

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

Heitor Berger Celeri

**ANÁLISE COMPARATIVA E AVALIAÇÃO DE ESTUDO DE CASO DE
SUBESTAÇÕES CONVENCIONAIS E ISOLADAS A GÁS**

**Ilha Solteira
2025**

Heitor Berger Celeri

**ANÁLISE COMPARATIVA E AVALIAÇÃO DE ESTUDO DE CASO DE
SUBESTAÇÕES CONVENCIONAIS E ISOLADAS A GÁS**

Trabalho de graduação apresentado à
Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira –
Unesp como parte dos requisitos para
obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Nome do orientador
Prof. Dr. Carlos Antonio Alves

**Ilha Solteira
2025**

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

C392a Celeri, Heitor Berger.
Análise comparativa e avaliação de estudo de caso de subestações convencionais e isoladas a gás / Heitor Berger Celeri. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2025
50 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Elétrica) -
Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira,
2025

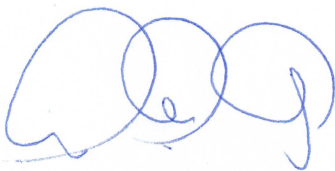
Orientador: Carlos Antonio Alves

Inclui bibliografia

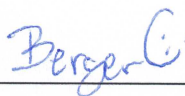
1. Análise. 2. Comparativa. 3. Subestações.

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE GRADUAÇÃO

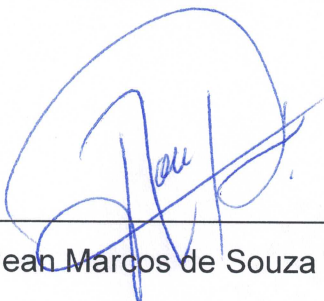
Aos vinte e três dias do mês de junho do ano de dois mil e vinte e cinco, o discente **Heitor Berger Celeri**, matriculado sob o nº 181053519, tendo como banca examinadora o seu orientador, o *Prof. Dr. Carlos Antonio Alves*, o *Prof. Dr. Jean Marcos de Souza Ribeiro* e o *Doutorando Rodrigo Serra Daltin*, apresentou o Trabalho de Graduação intitulado "**ANÁLISE COMPARATIVA E AVALIAÇÃO DE ESTUDO DE CASO DE SUBESTAÇÕES CONVENCIONAIS E ISOLADAS A GÁS**", obtendo a nota 95 (NOVE E MEIO) e conceito APROVADO.



Prof. Dr. Carlos Antonio Alves
- Orientador -



Heitor Berger Celeri
- Discente -



Prof. Dr. Jean Marcos de Souza Ribeiro
- Membro da Banca -



Doutorando Rodrigo Serra Daltin
- Membro da Banca -

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, meu eterno agradecimento. Sem o amor, apoio e força de vocês, nada disso seria possível. Este trabalho é uma homenagem a vocês.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de iniciar meus agradecimentos aos meus pais, que sempre foram minha maior fonte de apoio e inspiração. Obrigado por me ensinarem a importância do estudo e por acreditarem em mim em todos os momentos. O amor e os ensinamentos que recebi de vocês são a base de tudo o que conquistei até aqui.

Agradeço também à minha irmã, pela parceria e por estar ao meu lado ao longo de todos esses anos.

Meus agradecimentos vão ainda para os meus amigos da república Cinco Bola. Com vocês, não compartilhei apenas uma casa, mas vivências inesquecíveis, que me trouxeram ensinamentos, risadas e muita amizade.

Sou imensamente grato também aos meus amigos de Ilha Solteira, Caio Lombardi, Thiago Kitayama e Eduardo Carvalho. A amizade de vocês tem sido uma constante ao longo dos anos, e a presença de cada um de vocês sempre foi um apoio incondicional desde os primeiros passos dessa caminhada.

Agradeço profundamente aos meus colegas de trabalho da equipe de Engenharia de Vendas da Siemens Energy. Sou grato por todos os ensinamentos que recebi e pelo suporte técnico que me proporcionaram ao longo dessa jornada. Trabalhar ao lado de vocês é uma experiência enriquecedora, e cada aprendizado que compartilhei com a equipe contribuiu de maneira significativa para o meu crescimento profissional.

Por fim, não poderia deixar de agradecer ao Professor Doutor Carlos Antônio Alves, que se fez presente de forma exemplar em minha trajetória acadêmica. Agradeço pelo comprometimento, pela paciência e por todo o auxílio que me ofereceu durante a graduação e neste TG.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo destacar elementos relevantes de uma análise comparativa entre subestações convencionais e isoladas a gás (GIS). As subestações são componentes essenciais no sistema de transmissão e distribuição de energia elétrica, e a escolha do tipo adequado pode impactar significativamente a eficiência, segurança e custos operacionais. A metodologia utilizada inclui uma revisão bibliográfica detalhada, análise de estudos de caso e comparação de parâmetros técnicos e econômicos. Durante o desenvolvimento do trabalho, são descritas as estruturas, componentes e funcionamento de ambos os tipos de subestações, além de uma análise de custo de aquisição dos equipamentos envolvidos no estudo. Também são abordados critérios de desempenho técnico e ambiental, proporcionando uma visão abrangente das vantagens e desvantagens de cada tipo de subestação.

Palavras-chave: Transmissão de energia elétrica; Distribuição de energia elétrica; Subestações; Estudo de Caso.

ABSTRACT

This work aims to highlight key elements of a comparative analysis between conventional and gas-insulated substations (GIS). Substations are essential components in the power transmission and distribution system, and the choice of the appropriate type can significantly impact efficiency, safety, and operational costs. The methodology used includes a detailed literature review, case study analysis, and comparison of technical and economic parameters. During the development of the work, the structures, components, and operation of both types of substations are described, along with a cost analysis of the equipment involved in the study. Additionally, technical and environmental performance criteria are also addressed, providing a comprehensive overview of the advantages and disadvantages of each type of substation.

Keywords: Electrical power transmission system; Electrical power distribution system; Substation; Case study analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Percurso da Energia: Geração, Transmissão e Distribuição.....	17
Figura 2. Subestação AIS (Convencional).....	19
Figura 3. Transformador de Potência de Alta Tensão.....	21
Figura 4. Disjuntor de Alta Tensão.....	23
Figura 5. Chave Seccionadora de Alta Tensão.....	25
Figura 6. Para-raios de Alta Tensão.....	27
Figura 7. Transformador de Corrente.....	29
Figura 8. Transformador de Potencial.....	30
Figura 9. Painel de Controle e Proteção	31
Figura 10. Subestação GIS - Metrô de SP	33
Figura 11. Corte Lateral de uma GIS.....	36
Figura 12. Imagem Aérea da Subestação Bandeirantes	42
Figura 13. Vista Lateral de um Arranjo AIS.....	42
Figura 14. Vista Lateral de uma Sala de Comando	43
Figura 15. Comparativo em Área - AISxGIS.....	44
Figura 16. Vista Lateral em Corte (GIS + Sala de Comando).....	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Grau de Relevância dos Aspectos Técnicos na Implementação de Subestações.	39
Tabela 2. Comparativo em Valor de Área	45
Tabela 3. Custo dos Equipamentos da SE Bandeirantes.....	46
Tabela 4. Comparativo Final.....	47

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AIS	Air Insulated Switchgear
CA	Corrente Alternada
GIS	Gas Insulated Switchgear
SF6	Hexafluoreto de Enxofre
SEP	Sistema Elétrico de Potência
TC	Transformador de Corrente
TP	Transformador de Potencial

Sumário

1. Introdução	14
1.1. Objetivos.....	14
1.2. Estruturação do conteúdo.....	15
2. Sistema Elétrico brasileiro	16
2.1. Subestações Isoladas a Ar (AIS).....	18
2.1.2. Equipamentos de Pátio de Alta Tensão	19
2.1.2.1. Transformador de Potência	20
2.1.2.2. Disjuntores de Alta Tensão	22
2.1.2.3. Seccionadores de Alta Tensão.....	24
2.1.2.4. Para-raios de Alta Tensão.....	26
2.1.2.5. Transformadores de Corrente	28
2.1.2.6. Transformadores de Potencial	29
2.1.2.7. Painéis de controle e proteção	30
3. Subestações Isoladas a Gás (GIS)	33
3.1. Gás Hexafluoreto de Enxofre	34
3.2. Equipamentos de Alta Tensão em uma GIS.....	35
4. Fatores da análise comparativa entre os tipos de subestação.....	37
4.1. Fatores Econômicos	37
4.1.1. Área disponível	37
4.1.2. Tecnologia Implementada.....	37
4.1.3. Construção Civil	38
4.2. Fatores Técnicos	38
4.2.1. Confiabilidade	39
4.2.2. Segurança.....	39
4.2.3. Tempo para Implementação da Obra	39
4.2.4. Degradação dos Equipamentos	40
4.3. Fatores Ambientais.....	40
4.3.1. Poluição atmosférica.....	40
4.3.2. Licença Ambiental.....	41
4.3.3. Impacto Visual	41
5. Estudo de caso: Subestação Primária Bandeirantes – Linha 5 Lilás	42

6. Conclusão	48
REFERÊNCIAS	49

1. INTRODUÇÃO

O sistema de energia brasileiro é um dos mais complexos e extensos do mundo, desempenhando um papel importante na infraestrutura do país. A transmissão e distribuição de energia elétrica no Brasil envolvem uma vasta rede de linhas de transmissão, subestações e unidades geradoras que garantem o fornecimento contínuo e eficiente de eletricidade para consumidores residenciais, comerciais e industriais. As subestações, elementos essenciais dessa infraestrutura, são responsáveis por transformar os níveis de tensão adequados para a transmissão e distribuição da energia, assegurando a estabilidade e a segurança do sistema elétrico.

Devido à sua complexidade e à natureza crítica de seu funcionamento, a construção e manutenção das subestações demandam investimentos significativos. O elevado custo associado a esses projetos se deve, em parte, à necessidade de equipamentos especializados, materiais de alta qualidade e mão de obra qualificada. Além disso, a localização estratégica das subestações e a sua capacidade de suportar flutuações na demanda de energia são fatores que influenciam a eficiência e o custo operacional do sistema.

Este trabalho tem como objetivo realizar uma análise comparativa entre subestações convencionais AIS e subestações isoladas a gás GIS. A escolha do tipo adequado de subestação pode impactar significativamente a eficiência, segurança e custos operacionais. Este estudo é realizado com a finalidade de proporcionar uma compreensão abrangente das vantagens e desvantagens associadas a cada tipo de subestação, contribuindo assim para uma tomada de decisão mais informada na seleção de subestações.

1.1. Objetivos

O principal objetivo deste estudo é analisar e comparar os aspectos técnicos, econômicos e ambientais das subestações convencionais AIS e das subestações isoladas a gás GIS, de modo a identificar as características mais relevantes e determinar em quais circunstâncias cada tipo apresenta maior vantagem.

1.2. Estruturação do conteúdo

A estrutura deste trabalho está organizada de forma a proporcionar uma visão completa e detalhada sobre as subestações convencionais e as subestações isoladas a gás. Inicialmente, são abordadas as peculiaridades e complexidades do sistema de energia brasileiro, com ênfase na importância das subestações para a eficiência e segurança do fornecimento elétrico. Em seguida, são descritas em detalhes as subestações convencionais AIS, incluindo sua estrutura, componentes e funcionamento, além de uma análise das vantagens e desvantagens associadas. Na sequência, são apresentadas as subestações isoladas a gás GIS, com a descrição de sua estrutura, componentes e funcionamento, bem como a discussão de seus pontos positivos e negativos.

Após essas seções individuais, realiza-se uma análise comparativa abrangente entre as subestações AIS e GIS. Essa comparação contempla parâmetros técnicos, custos operacionais, fatores ambientais e aspectos relacionados à segurança, com base em dados obtidos por meio de revisão bibliográfica e da avaliação do estudo de caso apresentado.

Por fim, a seção de conclusão resume as principais descobertas do estudo, destacando as circunstâncias em que cada tipo de subestação apresenta maior vantagem. São feitas recomendações práticas para a seleção de subestações, fundamentadas nas análises desenvolvidas ao longo do trabalho, além da sugestão de direções para pesquisas futuras, com foco na continuidade e aprofundamento do tema.

2. SISTEMA ELÉTRICO BRASILEIRO

Para levar a energia elétrica a todos os consumidores, grandes usinas, utilizando as mais variadas formas de força motriz – hidráulica, térmica, atômica, eólicas e solares – são interligadas entre si e às subestações dos grandes centros de carga por meio de longas linhas de transmissão em altas e extra-altas tensões, formando gigantescas redes de transmissão que, juntamente com as linhas e subestações de subtransmissão e de distribuição, formam os sistemas elétricos de potência (SEP). (BICHELS, 2018).

Embora a geração de energia seja um passo indispensável, a verdadeira complexidade reside na transmissão dessa energia desde as usinas geradoras até os centros de consumo. O Brasil, sendo um país de dimensões continentais, enfrenta o desafio de transportar energia elétrica através de longas distâncias. Isso é realizado por meio de uma extensa rede de linhas de transmissão de alta tensão que interligam diversas regiões. A transmissão de energia elétrica é realizada através de linhas de transmissão que operam em altos níveis de tensão para minimizar perdas durante o transporte. No entanto, para que essa energia possa ser utilizada de forma segura e eficiente pelos consumidores finais, é necessário “manipular” essa tensão em etapas apropriadas.

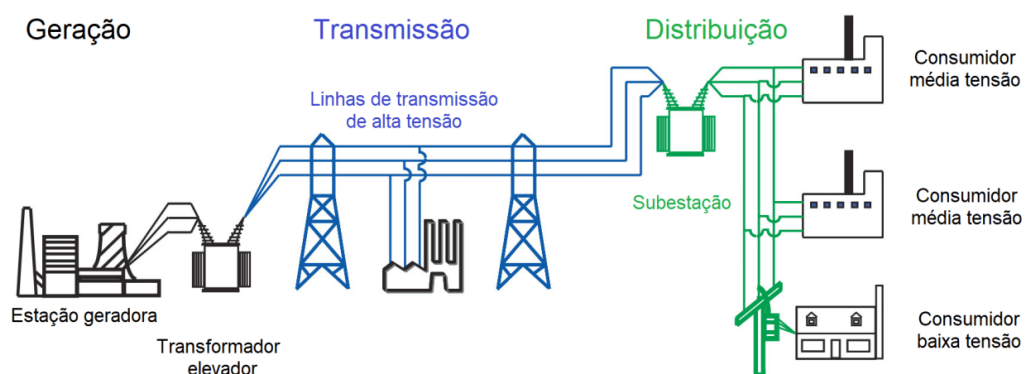
As subestações são componentes que têm a função de transformar os níveis de tensão da energia elétrica, permitindo que seja transmitida em longas distâncias com perdas mínimas e depois redistribuída com segurança aos consumidores finais. Sem as subestações, seria impossível gerenciar a complexa malha de transmissão de energia que interliga um país com as características do Brasil. Existem diferentes tipos de subestações, sendo as mais comuns as subestações convencionais e as subestações isoladas a gás. As subestações convencionais utilizam o ar como meio de isolamento e as subestações GIS utilizam gás SF₆ como meio de isolamento.

No sistema elétrico, existem diferentes tipos de subestações, cada uma com características e funções específicas. Elas podem ser classificadas de acordo com a sua localização, função e nível de tensão. Entre os principais tipos, temos as subestações de transmissão, distribuição, subtransmissão, elevadoras e redutoras.

As subestações de transmissão operam em níveis de alta e extra-alta tensão, geralmente acima de 230 kV, e têm como função principal interligar as linhas de transmissão de longa distância, facilitando o transporte de grandes quantidades de energia elétrica das usinas geradoras até as áreas de consumo. Essas subestações são responsáveis por manter a estabilidade e a confiabilidade do sistema elétrico, utilizando equipamentos robustos e de alta capacidade.

Na figura 1 é representado todo o percurso da energia, desde sua geração até o consumo. No meio desse trajeto, destaca-se a importância das subestações no processo.

Figura 1. Percurso da Energia: Geração, Transmissão e Distribuição



Fonte: (ALFACOMP, 2025).

As subestações de distribuição operam em níveis de média tensão, entre 1 kV e 69 kV, sendo responsáveis por distribuir a energia elétrica das subestações de transmissão para os consumidores finais, como residências, indústrias e comércios. Elas desempenham um papel muito importante na regulação da tensão e na proteção dos circuitos de distribuição, garantindo um fornecimento contínuo e de qualidade. As subestações de subtransmissão operam em níveis de tensão intermediários, geralmente entre 69 kV e 230 kV, e servem como um elo de conexão entre as subestações de transmissão e as de distribuição, ajudando a reduzir os níveis de tensão de forma gradual e facilitando a integração dos diferentes segmentos do sistema elétrico.

As subestações elevadoras, localizadas próximas às usinas geradoras, têm a função de elevar a tensão da energia gerada para níveis adequados à transmissão de

longa distância. Elevar a tensão é essencial para reduzir as perdas de energia durante o transporte e aumentar a eficiência do sistema. Por fim, as subestações redutoras são responsáveis por reduzir a tensão da energia transmitida para níveis adequados à distribuição e consumo final, sendo estrategicamente localizadas próximas às áreas de consumo para garantir uma entrega eficiente e segura da eletricidade.

2.1. Subestações Isoladas a Ar (AIS)

As subestações isoladas a ar, conhecidas como subestações AIS (*Air Insulated Substations*), possuem como principal característica o uso do ar como meio isolante entre os componentes energizados e o ambiente externo. Essa particularidade exige maiores espaçamentos físicos entre os equipamentos, resultando em subestações que ocupam áreas consideráveis.

Além dos espaçamentos mínimos citados acima, devem ser previstos áreas para a circulação de pessoas e equipamentos. Portanto, em regiões internas a SE, as distâncias de segurança resultam da soma de dois valores:

- Distanciamento referente aos afastamentos mínimos necessários para a passagem de pedestres, veículos e equipamentos em áreas energizadas.
- Distanciamento referente aos afastamentos mínimos necessários para a realização de trabalho e manutenções por operadores, considerando as dimensões médias de uma pessoa (HORIKAWA, 2013).

As subestações AIS operam em uma ampla faixa de níveis de tensão, de acordo com a sua função e localização dentro do sistema elétrico. Os níveis de tensão podem ser categorizados como alta tensão, média tensão e baixa tensão. As subestações de alta tensão, que operam geralmente acima de 69 kV, são utilizadas na transmissão de energia a longas distâncias. Níveis de tensão comuns incluem 115 kV, 138 kV, 230 kV e 345 kV. As subestações são essenciais para conectar grandes usinas geradoras a centros de carga e outras subestações de transmissão.

As subestações de média tensão, que operam entre 1 kV e 69 kV, são empregadas na distribuição de energia a curtas e médias distâncias. Níveis de tensão comuns nesta categoria incluem 13,8 kV, 34,5 kV e 69 kV. Elas são responsáveis por

fornecer energia para áreas urbanas e rurais, garantindo que a eletricidade chegue aos consumidores finais de forma eficiente. As subestações de baixa tensão, que operam geralmente abaixo de 1 kV, são utilizadas para a distribuição final de energia diretamente aos consumidores. Exemplos de níveis de tensão nesta categoria incluem 127 V, 220 V e 440 V. As subestações são essenciais para a entrega segura e eficiente da eletricidade em residências, comércios e pequenas indústrias.

As subestações AIS possuem várias particularidades que as diferenciam. Além do uso do ar como meio isolante, outras características incluem o espaçamento físico, a manutenção e operação, o custo de implementação, a resiliência e flexibilidade e o impacto ambiental. Dentro de uma subestação AIS, encontramos diversos equipamentos, cada um desempenhando funções específicas para o funcionamento da subestação, como transformadores, disjuntores, seccionadoras, para-raios, transformadores de corrente, transformadores de potencial e painéis de controle e proteção.

Na Figura 2 apresenta-se a vista lateral de uma subestação AIS e os equipamentos que a compõem.

Figura 2. Subestação AIS (Convencional)



Fonte: (Revista AdNormas, 2020).

2.1.2. Equipamentos de Pátio de Alta Tensão

As subestações elétricas são compostas por uma série de equipamentos essenciais que desempenham funções específicas para garantir a operação eficiente

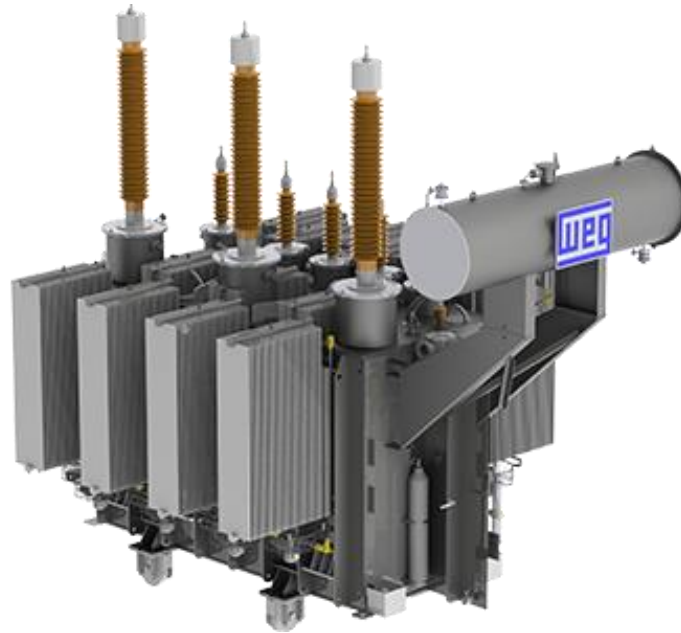
e segura do sistema elétrico. Entre os principais equipamentos estão os transformadores, responsáveis por alterar os níveis de tensão e corrente da energia elétrica, mantendo a potência constante; os disjuntores, que protegem o sistema ao interromper o fluxo de corrente em casos de falhas ou sobrecargas; as seccionadoras, utilizadas para isolar circuitos e permitir a manutenção dos equipamentos; os para-raios, que protegem a subestação contra surtos de tensão causados por descargas atmosféricas; os transformadores de corrente (TCs) e transformadores de potencial (TPs), que realizam a medição e monitoramento das correntes e tensões no sistema; e os painéis de controle e proteção, que monitoram e controlam a operação de todos os equipamentos da subestação. Cada um desses componentes são indispensáveis para o funcionamento integrado e eficaz das subestações, assegurando a estabilidade e confiabilidade do fornecimento de energia elétrica.

2.1.2.1. Transformador de Potência

O transformador de potência ou de força é o responsável por elevar ou abaixar os níveis de tensão no sistema elétrico da instalação. De forma geral, realiza a transferência de potência por meio de indução eletromagnética, transformando tensão e corrente alternadas entre dois ou mais circuitos, normalmente sem mudança de frequência (TSEA, 2018).

Na Figura 3 é apresentado um transformador de potência de alta tensão.

Figura 3. Transformador de Potência de Alta Tensão



Fonte: (WEG, 2025).

O funcionamento dos transformadores de alta tensão é baseado no princípio da indução eletromagnética. Eles são compostos por dois enrolamentos de fio condutor, o primário e o secundário, enrolados em torno de um núcleo de material ferromagnético. Quando uma corrente alternada (CA) passa pelo enrolamento primário, ela cria um campo magnético variável que é transferido para o núcleo do transformador. Esse campo magnético induz uma corrente elétrica no enrolamento secundário, convertendo a tensão para um nível diferente. A relação de transformação entre os enrolamentos primário e secundário determina se a tensão será aumentada (transformador elevador) ou reduzida (transformador rebaixador). Essa capacidade de ajustar os níveis de tensão é vital para a operação do sistema elétrico.

A utilização de transformadores de alta tensão nas subestações AIS é impulsionada por várias razões. Primeiramente, transportar energia elétrica em altas tensões reduz as perdas por efeito Joule ao longo das linhas de transmissão. Níveis de tensão mais altos implicam correntes mais baixas para a mesma potência, resultando em menores perdas de energia nos condutores. Além disso, os transformadores de alta tensão permitem que diferentes partes do sistema elétrico, que operam em variados níveis de tensão, sejam compatíveis entre si. As usinas

geradoras produzem energia, que é elevada para transmissão e, posteriormente, rebaixada para distribuição e consumo.

Os transformadores de alta tensão podem ser classificados em diferentes tipos, cada um com características específicas. Os transformadores elevadores aumentam a tensão da energia gerada nas usinas para níveis adequados à transmissão de longa distância. Eles possuem um enrolamento secundário com maior número de espiras em comparação ao primário, resultando em uma tensão secundária mais alta. Já os transformadores rebaixadores diminuem a tensão da energia transmitida para níveis apropriados à distribuição e consumo final. Eles possuem um enrolamento secundário com menor número de espiras em comparação ao primário, resultando em uma tensão secundária mais baixa. Essa redução de tensão é necessária para adaptar a energia aos níveis seguros de operação dos equipamentos de consumo.

Além dos transformadores convencionais, existem autotransformadores, que possuem um único enrolamento que atua como primário e secundário. Eles são usados quando a diferença entre as tensões de entrada e saída é pequena, oferecendo maior eficiência e compactação. No entanto, não proporcionam o mesmo isolamento elétrico que os transformadores convencionais. Outra variação são os transformadores de potência imersos em óleo, que utilizam óleo isolante para refrigerar e isolar os enrolamentos e o núcleo. São amplamente usados devido à sua capacidade de dissipar calor de forma eficaz, garantindo a operação confiável do transformador. Transformadores a seco, que utilizam materiais isolantes sólidos em vez de óleo para isolamento e refrigeração, são utilizados em ambientes onde o risco de incêndio deve ser minimizado, como edifícios e indústrias sensíveis.

2.1.2.2. Disjuntores de Alta Tensão

Os disjuntores de alta tensão são componentes fundamentais nas subestações isoladas a ar. Eles desempenham um papel fundamental na proteção e controle do sistema elétrico, interrompendo o fluxo de corrente em casos de falhas ou sobrecargas. Essa função é essencial para garantir a segurança dos equipamentos e

a continuidade do fornecimento de energia elétrica. Um exemplo de disjuntor de alta tensão é indicado conforme a Figura 4.

Figura 4. Disjuntor de Alta Tensão



Fonte: (Siemens Energy, 2025).

O disjuntor de alta tensão frequentemente atua em conjunto com relés de proteção e chaves seccionadoras. É usado quando se faz necessário conectar ou desconectar circuitos nos barramentos ou também conectar diferentes barramentos ou seções no sistema, pois interrompe as correntes de defeito do circuito durante o menor espaço de tempo possível. Em complemento, os disjuntores de alta tensão podem possuir a capacidade de interromper correntes de circuitos operantes a plena carga ou a vazio, além de energizar os mesmos circuitos em condições de operação normal ou em falta (MAMEDE, 2021).

Os disjuntores de alta tensão são compostos por contatos móveis e fixos que, quando se separam, criam um arco elétrico. Para extinguir esse arco e interromper a corrente, os disjuntores utilizam diferentes meios de extinção, como óleo, ar comprimido, vácuo ou gás SF₆. A escolha do meio de extinção depende das características específicas do disjuntor e das condições de operação.

A utilização de disjuntores de alta tensão nas subestações AIS é motivada por várias razões. Primeiramente, eles são essenciais para a proteção do sistema elétrico, garantindo que falhas sejam isoladas rapidamente para evitar danos aos equipamentos e interrupções no fornecimento de energia. Além disso, os disjuntores permitem a realização de manutenções e operações de comutação de maneira segura e controlada, contribuindo para a flexibilidade e confiabilidade do sistema.

Os disjuntores de alta tensão podem ser classificados em diferentes tipos, cada um com características específicas de acordo com o meio de extinção do arco elétrico. Os disjuntores a óleo utilizam óleo isolante para extinguir o arco elétrico. Já os disjuntores a ar comprimido utilizam ar como meio de extinção do arco, sendo comuns em sistemas de média e alta tensão. Os disjuntores a vácuo são conhecidos por sua alta confiabilidade e baixa manutenção, sendo frequentemente utilizados em sistemas de média tensão. Por fim, os disjuntores a SF₆ utilizam gás hexafluoreto de enxofre para extinguir o arco elétrico, oferecendo excelentes propriedades isolantes e de extinção de arco.

Os disjuntores de alta tensão possuem várias características elétricas importantes. A capacidade de interrupção define a corrente máxima que o disjuntor pode interromper com segurança durante uma falha. A tensão nominal indica o nível de tensão para o qual o disjuntor foi projetado. A resistência de contato refere-se à resistência elétrica dos contatos do disjuntor quando fechados, influenciando as perdas de energia e a eficiência do dispositivo. Além disso, os disjuntores de alta tensão são projetados para operar com alta confiabilidade e rapidez, garantindo uma resposta imediata em casos de falha. Os disjuntores de alta tensão são dimensionados com base em critérios técnicos rigorosos para garantir seu desempenho adequado. O dimensionamento leva em consideração a capacidade de interrupção necessária, a tensão de operação, as condições ambientais e os requisitos de manutenção.

2.1.2.3. Seccionadores de Alta Tensão

As chaves seccionadoras de alta tensão são componentes essenciais nas subestações isoladas a ar. Elas desempenham seu papel na operação e manutenção

do sistema elétrico, proporcionando a capacidade de isolar circuitos e equipamentos para a realização de manutenções, reparos ou operações de comutação de maneira segura e eficiente. A utilização das chaves seccionadoras garante a segurança dos operadores e a continuidade do fornecimento de energia elétrica. Uma seccionadora de alta tensão é indicada conforme a Figura 5.

Figura 5. Chave Seccionadora de Alta Tensão



Fonte: (Savree, 2025).

O funcionamento das chaves seccionadoras de alta tensão baseia-se na abertura e fechamento de circuitos elétricos em condições de ausência de carga. Essas chaves são projetadas para serem operadas manualmente ou por meio de acionamento motorizado. Quando abertas, as chaves seccionadoras criam uma separação física visível entre os contatos, garantindo que o circuito esteja completamente isolado e seguro para intervenções. É importante destacar que as chaves seccionadoras não possuem a capacidade de interromper correntes de carga ou de falha; sua operação deve ser realizada apenas quando o circuito está sem carga, de modo a evitar a ocorrência de arcos elétricos perigosos.

A utilização de chaves seccionadoras de alta tensão é motivada por diversas razões. Primeiramente, elas garantem a segurança dos operadores, proporcionando um meio confiável de isolar circuitos e equipamentos antes de qualquer intervenção.

Além disso, as chaves seccionadoras permitem a realização de operações de comutação de maneira flexível, facilitando a reconfiguração do sistema elétrico conforme necessário. Outro aspecto importante é a contribuição dessas chaves para a manutenção da continuidade do fornecimento de energia elétrica, uma vez que permitem isolar apenas a parte do sistema que necessita de intervenção, sem interromper o fornecimento para os consumidores.

As chaves seccionadoras possuem várias características elétricas importantes. A tensão nominal indica o nível de tensão para o qual a chave seccionadora foi projetada. A corrente nominal define a capacidade de corrente que a chave pode conduzir de forma contínua sem superaquecimento. A capacidade de curto-circuito refere-se à capacidade da chave de suportar correntes de curto-circuito por um período de tempo específico, garantindo a integridade do dispositivo durante condições extremas.

O dimensionamento das chaves seccionadoras de alta tensão é realizado com base em critérios técnicos rigorosos para garantir seu desempenho adequado. O dimensionamento leva em consideração a tensão de operação, a corrente nominal, as condições ambientais e os requisitos de manutenção.

2.1.2.4. Para-raios de Alta Tensão

Os para-raios são componentes essenciais nas subestações isoladas a ar. Sua função principal é proteger os equipamentos da subestação contra surtos de tensão causados por descargas atmosféricas ou outras fontes de alta tensão. Esses surtos podem causar danos severos aos equipamentos e interromper o fornecimento de energia elétrica, tornando a presença de para-raios fundamental para a segurança e a confiabilidade do sistema elétrico. Um para-raios de alta tensão é indicado conforme a Figura 6.

Figura 6. Para-raios em uma subestação de alta tensão



Fonte: (Montax Engenharia, 2022).

Para prevenir os danos provocados pelas descargas atmosféricas sobre as redes de transmissão e distribuição, utiliza-se o pára-raios, que é um dispositivo com características não lineares dos elementos constituídos na sua fabricação. O objetivo básico é conduzir correntes provenientes de descargas atmosféricas devido às tensões induzidas nas redes e em seguida interromper as correntes subsequentes, isto é, aquelas que sucedem às correntes de descargas após a sua condução para a terra (MAMEDE FILHO, 2005).

Os para-raios são compostos por uma combinação de materiais condutores e isolantes. Eles possuem elementos internos, como resistores não lineares feitos de óxido de zinco (ZnO), que têm a capacidade de limitar a tensão de forma eficaz. Em condições normais de operação, o para-raios apresenta alta resistência e isola os equipamentos da subestação. No entanto, quando ocorre um surto de tensão, a resistência do para-raios diminui drasticamente, permitindo que a corrente de surto seja desviada para a terra.

Nas subestações AIS, os para-raios são selecionados e instalados com base em critérios técnicos rigorosos. O dimensionamento dos para-raios leva em

consideração a tensão nominal do sistema, a corrente de surto que pode ocorrer e a capacidade de dissipação de energia necessária. Para garantir uma proteção eficaz, é essencial que os para-raios sejam posicionados de maneira estratégica, próximo aos pontos de entrada das linhas de transmissão e aos equipamentos mais sensíveis da subestação.

Existem diferentes tipos de para-raios utilizados em subestações AIS, cada um com características específicas. Os para-raios de óxido de zinco são amplamente utilizados devido à sua alta capacidade de absorção de energia e baixa resistência residual. Esses para-raios oferecem excelente proteção contra surtos de tensão e são eficazes em uma ampla faixa de temperaturas e condições ambientais. Outros tipos incluem os para-raios de carbeto de silício (SiC) e os para-raios de óxido de magnésio (MgO), que também são utilizados em determinadas aplicações, embora tenham sido amplamente substituídos pelos Para-raios de óxido de zinco devido ao seu desempenho superior.

Os para-raios possuem várias características importantes. A tensão nominal indica o nível de tensão para o qual o para-raios foi projetado. A corrente de surto nominal define a capacidade do para-raios de conduzir correntes de surto sem sofrer danos. A energia de absorção específica a quantidade máxima de energia que o para-raios pode dissipar durante um surto. Além disso, os para-raios são projetados para operar com alta confiabilidade e durabilidade, garantindo uma proteção contínua e eficaz dos equipamentos da subestação.

2.1.2.5. Transformadores de Corrente

O transformador de corrente (TC) é um equipamento monofásico que possui dois enrolamentos, um denominado primário e outro denominado secundário, sendo isolados eletricamente um do outro, porém, acoplados magneticamente e que são usados para reduzir a corrente a valores baixos (normalmente 1 A ou 5 A) com o objetivo de promover a segurança do pessoal, isolar eletricamente o circuito de potência dos instrumentos e padronizar os valores de corrente de Por Cláudio Mardegan* relés e medidores.(MARDEGAN, 2010). Um transformador de corrente é indicado conforme Figura 7.

Figura 7. Transformador de Corrente



Fonte: (Arteche, 2025).

O funcionamento dos TCs baseia-se no princípio da indução eletromagnética. Eles possuem um enrolamento primário, que é conectado em série com o circuito, e um enrolamento secundário, onde a corrente é proporcionalmente reduzida. A relação de transformação é definida pelo número de espiras nos enrolamentos primário e secundário. Por exemplo, um TC com uma relação de transformação de 1000:1 reduzirá uma corrente de 1000 A no primário para 1 A no secundário.

Os TCs são dimensionados com base na corrente nominal do sistema, na corrente de curto-circuito esperada e na precisão necessária para a aplicação. Eles são projetados para operar com alta confiabilidade e fornecer medições precisas em uma ampla faixa de condições operacionais. A precisão dos TCs é muito importante para garantir a exatidão das medições e a operação adequada dos sistemas de proteção e medição.

2.1.2.6. Transformadores de Potencial

Os transformadores de potencial são equipamentos que adequam o nível de tensão (rebaixamento) de forma a permitir que os instrumentos de medição e proteção funcionem adequadamente sem que lhes seja necessário possuir tensão de acordo com o valor nominal da rede à qual serão ligados.(FERGÜTZ, 2021). Um transformador de potencial é indicado conforme Figura 8.

Figura 8. Transformador de Potencial



Fonte: (Arteche, 2025).

O funcionamento dos TPs também é baseado no princípio da indução eletromagnética. Eles possuem um enrolamento primário, conectado diretamente ao circuito de alta tensão, e um enrolamento secundário, onde a tensão é proporcionalmente reduzida. A relação de transformação é definida pelo número de espiras nos enrolamentos primário e secundário. Por exemplo, um TP com uma relação de transformação de 5000:1 reduzirá uma tensão de 5000 V no primário para 1 V no secundário.

Os TPs são dimensionados com base na tensão nominal do sistema, na precisão requerida e nas condições ambientais. Eles são projetados para fornecer medições precisas e confiáveis, garantindo que os sistemas de proteção e controle possam operar corretamente. A precisão dos TPs é essencial para manter a integridade das medições e assegurar a operação segura e eficiente do sistema elétrico.

2.1.2.7. Painéis de controle e proteção

Os painéis de controle e proteção atuam como unidades centrais de supervisão e comando em sistemas elétricos de potência. Monitorar, comandar e proteger os diversos equipamentos da instalação, promovendo a operação segura, eficiente e confiável da subestação são a priori sua função. Por meio de sistemas automatizados,

integram dispositivos de medição, relés de proteção, controladores lógicos programáveis (CLPs) e interfaces homem-máquina (IHM), desempenham papel estratégico na coordenação das manobras uma vez que realizam ‘rápida atuação frente a falhas’. Uma área dedicada aos painéis de controle e proteção de uma subestação é indicada conforme Figura 9.

Figura 9. Painel de Controle e Proteção



Fonte: (TS Infra, 2025).

Os sistemas de comunicação integrados nos painéis de controle e proteção permitem a troca de informações entre os diferentes dispositivos da subestação e o centro de controle remoto. Isso inclui a transmissão de dados de medição, alarmes de falha e comandos de controle. A comunicação eficaz é essencial para a coordenação das operações da subestação e para garantir uma resposta rápida a qualquer situação de emergência.

Os dispositivos de controle presentes nos painéis permitem a operação e a configuração dos diferentes equipamentos da subestação. Isso inclui a abertura e o fechamento de disjuntores, a comutação de seccionadoras e a regulação de transformadores. Esses dispositivos são operados tanto localmente quanto remotamente, proporcionando flexibilidade e controle total sobre as operações da subestação.

Os painéis de controle e proteção são dimensionados e configurados com base em critérios técnicos rigorosos para garantir seu desempenho adequado. O dimensionamento leva em consideração a capacidade dos relés de proteção, a precisão dos instrumentos de medição, a necessidade de comunicação e os requisitos de controle. A configuração adequada dos painéis é fundamental para garantir a operação segura e eficiente da subestação, prevenindo falhas e minimizando interrupções no fornecimento de energia.

3. SUBESTAÇÕES ISOLADAS A GÁS (GIS)

Conhecida como GIS (Gas Insulated Switchgear), possui o gás SF6 como material de isolamento, e é o tipo de subestação mais compacta que é fabricada atualmente. Os condutores de alta tensão, comutadores, barramentos, disjuntores, transformadores de corrente e tensão estão instalados nos cilindros e compartimentos metálicos cheios de gás SF6 que são geralmente chamados de módulos GIS. Os espaçamentos mínimos elétricos para implantação de uma subestação GIS não tem padrão nem norma regulamentadora diferente das subestações AIS (MAMEDE,2021).

A principal característica das subestações GIS é a utilização do gás SF6 como meio isolante e de extinção de arco. O SF6 é um gás incolor, inodoro, não inflamável e altamente eletronegativo, o que significa que ele é muito eficaz na captura de elétrons livres. Essa propriedade torna o SF6 um excelente isolante elétrico, permitindo que os componentes da subestação sejam colocados mais próximos uns dos outros sem risco de falhas elétricas. Essa encapsulação não apenas reduz o espaço necessário para a instalação, mas também protege os componentes contra poeira, umidade e outros contaminantes ambientais.

A subestação isolada a gás instalada na linha 15 do metrô de São Paulo é indicada conforme Figura 10.

Figura 10. Subestação GIS - Metrô de SP



Fonte: (Acervo Siemens Energy, 2025).

A alta confiabilidade é outra característica importante das subestações GIS. O gás SF₆ é altamente eficaz na extinção de arcos elétricos, o que reduz a probabilidade de falhas e a necessidade de manutenção frequente. A manutenção preventiva e de rotina é mais fácil e menos custosa, uma vez que os componentes estão encapsulados em invólucros metálicos estanques.

A segurança é um aspecto que se destaca nas subestações GIS. O invólucro metálico que encapsula os componentes internos proporciona uma barreira física que minimiza o risco de acidentes. Além disso, o gás SF₆ é não inflamável e não explosivo, aumentando ainda mais a segurança operacional. A durabilidade das subestações GIS também é notável, com uma vida útil que pode ultrapassar 50 anos, e a primeira inspeção geralmente é necessária apenas após 25 anos de operação.

As subestações GIS são amplamente utilizadas em áreas urbanas e industriais, onde o espaço é limitado. Elas são ideais para instalações em centros urbanos, onde a demanda por energia é alta e o espaço para novas subestações é restrito. Além disso, as GIS são frequentemente utilizadas em ambientes industriais, onde a resistência a condições ambientais adversas é prioridade.

3.1. Gás Hexafluoreto de Enxofre

O gás hexafluoreto de enxofre, conhecido pela sigla SF₆, é um composto químico amplamente utilizado na engenharia elétrica devido às suas excelentes propriedades isolantes e de supressão de arco elétrico. O SF₆ é um gás incolor, inodoro, não inflamável e altamente eletronegativo, o que significa que ele é muito eficaz na captura de elétrons livres. Essa propriedade torna o SF₆ um excelente isolante elétrico, permitindo que os componentes elétricos sejam colocados mais próximos uns dos outros sem risco de falhas elétricas. Além disso, o SF₆ possui uma rigidez dielétrica muito superior à do ar, o que o torna ideal para uso em equipamentos de alta tensão.

Uma das principais aplicações do gás SF₆ é em subestações GIS. Nessas subestações, o SF₆ é utilizado como meio isolante e de extinção de arco. No ano de

1937, a General Electric já analisava a utilidade do gás SF₆ como material de isolamento e nesse período depois da 2ª Guerra Mundial, no meio do século XX, sua popularidade como gás isolante cresceu rapidamente. Anos depois, em 1971 a primeira GIS do mundo foi inaugurada em Paris, na França e então após aproximadamente 5 anos de experiência, países onde espaços físicos eram limitados, tiveram um aumento em 20% de suas taxas de novas GIS instaladas (MCDONALD, 2006).

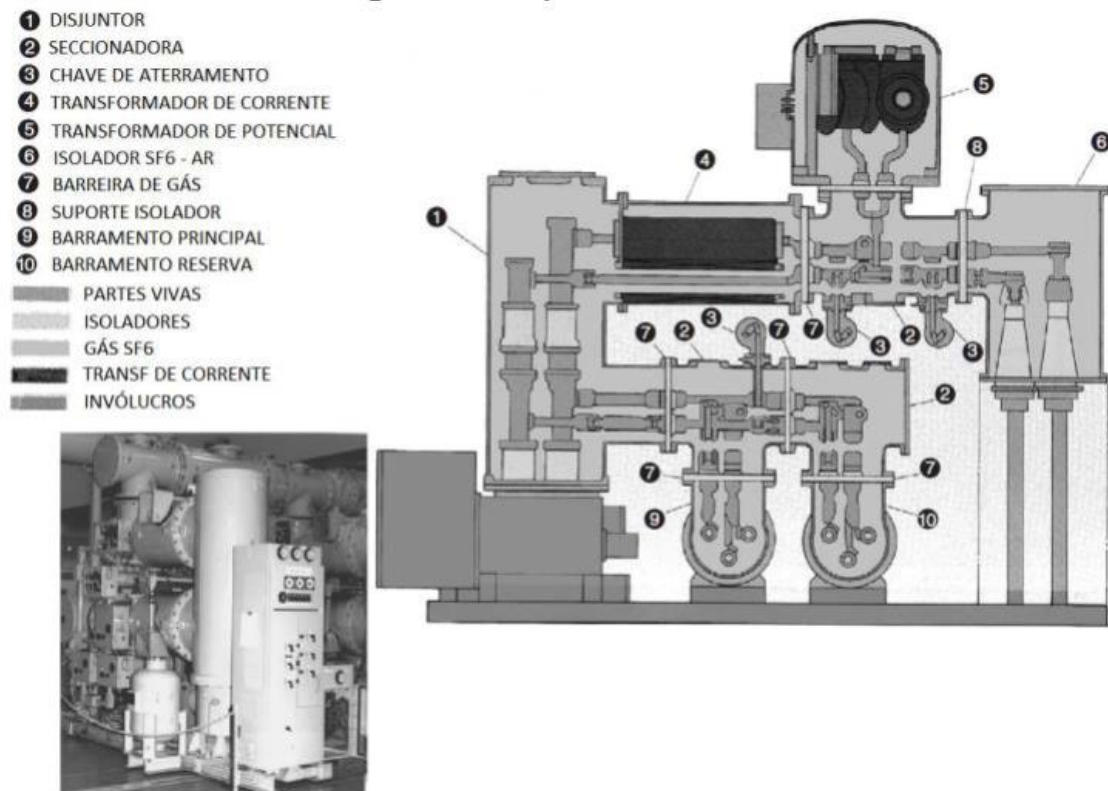
Apresenta uma desvantagem pois o SF₆ é um dos gases que provocam efeito estufa e seu potencial de aquecimento global é de aproximadamente 23.000 vezes maior que o do dióxido de carbono (CO₂) segundo o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), possui também uma vida atmosférica longa estimada de 800 a 3200 anos, logo seu efeito é cumulativo e permanente (CHIAPPINI, 2021).

3.2. Equipamentos de Alta Tensão em uma GIS

A principal diferença entre os equipamentos de pátio em subestações AIS e GIS reside no meio isolante utilizado. Essa diferença fundamental resulta em várias implicações para o projeto, instalação e manutenção dos equipamentos de pátio. Os condutores de alta tensão, comutadores, barramentos, disjuntores, transformadores de corrente e tensão estão instalados nos cilindros e compartimentos metálicos cheios de gás SF₆ que são geralmente chamados de módulos GIS. Os espaçamentos mínimos elétricos para implantação de uma subestação GIS não tem padrão nem norma regulamentadora diferente das subestações AIS (MAMEDE, 2021).

Na Figura 11 é mostrado um exemplo de uma GIS de 242 kV vista em corte com encapsulamento trifásico.

Figura 11. Corte Lateral de uma GIS



Fonte: (MCDONALD, 2006).

A imagem lateral de uma GIS revela a disposição compacta e encapsulada dos componentes internos, todos isolados com gás SF6.

4. FATORES DA ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS TIPOS DE SUBESTAÇÃO

Este tópico abordará a comparação entre os dois tipos de subestação mencionados neste trabalho, com base na análise de alguns fatores significativos: econômicos, técnicos e ambientais.

4.1. Fatores Econômicos

A análise comparativa entre subestações AIS e GIS envolve diversos fatores econômicos que influenciam a escolha e a implementação de cada tipo de subestação. Entre esses fatores, destacam-se a área disponível para instalação, o custo dos equipamentos e as obras necessárias para a construção de cada solução.

4.1.1. Área disponível

É essencial avaliar se a área disponível é adequada para a instalação de uma subestação convencional, especialmente em grandes metrópoles, onde pode ser desafiador encontrar o espaço físico necessário para sua construção. Quando o espaço é limitado ou menor do que o esperado, as subestações GIS surgem como alternativas viáveis. Além disso, é importante considerar a regularidade do terreno e a necessidade de terraplanagem ou construção de muros de contenção, fatores que podem aumentar significativamente o custo de implementação da subestação.

4.1.2. Tecnologia Implementada

O custo dos equipamentos é outro fator econômico na análise comparativa entre subestações AIS e GIS. Os equipamentos utilizados em subestações AIS são geralmente mais baratos em termos de custo inicial. Por outro lado, os equipamentos utilizados em subestações GIS, que são encapsulados em invólucros metálicos preenchidos com gás SF₆, têm um custo inicial mais elevado. No entanto, esses equipamentos são altamente confiáveis e requerem menos manutenção, o que pode resultar em menores custos operacionais ao longo do tempo. Além disso, o fato dos equipamentos estarem encapsulados na subestação GIS proporciona alta proteção

contra condições ambientais adversas, contribuindo para a durabilidade e a confiabilidade dos equipamentos GIS.

4.1.3. Construção Civil

As obras de construção também diferem significativamente entre subestações AIS e GIS. A construção de subestações AIS envolve a instalação de equipamentos ao ar livre, o que requer uma infraestrutura mais extensa para suportar os componentes e garantir a segurança operacional. Isso inclui a construção de fundações, estruturas de suporte, e sistemas de proteção contra intempéries.

Em contraste, a construção de subestações GIS é mais compacta e pode ser realizada em ambientes internos ou externos. A encapsulação dos componentes em invólucros metálicos preenchidos com gás SF₆ reduz a necessidade de infraestrutura externa extensa. Além disso, a construção de subestações GIS pode ser concluída mais rapidamente devido à menor complexidade das obras civis necessárias.

4.2. Fatores Técnicos

Os fatores técnicos envolvem a confiabilidade, a segurança, o tempo necessário para a implementação da obra e a degradação dos equipamentos. A confiabilidade e a segurança dos equipamentos são aspectos críticos que impactam a durabilidade e a operação segura das subestações. O tempo para a implementação da obra deve ser considerado, pois pode afetar o cronograma do projeto. A degradação dos equipamentos varia conforme o tipo de subestação, influenciando a frequência e a complexidade das intervenções necessárias.

Para a análise deste fator, foi adotada uma classificação baseada na importância dos aspectos técnicos mencionados anteriormente, conforme o estudo de Tomazi (2021). Essa classificação é apresentada na Tabela 01.

Tabela 1 - Grau de Relevância dos Aspectos Técnicos na Implementação de Subestações

Aspectos	Classificação	
	AIS	GIS
Confiabilidade	Baixa	Alta
Segurança	Baixa	Alta
Tempo para implementação da obra	Alta	Baixa
Degradação dos equipamentos	Alta	Baixa

Fonte: ADAPTADO DE TOMAZI, (2021).

4.2.1. Confiabilidade

As subestações GIS são geralmente consideradas mais confiáveis devido à sua construção encapsulada, que protege os componentes internos contra fatores ambientais adversos, como poeira, umidade e poluição. Essa proteção reduz a probabilidade de falhas e a necessidade de manutenção frequente, resultando em uma operação mais estável e contínua. Em contraste, as subestações AIS estão mais expostas a esses fatores ambientais, o que pode aumentar a frequência de falhas e a necessidade de intervenções de manutenção.

4.2.2. Segurança

As subestações GIS são frequentemente consideradas mais seguras devido à sua construção encapsulada, que isola os componentes internos e minimiza o risco de arcos elétricos e explosões. Essa proteção adicional resulta em um ambiente de operação mais seguro e reduz a necessidade de intervenções de manutenção em condições adversas. Em contraste, as subestações AIS estão mais expostas a riscos de falhas catastróficas, especialmente em condições climáticas desfavoráveis, tornando a manutenção mais perigosa.

4.2.3. Tempo para Implementação da Obra

As subestações GIS geralmente têm um tempo de implementação mais curto devido à sua construção modular e compacta, que permite uma instalação mais rápida e eficiente. Além disso, a necessidade reduzida de espaço e a menor quantidade de obras civis contribuem para acelerar o processo de implementação. Por outro lado, as subestações AIS, que requerem mais espaço e uma infraestrutura mais extensa, tendem a demandar um tempo maior para serem implementadas. A montagem e a instalação dos componentes ao ar livre também podem ser mais demoradas, especialmente em condições climáticas adversas.

4.2.4. Degradação dos Equipamentos

Nas subestações GIS, os componentes são encapsulados em um invólucro de metal preenchido com gás isolante, o que proporciona uma proteção superior contra fatores ambientais como umidade, poeira e poluição. Essa proteção reduz significativamente a taxa de degradação dos equipamentos, resultando em uma vida útil mais longa. Em contraste, nas subestações AIS, os equipamentos estão mais expostos ao ambiente externo, o que pode acelerar a degradação devido à corrosão, contaminação e variações climáticas.

4.3. Fatores Ambientais

Uma das fases essenciais na comparação entre subestações AIS e GIS é a análise ambiental. Esta etapa envolve a avaliação de diversos fatores que podem influenciar a escolha do tipo de subestação mais adequada para um determinado local. Entre os principais aspectos a serem considerados estão a poluição atmosférica, a licença ambiental e o impacto visual.

4.3.1. Poluição atmosférica

A presença de poluentes no ambiente de instalação pode afetar significativamente a performance das subestações AIS, que utilizam o ar como meio isolante. Partículas de poluição podem se acumular nos componentes expostos, aumentando o risco de falhas e a necessidade de manutenção. Em contraste, as subestações GIS, com seus componentes encapsulados em um invólucro de metal

preenchido com gás isolante, são menos suscetíveis aos efeitos da poluição atmosférica, mantendo uma operação mais estável e confiável.

Embora essas subestações apresentem vantagens em ambientes com a presença de poluentes, utilizam volumes significativamente maiores de hexafluoreto de enxofre em comparação às subestações AIS. O SF₆ é um gás de efeito estufa extremamente potente, considerado um dos mais prejudiciais ao meio ambiente em termos de potencial de aquecimento global. Portanto, sua utilização em larga escala deve ser cuidadosamente analisada, levando em conta estratégias de contenção, monitoramento e mitigação de emissões ao longo do ciclo de vida da instalação.

4.3.2. Licença Ambiental

As subestações GIS, devido à sua construção compacta e encapsulada, geralmente enfrentam menos desafios na obtenção de licenças ambientais, pois ocupam menos espaço e têm um impacto menor no solo e na vegetação circundante. Em contraste, as subestações AIS, que requerem mais espaço e uma infraestrutura mais extensa, podem enfrentar mais obstáculos regulatórios e exigências rigorosas para a obtenção de licenças, especialmente em áreas sensíveis ou protegidas.

4.3.3. Impacto Visual

As subestações GIS, com sua construção compacta e encapsulada, têm um perfil visual mais discreto e podem ser facilmente integradas ao ambiente urbano ou rural sem causar grandes alterações na paisagem. Em contraste, as subestações AIS, que ocupam mais espaço e possuem estruturas mais visíveis, podem ter um impacto visual mais significativo, o que pode ser uma preocupação em áreas de preservação paisagística ou em locais onde a estética é um fator importante.

5. ESTUDO DE CASO: SUBESTAÇÃO PRIMÁRIA BANDEIRANTES – LINHA 5 LILÁS

Para fundamentar a análise comparativa entre subestações AIS e GIS, foi analisado um estudo de caso, elaborado pela TSEA Energia S.A., empresa especializada em soluções para sistemas elétricos de potência, com base na Subestação Primária Bandeirantes, localizada na Avenida dos Bandeirantes, nº 2200-2644, na cidade de São Paulo. Esta subestação, pertencente à infraestrutura da Linha 5 Lilás do metrô, opera com níveis de tensão de 88-138/22 kV e potência instalada de 3x33 MVA, adotando atualmente a configuração AIS.

A área ocupada pela subestação em sua configuração atual é de 3.589 m², conforme pode ser observado na imagem aérea obtida via Google Maps.

Figura 12. Imagem Aérea da Subestação Bandeirantes

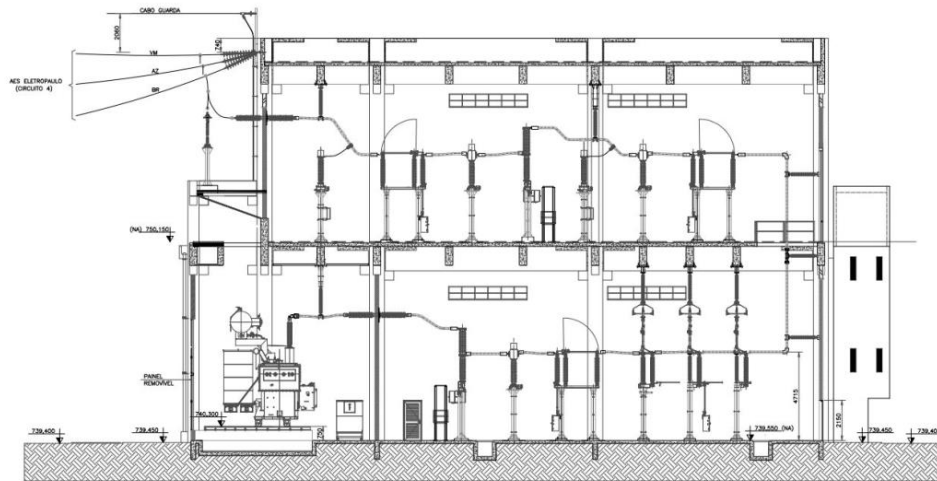


Fonte: (Autor, 2025).

A vista lateral em corte, apresentada nas Figuras 13 e 14, complementa a perspectiva aérea ilustrada na Figura 12, ao permitir identificação detalhada da disposição interna

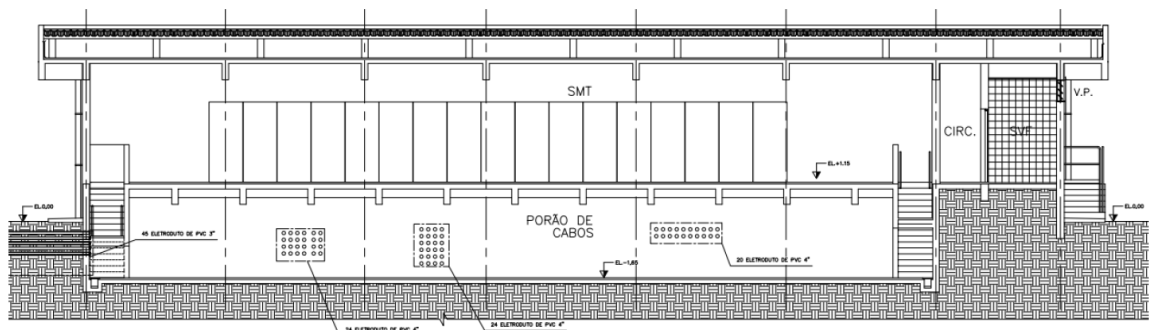
dos equipamentos, conforme a mesma configuração estrutural observada anteriormente.

Figura 13. Vista Lateral de um Arranjo AIS



Fonte: (TSEA, 2019).

Figura 14. Vista Lateral de uma Sala de Comando



Fonte: (TSEA, 2019).

A projeção teve como base a mesma imagem aérea utilizada na análise da configuração atual, permitindo uma avaliação precisa da área otimizada que seria necessária para a instalação da subestação em tecnologia GIS. De acordo com o estudo conduzido pela TSEA, observou-se uma redução significativa na área ocupada, evidenciando uma das principais vantagens da tecnologia GIS em contextos urbanos densamente ocupados, onde a disponibilidade de espaço é um fator crítico.

Na Figura 15, duas áreas distintas foram demarcadas para facilitar a visualização do ganho espacial: a área delimitada em amarelo representa o novo espaço necessário para a implantação da subestação GIS, enquanto a área não demarcada corresponde à porção de terreno que seria liberada em função da substituição da configuração AIS pela GIS.

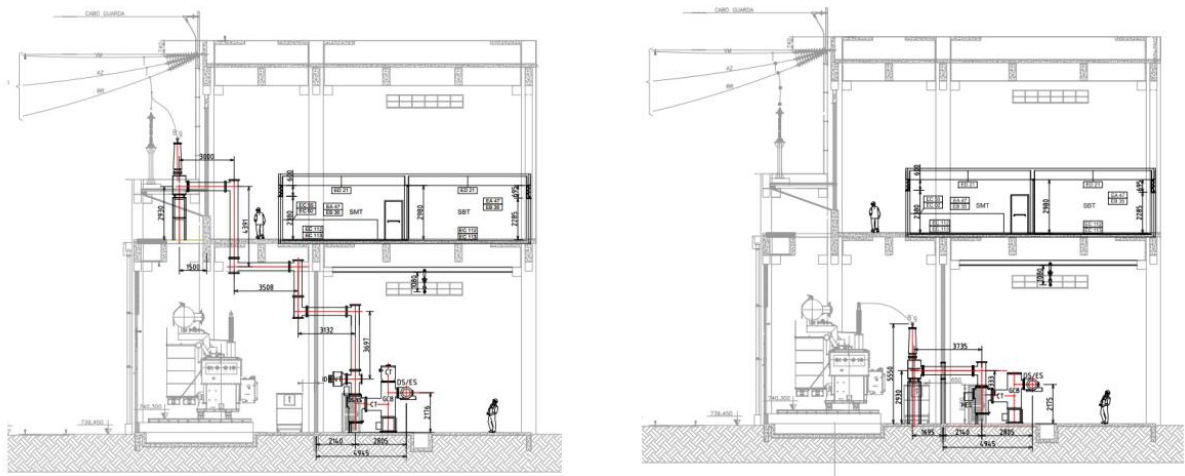
Figura 15. Comparativo em Área - AISxGIS



Fonte: (TSEA, 2019).

A área originalmente utilizada de 3.589 m² seria reduzida para 1.682 m², representando uma diminuição aproximada de 53%. Além da análise em planta, foi elaborada uma nova vista lateral em corte da subestação adaptada, permitindo a comparação direta com a configuração original, conforme Figura 16. Essa visualização técnica possibilita identificar com clareza a reorganização dos equipamentos e a redução da infraestrutura civil necessária.

Figura 16. Vista Lateral em Corte (GIS + Sala de Comando)



Fonte: (TSEA, 2019).

Foi considerada a valorização do terreno urbano como fator relevante na comparação entre as configurações AIS e GIS. Com base no valor médio do metro quadrado em São Paulo no ano de 2019, estimado em R\$ 3.513,00, foi possível organizar o custo associado à área ocupada por cada configuração na tabela a seguir.

Tabela 2. Comparativo em Valor de Área

Tipo de Configuração	Área (m ²)	Custo (R\$)	Redução %
AIS	3.589,00	12,6 milhões	-
GIS	1.682	5,9 milhões	53

Fonte: (Autor, 2025).

Para a subestação AIS, com área de 3.589 m², o custo estimado do terreno seria de aproximadamente R\$ 12,6 milhões, enquanto para a configuração GIS, com 1.682 m², esse valor seria reduzido para cerca de R\$ 5,9 milhões

Complementando a análise espacial e estrutural da Subestação Primária Bandeirantes, é fundamental considerar também os custos associados aos equipamentos de alta tensão nas configurações AIS e GIS. De acordo com o estudo conduzido pela TSEA, os valores estimados para os principais componentes da

subestação — como disjuntores, seccionadores, transformadores de corrente e de potencial, para-raios e painéis de controle — foram organizados na tabela a seguir, permitindo uma comparação direta entre as duas tecnologias.

Tabela 3. Custo dos Equipamentos da SE Bandeirantes

Configuração	AIS	GIS
Custo de Equipamentos	R\$ 12,5 milhões	R\$ 13,7 milhões

Fonte: Adaptado de TSEA, (2019).

É relevante destacar os custos iniciais associados aos equipamentos de alta tensão nas configurações AIS e GIS. Conforme os dados apresentados na tabela de custos elaborada com base no estudo da TSEA, o investimento inicial estimado para a configuração AIS foi de aproximadamente R\$ 12,5 milhões, enquanto a configuração GIS demandaria cerca de R\$ 13,7 milhões. Essa diferença representa um acréscimo de aproximadamente 9,25% no custo de aquisição dos equipamentos GIS em relação à solução convencional.

Além dos custos com equipamentos foi considerada a estimativa de investimento em obras civis para a Subestação Primária Bandeirantes, conforme estudo realizado pela TSEA. Na configuração AIS, os custos com construção civil foram estimados em aproximadamente R\$ 5 milhões, enquanto na configuração GIS esse valor seria reduzido para cerca de R\$ 2 milhões. Essa diferença representa uma economia de 60% nos custos relacionados à infraestrutura civil. Essa redução está diretamente associada à menor área ocupada e à simplificação das estruturas necessárias na configuração GIS, reforçando os benefícios já discutidos quanto à eficiência espacial.

Com base na análise do estudo de caso da Subestação Primária Bandeirantes, foi realizada uma comparação entre as configurações AIS e GIS, considerando os principais aspectos econômicos envolvidos na implantação de cada tecnologia. Um dos destaques foi a significativa redução de área com a adoção da configuração GIS, o que impacta diretamente no custo de ocupação do solo em regiões urbanas.

Além disso, embora a configuração GIS apresente um custo inicial mais elevado em equipamentos de alta tensão, ela oferece vantagens operacionais como maior confiabilidade e menor necessidade de manutenção. Também foram observadas reduções expressivas nos custos com construção civil, devido à menor complexidade estrutural. Os valores detalhados de cada item analisado estão apresentados na tabela 4.

Tabela 4. Comparativo final

Tipo de Configuração	AIS	GIS
Área Ocupada	3.589 m ²	1.682 m ²
Custo do terreno	R\$ 12,6 milhões	R\$ 5,9 milhões
Equipamentos	R\$ 12,5 milhões	R\$ 13,7 milhões
Obras civis	R\$ 5 milhões	R\$ 2,0 milhões
Custo total estimado	R\$ 30,1 milhões	R\$ 21,6 milhões

Fonte: Autor.

Por fim, destaca-se que, além dos investimentos iniciais, a configuração GIS tende a apresentar menores custos operacionais ao longo do tempo, especialmente em relação à manutenção.

6. CONCLUSÃO

A análise comparativa entre subestações convencionais e subestações isoladas a gás evidencia um conjunto de diferenças técnicas, econômicas e ambientais que devem ser cuidadosamente consideradas durante o planejamento de projetos de infraestrutura elétrica. Cada tecnologia apresenta características próprias que influenciam diretamente na viabilidade de implantação, operação e manutenção, especialmente em contextos urbanos onde fatores como espaço físico, confiabilidade e segurança operacional são críticos.

As subestações AIS, por utilizarem o ar como meio de isolamento, geralmente requerem áreas maiores e estruturas civis mais robustas, o que pode representar um desafio em regiões densamente povoadas. Já as subestações GIS, com seus equipamentos encapsulados em invólucros metálicos preenchidos com gás isolante, oferecem uma solução mais compacta e protegida contra intempéries e poluição, o que pode resultar em maior confiabilidade e menor necessidade de manutenção corretiva.

Do ponto de vista econômico, embora os equipamentos da tecnologia GIS envolvam um investimento inicial mais elevado, essa diferença pode ser compensada ao longo do tempo por meio da redução de custos operacionais e maior durabilidade dos equipamentos. No entanto, essa compensação depende fortemente do contexto do projeto, como o valor do terreno, as exigências ambientais e os requisitos de confiabilidade.

É importante destacar que a análise apresentada neste trabalho foi baseada em um estudo de caso específico, e os resultados obtidos refletem as condições particulares desse cenário. Portanto, a escolha entre AIS e GIS deve ser feita caso a caso, considerando as características técnicas, econômicas e ambientais de cada projeto. A metodologia comparativa aqui aplicada pode servir como referência para futuras análises, mas não substitui a avaliação individualizada de cada situação.

REFERÊNCIAS

ALFACOMP. Transmissão, Geração e Distribuição. Disponível em: <<https://alfacomp.net/portfolio-item/energia-eletrica/>> Acesso em: 25/06/2025.

ARTECHE. Transformadores de Corrente de Alta Tensão. Disponível em: <<https://www.artech.com/pt/transformadores-combinados-de-alta-tensao>> Acesso em: 14/02/2025.

ARTECHE. Transformadores de Potencial de Alta Tensão. Disponível em: <https://www.artech.com/pt/transformadores-de-potencial-indutivos-de-alta-tensao> Acesso em: 14/02/2025>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Sistemas Elétricos de Potência. ABNT NBR 5460, 1992.

BICHELS, Arlei. Sistemas elétricos de potência: métodos de análise e solução. Curitiba: EDUTFPR, 2018. 466 p

CHIAPPINI, Gabriel. Siemens Energy e Mitsubishi Electric querem substituir gás de efeito estufa em sistemas de alta tensão. EPBR, 2021. Disponível em: <https://epbr.com.br/siemens-energy-e-mitsubish-eletric-querem-substituir-gas-de-efeito-estufa-em-sistemas-de-alta-tensao>

FERGÜTZ, Marcos. Transformadores para instrumentação. Disponível em: <https://www.udesc.br/arquivos/udesc/id_cpmenu/9731/TRANSFORMADORES_PARA_INSTRUMENTA__O_v7_21_17218272993066_9731.pdf> . Acesso em: 25/06/2025.

HORIKAWA, D. K. Comparative Study on Air Insulated Switchgear (AIS) and Gas Insulated Switchgear (GIS). 2013. 56 p. Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá.

MAMEDE FILHO, J. Manual de Equipamentos Elétricos. 3ª Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2005.

MAMEDE FILHO, João. Subestações de Alta Tensão. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2021.

MARDEGAN, Cláudio. Transformadores de corrente, potencial e bobinas de Rogowski para fins de proteção – Parte 1. Cap I. ed. O Setor Elétrico. 2010.

MCDONALD, John D. Electric power substations engineering. 2. ed. Flórida: CRC Press, 2006.

MEIRELES, Denise. Aplicabilidade de Subestações Compactas Isoladas a Gás em Grandes Centros Urbanos: Proposta de Procedimento Aplicado à Expansão do Sistema Elétrico. 2010. 77 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

MONTAX ENGENHARIA. Para-raios de Alta Tensão. Disponível em:
<<https://montax.eng.br/voce-sabe-qual-a-finalidade-dos-para-raios-em-uma-subestacao/>> Acesso em: 12/01/2025.

REVISTA AD NORMAS. Subestação Convencional AIS Disponível em:
<<https://revistaadnormas.com/tag/transformadores%20e%20reatores>> Acesso em: 12/01/2025.

SAVREE. Chave Seccionadora de Alta Tensão. Disponível em:
<<https://savree.com/en/encyclopedia/high-voltage-disconnectors>> Acesso em: 24/06/2025.

SIEMENS ENERGY. Disjuntor de Alta Tensão. Disponível em:
<<https://www.siemens-energy.com/br/pt/home.html>> Acesso em: 12/01/2025.

TOMAZI, Kamila Osowski. Análise Comparativa de Diferentes Subestações de Alta Tensão: Tecnologia Convencional, Híbrida e GIS Abrigada. 2021. 33 f. TCC (Graduação) – Curso de Engenharia de Energia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

TSEA Energia. Compactação de Subestações: Tecnologia GIS da TSEA Energia. 2019. Disponível em: http://www.semanadetecnologia.com.br/25semana/wp-content/uploads/2019/09/T52_Paulo_Benites_TSEA_Energia.pdf. Acesso em: 10/03/2025

TS Infra. Painéis de Controle e Proteção. Disponível em:
<<https://www.tsinfra.com.br/full-turnkey/sistemas-de-protecao-e-controle-spc-service/>>. Acesso em: 24/06/2025.

WEG. Transformador de Potência de Alta Tensão. Disponível em:
<[https://www.weg.net/catalog/weg/US/pt/Geração,-Transmissão-e-Distribuição/Transformadores-e-Reatores-a-Óleo/Transformadores-de-Potência-a-Óleo/50-A-500-MVA-/Transformadores-de-Potência-\(até500MVA\)/p/MKT_WTD_MEDIUM_POWER_TRANSFORMER_UP_TO_150000KVA](https://www.weg.net/catalog/weg/US/pt/Geração,-Transmissão-e-Distribuição/Transformadores-e-Reatores-a-Óleo/Transformadores-de-Potência-a-Óleo/50-A-500-MVA-/Transformadores-de-Potência-(até500MVA)/p/MKT_WTD_MEDIUM_POWER_TRANSFORMER_UP_TO_150000KVA)> Acesso em: 12/01/2025.