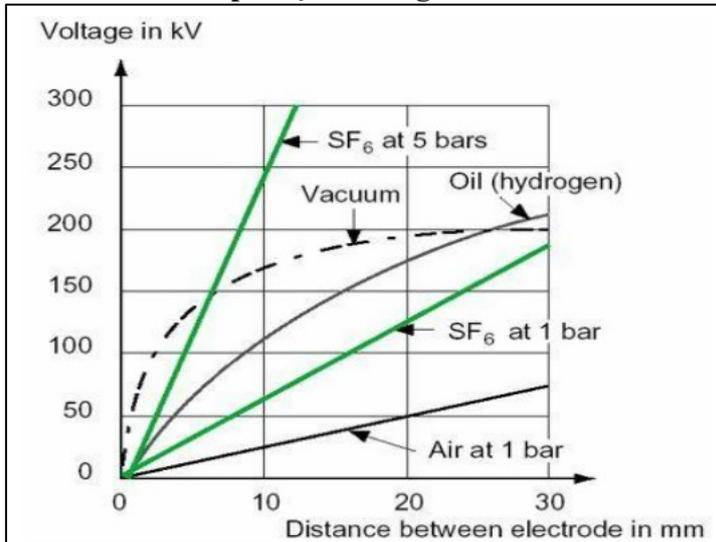
Fonte: (KOCH, 2014, p.71)

³ Do inglês Greenhouse Gases Protocol, ou Protocolo de Gases de Efeito Estufa

⁴ A Cemig Distribuição S/A é maior distribuidora de energia elétrica do Brasil em extensão de rede, atendendo aproximadamente 96% do Estado de Minas Gerais (Fonte: <https://www.cemig.com.br/grupo-cemig/>)

Duas características proporcionam a esse gás eficiência na extinção de arcos elétricos. A primeira é a baixa temperatura e alta energia de dissociação do arco. A segunda característica é sua forte eletronegatividade, conferindo excepcionais características dielétricas porque ele tem a capacidade absorver os elétrons livres no plasma do arco elétrico, assim a condutibilidade do arco é reduzida e extinta à medida que corrente elétrica se aproxima do zero da senoide (MAMEDE, 2013, p. 589). O Gráfico 1 mostra rigidez dielétrica do SF₆ em comparação com ar, óleo e vácuo.

Gráfico 1 – Comparação da rigidez dielétrica do SF₆



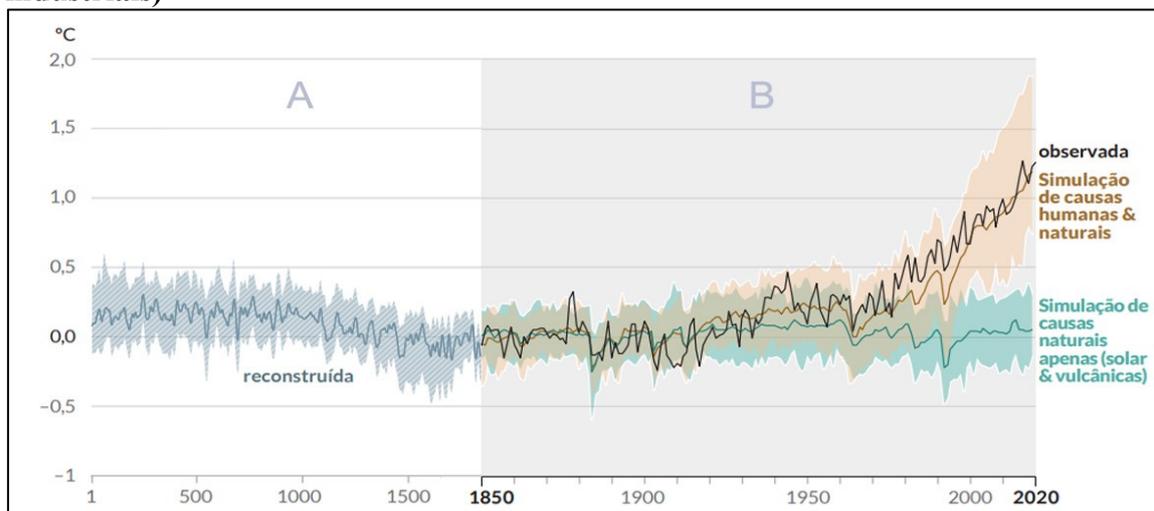
Fonte: (CAI, 2013, p.29)

A alta capacidade de absorção de calor do SF₆, que o torna eficiente na extinção de arco elétrico também lhe confere um pronunciado efeito estufa. (KOCH, 2014, p. 71), sendo o gás de maior PAG – Potencial de Efeito estufa.

2.2 SF₆ e o efeito estufa

O Efeito estufa é um fenômeno natural que ocorre na atmosfera e consiste na retenção de parte do calor do sol, sendo uma das condições que permite a vida terra. O dióxido de carbono – CO₂, metano, os gases vulcânicos e a água são os principais responsáveis pelo processo natural do efeito estufa. Porém a ação humana vem provocando aumento da temperatura na atmosfera em níveis diretamente observáveis desde cerca de 1750, mas a partir da era industrial essas as taxas aumentam disparadamente década após década devido em grande parte ao aumento de emissões de gases de efeito estufa. (ALLAN et al, 2021, p.7). A parte A do Gráfico 2 mostra a reconstrução das mudanças na temperatura da superfície global do ano 1 até 1850, já a parte B compara as mudanças na temperatura da superfície global observada e simulada considerando fatores humanos naturais e fatores apenas naturais de 1850 até 2020.

Gráfico 2 – Mudanças na temperatura da superfície global em relação a 1850-1900 (Pré-industriais)



Fonte: (ALLAN et al, 2021, p.9)

Segundo o Relatório dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável de 2022:

Para limitar o aquecimento a 1,5 °C acima dos níveis pré-industriais, como estabelecidas no Acordo de Paris, as emissões globais de gases de efeito estufa precisam atingir o pico antes de 2025. Em seguida, eles devem diminuir em 43% até 2030, caindo para zero líquido até 2050, de acordo com o IPCC (ONU, 2022, p.).

No pior cenário previsto pelo IPCC se nenhuma política de redução for tomada, até 2050 a temperatura global pode atingir até 2,5°C até 2050 (GT1 p24).

O protocolo de Quioto é um acordo internacional que estabelece metas aos países membros redução de emissão dos GEE proveniente de atividades humanas.

Cada gás contribui de forma diferente para o aquecimento global de acordo com suas características físico-químicas e seu ciclo na natureza. A título de estudos e para comparar os efeitos de cada gás foi desenvolvido o conceito Potencial de Efeito Estufa, ou PAG, para cada tipo de gás, que consiste comparar a quantidade energia absorvida por um uma tonelada de determinado tipo de GEE por um certo período, geralmente 20 ou 100 anos, em relação a mesma quantidade de CO₂ no mesmo período (EPA,2023):

Tabela 1 - PAG de 100 anos dada em toneladas de CO₂ equivalente

Gás	PAG em tCO ₂ e
Dióxido de carbono (CO ₂)	1
Metano (CH ₄)	28
Óxido nitroso (N ₂ O)	265
HFCs (grupo de gases)	4 - 12400
Hexafluoreto de enxofre (SF ₆)	23.500
Trifluoreto de nitrogênio (NF ₃)	16.100
PFCs (grupo de gases)	6630 - 17400
Trifluorometil pentafluoreto de enxofre	17.400
Perfluorociclopropano	9.200

Fonte: (GHG Protocol)

A partir da Tabela 1 acima é evidenciado porque o SF₆, tão eficiente como material isolante utilizado em equipamentos elétricos e em uso ainda crescente, é foco de preocupação para as empresas do sistema elétrico.

2.3 Inventário de GEE

O primeiro passo a caminho da redução das emissões é a identificação dos agentes, das fontes, do contexto e a quantificação das emissões. Nesse sentido os Inventários de GEE publicados pelas empresas são importantes mecanismos de autoconhecimento para nortear as políticas e investimentos para redução dos GEE.

O Registro Público de Emissões é uma plataforma mantida pela FGV⁵ onde estão reunidas a divulgação dos inventários da de GEE das organizações membros. Nesse sistema estão disponibilizadas ferramentas de cálculo de emissões de gases, bem como procedimentos e suportes para as organizações que desejam elaborar e publicar seus inventários em conformidade com ABNT NBR 14064. Nela também são atualizados os valores dos PAG.

As fontes de emissões e sumidouros⁶ são divididas em três escopos:

Escopo 1: combustão estacionária, combustão móvel, emissões fugitivas, processos industriais e uso de material; tratamento de efluentes e resíduos sólidos; processos agrícolas; remoções de GEE;

Escopo 2: emissões indiretas por uso de energia da empresa provenientes do consumo de eletricidade, vapor, calor e resfriamento.

Escopo 3: são emissões indiretas fora do escopo do 2 ligadas diretamente às operações da empresa, como compra de matérias primas, produção, viagens de funcionários, geração de resíduos etc.

As emissões de gás SF₆ são caracterizadas como emissões fugitivas do escopo 1. Suas fontes são fugas indevidas provenientes de das emissões naturais e toleradas por normas, defeitos de vedação, ou incidentes que resultam na perda total do gás para a atmosfera.

O cálculo de emissão fugitiva do escopo 1 é feito de acordo com a Fórmula 1 utilizada pela ferramenta de cálculo do Programa *GHG Protocol*.

Fórmula 1

$$ef = \frac{mf.PAG}{1000}$$

Onde:

ef = emissão fugitiva em toneladas equivalente de CO₂, ou tCO₂e;

mf = massa fugitiva em Kg;

PAG = valor adimensional que compara o potencial de aquecimento global de uma tonelada de um determinado GEE com uma tonelada de CO₂, ver Tabela 1.

A fórmula acima é tudo o que a ferramenta de cálculo oferece como contabilização para as emissões do Escopo 1. Ou seja, parte do pressuposto que já existe a informação da massa fugitiva, mas não detalha, nem fornece metodologia de como contabilizar tal massa.

⁵ Surgiu em 1944 com objetivo de capacitar profissionais para administração pública e privada, com a missão de estimular o desenvolvimento socioeconômico nacional (Fonte: <https://portal.fgv.br/institucional>)

⁶ Sumidouros: “Qualquer processo, atividade ou mecanismo que retire gases de efeito estufa (ou seus precursores) da atmosfera, armazenando-os por um período de tempo. Os sumidouros realizam o sequestro de carbono, atuam como ralos, retirando da atmosfera mais carbono do que emitem. Florestas e oceanos são sumidouros de carbono” (Fonte: <http://redd.mma.gov.br/pt/component/k2/item/66-glossario>)

2.4 Equipamentos que usam SF₆

O SF₆ é usado em equipamentos elétricos podendo assumir duas funções: a de extinção de arco elétrico; e a de isolamento entre condutores e entre condutores e massa de terra. Para delimitação desse estudo os equipamentos que serão apresentados são os utilizados e classificados pela Cemig D na apresentação dos dados do Inventário de GEE.

2.4.1 Chave seccionadora em rede aérea

São dispositivos usadas para abrir e fechar circuitos em redes de MT⁷. Além de conduzirem corrente nominal em condições normais, também conduzem, correntes de condições anormais - como as de curto-circuito, por um determinado período específico (NBR 6935, 1985). Essas seccionadoras são instaladas em postes de rede aérea, tal como mostra a Figura 2.

Figura 2 - Chave SF₆ da rede aérea



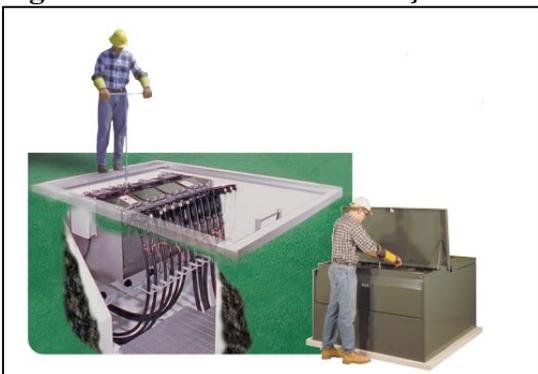
Fonte: <https://www.istockphoto.com>

2.4.2 Painel de Distribuição de Rede Subterrânea

Os painéis de distribuição subterrânea são equipamentos que possuem interruptores de cargas e interruptores de falta à vácuo rearmáveis para manobras e proteções em redes de MT. O conjunto fica contido em um tanque de aço soldado, selado e com isolamento a gás SF₆ (S&C, 2022). Esses painéis foram desenvolvidos para terem o mínimo de manutenção possível e trabalhar em condições extremas, inclusive submersas. São usados principalmente em regiões centrais de grandes cidades. Na Figura 3 é possível ver as possibilidades de operação do painel quando o operador está acima do nível da chave e quando ambos estão ao nível do solo.

⁷ Segundo a regulação da ANEEL a Alta Tensão, AT, vai de tensão entre fases cujo valor eficaz é igual ou superior a 69 kV e inferior a 230 kV. E a Média Tensão, MT, vai da tensão entre fases cujo valor eficaz é igual ou superior a 2,3 kV e inferior a 69 kV (ANEEL- PRODIST 1)

Figura 3 – Painel de Distribuição Subterrânea Vista S&C



Fonte: (S&C, 2022, p.1)

2.4.3 Disjuntores a SF₆

Disjuntores são equipamentos capazes de interromper e restabelecer correntes em circuitos elétricos em condições normais ou de falta. As principais características dos disjuntores é a extinção de arcos elétricos em um tempo mais curto possível. Esses equipamentos operam em regime constante por vezes permanecendo muito tempo em um estado aberto ou fechado e deve funcionar corretamente com todas as suas funções mesmo depois da inércia (MAMEDE, 2013, p.580). Na Cemig D são utilizados disjuntores de AT, como o da Figura 4, e de MT.

Figura 4 – Disjuntor a SF₆ de 138 KV



Fonte: Do Autor

2.4.4 Subestações Isoladas a Gás - GIS⁸

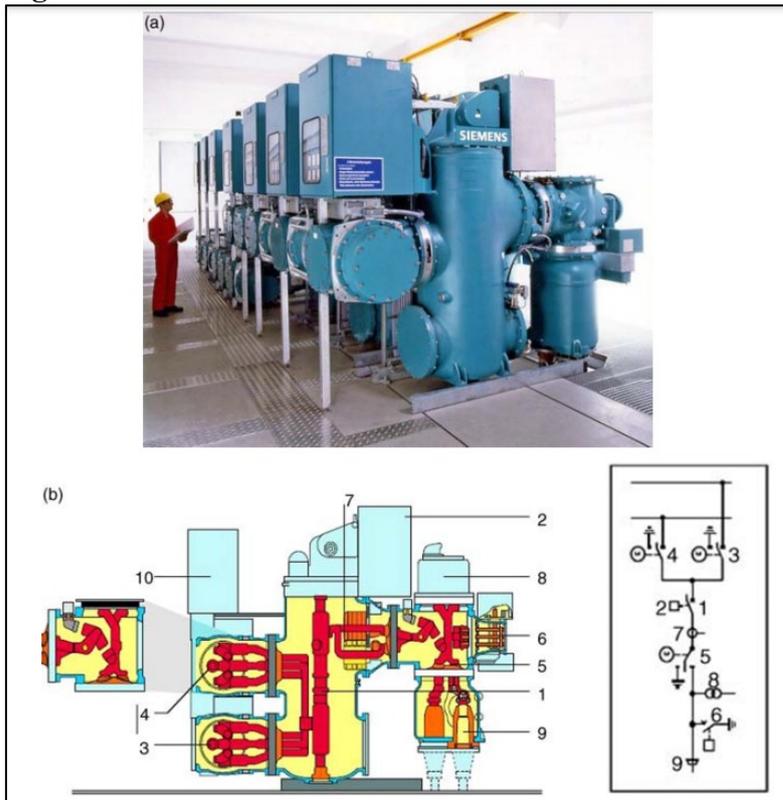
As GIS ficam abrigadas com exceção do transformador e dos bancos de capacitores, todos os demais equipamentos que se vê nas subestações convencionais são encapsulados dentro de módulos bastante compactos. A proximidade dos condutores de alta tensão dentro desses compartimentos só é possível em função da alta rigidez dielétrica característica do gás. Segundo KOCH (2014, p.41), no caso da GIS, o impacto das condições ambientais não afeta diretamente a parte de alta tensão, o que melhora os números de confiabilidade. O autor afirma

⁸ Do inglês: *Gas Insulated Substations*

que para uma GIS de 110 kV, o tempo médio entre falhas é de mais de 10.000 anos com equipamento em serviço.

A Figura 5 mostra um projeto de GIS de 110 KV. Em **a**: GIS de 110KV – disjuntor vertical e invólucro trifásico. Em **b**: 1- Unidade interruptora do disjuntor, 2 - mecanismo de acionamento por mola do disjuntor, 3 e 4 - barramentos I e II com chaves seccionadoras e de aterramento, 5 - módulo de saída com chaves seccionadora e de aterramento, 6 - seccionador de aterramento à prova de fechamento - alta velocidade, 7- transformador de corrente, 8 - transformador de tensão, 9 - extremidade de vedação do cabo e 10 - cubículo de controle.

Figura 5 - GIS de 110 kV



Fonte: (KOCH, 2014, p.24)

2.4.5 Módulos de Manobras Híbrido Compacto - MMHC

Módulos híbridos, ver figura 6, são um conjunto de equipamentos em um mesmo encapsulamento. Dentro dele encontra-se seccionadores, disjuntores, chaves de aterramento, transformadores de medição. Dá para dizer que é um meio termo entre a GIS e as subestações isoladas a ar. Do ponto de vista econômico são mais baratas e menores que as GIS. Esses módulos são usados em subestações convencionais onde a chegada das linhas de alta tensão são isoladas a ar e desabrigadas.

2.4.6 Subestações Compactas Integradas - SECI

Nesse caso não se trata de um equipamento, mas de um modelo de subestação cuja principal característica é serem mais compactas que as subestações convencionais isoladas a ar, mas não totalmente encapsuladas como as GIS. Possuem vários equipamentos montados sobre uma mesma plataforma metálica. Na Figura 6 vê-se na entrada da AT, ou seja, na chegada da linha de transmissão, encontra-se um MMHC. Na MT, ou seja, na saída dos alimentadores encontram-se um painel de distribuição semelhantes aos painéis da rede subterrânea.

Figura 6 – Instalação de uma SECI



Fonte: (<https://www.cemig.com.br/release/>)

3. METODOLOGIA

Este trabalho é uma pesquisa aplicada com objetivo de apresentar uma metodologia de contabilização de emissões fugitivas de gás SF₆ em subestações de até 138 KV e em redes aéreas e subterrâneas de média tensão até 23 KV.

É possível adotar quatro casos de contabilização de emissões fugitivas de gás SF₆:

- 1º Caso – Equipamentos com sistemas de pressão selado para gás;
- 2º Caso – Equipamentos sistema de pressão fechado para gás;
- 3º Caso - Sinistro de equipamento;
- 4º Caso – Desativação.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Contabilização de emissão fugitiva em equipamentos com sistemas de pressão fechado para gás

A NBR 16902 define esses equipamentos como de volume que é complementado somente periodicamente por meio de conexão manual a uma fonte de gás externa. Os equipamentos que se enquadram nessa categoria são os disjuntores, os módulos de manobras híbridos e os compartimentos das GIS.

É preciso lembrar que todos os equipamentos possuem algum grau de vazamento que é tolerado por norma, ainda que mínimo. Segundo KOCH, algumas das primeiras GIS, que se encontra na Alemanha, apresentaram taxas de vazamentos de 0,5% ao ano de acordo com padrões IEEE e IEC (2014, p.41). Ocorre, e não muito raro, que devido à desgaste de materiais de vedação as taxas de fuga sejam maiores que o previsto e seja necessário uma ou mais reposições ao longo da vida útil. Então para efeitos de contabilização a massa de gás que for complementada é de fato a massa fugitiva.

Se o vazamento de gás for um problema de longo tempo a massa de gás perdida será conhecida na ocasião da complementação.

Existem duas maneiras conhecer a massa de gás fugitiva.

4.1.1 Pesagem de cilindro

Através da diferença entre os resultados de pesagem dos cilindros com reserva de gás, antes e após a complementação. É a maneira mais assertiva, mas traz alguns inconvenientes como o de além de ser um item a mais envolvido na manutenção ela própria em algum momento precisa de manutenção.

O ideal é que para cada equipamento ou compartimento sejam feitas as pesagens iniciais e finais. Caso sejam feitas apenas uma pesagem inicial e um final para complementação de mais de um equipamento, perde-se a rastreabilidade e controle sobre cada dele.

Fórmula 2

$$mf = pi - pf$$

Onde:

mf = massa fugitiva em Kg;

pi = peso inicial do cilindro com reserva de gás em Kg;

pf = peso final do cilindro com reserva de gás Kg.

4.1.2 Cálculo pela diferença de pressão

Para esse método considera-se o gás SF₆ como ideal na temperatura ambiente, e assim aplica-se a equação dos gases perfeitos:

Fórmula 3

$$P.V = \frac{m}{M} R.T$$

Onde:

P = pressão;

V = volume;

m = massa do gás;

M = massa molar do gás;

R = constante universal dos gases, varia de acordo com as unidades utilizadas;

T = temperatura em Kelvin.

Como a massa complementada varia em função da pressão, e o procedimento de complementação é feito a uma determinada temperatura, então:

Fórmula 4

$$mc = mf = \int_{pi}^{pf} \frac{V.M}{R.Ta} dp = \frac{M}{R.Ta} . V . (Pf - Pi)$$

O volume é do equipamento⁹, então se isolar *V* na Fórmula 3 ele é substituído pelos dados de placa do equipamento na Fórmula 4, ficando:

Fórmula 5

$$mf = mp = \frac{mp . (Tp + 273) . (Pf - Pi)}{Pp . (Ta + 273)}$$

⁹ Ver exemplo na Figura 9

Onde:

mf = massa fugitiva em Kg;

mc = massa complementada em Kg;

mp = massa de placa em Kg;

Pp = pressão nominal de placa;

Pf = pressão final deixada no equipamento após a complementação;

Pi = pressão inicial encontrada no equipamento antes da complementação;

Tp = temperatura de placa em °C;

Ta = temperatura ambiente em °C

A complementação deve obedecer aos requisitos técnicos e de segurança tal como preconiza a NBR 16902. Para que o cálculo seja mais preciso os manômetros precisam estar calibrados.

4.2 Contabilização de emissão fugitiva em equipamentos com sistemas de pressão selado para gás

A NBR 16902 define esses equipamentos como de volume para o qual nenhum processo adicional de manuseio de gás ou realização de vácuo é necessário por toda sua vida útil esperada (p.12). Os equipamentos que se enquadram nessa categoria são as chaves de RDA e RDS até 23KV vistos nas seções 2.4.1 e 2.4.2.

Esses equipamentos podem possuir ou não indicador de pressão interna, e quando o tem não é com objetivo de avisar nível de tensão que exija reposição de gás, mas para solicitar a troca do mesmo.

No caso desses equipamentos é salutar adotar uma posição conservadora a título de contabilização de emissão fugitiva assumir um certo percentual de fuga dentro dos padrões tolerados por norma. Esses valores podem variar de 0,1% a 0,5 % dependendo da idade, do nível de tensão e da norma atendida pelo equipamento.

Segundo KOCH testes de estanqueidade demonstram que a taxa de vazamento de SF₆ de uma GIS não excede o valor admissível:

“de acordo com os padrões IEEE e IEC a taxa de vazamento não deve exceder 0,5% ao ano por compartimento de gás (consulte IEC 62 271-1 [1]). Alguns fabricantes de GIS fornecem taxas de vazamento uniformes de 0,1% ao ano por compartimento de gás” (KOCH, 2014, p.38)

A NBR ISO 14064 deixa margem para hipóteses conservadoras quando há parâmetros altamente incertos e alerta para não subestimar nem superestimar (NBR ISO 14064, p.5). Portanto é imprudente tanto considerar zero emissão quanto exceder para além dos limites estabelecidos por normas.

Fórmula 6

$$mf = mp * per$$

Onde:

mf = massa fugitiva em Kg;

mp = massa de placa Kg;

per = percentual de fuga que pode variar entre 0,1% e 0,5% ao ano

4.3 Contabilização de emissão fugitiva emissão fugitiva em casos de sinistro

Em casos de acidentes que envolvem perda do equipamento com danos na câmara de extinção que provoque fuga total do gás, deve ser contabilizada a massa nominal de gás desse equipamento.

Fórmula 7

$$mf = mp$$

Onde:

mf = massa fugitiva em Kg;

mp = massa de placa em Kg;

4.4 Contabilização de emissão fugitiva em casos de desativação

Quando um equipamento for desativado por motivos que não sejam da seção 4.3 serão consideradas as emissões fugitivas, mesmos que nunca tenha ocorrido complementação de gás. Para isso deve-se utilizar o método de diferença de pressão, onde a pressão final será a nominal e a inicial será a da leitura do manômetro no momento da desativação, ver fórmula 8.

Fórmula 8

$$mf = \frac{mp \cdot (Tp + 273) \cdot (Pp - Pd)}{Pp \cdot (Ta + 273)}$$

Onde:

mf = massa fugitiva em Kg;

mp = massa de placa em Kg;

Pp = pressão nominal de placa;

Pd = pressão encontrada no equipamento no momento da desativação;

Tp = temperatura de placa em °C;

Ta = temperatura ambiente em °C

Se o equipamento desativado não possuir manômetro, considerar a taxa anual adotada no item 4.2 e multiplicar pelos anos de vida naquele local de instalação ou pela quantidade de anos desde a última complementação, nessa situação calcular a emissão fugitiva usando a Fórmula 9.

Fórmula 9

$$mf = mp * per * qa$$

Onde:

mf = massa fugitiva em Kg;

mp = massa de placa em Kg;

qa = anos de vida no local de instalação, ou quantidade de anos desde a última complementação;

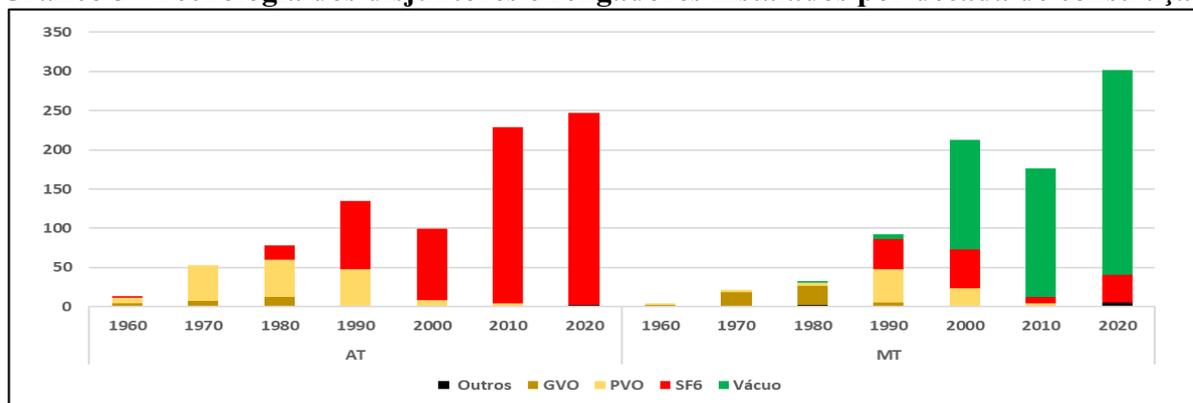
per = percentual de fuga que pode variar entre 0,1% e 0,5% ao ano

A seguir será apresentado como os equipamentos que usam SF₆ vem ganhando espaço no sistema elétrico, para isso será visto como tem acontecido com a Cemig D, e seus resultados da contabilização das emissões fugitivas de 2020 até 2022.

4.5 Uso de Gás SF₆ na Cemig D

Segundo MAMEDE (2013, p.593) o SF₆ é usado para interrupção de arcos elétricos em disjuntores e religadores e tem substituído os equipamentos GVO¹⁰ e PVO¹¹ por estes serem de tecnologia ultrapassada. Isso pode ser visto na prática através do Gráfico 3, que mostra que dentre os equipamentos atualmente instalados na Cemig D os disjuntores e religadores PVO, GVO e de outras tecnologias tendem a ser substituídos por tecnologias mais eficazes. Percebe-se que na MT a tendência é o aumento de equipamentos à vácuo, enquanto na AT há aumento de equipamentos apenas a SF₆. Nesse gráfico não entra em consideração as GIS, SECI e MMHC.

Gráfico 3 –Tecnologia dos disjuntores e religadores instalados por década de construção



Fonte: Cemig D

Em relação construção de subestações, desde o ano 2000 a Cemig passou a adotar novos padrões para atender as regras regulamentadoras mais exigentes associadas a prudência nos investimentos, remuneração de ativos, qualidade de atendimento a cargas, consumidores e acessantes (ASSIS et al, 2019). Os novos padrões de subestação são: GIS de 40MVA; subestações híbridas de 25 MVA; SECI de 10, 15 e 25 MVA; e subestações de integração para conexão de novos consumidores e acessantes, que usam módulos híbridos.

Segundo ASSIS (2019), a Cemig já está na segunda geração de SECI, e desde a primeira geração houve redução de 25% do pátio, segundo o autor, custo de implantação de uma SECI é cerca de 50 % menor, comparado a subestação convencional similar, enquanto os custos de manutenção são reduzidos, em torno de 80%.

4.6 Contabilização das emissões fugitivas pela Cemig D

Quanto aos equipamentos selados, do ponto de vista prático não há como monitorar se esses equipamentos estão vazando. De acordo com a proposta de construção, pelo nível de pressão de gás e tensão de operação, eles são feitos para não precisarem de complementação ao longo de toda a vida útil. Dessa forma a Cemig D assume a taxa de emissão de 0,5% ao ano. Trata-se, no entanto de um posicionamento conservador adotado pela empresa. É conservador

¹⁰ Grande Volume de Óleo

¹¹ Pequeno Volume de Óleo

Figura 8 – Preenchimento da OM com dados sobre a diferença de pressão

Fonte: Cemig D

Figura 9 – Cálculo e contabilização da emissão fugitiva em programa

	φVer	φAzu	φBra	Total
Tp	20	20	20	20
Mp	12			12
Ta				30
PP	0,74	0,74	0,74	0,74
Pi				0,66
Pf				0,74
MC				1,2544822049

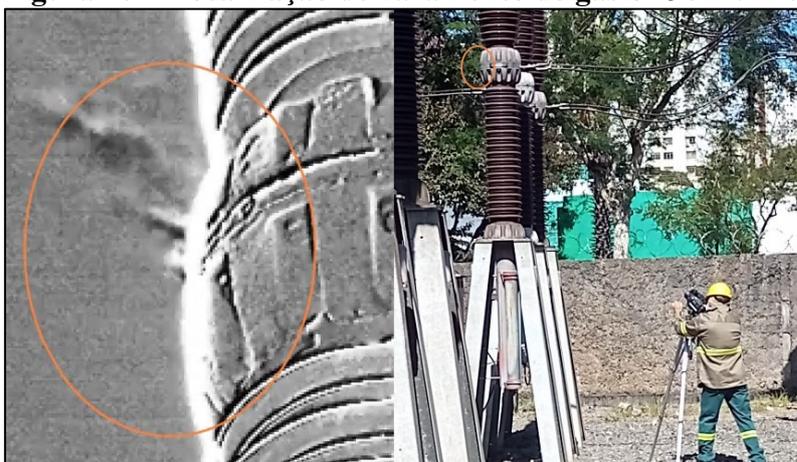
Fonte: Cemig D

Se as informações necessárias para contabilização da massa fugitiva¹⁵ deixarem de ser registradas na ocasião da complementação, por erro de procedimento, considera-se a pressão inicial como a pressão de primeiro de alarme, e a pressão nominal considera-se a pressão final.

Quando um equipamento é recorrente em complementações, é necessário identificar o local do vazamento e programar uma intervenção para substituição das vedações. A Figura 10 mostra o trabalho de localização de vazamento de gás SF₆ em um disjuntor de 138KV e a imagem do gás escapando feita por uma câmera de detecção de infravermelho.

¹⁵ Pesagem do cilindro, ou pressões iniciais e finais no equipamento.

Figura 10 – Localização de vazamento de gás SF₆ em um disjuntor



Fonte: Cemig D

4.8 Resultado das contabilizações

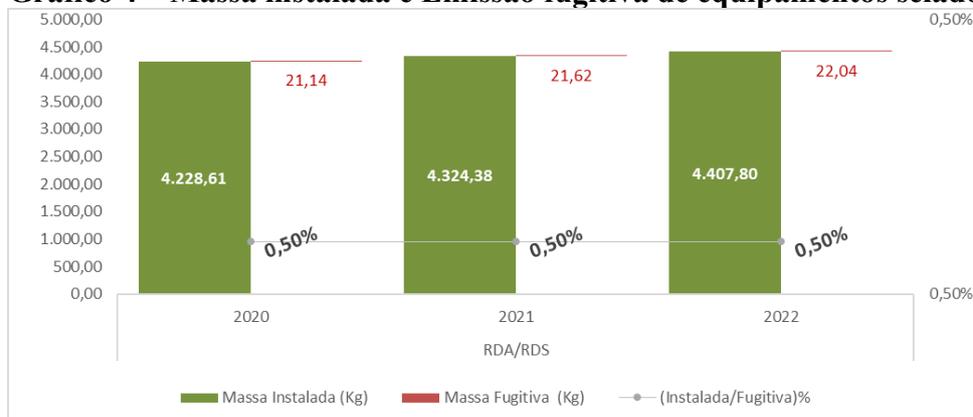
O resultado da última contabilização das emissões fugitivas referente ao ano de 2022 se encontra na Tabela 2, enquanto a evolução da relação de massa instalada e massa fugitiva por tipo de equipamento pode ser vista nos Gráficos 4, 5 e 6.

Tabela 2 – Cálculo das emissões fugitivas de 2022 por tipo de equipamento

Equipamentos	Massa Instalada (Kg)	Massa fugitiva (Kg)	Emissão fugitiva (tCO ₂ e)
Equipamentos selados	4.407,80	22,04	517,92
Disjuntores e religadores	6.386,47	89,36	2.099,95
GIS/SECI/MMHC	21.107,37	0,00	0,00
Cilindros e Máquinas de tratamento	1434,66	-	-
Total	33.336,30	111,40	2.617,86

Fonte: Anexo 2

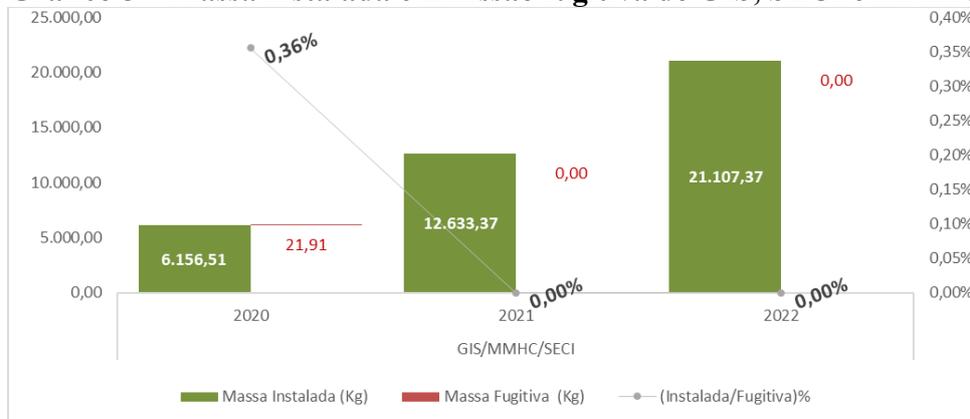
Gráfico 4 – Massa instalada e Emissão fugitiva de equipamentos selados



Fonte: Anexo 2

No gráfico 4 acima percebe-se que a massa instalada dos equipamentos selados aumenta, mas a taxa de emissão se mantém 0,5% porque não se trata de emissões que se podem medir, mas consideradas por conservadorismo.

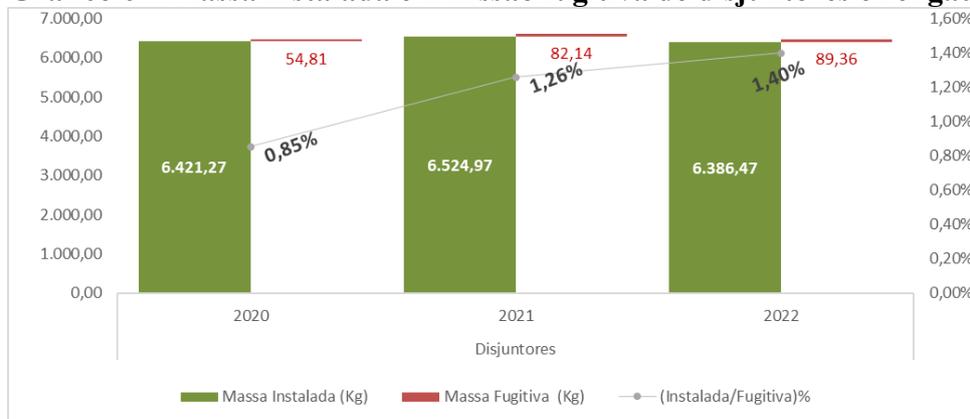
Gráfico 5 – Massa instalada e Emissão fugitiva de GIS, SECI e MMHC



Fonte: Anexo 2

No Gráfico 5 percebe-se o salto da massa instaladas nesses tipos de subestações, mas surpreendentemente não houve reposição de gás nos últimos anos. Se nesse período estiver ocorrendo pequenos vazamentos em algum momento haverá uma sinalização de 1º estágio, quando isso acontecer no momento da complementação será conhecido o quanto o equipamento perdeu de SF₆.

Gráfico 6 – Massa instalada e Emissão fugitiva de disjuntores e religadores



Fonte: Anexo 2

O caso dos disjuntores é mais preocupante pois como mostra o Gráfico 6 há uma tendência de aumento da taxa de massa fugitiva. Para início de análise é necessário lembrar que idealmente a taxa de vazamento tolerada por norma, é de 0,5% ao ano, ver seção 4.1. Logo todas as complementações de gás já são para atendimentos de casos atípicos, e a Tabela 3 mostra que alguns casos de reposições de gás se referem a recorrências de equipamentos específicos. Isso aponta para necessidade manutenções mais assertivas ou substituição.

Tabela 3 – Comparação das emissões novas e recorrentes

	Ocorrências	Nº de equipamentos envolvidos	Massa fugitiva (Kg)	% da massa fugitiva em relação a massa instalada Disj.& Rel.
Nova ocorrência	17	17	14,74	0,23%
Recorrência	44	24	58,49	0,92%
Desativações/Sinistros		12	16,12	0,25%
Total	61	41	89,36	1,40%

Fonte: Fonte: Anexo 1

4.9 O futuro do SF₆

O SF₆ tem sido amplamente utilizado como gás isolante em equipamentos de alta tensão devido às suas propriedades únicas. No entanto, seu impacto ambiental é preocupante, uma vez que possui um potencial de aquecimento global muito alto e pode permanecer na atmosfera por milhares de anos. Concessionárias e órgãos governamentais reconhecem a necessidade de reduzir o uso do SF₆, mas até recentemente não havia alternativas viáveis disponíveis. No entanto, avanços significativos foram alcançados nos últimos anos por meio de extensas pesquisas e desenvolvimento de fornecedores de equipamentos.

As soluções passam desde melhorias nas tecnologias e uso de materiais já existentes, até o desenvolvimento de novos materiais.

A Siemens vem desenvolvendo vários produtos com objetivo de eliminar ou reduzir o uso de SF₆. Um deles é um projeto de GIS até 145KV, o 8VN1, baseado no uso de duas tecnologias já conhecidas, onde nos compartimentos de extinção de arco é usado vácuo e nos compartimentos de isolamento é usado ar puro com 80% de N₂ e 20% de O₂ (SIEMENS, 2021).

Na linha de desenvolvimento de novos materiais destaca-se uma mistura de gás à base de fluoronitrila desenvolvida pela 3M sob o nome comercial Novec™ 4710 para aplicações de alta tensão. Segundo HEIMBACH (2023) uma GIS de 145 kV sem SF₆ está disponível comercialmente desde 2021, para 2023 estão previstos o primeiro disjuntor de 420KV utilizado em uma fornecedora no Estados Unidos que atende 4 milhões de consumidores.

Os gases substitutos do SF₆ estão atualmente mais restritos à Europa e aos Estados Unidos em termos de regulamentações e implementação. Na Europa, a legislação dos gases-F¹⁶ e a Diretiva de Emissões Industriais, tem impulsionado a busca por alternativas ao SF₆. Nos Estados Unidos, a Agência de Proteção Ambiental EPA também tem trabalhado para restringir o uso de gases fluorados. No entanto, é importante destacar que a conscientização sobre os impactos ambientais do SF₆ e a busca por alternativas mais sustentáveis está se expandindo globalmente, com países ao redor do mundo adotando medidas para reduzir seu uso.

A um primeiro momento a solução mais adequada parece ser a de encontrar um gás substituto. Muitos equipamentos existentes ainda utilizam o SF₆ e substituí-los por completo pode ser desafiador e oneroso. Portanto é de extrema importância que o gás substituto se adeque às instalações legadas.

Por meio de entrevistas com engenheiros da Cemig, foi revelado que a empresa está discutindo internamente a implementação de um projeto piloto de uma subestação livre de SF₆. Empresas como Siemens, Hitachi, ABB e GE têm apresentado ocasionalmente seus produtos à Cemig oferecendo um amplo portfólio de produtos, ver Anexos 3 e 4. Essas iniciativas refletem o interesse crescente na busca por alternativas ao SF₆ e destacam a importância de explorar as soluções oferecidas por diversas empresas do setor.

¹⁶ Regulamento (UE) N.O 517/2014 Do Parlamento Europeu e do Conselho. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014R0517>

5. CONCLUSÕES

A metodologia apresentada cobre a maior parte das situações enfrentadas no dia a dia da manutenção em equipamentos a SF₆. O aprimoramento da apuração das emissões fugitivas é uma busca constante que pode ser aperfeiçoada do ponto de vista metodológico e do ponto de vista técnico. Do ponto de vista técnico, entenda-se investir em melhores recursos que permitem mais precisão na quantificação da massa fugitiva, por exemplo utilizar mais o método de pesagem de cilindros que o de cálculo pela diferença de pressão. Do ponto de vista metodológico, tome-se como exemplo, ter que ponderar uma referência ótima entre a ausência de dados e lançar mão de algum conservadorismo, em situações em que não é possível acompanhar as emissões fugitivas nem fazer complementações.

Os inventários de GEE contribuem positivamente para conscientização dos impactos ambientais do negócio da empresa e podem influenciar nos processos de aquisição, utilização e manutenção dos ativos. Na Cemig D isso pode ser observado em relação aos atendimentos aos casos de vazamento de SF₆ e na busca da precisão na contabilização das emissões fugitivas desse gás.

Todo o cuidado com as manutenções dos equipamentos, no entanto, não impede o aumento pela demanda desse gás. O sistema elétrico é um setor que está sempre em expansão, isso exige mais investimentos das concessionárias de energia e conseqüentemente mais equipamentos que utilizam o SF₆. Desse modo não basta apenas a preocupação com os aspectos da rotina da manutenção para mitigar as emissões de gases de efeito estufa, porém o desafio muito maior é a substituição do SF₆ por soluções ecologicamente mais seguras. Se a Cemig ainda não o fez é porque essas tecnologias estão maioritariamente sendo exploradas na Europa devido a maiores rigores na legislação ambiental naquele continente. A adoção de gases substitutos será uma boa alternativa pois permite a continuidade das operações sem a necessidade de substituir todos os equipamentos, resultando em economia de recursos e investimentos

Ao adotar tecnologias mais sustentáveis, as empresas podem se posicionar como líderes na mitigação das mudanças climáticas, ganhando vantagem competitiva e fortalecendo sua reputação. Portanto usar uma metodologia com métodos adequados e embasados de contabilização de emissões fugitivas de GEE é uma estratégia essencial para promover a sustentabilidade, alinhar-se às demandas do mercado e contribuir para a preservação da natureza, protegendo ecossistemas e recursos naturais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT NBR16902. **Hexafluoreto de enxofre (SF₆) para equipamentos elétricos — Requisitos para manutenção.** ABNT: 2020

ABNT NBR ISO 14064. **Guia de Implementação - Gestão de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (GEE).** ABNT: 2015

ABNT 6935. **Seccionador, Chaves de Terra e Aterramento Rápido.** ABNT. 1985. Disponível em: https://kupdf.net/download/nbr-6935_590a024edc0d600e7a959e86_pdf

ALLAN, P. et al. **Mudança do Clima 2021 - A Base Científica - Contribuição do Grupo de Trabalho I ao Sexto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima.** Painel Intergovernamental Sobre mudança do Clima, 2021, Suíça Esta tradução foi realizada pelo Governo do Brasil, e não é uma tradução oficial do IPCC, 2021. Disponível em: “https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/relatorios-do-ipcc/arquivos/pdf/IPCC_mudanca2.pdf”

ALLEN, M., et al. **Aquecimento Global de 1,5°C - Relatório especial do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) sobre os impactos do aquecimento global de 1,5°C acima dos níveis pré-industriais e respectivas trajetórias de emissão de gases de efeito estufa, no contexto do fortalecimento da resposta global à ameaça da mudança do clima, do desenvolvimento sustentável e dos esforços para erradicar a pobreza.** Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas. 2018. Suíça. Versão em português publicada pelo MCTIC em julho de 2019, Brasil. Disponível em: “<https://doi.org/10.1017/9781009157940.004>”

Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. **Manual de Controle Patrimonial do Sistema Elétrico - MCPSE.** Revisão 2. 2014

Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, Módulo 1 – Glossário de termos Técnicos.** 2021.

ASSIS, S.C., COSTA, P. R. F. C., CARVALHO, E. N., MURTA, M. L., BARBOSA A. V. N., MOTTA, I.L.M., OLIVEIRA L.R.. **Subestação Compacta Integrada - SECI, Um Padrão Estratégico De Sucesso Para Expansão Do Sistema Elétrico Da Cemig.** XXV SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica: Belo Horizonte: 2019

CEMIG. **Inventário de Emissões de Gases de Efeito Estufa – 2021.** Belo Horizonte, 2022.

Disponível em: “<https://www.cemig.com.br/wp-content/uploads/2022/05/inventario-gee-2021.pdf>”

CEMIG. **Inventário de Emissões de Gases de Efeito Estufa – 2020.** Belo Horizonte, 2021. Disponível em: “<https://www.cemig.com.br/wp-content/uploads/2021/04/inventario-gases-efeito-estufa-2020.pdf>”

United States Environmental Protection Agency – EPA. **Understanding Global Warming Potentials.** Consultado em maio de 2022. Disponível em:

<https://www.epa.gov/ghgemissions/understanding-global-warming-potentials>

FRONTIN, S. O. (Org.), **Equipamentos de Alta Tensão** – Prospecção e Hierarquização de Inovações Tecnológicas

GE Grid Solutions. **The Alternative to SF₆ for High Voltage Applications**. Brochure-EN-2021-04-Grid-GS-L3-1001. General Electric Company. 2021

GHG Protocol - **Programa Brasileiro GHG Protocol**. Consultado em maio de 2023.

Disponível em:

<https://eaesp.fgv.br/centros/centro-estudos-sustentabilidade/projetos/programa-brasileiro-ghg-protocol>

HEIMBACH, M. **Eliminating SF₆ in High-Voltage Switchgear Paving the Way for More Sustainable Grids**. Electric Energy Online, 2023

Disponível em: <https://electricenergyonline.com/energy/magazine/1376/article/>

HELBIG, D. **Sustainable high-voltage products Blue Portfolio**. Erlangen: SIEMENS AG, 2019a

KOCH, H., **Gas Insulated Substations**. IEEE Press. 2014

MAMEDE Filho, J. **Manual de Equipamentos Elétricos**. 4º ed. (Versão Digital) – Rio de Janeiro: LTC, 2013a.

S&C Electric Company. **Painel de Distribuição Subterrânea Vista®**. Folha de Instrução 681-510P. 2022a.

Disponível em: <https://www.sandc.com/globalassets/sac-electric/documents/public---documents/sales-manual-library---external-view/folha-de-instrucoes-681-510p.pdf?dt=638203927956025415>

STOLLER, P. C., HENGSTLER, J., DOIRON, C. B., SCHEEL, S., SIMKA, P., e MÜLLER, P. **Environmental aspects of high voltage gas insulated switchgear that uses alternatives to SF₆ and monitoring and long-term performance of a pilot installation**. Cigré, 2018

United Nations – ONU. **The Sustainable Development Goals Report. 2022**. Disponível em: <https://unstats.un.org/sdgs/report/2022/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2022.pdf>

XIAOLEI, C. **Elimination of SF₆ From Transmission System Equipment**, 2013

ANEXO 1 – Contabilização das emissões fugitivas a partir das respostas das OM, desde 2020

Ordem de Manutenção	Regional*	Código do equipamento	Tensão Nominal (KV)	Massa Nominal (Kg)	Massa fugitiva (Kg)
2302708544	CE	DISJ30138-2	138	5	0,69
2302709715	CE	DISJ01472-0	138	16,2	4,46
2302712215	CE	DISJ30133-3	138	6	0,92
2302713266	CE	DISJ01472-0	138	16,2	2,90
2302714388	CE	DISJ01471-2	138	16,2	4,46
2302715024	CE	DISJ00207-1	138	12	1,56
2302718434	CE	DISJ00179-2	138	18	2,48
2302719505	CE	DISJ30094-7	138	8	1,29
2302721562	CE	DISJ30255-4	138	8	1,29
2302722954	CE	DISJ01471-2	138	16,2	2,45
2302726418	CE	DISJ00639-5	138	18	3,54
2302727356	CE	DISJ30143-2	138	8	1,29
2302746742	CE	DISJ01753-3	138	7,2	1,16
2302758330	CE	DISJ00207-1	138	12	1,56
2302780028	CE	DISJ30138-2	138	5	0,69
2302782916	CE	DISJ30138-2	138	5	0,83
2302712557	CE	DISJ31740-4	69	4	0,57
2302719547	CE	DISJ00777-3	138	10	2,21
2302725472	CE	DISJ00777-3	138	10	2,40
2302807343	CE	DISJ31740-4	69	4	0,57
2302787045	CE	DISJ00207-1	138	12	1,55
2302794197	CE	DISJ01753-3	138	7,2	1,15
2302718666	SU	DISJ01149-4	138	5	0,04
2302806794	SU	DISJ01149-4	138	5	0,06
2302787971	MQ	DISJ01031-4	138	8	9,44
2302823598	MQ	DISJ02130-3	138	5	4,99
2302786714	OE	DISJ00923-3	138	10	2,20
2302786718	OE	DISJ00882-1	138	10	1,80
2302790512	OE	DISJ01942-2	138	5	0,80
2302687997	OE	DISJ01942-2	138	5	0,48
2302778113	OE	DISJ30375-0	69	6	0,30
2733044	CE	DISJ00638-7	138	10	1,00
2302735232	CE	DISJ31740-4	69	4	0,76
2729098	LE	DISJ30166-3	138	5	0,50
2738563	LE	DISJ30240-6	138	5	0,50
2749664	LE	DISJ30166-3	138	5	0,50
2302767054	MQ	DISJ00917-5	69	4	0,52
2750926	SU	DISJ30308-1	138	8,1	0,81
2795752	SU	DISJ02079-2	138	5	0,50

2302670290	TA	DISJ30037-6	138	5	0,42
2715102	TA	DISJ01718-6	138	18	1,80
2725898	TA	DISJ30042-6	138	5	0,50
0	NT	DISJ01389-6	138	8	0,89
2793315	CE	DISJ00687-4	138	55	5,50
2302809254	CE	DISJ30138-2	138	5	0,69
2302810287	CE	DISJ02201-2	138	5	0,80
2302851207	CE	DISJ01753-3	138	7,2	1,18
2302858561	CE	DISJ31740-4	69	4	0,51
2302860260	CE	DISJ00179-2	138	18	2,48
2302864505	CE	DISJ00638-7	138	10	1,87
2302881474	CE	DISJ00207-1	138	12	2,81
2302899290	CE	DISJ30138-2	138	5	0,70
2302913960	CE	DISJ30138-2	138	5	0,06
2302926856	CE	DISJ31861-8	138	15	1,47
2302956339	CE	DISJ30255-4	138	8	1,54
2302956530	CE	DISJ00179-2	138	18	3,72
2302960894	CE	DISJ01753-3	138	7,2	1,30
2302978599	CE	DISJ30094-7	138	8	2,88
2302989134	CE	DISJ01617-0	13,8	0,22	0,15
2302989135	CE	DISJ01753-3	138	7,2	1,18
2302762522	CE	DISJ02185-7	13,8	0,22	0,10
2302915053	CE	DISJ01617-0	13,8	0,22	0,14
2302670291	TA	DISJ30032-7	138	5	0,28
2302852513	TA	DISJ30192-9	138	12	1,59
2302861080	OE	DISJ01942-2	138	5	0,52
2302864622	NT	DISJ30330-5	138	8	0,52
2302864623	NT	DISJ30329-7	138	8	0,90
2302871828	TA	DISJ00118-0	138	18	1,74
2302928480	NT	DISJ00485-3	138	15	1,47
2302944433	TA	DISJ30042-6	138	5	0,78
2302944435	TA	DISJ30037-6	138	5	0,69
2302944436	TA	DISJ30032-7	138	5	0,48
2302945102	LE	DISJ00603-1	69	4,5	0,44
2302945979	TA	DISJ01713-7	138	5	0,90
2302965006	NT	DISJ01970-3	138	5	0,48
2302979154	TA	DISJ01713-7	138	5	0,83
2302980561	OE	DISJ00923-3	138	10	0,97
2302981125	TA	DISJ30009-5	138	5	0,55
2302805271	OE	DISJ00210-5	138	5	2,76
2302805272	OE	DISJ02111-3	138	5	0,28
2302807319	OE	DISJ00921-7	138	5	0,35
2302828900	TA	DISJ30042-6	138	5	0,41
2302849792	NT	DISJ00485-3	138	15	1,24
2302888021	SU	DISJ02090-9	138	5	0,48

2302893756	SU	DISJ01149-4	138	5	0,48
2302893758	SU	DISJ01171-8	138	5	0,48
2302909271	MQ	DISJ00917-5	69	4	0,39
2302925133	LE	DISJ30240-6	138	5	0,90
2302928062	OE	DISJ01942-2	138	5	0,48
2302822528	CE	DISJ01472-0	138	16,2	1,57
2302860278	CE	DISJ30255-4	138	8	0,77
2302864504	CE	DISJ00641-1	138	10	0,97
2302893807	CE	DISJ01471-2	138	16,2	1,57
2302916939	CE	DISJ30255-4	138	8	0,77
2302931015	CE	DISJ30138-2	138	5	0,48
2302931094	CE	DISJ01753-3	138	7,2	0,70
2302954309	CE	DISJ31753-7	138	12	1,16
2302918094	CE	DISJ10153-5	138	38	16,01
2302918095	CE	PARA00000-0	138	14	5,90
2302893746	CE	DISJ30255-4	138	8	1,26
2302959967	CE	DISJ00639-5	138	6	0,70
2302972428	CE	DISJ00207-1	138	12	1,54
2302978599x	CE	DISJ30094-7	138	8	2,84
2302981124	TA	DISJ30012-9	138	5	1,05
2302989134x	CE	DISJ01617-0	13,8	0,22	0,13
2302989135x	CE	DISJ01753-3	138	7,2	1,16
2302989227	CE	DISJ01617-0	13,8	0,22	0,90
2302989228	CE	DISJ01753-3	138	7,2	0,70
2302991412	CE	DISJ30255-4	138	8	0,80
2302993638	TA	DISJ01970-3	138	5	0,50
2302997790	OE	DISJ00210-5	138	5	0,62
2303002330	TA	DISJ01970-3	138	5	0,62
2303006688	TA	DISJ01713-7	138	5	0,76
2303007371	TA	DISJ01718-6	138	18	3,57
2303012907	TA	DISJ30224-0	36	0,5	0,67
2303015861	OE	DISJ00882-1	138	10	1,08
2303026260	CE	DISJ00638-7	138	10	1,88
2303032571	NT	DISJ01543-8	138	15	2,28
2303034015	CE	DISJ01471-2	138	16,2	8,00
2303037598	TA	DISJ31702-4	138	12	1,58
2303037788	TA	DISJ01713-7	138	5	0,89
2303039516	CE	DISJ00641-1	138	10	1,46
2303045420	NT	DISJ01543-8	138	15	0,73
2303045521	CE	DISJ02185-7	13,8	0,22	0,11
2303047156	TA	DISJ00079-4	138	16	0,35
2303050073	CE	DISJ30268-7	138	8	1,29
2303053977	CE	DISJ30255-4	138	8	1,35
2303059632	NT	DISJ01389-6	138	8	0,45
2303059750	TA	DISJ01972-9	138	5	0,23

2303074386	TA	DISJ00484-6	138	15	1,38
2303078035	CE	DISJ30255-4	138	8	1,26
2303078276	CE	DISJ00207-1	138	12	1,88
2303079100	TA	DISJ31702-4	138	12	1,57
2303079103	TA	DISJ30008-7	138	5	0,55
2303080031	TA	DISJ00079-4	138	16	1,03
2303080034	TA	DISJ01948-9	138	12	1,25
2303084968	TA	DISJ00484-6	138	15	0,73
2303085914	SU	DISJ02598-1	138	12	1,74
2303099899	TA	DISJ01972-9	138	5	5,11
2303104569	CE	DISJ30107-7	138	5	0,79
2303108682	MQ	DISJ02125-3	138	5	0,73
2303110452	CE	DISJ00207-1	138	12	1,54
2303118899	TA	DISJ00079-4	138	16	0,55
2303122693	CE	DISJ01472-0	138	16,2	7,02
2303122694	CE	DISJ01471-2	138	16,2	7,46
2303126559	TA	DISJ00040-6	138	6	0,58
2303127681	TA	DISJ31702-4	138	12	1,57
2303140683	NT	DISJ30329-7	138	8	0,91
2303151136	TA	EPPT30040-0	138	4	1,55
2303152880	MQ	DISJ02125-3	138	5	0,62
2303067782	NT	DISJ01543-8	138	15	0,73
2302993394	MQ	DISJ00409-3	138	13,1	0,63
2303073639	MQ	DISJ02125-3	138	5	0,23
2303097765	LE	DISJ30235-6	69	2,5	0,25
2303100639	OE	DISJ00923-3	138	10	0,97
2302828332	CE	DISJ00671-8	138	45	6,81
2303126759	TA	DISJ30042-6	138	5	0,52
2303127139	TA	DISJ30037-6	138	5	0,24
2303138955	MQ	DISJ00656-9	138	8	0,55
2303155178	NT	DISJ30329-7	138	8	0,34
2303158736	TA	DISJ00079-4	138	16	0,30
2303174735	TA	DISJ31702-4	138	12	2,04
2303194017	TA	DISJ00079-4	138	16	1,80
2303195666	LE	DISJ31915-2	138	5	0,68
2303199879	OE	DISJ00882-1	138	10	1,02
2303201308	TA	DISJ31702-4	138	12	1,41
2303206855	NT	DISJ39003-9	138	8	0,26
2303207184	NT	DISJ30344-6	69	4	0,13
2303210396	TA	DISJ30053-3	13,8	0,22	0,15
2303211335	CE	DISJ02770-6	138	8	1,29
2303219843	CE	DISJ00179-2	138	18	2,61
2303221832	CE	DISJ00641-1	138	10	0,48
2303221845	CE	DISJ00641-1	138	10	0,44
2303222580	CE	DISJ02185-7	13,8	0,22	0,15

2303222581	CE	DISJ01472-0	138	16,2	2,35
2303222582	CE	DISJ01471-2	138	16,2	2,35
2303224017	CE	DISJ30264-6	138	8	1,16
2303224020	CE	DISJ30268-7	138	8	1,16
2303224022	CE	DISJ00207-1	138	12	1,74
2303224938	CE	DISJ00179-2	138	18	2,61
2303225355	CE	DISJ00638-7	138	10	1,45
2303234859	TA	DISJ30009-5	138	5	1,31
2303234866	MQ	DISJ02125-3	138	5	0,73
2303236716	NT	DISJ01581-8	138	15	0,83
2303243106	MQ	DISJ00991-0	138	8	1,89
2303244363	LE	DISJ31887-3	69	6	1,30
2303247338	TA	DISJ02286-3	138	5	0,55
2303249806	TA	DISJ31702-4	138	12	1,41
2303268331	TA	DISJ30295-0	69	6	0,19
2303268332	TA	DISJ30296-8	69	6	0,26
2303274217	CE	DISJ00207-1	138	12	1,74
2303277696	OE	DISJ00875-5	138	16	2,87
2303284332	TA	DISJ30053-3	13,8	0,22	0,22
2303287310	NT	DISJ01389-6	138	8	0,18
2303288279	CE	DISJ30255-4	138	8	1,16
2303290301	CE	DISJ01471-2	138	16,2	1,79
2303297807	CE	DISJ00641-1	138	10	1,45
2303302228	TA	DISJ00079-4	138	16	1,05
2303308435	CE	DISJ00179-2	138	18	1,99
2303309865	NT	DISJ30328-9	13,8	0,5	0,16
2303313120	TA	DISJ01718-6	138	18	0,65
2303316370	TA	DISJ31702-4	138	12	1,53
2303317073	OE	DISJ02111-3	138	5	0,35
2303317076	OE	DISJ00210-5	138	5	0,38
2303319561	CE	DISJ02201-2	138	5	1,38
2303321587	CE	DISJ00179-2	138	18	3,73
2303325651	CE	DISJ30200-0	138	12	1,43
2303329618	CE	DISJ00641-1	138	10	2,82
2303329620	CE	DISJ01472-0	138	16,2	3,58
2303330129	LE	DISJ30240-6	138	5	1,14
2303330487	CE	DISJ00207-1	138	12	1,57
2303331654	TA	DISJ01718-6	138	18	1,99
2303334371	TA	DISJ30008-7	138	5	0,28
2303154870	TA	DISJ30053-3	13,8	0,22	0,22
2302668617	TA	DISJ31841-0	138	12,7	0,92

*São as regiões administrativas do estado de Minas Gerais segundo a Cemig D: CE-Centro; LE- Leste; MQ- Mantiqueira; OE-Oeste; NT-Norte; SU-Sul; e TA-Triângulo.

ANEXO 2 – Resumo da contabilização no formato enviado para Gerência de Sustentabilidade e para a Bureau Veritas

2020							
TIPOS DE EQUIPAMENTOS	Total de equipamentos	Massa de SF6 (kg)	Vazamento anual de 0,5% (Kg)	Total de equipamentos com intervenção	Massa de SF6 dos equipamentos com intervenção	Complementação dos eqtos com intervenção (Kg)	Total Emissão
Eqto. Manobra <= 23kV	133	235,22	-	2	0,44	0,39	0,39
Eqto. Manobra > 23kV	672	6.186,05	-	36	296,10	52,62	52,62
Des./Sin. - Eqto. Manobra <= 23kV	2	10,00	-			1,00	1,00
Des./Sin. -Eqto. Manobra > 23kV	1	8,00	-			0,80	0,80
	805	6.421		38	297	53,01	54,81
GIS	4	2.576,97	-	2	2.576,97	21,91	21,91
Modular Híbrida	6	2.610,00	-				0,00
SECI	11	969,54	-				0,00
	21	6.157		2	2.577	21,91	21,91
Cilindros de SF6	129	1.487,90	-	-	-	-	
Máquinas de tratamento de gás	16	-	-	-	-	-	
	145	1.487,90					0,00
Rede de Distribuição Aérea	494	701,48	3,51	-	-	-	3,51
Rede de Distribuição Subterrânea	588	3.527,13	17,64	-	-	-	17,64
	1.082	4.228,61	21,14				21,14
Massa de gás instalada:	18.294,29					Total de Emissão:	97,86

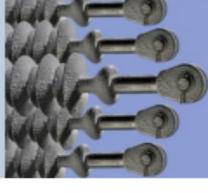
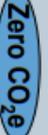
2021							
TIPOS DE EQUIPAMENTOS	Total de equipamentos	Massa de SF6 (kg)	Vazamento anual de 0,5% (Kg)	Total de equipamentos com intervenção	Massa de SF6 dos equipamentos com intervenção	Complementação dos eqtos com intervenção (Kg)	Total Emissão
Eqto. Manobra <= 23kV	133	240,42	-	2	0,44	1,14	1,14
Eqto. Manobra > 23kV	675	6.284,55	-	34	303,70	81,00	81,00
Des./Sin. - Eqto. Manobra <= 23kV			-				0,00
Des./Sin. -Eqto. Manobra > 23kV			-				0,00
	808	6.525		36	304,14	82,14	82,14
GIS	4	2.576,97	-				0,00
Modular Híbrida	15	6.360,00	-				0,00
SECI	29	3.696,40	-				0,00
	48	12.633,37		0	0	0,00	0,00
Cilindros de SF6	129	1.487,90	-	-	-	-	
Máquinas de tratamento de gás	16	-	-	-	-	-	
	145	1.487,90					0,00
Rede de Distribuição Aérea	518	735,56	3,68	-	-	-	3,68
Rede de Distribuição Subterrânea	600	3.588,82	17,94	-	-	-	17,94
	1.118	4.324,38	21,62				21,62
Massa de gás instalada:	24.970,62					Total de Emissão:	103,76

2022							
TIPOS DE EQUIPAMENTOS	Total de equipamentos	Massa de SF6 (kg)	Vazamento anual de 0,5% (Kg)	Total de equipamentos com intervenção	Massa de SF6 dos equipamentos com intervenção	Complementação dos eqtos com intervenção (Kg)	Total Emissão
Eqto. Manobra <= 23kV	131	230,42	-	3	0,94	0,90	0,90
Eqto. Manobra > 23kV	662	6.156,05	-	38	343,10	72,34	72,34
Des./Sin. - Eqto. Manobra <= 23kV	-	-	-	2	10	-	1,70
Des./Sin. -Eqto. Manobra > 23kV	-	-	-	10	70	-	14,42
	793	6.386		41	344,04	73,24	89,36
GIS	4	2.576,97	-				0,00
Modular Híbrida	33	13.260,00	-				0,00
SECI	42	5.270,40	-				0,00
	79	21.107,37		0	0	0,00	0,00
Cilindros de SF6	149	1.434,66	-	-	-	-	
Máquinas de tratamento de gás	16	-	-	-	-	-	
	165	1.434,66					0,00
Rede de Distribuição Aérea	502	712,84	3,56	-	-	-	3,56
Rede de Distribuição Subterrânea	618	3.694,96	18,47	-	-	-	18,47
	1.120	4.407,80	22,04				22,04
Massa de gás instalada:	33.336,30					Total de Emissão:	111,40

ANEXO 3 – Portfólio de produtos da SIEMENS livres de SF₆ ou reduzidos

The high voltage product family – a comprehensive portfolio for long-term business sustainability



Gas-insulated switchgear	Circuit breakers	Disconnectors and earthing switches	Surge arresters	Instrument transformers	Coil products	Bushings	Long rod insulators
 <ul style="list-style-type: none"> • GIS 8VM1 72.5 kV Vacuum Circuit Breakers+Clean Air • GIS 8VN1 145 kV Vacuum Circuit Breakers+Clean Air • GIS 8DN8 170 kV SF₆ & Vacuum Circuit Breakers+Clean Air (in dev.) • GIS 8DN9 245 kV SF₆ • GIS 8DQ1 550 kV SF₆ 	 <ul style="list-style-type: none"> • Live Tank SF₆ & Vacuum Circuit Breakers+Clean Air (in dev.) • Dead Tank SF₆ & Vacuum Circuit Breakers+Clean Air (in dev.) • Dead Tank Compact / Hybrid Modules SF₆ • Disconnecting Circuit Breaker SF₆ • Circuit Breakers for GIS SF₆ 	 <ul style="list-style-type: none"> • Centre Break • Pantograph • Semi-Pantograph • Vertical Break • Side Break • Double Side Break • Knee-Type • V-Type • Earthing Switches 	 <ul style="list-style-type: none"> • AIS Porcelain • AIS Polymer • GIS - SF₆ & Clean Air • HVDC • FACTS • Distribution • Railways • Line Arresters 	 <ul style="list-style-type: none"> • Current Transf. AIS (Oil, SF₆ & Clean Air) • GIS (Ind. & Sensors) • Voltage Transf. AIS (Inductive: Oil, SF₆ & Clean Air; Cap) GIS (Ind. & RC-D.) • Combined Transf. AIS (Oil, SF₆ & Clean Air¹⁾ • HVDC (RC-Div.) • Capacitor Products 	 <ul style="list-style-type: none"> • Air Core Dry Type Reactors • Line Traps • Arc Suppression Coils • Super-conducting Fault Current Limiters 	 <ul style="list-style-type: none"> • Transformer Bushings AC & DC OIP, RIP, RIS • Wall Bushings AC & DC RIP • GIS Bushings (SF₆ & Clean Air) • Generator Bushings RIP 	 <ul style="list-style-type: none"> • Transmission line polymer insulators for systems up to 550 kV
							

Unrestricted © Siemens 2019.
Page 4 June 27, 2019
Dr.-Ing. Dirk Helbig / Transmission Products

Fonte: (HELBIG, 2019)

ANEXO 4 – Portfólio de produtos da GE livres de SF₆

g³ Portfolio

145 kV Gas-Insulated Substations
40 kA, for -25°C applications
16 sites, more than 100 bays



GIS in Switzerland (Axpö)

420 kV Gas-Insulated Lines
63 kA, for -25 °C/-30 °C applications
8 sites, more than 5,000 meters



GIL in England (National Grid)

Live Tank Circuit breakers up to 145 kV
40 kA, for -30°C applications
5 sites, 14 circuit breakers



Live Tank CB in Switzerland (Groupe E)

Development of a 420 kV g³ GIS

Next on the g³ roadmap is the development of a g³ 420 kV GIS including the g³ interrupter for this GIS.

LifeGRID

LifeGRID is GE's project to develop the 420 kV g³ circuit breaker at the core of the substation. This project is being co-funded over a three-year period by the EU's LIFE Programme dedicated to climate change. The specifications of the circuit breaker's main performance requirements were made with the inputs of a major electrical grid operator.

To know more: www.lifegrid.eu



For more information please contact
GE
Grid Solutions

Worldwide Contact Center

Web: www.GEGridSolutions.com/contact
Phone: +44 (0) 1785 250 070

GEGridSolutions.com

3M™ and Novec™ 4710 are registered trademarks of 3M.
GE, the GE monogram, g³ and g¹ logo are trademarks of General Electric Company.

GE reserves the right to make changes to specifications of products described at any time without notice and without obligation to notify any person of such changes.

g³-gas-Technology-Brochure-EN-2021-04-Grid-GS-L3-1001. © Copyright 2021, General Electric Company. All Rights Reserved.



Fonte: (GE, 2021)