

ANÁLISE DA APLICAÇÃO DE SUBESTAÇÕES ISOLADAS A GÁS SF₆ EM CENTROS URBANOS: BENEFÍCIOS, LIMITAÇÕES E ESTUDO DE CASO

GUSTAVO HENRIQUE COTTA MAGALHÃES¹

¹ *Graduando em Bacharelado em Engenharia Elétrica - Departamento de Engenharia Elétrica Universidade Federal de Viçosa - Av. P. H. Rolfs, s/n, Campus UFV, CEP: 36570-000, Viçosa, MG, Brasil*

E-MAILS: gustavo.h.magalhães@ufv.br

Resumo — Este trabalho apresenta uma análise comparativa entre diferentes tipologias de subestações em média tensão considerando aspectos técnicos, construtivos, de custo e de viabilidade de implantação em áreas urbanas. A pesquisa abordou características de cada modelo, suas vantagens e limitações, bem como as exigências normativas e restrições impostas pelas concessionárias de energia. Como parte do estudo, desenvolveu-se um projeto aplicado, no qual três alternativas foram avaliadas em termos de espaço físico, confiabilidade operacional e investimento necessário. Os resultados evidenciaram que, embora a subestação convencional ainda seja a solução de menor custo, opções mais compactas, como a cabine blindada e a subestação isolada a gás, apresentam maior adequação a edificações com restrição de espaço. Conclui-se, assim, que a escolha do modelo deve considerar não apenas o investimento inicial, mas também o contexto urbano, os requisitos normativos e as perspectivas de longo prazo.

Palavras-chave – Subestação; SF₆; ABNT NBR 14039, AIS, GIS.

1 Introdução

O crescimento do consumo de energia elétrica e a elevada concentração de carga nas regiões metropolitanas têm exigido a expansão da rede de transmissão até pontos mais próximos dos centros consumidores. Essa aproximação entre os níveis de transmissão e de distribuição proporciona não apenas vantagens econômicas, mas também assegura um fornecimento de energia confiável. (Naidu, 2008).

Apesar disso, a instalação das SEE (subestações de entrada de energia) convencionais enfrenta importantes limitações de ordem técnica e normativa. Em áreas urbanas, não é permitido instalar subestações aéreas em passeios públicos para atendimento privado, salvo para o caso de atendimento em condomínios horizontais.

Essa restrição decorre de questões de segurança, ocupação do espaço urbano e impacto estético, o que torna inviável a utilização desse tipo de arranjo em centros densamente povoados, uma vez que seria necessário espaço aberto hábil dentro dos limites da propriedade para a instalação de poste com transformador. Dessa forma, a implantação de subestações tradicionais acaba exigindo grandes áreas internas nos empreendimentos, competindo com espaços que poderiam ser destinados a fins econômicos ou funcionais.

Diante desse cenário, as Subestações Isoladas a Gás (Gas Insulated Substations - GIS) surgem como uma alternativa tecnológica de grande relevância. Diferentemente das subestações convencionais e blindadas, que demandam amplas áreas para sua instalação, as GIS conseguem operar em até 10% do espaço necessário, garantindo não apenas vantagens econômicas, mas também elevada confiabilidade operacional. (Naidu,

2008)

Entretanto, a adoção dessa tecnologia no Brasil enfrenta desafios significativos, sobretudo pela ausência de referências normativas específicas que tratem de requisitos técnicos, construtivos e de segurança aplicáveis a esse tipo de subestação. A falta de padronização em normas como a NBR 14039 e nos manuais das concessionárias de energia tem limitado sua difusão e dificultado processos de aprovação e homologação junto às distribuidoras.

Ainda assim, a utilização desse tipo de subestação mostra-se, particularmente, adequada para centros urbanos densamente ocupados, onde o aproveitamento eficiente do espaço é um requisito fundamental para a viabilidade de novos empreendimentos.

O presente trabalho tem como objetivo analisar a viabilidade técnica e as vantagens da utilização de subestações compactas isoladas a gás SF₆ em centros urbanos, destacando sua contribuição para a otimização de espaço em edificações, bem como os benefícios relacionados à confiabilidade e segurança desses sistemas.

Como objetivo específico, o estudo propõe o desenvolvimento e análise de um projeto de subestação de entrada de energia para uma edificação, localizada em Porto Alegre – Rio Grande do Sul, com demanda de aproximadamente 518kVA, comparando alternativas construtivas convencionais com cabines blindadas e isoladas a gás SF₆, a fim de determinar a solução mais adequada para o contexto urbano e às restrições arquitetônicas da edificação.

2 Subestações Elétricas

As subestações elétricas são instalações

fundamentais no sistema de potência, responsáveis por interligar os diferentes níveis de tensão e garantir a continuidade do fornecimento de energia elétrica. Sua função básica é transformar a energia em níveis de tensão adequados às necessidades do sistema, realizar proteção contra falhas e permitir a operação e o controle da rede.

3.1 Definições

De acordo com os itens 3.6, 3.7 e 3.8 da NBR 14039 (ABNT, 2005), as subestações podem ser definidas de três formas:

- Subestação de entrada de energia: Subestação que é alimentada pela rede de distribuição de energia do concessionário e que contém o ponto de entrega e a origem da instalação. A seção 3.2 deste trabalho abordará este modelo de subestações.
- Subestação transformadora: Subestação que alimenta um ou mais transformadores conectados a equipamentos diversos. São comumente utilizadas pelas concessionárias de energia e utilizam o padrão construtivo descrito na seção 3.2.1 deste trabalho.
- Subestação unitária: Subestação que possui e, ou alimenta apenas um transformador de potência. Geralmente pré-fabricada e integra os equipamentos de média e baixa tensão em uma única estrutura, conforme Figura 1.



Figura 1 – Subestação Skid transportável. Fonte: WEG

3.2 Composição das subestações

No contexto deste trabalho, será dado enfoque às subestações de entrada de energia, uma vez que representam o tipo de arranjo presente no estudo de caso analisado.

Estas subestações podem ser classificadas de acordo com a forma de instalação e o arranjo construtivo adotado. Essa classificação está relacionada ao espaço disponível, nível de tensão, condições ambientais e requisitos de segurança.

3.2.1 Subestações externas

Essas subestações podem ser utilizadas como subestação de entrada de energia ou subestação transformadora. São instaladas em campo aberto ou no exterior das indústrias, ficando expostas ao tempo e costumam ser empregadas em instalações de maior porte devido ao tamanho dos equipamentos necessários e a facilidade de manutenção. O modelo 3D desse tipo de subestação pode ser visto na Figura 2.

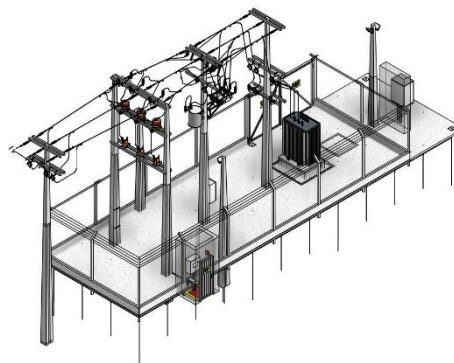


Figura 2 – Subestação externa de energia – Fonte: Respositório (Autodesk)

3.2.2 Subestação aérea

Sendo também um tipo de subestação externa as subestações aéreas são destinadas à alimentação de edificações ou equipamentos de menor porte, geralmente delimitada em 300kVA de potência do transformador.

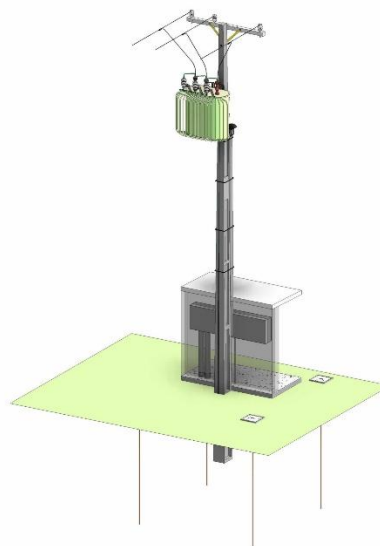


Figura 3 – Subestação aérea de energia. Fonte: World Engenharia (2025).

Conforme Figura 3, esse tipo de subestação é composto por um transformador de potência, proteção em média tensão feita por chave-faca com elo fusível e para-raios, podendo ou não ser instalado medidor de energia indireto em média tensão. Apesar de menor custo inicial, sua utilização em áreas urbanas é limitada por normas de

segurança e de uso de espaço público.

3.2.3 Subestação abrigada

Subestações abrigadas são aquelas cujos equipamentos de média e baixa tensão encontram-se instalados em ambiente fechado, geralmente em salas ou edifícios próprios construídos para esse fim.

De acordo com a NBR 14039 (ABNT 2005), as subestações devem ser projetadas de forma a garantir segurança operacional e acessibilidade apenas a pessoas qualificadas. Nesse contexto, o modelo abrigado oferece maior confiabilidade, pois permite um melhor controle ambiental e maior flexibilidade de organização dos equipamentos.

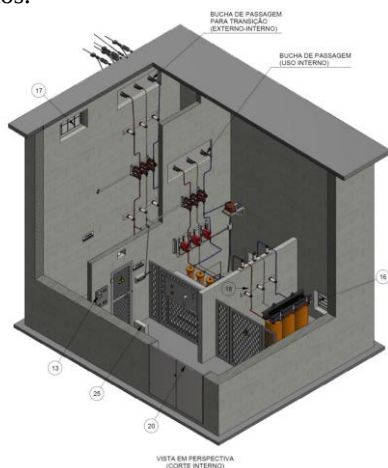


Figura 4 – Subestação Abrigada em Alvenaria – vista em perspectiva - Fonte: E.T.942, versão 2, 2021(ENEL).

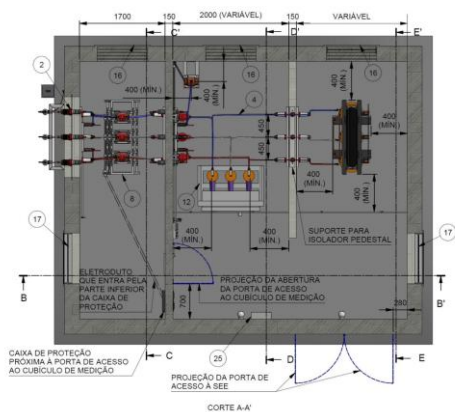


Figura 5 – Subestação Abrigada em Alvenaria – vista superior – Fonte: E.T.942, versão 2, 2021(ENEL)

Através das Figuras 4 e 5 é possível identificar a disposição típica de uma subestação abrigada de entrada de energia. Este tipo de arranjo é estruturado em cubículos independentes, cada um com função específica no processo de transformação e distribuição de energia.

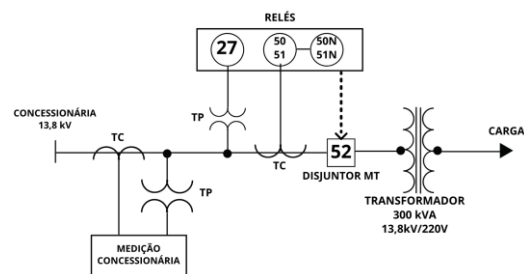
- Cubículo de Medição: localizado próximo ao ponto de entrega da

concessionária, abriga os transformadores de corrente (TCs) e de potencial (TPs), além do sistema de medição de energia ativa e reativa. Sua função é possibilitar o monitoramento e o faturamento do consumo, devendo ser acessível à distribuidora para inspeção e manutenção.

- Cubículo de Proteção e Manobra em Média Tensão: Responsável pela proteção contra faltas e pelo seccionamento da instalação em caso de necessidade. Nele estão presentes disjuntores, chaves seccionadoras e relés de proteção com a função de analisar a rede e atuar no disjuntor de média tensão.
- Cubículo do Transformador: Destinado à instalação do transformador de potência. Dependendo do projeto pode-se utilizar transformadores a óleo isolante ou a seco, para o caso dos transformadores à óleo, faz-se necessário a instalação de um compartimento subterrâneo para garantir a retenção do óleo em caso de possíveis vazamentos.

Essa setorização em cubículos está presente em todos os projetos de subestações abrigadas. Tal configuração é empregada tanto no padrão construtivo convencional apresentado quanto nas demais tipologias de subestações, adaptando-se às particularidades de cada arranjo.

A Figura 6 apresenta um diagrama unifilar desse tipo de subestação.



3.2.4 Cabine blindada

A cabine blindada é um tipo de subestação elétrica em que os equipamentos de média tensão (disjuntores, seccionadoras, fusíveis, TCs e TPs, barramentos) são instalados em cubículos metálicos fechados. Esses cubículos possuem invólucros autoportantes, com chapa de aço, intertravamentos mecânicos e isolamento a ar ou a vácuo. O modelo padrão de um cubículo metálico está representado pela Figura 7.

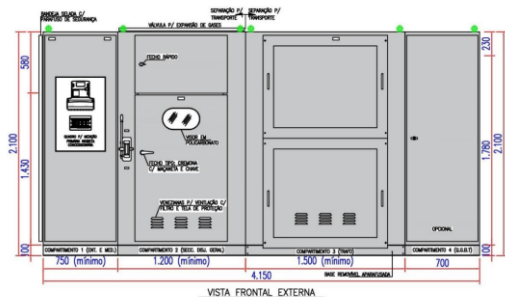


Figura 7 – Modelo de Subestação Blindada – Vista Externa - Fonte: E.T.021, 2022 (Equatorial)

Esse modelo é amplamente utilizado em áreas urbanas e industriais, principalmente onde há restrição de espaço físico e necessidade de proteção contra contato acidental, arcos internos e interferências externa. A compartimentação dos módulos facilita a operação, uma vez que cada unidade (medição, proteção, manobra e transformação) fica organizada em blocos independentes, conforme Figura 8

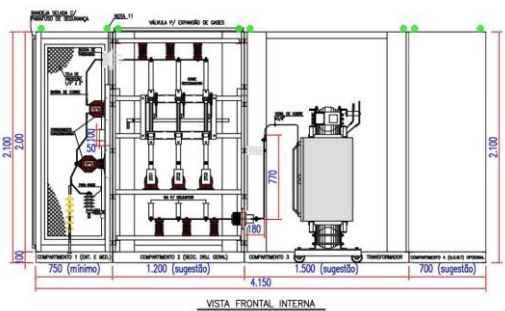


Figura 8 – Modelo de Subestação Blindada – Vista Interna – Fonte: E.T.021, 2022 (Equatorial).

3 Subestações Elétricas Isoladas a Gás SF₆

Segundo Naidu (2008), o desenvolvimento das subestações isoladas a gás (GIS) representa uma evolução das cabines blindadas, com aplicação do hexafluoreto de enxofre (SF₆) como meio isolante e extintor de arco.

Neste capítulo é apresentada a fundamentação técnica e conceitual sobre as GIS, destacando suas características, aplicações e limitações.

4.1 Hexafluoreto de Enxofre

4.1.1 Rigidez Dielétrica do gás SF₆

“O Hexafluoreto de Enxofre (SF₆), resultado de uma reação química entre o enxofre e o flúoreto é um sintético que possui aspecto transparente, inodoro, não inflamável, inerte até 500°C, comportando-se assim, como um gás nobre” (Yokogawa, 2017).

O SF₆ é constituído por um átomo central de enxofre ligado a seis átomos de flúor em arranjo

simétrico, o que lhe confere elevada estabilidade molecular e boas propriedades como isolante elétrico e supressor de arco, seu arranjo molecular pode ser visto na Figura 9.

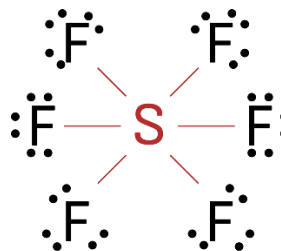
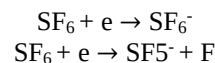


Figura 9 – Estrutura molecular do gás

Essa elevada rigidez dielétrica do gás é devido à sua capacidade de captura de elétrons. Nesse processo, os elétrons livres colidem com as moléculas neutras formando íons negativos pelos seguintes processos:



Os íons negativos formados (SF₆⁻, SF₅⁻) possuem massa significativamente maior do que os elétrons livres. Em consequência, sob a ação de um campo elétrico, esses íons apresentam baixa mobilidade, não acumulando energia cinética suficiente para provocar novas ionizações sucessivas no meio gasoso. Esse fenômeno limita a ocorrência da ionização em cadeia e, portanto, reduz a probabilidade de centelhamento. Assim, esse processo remove elétrons livres que, de outra forma, contribuiriam para o crescimento da corrente elétrica e para a ruptura do isolamento. (Naidu, 2008).

Os valores de rigidez dielétrica do SF₆, do ar e do óleo isolante são apresentados na Figura 10.

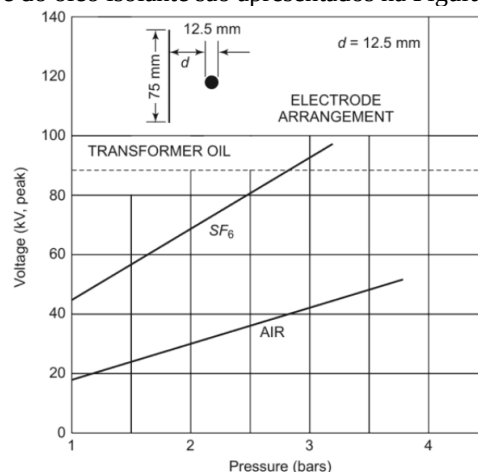


Figura 10 – Tensão de ruptura em função da pressão – Fonte: (Naidu, 2008)

A Figura 10 evidencia que a tensão de ruptura aumenta com a pressão do gás e que o SF₆ supera o ar em toda a faixa analisada para o arranjo de

eletrodos indicado. Em aproximadamente 3 bar alcança o desempenho do óleo isolante (linha de referência em 90kV).

Portanto operar SF₆ em pressões elevadas permite níveis de isolamento iguais ou superiores aos do óleo com menores distâncias de escoamento, justificando a compactidade típica das GIS.

Entretanto, além das vantagens técnicas, o SF₆ apresenta um impacto ambiental relevante, sendo considerado um dos gases de maior potencial de aquecimento global. Esse aspecto é discutido a seguir.

4.1.2 Impactos Ambientais do SF₆ e sua Contribuição para o Efeito Estufa

Durante a conferência de Kyoto em 1997, o gás SF₆ foi listado como 1 dos 6 gases de efeito estufa cuja emissões deveriam ser diminuídas.

Isso se deve ao fato de que embora o SF₆ tenha uma participação muito pequena quando comparado ao total de gases estufas devido a atividade humana, o gás possui uma vida muito longa na atmosfera (meia vida estimada em 3200 anos), logo, o efeito do SF₆ na atmosfera é cumulativo e permanente.

No que tange às orientações internacionais quanto ao uso do SF₆ em equipamentos elétricos, a contribuição do gás para o aquecimento global deve ser mantida abaixo de 0,1%. Portanto, a análise de impacto ambiental do SF₆ utilizado no setor elétrico, aponta que o uso, quando comparado a outros isolantes tradicionais, reduz o impacto ambiental global, sendo assim, um ponto positivo para justificar seu uso no setor. (Yokogawa, 2017).

4.2 Construção das Subestações Isoladas a Gás

As Subestações Isoladas a Gás (GIS) possuem em sua composição os mesmos equipamentos elétricos que as Subestações Isoladas a Ar (AIS), diferenciando-se na disposição dos equipamentos que são divididos em módulos e acoplados entre si conforme projeto.



Figura 11 – Módulos SM6 isolados a gás SF₆ –
Fonte: (Schneider-eletric, SM6 Catalog)

Como pode ser visto na Figura 11, os módulos GIS são compactos e formados por invólucros metálicos selados, dentro desses compartimentos está contido o gás SF₆ sob pressão, o que torna possível uma menor distância entre os equipamentos de média tensão pelas características do gás supracitadas.

A Figuras 12 e 13 apresentam exemplos de arranjos modulares de cubículos da linha SM6, conforme catálogo técnico da Schneider Eletric, demonstrando flexibilidade do sistema para diferentes configurações de entrada, permitindo a composição de módulos de entrada, proteção, medição e conexão de acordo com a necessidade do projeto.

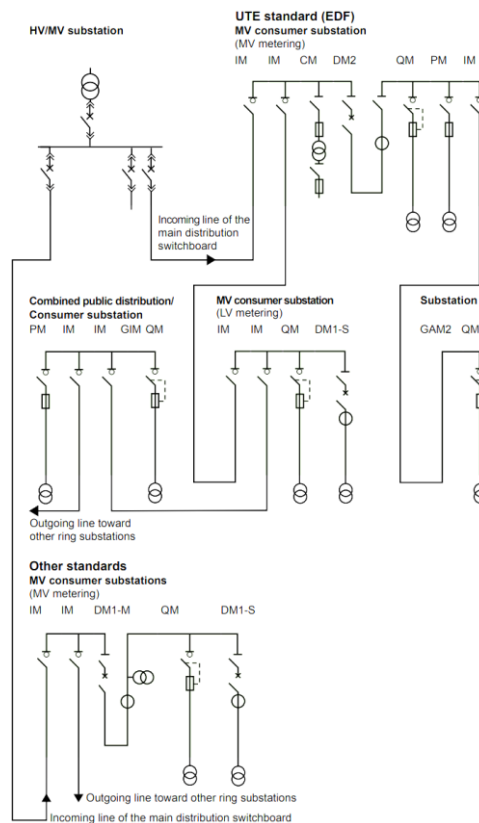


Figura 12 – Exemplos de arranjos modulares de cubículos SM6 isolados a gás. A sigla de cada módulo representa sua função: IM (combinação chave-fusível), DM1 e DM2(disjuntores a SF₆), CM (transformador de tensão), GAM (entrada de cabos) - Fonte: (Schneider-Eletric, SM6 Catalog)

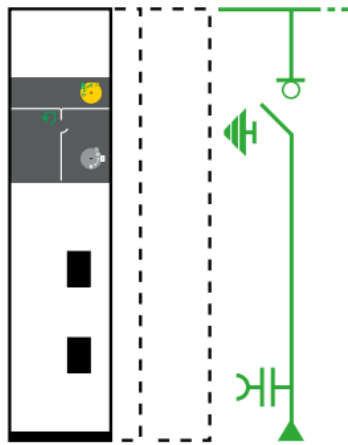


Figura 13 – Exemplo de módulo IM (combinação chave-fusível) – Fonte: (Schneider-Eletric, SM6 Catalog)

4.3 Diferença entre Subestações AIS e GIS

Embora tanto as subestações isoladas a ar (AIS) quanto as isoladas a gás (GIS) desempenhem a mesma função de seccionamento, proteção e transformação, suas diferenças construtivas resultam em impactos diretos na ocupação de espaço, segurança operacional e viabilidade econômica do projeto.

Neste tópico será realizada uma comparação entre três alternativas construtivas: Subestação abrigada convencional, cubículos blindados isolados a ar e cubículos blindados isolados a gás (GIS). Considerando situações em que a instalação deve ocorrer de forma abrigada.

As três situações apresentadas terão como referência um mesmo arranjo funcional descrito pela Figura 14, composto por seccionamento e medição e proteção em média tensão com disjuntor, não será incluindo o compartimento do transformador pois consideraremos que será instalado em uma área comum para todos.

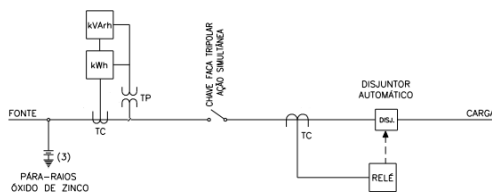


Figura 14 – Modelo Construtivo Exemplo – Fonte: Elaboração própria

4.3.1 Ocupação de Espaço

A ocupação de espaço é um dos fatores determinantes na escolha do tipo de subestação a ser adotada em um empreendimento.

4.3.1.1 Construção em Alvenaria

Considerando um projeto de subestação em alvenaria com o mesmo arranjo funcional

descrito na Figura 14, e, levando em conta as dimensões mínimas impostas pela NBR 14039 (ABNT) e, tomando como referência a norma técnica N.T.02 da Equatorial (2023), a disposição da sala em alvenaria assim como suas dimensões mínimas pode ser visto na Figura 15:

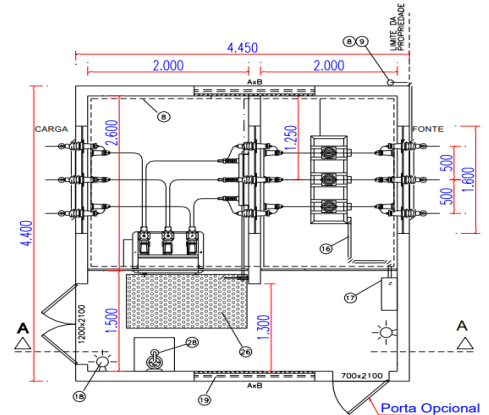


Figura 15 – Subestação Abrigada – Fonte: N.T.02, 2023(Equatorial).

$$\text{Área total} = 4,45 \times 4,4 = 19,58 \text{m}^2 [1]$$

De acordo com NBR14039 (ABNT), os corredores de circulação e manobra devem apresentar largura mínima de 1,20m, sendo recomendado até 1,50m em frentes de operação. Também devem ser respeitadas as distâncias de segurança para manutenção, que ampliam ainda mais a área necessária.

4.3.1.2 Cubículo Blindado isolado a Ar

Para a implantação de cubículos isolados a ar em salas técnicas, deve-se prever faixas de circulação e afastamentos mínimos conforme as especificações da concessionária. De acordo com a N.T.02 da Equatorial Energia (2024) a área destinada aos cubículos – externos ou internos – deve observar, no mínimo:

- I. 0,7 m de afastamento lateral até paredes ou divisas
- II. Faixa livre frontal de 0,7 m para operação e manobra, considerando a projeção da porta aberta para fora.

Portanto, considerando o diagrama construtivo supracitado, a cabine blindada exemplo do nosso estudo é o modelo CCMP da Romagnole, conforme pode ser visto na Figura 16.

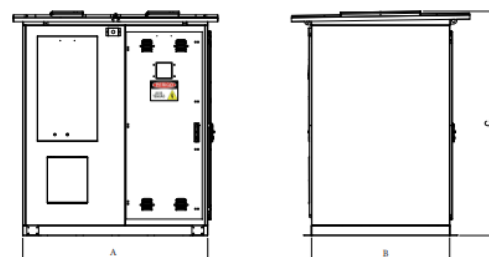


Figura 16 – Cabine compacta de entrada, medição, seccionamento e proteção em média tensão – Fonte: Romagnole, Catálogo Linha de Cabines Metálicas

Considerando as dimensões do invólucro ($A = 1,85\text{m}$; $B = 1,4\text{m}$; $C = 2,3\text{m}$), a área de base do equipamento é $2,59\text{m}^2$. Aplicando-se os afastamentos mínimos previstos – $0,7\text{ m}$ laterais, faixa frontal de $0,7\text{ m}$ com projeção de porta aberta e $0,3\text{m}$ de afastamento de fundo – resulta em uma área de implantação de $12,51\text{m}^2$.

4.3.1.3 Módulos GIS

As soluções GIS, diferentemente das subestações convencionais e blindadas, não possuem especificação normativa de padrão de construção e formas de instalação. Portanto, para representar esta solução, adotou-se um arranjo mínimo de cubículos da linha SM6 (24kV) equivalente ao unifilar de referência, com acesso frontal: GAM2 (entrada de cabos) – GBC-B (TPs e TCs) – IM (seccionamento) – DM1-A (disjuntor com proteção).

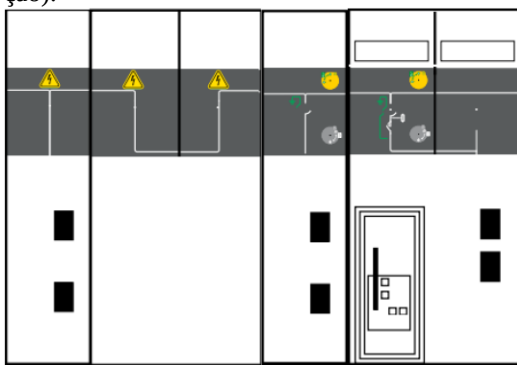


Figura 17 – Módulos SF6 – Fonte: Adaptado (Schneider-eletric, SM6 catalog)

No catálogo do fabricante, esses módulos apresentam dimensões típicas conforme a Tabela 1:

Módulo	Profundidade	Altura	Largura
GAM2	0,94m	1,6m	0,375m
GBC-B	0,94m	1,6m	0,75m
IM	0,94m	1,6m	0,375m
DM1-A	1,22m	1,6m	0,75m
Largura Total			2,25m

Tabela 1 – Dimensões dos módulos da linha SM6, Schneider – Fonte: (Elaboração própria)

Para a implantação do conjunto GIS ilustrado, a largura total resulta da soma das unidades (Figura 17). No exemplo adotado, obtém-se $2,25\text{m}$ de largura; a profundidade base deve considerar o módulo mais profundo, que é o disjuntor DM1-A, conforme catálogo do fabricante. Assim a área do conjunto é de aproximadamente $2,77\text{m}^2$.

Diferente dos cubículos blindados isolados a ar, que usualmente demandam corredores de $1,0\text{ m}$ em frente e nas laterais por exigência da concessionária, os painéis GIS trabalham com acesso frontal único e folgas técnicas reduzidas conforme o fabricante, conforme pode ser visto na Figura 18:

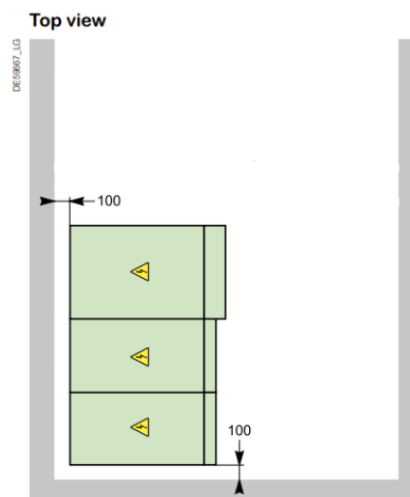


Figura 18 – Exemplo de Layout para Módulos SM6 – Fonte: Adaptada, (Schneider-eletric, SM6 Catalog)

Logo, o próprio fabricante indica que basta prever $0,10\text{ m}$ na parte traseira não havendo necessidade de corredores laterais dedicados. Mantida essa diretriz, e considerando um corredor frontal padronizado de $1,0\text{ m}$, a área total de implantação é de $5,7\text{m}^2$. Portanto, a solução GIS permanece mais compacta que as alternativas a ar.

4.3.2 Custo de implantação

Segundo Naidu (2008), o gasto de capital para uma subestação é normalmente determinado pelo custo do terreno e sua preparação. Uma GIS construída em forma modular pode ser entregue ao local com a maioria dos componentes já montados, facilitando o andamento das obras civis. Por outro lado, o custo de aquisição das GIS é, muitas vezes, mais elevado, uma vez que é uma tecnologia mais nova e muitas vezes são confeccionadas no exterior.

Do ponto de vista operacional, a maior confiabilidade das GIS também implica em menores perdas financeiras decorrentes de interrupções não programadas. Assim, a escolha entre uma subestação isolada a ar (AIS) ou a gás (GIS) depende de fatores específicos de cada projeto.

Para este trabalho, foi realizado um levantamento próprio de preços junto a fornecedores e orçamentos feitos no mercado, no qual para as subestações convencionais foi utilizado orçamentos feitos em lojas especializadas em componentes de média tensão e já para os modelos fornecidos prontos (cubículo blindado e módulos

GIS) foi utilizado orçamentos feitos em fabricantes homologados nas concessionárias de energia, como a Ramalho e Luchetti e Schneider.

Considerando a precificação somente dos componentes apresentados no estudo (desconsiderando custos de obras de alvenaria e do transformador), o custo estimado dos componentes da subestação convencional foi de R\$110.000,00 enquanto que o custo do cubículo blindado, ficou em torno de R\$150.000, já para os módulos SM6 da Schnneider ficou em média R\$270.000. Esses valores evidenciam a tendência de que soluções mais compactas e tecnicamente avançadas exigem maior investimento inicial, devendo a escolha final ser pautada em uma análise que contemple tanto aspectos técnicos quanto econômicos.

É importante pontuar que essa análise é feita considerando somente a diferença de custos de implantação, o estudo de custos de operação

ainda é muito precário no Brasil, abrangendo somente projetos de subestações de distribuição de energia, na qual utilizam grande quantidade de componentes. Ainda sim, entende-se que pelo fato das soluções GIS serem totalmente seladas e possuírem seus componentes totalmente protegidos de poeiras ou objetos externos, elas tendem a ter uma maior confiabilidade operacional no que se refere a vida útil de seus componentes e menor números de interrupções não esperadas.

Portanto, para sintetizar as principais diferenças entre os modelos construtivos apresentados, elaborou-se uma comparação considerando aspectos técnicos e econômicos que influenciam diretamente na escolha do tipo de subestação.

A tabela 2 resume essas características analisadas.

Critério	Convencional (AIS)	Cabine blindada (AIS)	Isolada a gás SF ₆ (GIS)
Construção	Equipamentos individualizados em salas ou pátios, maior área necessária.	Conjunto metálico fechado, compacto.	Módulos selados, preenchidos com SF ₆ , elevada compactação
Espaço ocupado	19,58m ²	12,51m ²	5,7m ²
Confiabilidade	Boa, mas mais suscetível a agentes externos	Maior proteção e segurança operacional	Muito alta, blindagem total contra agentes externos
Custo relativo de implantação	R\$110.000 (100%)	R\$150.000(136%)	R\$270.000(145%)

Tabela 2 – Comparação entre os principais tipos de subestações abrigadas – Fonte: Elaboração própria

4 Estudo de Caso

Esta seção tem como objetivo apresentar uma proposta de projeto em que foi necessária a aplicação da GIS, comparando as vantagens e as limitações desta tecnologia em relação a alternativas convencionais.

5.1 Contextualização

- Local: Porto Alegre – Rio Grande do Sul.
- Situação da edificação: Já construída, passando por reforma geral.
- Carga demandada: 518kVA.
- Concessionária: Equatorial Energia
- Localização em área de risco de alagamento conforme Figura 19.

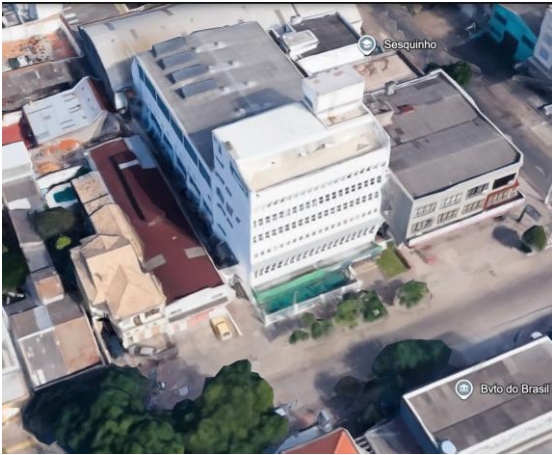


Figura 19 – Vista 3D da edificação estudada – Fonte: Google Earth, 2025

De acordo com o Anexo I – N.T.02 (2025) da Equatorial Energia, para uma carga demandada de 518kVA deve ser adotado um transformador de 500kVA conforme Tabela 03:

Demanda Calculada (kVA)	Transformador Recomendado (kVA)
60 a 82	75
83 a 124	112,5
125 a 165	150
166 a 248	225
249 a 330	300
334 a 550	500
551 a 825	750
826 a 1100	1000
1101 a 1375	1250
1376 a 1650	1500
1651 a 2200	2000
2201 a 2717	2500

Tabela 03 – Relação de demanda x transformador – Fonte: Anexo I, N.T.02.EQTL (2025)

5.2 Projeto Arquitetônico

A N.T.02 (2025), em sua seção 6.2, estabelece que o padrão construtivo de subestação ao tempo em poste, também conhecido como subestação aérea, aplica-se somente aos transformadores de distribuição em líquido isolante até 300kVA. Portanto, para o projeto em questão, que demanda um transformador de 500kVA, torna-se necessário a implantação de uma subestação em solo.

Além disso, a seção 6.5.31 da mesma norma prevê que, mediante análise técnica (aspectos técnicos e de segurança), podem ser aprovados projetos de subestações abrigadas instaladas no primeiro piso/andar de edificações comerciais. Portanto considerando os riscos de alagamento da região, foi acordado entre os gerentes da unidade e os projetistas responsáveis, que a implantação da subestação se daria pela construção de um novo pavimento por cima da entrada lateral esquerda do prédio, conforme Figuras 20 e 21.



Figura 20 – Entrada lateral existente – Fonte: Google Street View

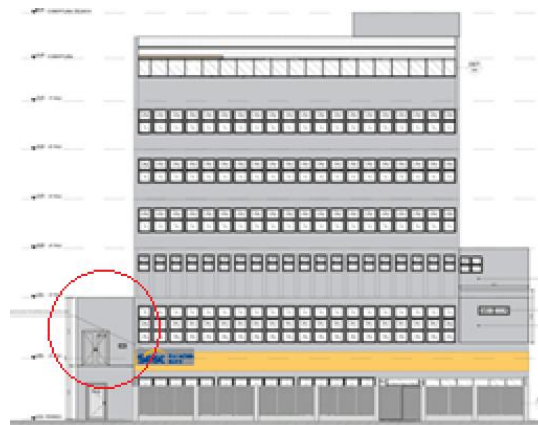


Figura 21 – Modelo proposto – Vista Frontal.

Entretanto, a área destinada à instalação da subestação é limitada, conforme apresentado na planta baixa da Figura 22. Esta restrição decorre das características construtivas da edificação existente: à esquerda, a sala faz divisa direto com uma edificação vizinha; já à direita, a ampliação demandaria a demolição de uma parede estrutural, o que poderia comprometer a estabilidade da edificação, ocasionando recalques nas vigas e até mesmo risco de colapso parcial.

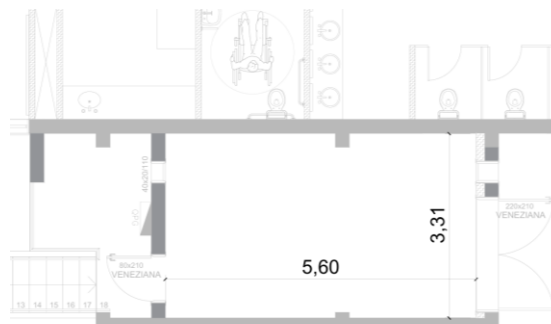


Figura 22 – Sala da Subestação – Planta Baixa, escala: 1/50 – Fonte: Elaboração própria

Dessa forma, não é viável a criação de uma sala de maiores dimensões, sendo necessário trabalhar dentro do espaço atualmente disponível conforme a Figura 22.

5.3 Projeto da subestação

A concepção geral da subestação se dá pela seguinte sequência funcional:

- I. Alimentação em rede trifásica de 13,8kV, proveniente de poste da concessionária equipado com chave seccionadora unipolar de elo fusível 25K e para-raios poliméricos 12kV-10kA.
- II. Entrada subterrânea em média tensão, realizada por meio de cabos de EPR 50mm² 8,7/15kV em eletroduto aço galvanizado.
- III. Cubículo de entrada e medição,

em média tensão, contendo transformadores de corrente (TCs), transformadores de potencial (TPs) e multimetro digital fornecidos pela concessionária.

- IV. Cubículo de proteção equipado com disjuntor de média tensão e relés de proteção, definidos conforme estudo de coordenação e seletividade.
- V. Cubículo de transformação composto por transformador à seco triângulo/estrela de 500kVA, 13,8kV/220-127V.
- VI. Quadro de proteção geral (QPG), equipado com disjuntor em caixa moldada trifásico de 1600A CA, responsável pela distribuição da energia elétrica aos quadros setoriais da edificação.

5.4 Alternativas de Implantação da Subestação

Diante das condições arquitetônicas e estruturais apresentadas, foram analisadas as três alternativas de implantação da subestação elétrica para atendimento da edificação: subestação convencional, subestação em cubículos blindados e subestação compacta isolada a gás SF₆.

5.4.1 Subestação Convencional

De acordo com o Desenho 14 da N.T.02.EQTL (2025), o padrão construtivo de subestações convencionais atendidas pela Equatorial Energia prevê a disposição e medidas mínimas para as salas da subestação, conforme ilustrado na Figura 23:

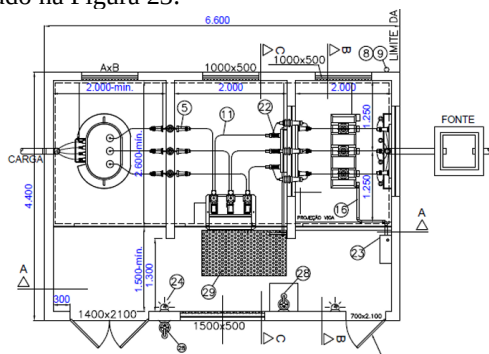


Figura 23 – Subestação com medição/proteção/transformação – Fonte: Desenho 14, N.T.02.EQTL, 2025(Equatorial).

Para a implantação deste modelo, seria necessária uma área mínima de 4,40 m x 6,00 m. No entanto, a sala atualmente disponível para a subestação possui dimensões de 5,60 m x 3,30 m, o que torna incompatível com a solução convencional, como pode ser visto pela Figura 24.

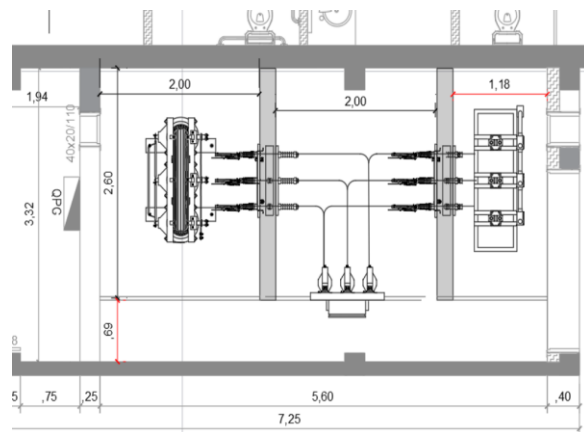


Figura 24 – Modelo proposto subestação convencional

Essa limitação inviabiliza a construção de uma subestação do tipo convencional no local estudado. Dessa forma, torna-se necessário a análise da implantação de soluções mais compactas como as de cubículos blindados ou módulos isolados a gás SF₆,

5.4.2 Subestação em Cubículos Blindados

Para a alternativa do cubículo blindado foi utilizado o padrão construtivo disponibilizado pela norma da Equatorial Energia, conforme figuras 7 e 8, este modelo de construção possui dimensões de 4,15 m x 2,1 m.

Essa solução, apesar de se apresentar mais compacta, conforme a seção 4.3.1.2 deste trabalho, ela deve ser instalada com afastamento mínimo lateral de 0,7 m até a parede e faixa livre frontal de 0,7 m para operação e manobra, considerando a projeção da porta aberta para fora. O layout do modelo em planta pode ser visto na Figura 25.

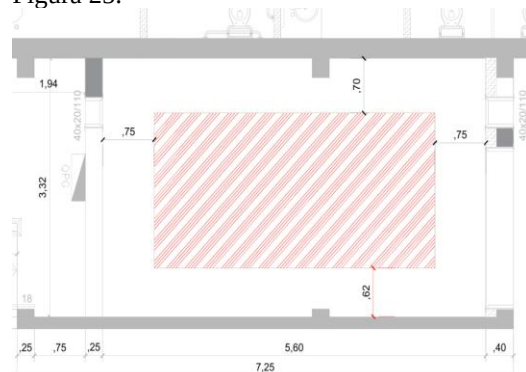


Figura 25 – Modelo proposto cubículo blindado

Conforme Figura 25, a largura total da sala não permite a disposição adequada dos cubículos blindados, uma vez que não há espaço hábil para instalar o cubículo de forma que suas portas fiquem abertas em 90 graus e ainda sim haja uma distância de circulação livre de 0,7m. Logo, essa solução também é inviável.

5.4.3 Subestação GIS (SF₆)

Como terceira alternativa e última alternativa, foi analisada a implantação de uma subestação

compacta isolada a gás (GIS), utilizando cubículos do tipo SM6, padrão Schneider, próprios para a instalação abrigada em 13,8kV.

Os módulos incluídos na proposta são: GAM2 (entrada), IM (secção), GBC-B (medição com transformadores de corrente e de potencial) e DM1-A (disjuntor de média tensão e relé).

O projeto é apresentado na Figura 26:

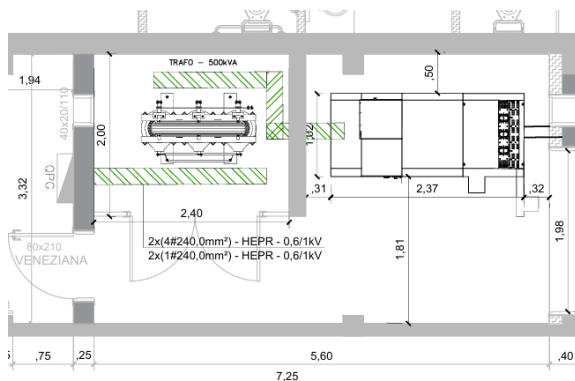


Figura 26 – Solução GIS proposta – Fonte: (Elaboração própria)

Para essa solução foi utilizada os módulos: GMA2 (entrada), IM (seccionamento), GBC-B (medição) e DM1-A (proteção). O diagrama unifilar está representado pela Figura 27:

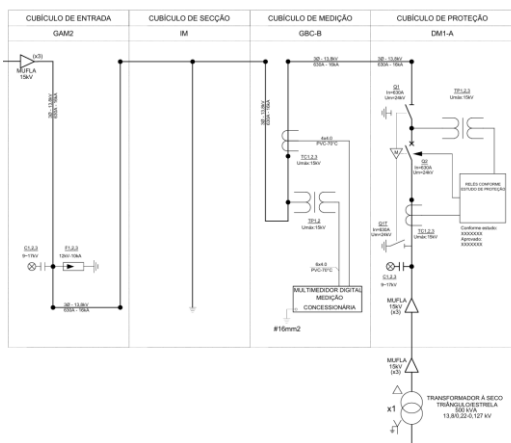


Figura 27 – Diagrama unifilar da solução proposta – Fonte: (Elaboração própria)

As principais vantagem desta configuração é a elevada compactidade e a possibilidade de instalá-la com afastamentos entre a face e a parede menores, em relação ao cubículo blindado.

Como desvantagens, ressalta-se o custo de aquisição mais elevado e a ausência de previsão específica nas normas brasileiras (como a NBR 14039 e as normas das concessionárias), o que demandou análise adicional pela concessionária para homologação.

Após a apresentação da proposta às partes envolvidas, foi realizada uma reunião conjunta entre os engenheiros e técnicos da Equatorial Energia e a equipe técnica e administrativa responsável pelo projeto. Nessa ocasião, foram discutidas as alternativas estudadas, bem como as vantagens

e desvantagens de cada uma, resultando na aprovação da solução GIS (SF₆).

O custo estimado para os módulos SM6 neste projeto em específico foi de R\$239.138,92. É importante salientar que, para esta análise, não foram incluídos os custos de manutenção, uma vez que os equipamentos GIS possuem vida útil prolongada e demandam intervenções mínimas ao longo de sua operação.

Logo, diante das restrições construtivas da edificação, e por mais que o custo de implantação seja mais elevado, a solução em subestação compacta isolada a gás (GIS – SF₆) foi considerada a mais adequada. Assim, o projeto foi aprovado pelas partes envolvidas e atualmente encontra-se em fase final de homologação, consolidando a viabilidade técnica da aplicação desta tecnologia em cenários urbanos críticos.

6 Conclusão

O presente trabalho apresentou um estudo de caso voltado à implantação de subestações de entrada de energia isoladas a gás SF₆, considerando a particularidade de edificações onde há a necessidade de implantação de subestações em solo e que a área disponível é crítica.

A análise demonstrou que, embora a subestação convencional e a de cubículo blindado sejam amplamente utilizadas no Brasil, ambas podem se mostrar incompatíveis com as limitações físicas e estruturais, principalmente em centros urbanos.

Por outro lado, a alternativa em GIS (SF₆) se destacou por sua compactidade, modularidade e segurança operacional, possibilitando a implantação em locais onde há pouca disponibilidade de área.

Conclui-se, portanto, que a utilização de subestações compactas isoladas a gás constitui uma alternativa eficaz para cenários urbanos críticos.

Este trabalho contribui, assim, para reforçar a aplicabilidade dessa tecnologia no contexto brasileiro, abrindo caminho para futuras discussões sobre sua inserção nas normas técnicas nacionais e nos manuais das concessionárias de energia.

7 Referências

- [1] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5410: Instalações elétricas de baixa tensão. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.
- [2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14039: Instalações elétricas de média tensão de 1,0 kV a 36,2 kV. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.
- [3] ENEL DISTRIBUIÇÃO RIO. Norma Técnica NT-05: Fornecimento em média tensão. Rio de Janeiro: ENEL, 2023.
- [4] EQUATORIAL ENERGIA. Formulários e instruções técnicas para projetos de média tensão. Belém: Equatorial Energia, 2024.
- [5] ENEL DISTRIBUIÇÃO. CNC-NDBR-DBR-20-0942-EDBR: Critérios de projeto

para subestações de média tensão. Rio de Janeiro: Enel, 2024.

[6] DE OLIVEIRA, Thiago; JESUS, Mayron Breda de; YOKOGAWA, Renan. Análise do desempenho de uma subestação isolada a gás em comparação a uma subestação convencional. 2017.

[7] NAIDU, M. S. *Gas Insulated Substations*. New Delhi: I. K. International Publishing House Pvt. Ltd., 2008.

[8] SCHNEIDER ELECTRIC. *Catálogo Técnico SM6 – Conjunto de Manobra Isolado a Gás SF₆*. São Paulo: (Schneider Electric, 2024)

[09] ROMAGNOLE PRODUTOS ELÉTRICOS. *Catálogo de Subestações Compactas e Blindadas*. Campo Mourão: (Romagnole, 2023)

[10] CEMIG DISTRIBUIÇÃO. ND 5.3: fornecimento de média tensão. Belo Horizonte: Cemig, 2020.

[11] WEG, Catálogo Skid Transportável. 2025