



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

CARINNE ARIANE BRITO NERY DE SOUZA

COMPARATIVO DE SUBESTAÇÕES COM DIFERENTES TIPOS DE ISOLAÇÃO

Recife
2023

CARINNE ARIANE BRITO NERY DE SOUZA

COMPARATIVO DE SUBESTAÇÕES COM DIFERENTES TIPOS DE ISOLAÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador(a): Prof. Zanoni Dueire Lins

Recife
2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Souza, Carinne Ariane Brito Nery de.

Comparativo de Subestações com Diferentes Tipos de Isolação / Carinne
Ariane Brito Nery de Souza. - Recife, 2023.

56 : il., tab.

Orientador(a): Zanoni Dueire Lins

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de
Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Elétrica -
Bacharelado, 2023.

Inclui referências, anexos.

1. Subestações Elétricas. 2. Compactas GIS. 3. Convencionais AIS. 4.
Híbrida HIS. I. Lins, Zanoni Dueire. (Orientação). II. Título.

620 CDD (22.ed.)

CARINNE ARIANE BRITO NERY DE SOUZA

COMPARATIVO DE SUBESTAÇÕES COM DIFERENTES TIPOS DE ISOLAÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovado em: 27/04/2023.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Zanoni Dueire Lins (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Vicente Ribeiro Simoni (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Guilherme Delgado Soriano (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Dedico este trabalho a Deus e a Nossa Senhora Aparecida que me deram forças para concluir todo o curso e este trabalho de conclusão.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, a Deus, por me permitir ultrapassar todos os obstáculos encontrados ao longo do curso e da realização deste trabalho.

À minha família por todo apoio, amor, força, encorajamento e compreensão que foram fundamentais em toda minha caminhada.

Ao meu orientador Prof. Zanoni Dueire Lins pelo incentivo, encorajamento e tempo disponibilizado para me orientar neste trabalho com muito empenho e atenção.

Aos professores do curso de Engenharia Elétrica que transmitiram seus conhecimentos e experiências com responsabilidade e atenção.

A todos aqueles que contribuíram, de alguma forma, para a realização deste trabalho, como colegas de curso que foram solícitos nas horas de dúvidas e estudo em conjunto.

"Não fui eu que ordenei a você? Seja forte e corajoso! Não se apavore nem desanime, pois o Senhor, o seu Deus, estará com você por onde você andar". (JOSUÉ 1:9)

RESUMO

As subestações são parte importante e fundamental no sistema elétrico de potência e a escolha de qual melhor tipo a ser instalado torna-se imprescindível. Este trabalho propõe um comparativo entre os diferentes tipos de subestação com diferentes tipos de isolamento: convencional isolada a ar (“Air Insulated Switchgear” – AIS), compactas isoladas a gás (“Gas Insulated Switchgear” - GIS) e híbridas, avaliando aspectos relevantes como fatores econômicos, ambientais, técnicos e operacionais, além de apresentar vantagens e desvantagens para aplicação de cada instalação a ser escolhida.

Palavras-chave: Subestações Elétricas, Compactas GIS, Convencionais AIS, Híbrida HIS.

ABSTRACT

Substations are an important and fundamental part of the electrical power system and choosing the best type to install becomes essential. This work proposes a comparison between the different types of substations with different types of insulation: conventional air insulated (“Air Insulated Switchgear” – AIS), compact gas insulated (“Gas Insulated Switchgear” - GIS) and hybrid, evaluating aspects relevant as economic, environmental, technical and operational factors, in addition to presenting advantages and disadvantages for the application of each installation to be chosen.

Keywords: Electric Substations, Compact GIS, Conventional AIS, Hybrid HIS.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Sistema Elétrico de Potência	18
Figura 2 - Subestação Convencional AIS – Pamplona, em Cristalina - GO	22
Figura 3 - Subestação Compacta GIS Abrigada	23
Figura 4 - Encapsulamento trifásico GIS	23
Figura 5 - Módulo GIS compacto da SE de Setúbal	24
Figura 6 - Módulo GIS compacto da SE de Setúbal	24
Figura 7 - Esforço para ruptura de diversos dielétricos com campos uniformes. Tensão de ruptura em função da espessura do dielétrico	27
Figura 8 - Disjuntor a vácuo de 145 kV	29
Figura 9 - Subestação Híbrida	30
Figura 10 - Comparação entre áreas utilizadas - Híbrida (HIS) x Convencional(AIS)	31
Figura 11 - Módulo híbrido - PASS M0 series	32
Figura 12 - Componentes do módulo híbrido para barramento simples	32
Figura 13 - Área da SE Bandeirantes AIS	34
Figura 14 - Vista Lateral em Corte do arranjo AIS da Subestação Primária Bandeirantes	34
Figura 15 - Comparativo das áreas AIS x GIS	35
Figura 16 - Vista Lateral em Corte do arranjo GIS da Subestação Primária Bandeirantes	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação das áreas dos três tipos de subestações.....	36
Tabela 2 - Grau de relevância dos aspectos referentes ao meio ambiente	37
Tabela 3 - Espaçamentos Elétricos em Subestações Convencionais.....	40
Tabela 4 - Comparação do custo total do terreno da SE Bandeirantes	42
Tabela 5 - Comparação do custo do terreno das subestações Bituruna e Hauer	42
Tabela 6 - Comparação do custo dos equipamentos, construção civil e custo total da SE Bandeirantes (em Reais)	43
Tabela 7 - Comparação do custo dos equipamentos, construção civil e custo total da SE Bituruna - AIS e SE Hauer - GIS (em Reais)	44
Tabela 8 - Comparação do custo total da Subestação Bandeirantes (em Reais)	45
Tabela 9 - Comparação do custo total das subestações do Paraná (em Reais).....	45
Tabela 10 - Grau de relevância dos aspectos referentes ao fator técnico	46

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AIS	<i>Air Insulated Switchgear</i> (Subestação Isolada a Ar)
ABB	<i>Asea Brown Boveri</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
AT	Alta Tensão
BT	Baixa Tensão
C	Celsius
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
EAT	Extra Alta tensão
EIA	Estudo de Impacto Ambiental
GIS	<i>Gas Insulated Switchgear</i> (Subestação Isolada a gás)
HIS	<i>Hybrid Insulated Switchgear</i>
kV	Quilovolt(s)
LTDA	Limitada
MT	Média Tensão
RIMA	Resumo dos Impactos ao Meio Ambiente
SE	Subestação
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SF ₆	Hexafluoreto de Enxofre
TC	Transformador de Corrente
TP	Transformador de Potencial
V	Volt(s)

LISTA DE SÍMBOLOS

%	Percentual
\$	Cifrão
°	Grau

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVO GERAL E ESPECÍFICO DESTE TRABALHO.....	15
1.2	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1	SUBESTAÇÕES.....	17
2.1.1	Classificação Geral das Subestações	18
2.1.1.1	<i>Classificação segundo a função desempenhada no Sistema Elétrico.....</i>	<i>19</i>
2.1.1.2	<i>Classificação segundo o nível de tensão operacional da SE</i>	<i>19</i>
2.1.1.3	<i>Classificação segundo à relação entre os níveis de tensão de entrada e saída da SE.....</i>	<i>19</i>
2.1.1.4	<i>Classificação segundo o tipo de instalação da SE</i>	<i>20</i>
2.1.1.5	<i>Classificação segundo a natureza da corrente elétrica</i>	<i>20</i>
2.1.1.6	<i>Classificação segundo o tipo de isolação dos equipamentos da SE</i>	<i>21</i>
2.1.1.7	<i>Classificação segundo à forma de operação.....</i>	<i>21</i>
2.2	SUBESTAÇÃO CONVENCIONAL - AIS.....	21
2.3	SUBESTAÇÃO COMPACTA - GIS.....	22
2.3.1	Subestação Compacta GIS Isolada com SF ₆	22
2.3.1.1	<i>Hexafluoreto de Enxofre (SF₆).....</i>	<i>26</i>
2.3.1.2	<i>Rigidez dielétrica</i>	<i>27</i>
2.3.2	Subestação Compacta GIS Isolada com Clean Air	28
2.4	SUBESTAÇÃO HÍBRIDA – HIS.....	30
3	DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO	33
3.1	LEVANTAMENTO DA ÁREA DISPONÍVEL	33
3.1.1	Resultados Referentes a Área Utilizada.....	33
3.2	MEIO AMBIENTE	36
3.2.1	Resultados Referentes ao Meio Ambiente	37
3.2.1.1	<i>Licença ambiental.....</i>	<i>38</i>
3.2.1.2	<i>Impacto visual.....</i>	<i>38</i>
3.2.1.3	<i>Poluição atmosférica</i>	<i>38</i>
3.2.1.4	<i>Ruídos/Poluição Sonora</i>	<i>39</i>
3.2.1.5	<i>Interferências Eletromagnéticas</i>	<i>39</i>
3.3	DEFINIÇÃO DE EQUIPAMENTOS	39
3.3.1	Resultados Referentes a Definição de Equipamentos.....	40
3.4	RECURSOS FINANCEIROS.....	41
3.4.1	Custo do Terreno.....	41

3.4.1.1	<i>Resultados Referentes ao Custo do Terreno</i>	41
3.4.2	Custo dos Equipamentos e Construção Civil.....	43
3.4.2.1	<i>Resultados Referentes ao Custo dos Equipamentos e Construção Civil</i>	43
3.4.3	Custo de Manutenção.....	44
3.4.4	Resultado Final dos Custos Analisados	45
3.5	FATOR TÉCNICO	46
3.5.1	Resultados Referentes aos Fator Técnico.....	46
3.5.1.1	<i>Confiabilidade</i>	47
3.5.1.2	<i>Segurança</i>	47
3.5.1.3	<i>Proximidade do centro de carga</i>	47
3.5.1.4	<i>Tempo para implantação da obra</i>	47
3.5.1.5	<i>Degradação dos equipamentos</i>	48
4	CONCLUSÃO	49
	REFERÊNCIAS	51
	ANEXOS	54

1 INTRODUÇÃO

As Subestações Elétricas (SEs) são uma das principais partes do sistema elétrico de potência, responsáveis pela transformação, proteção, controle e manobra da energia elétrica. Antes de chegar aos consumidores a energia elétrica percorre um sistema de transmissão que faz a conexão entre as unidades geradoras e os sistemas de distribuição que possuem transformadores que aumentam ou diminuem a tensão (MAMEDE, 2021).

Podem ser classificadas quanto à função, ao nível de tensão, ao tipo de instalação, à forma de operação, ao tipo de isolamento, entre outros. Quando trata-se de tipo de subestação, existe a classificação quanto ao tipo de isolamento: convencional, compacta e híbrida. Essa característica que será analisada de acordo com alguns aspectos relevantes como área utilizada, meio ambiente, custos, equipamentos e fatores técnicos.

Com o crescimento populacional nos grandes centros urbanos verifica-se que a especulação imobiliária e a ocupação desorganizada, muitas vezes, impedem a construção de uma subestação convencional. Isto porque o espaço necessário para construção precisa ser na maioria das vezes em grandes dimensões. Além disso, existe o impacto de poluição visual, ruídos, risco de explosão, interferência eletromagnética dentre outros que inviabiliza a construção em determinado local. Para minimizar este problema pode-se realizar a compactação de equipamentos que significa o encapsulamento dos mesmos e assim diminuir a área utilizada. Como benefícios adicionais dessa compactação pode-se obter uma menor necessidade de manutenção e melhorias na operação (PEIXOTO, 2005).

1.1 Objetivo Geral e Específico deste Trabalho

Este trabalho tem como objetivo geral realizar um estudo comparativo para escolha entre três modelos de subestações com diferentes tipos de isolamento: convencional, compacta e híbrida.

Para isto serão realizados estudos das SEs explicando conceitos básicos de uma SE, classificação, formas de operação e manutenção, seus impactos em diferentes âmbitos como ambiental, econômico e técnico, através de estudos e casos existentes.

Como objetivo específico serão feitas escolhas do tipo de isolamento da subestação planejada considerando potência, área/custo de terreno, meio ambiente e nível de tensão operacional.

1.2 Organização do Trabalho

Este trabalho está organizado da seguinte maneira:

No capítulo dois, é apresentada a fundamentação teórica que aborda conceitos, classificações e as subestações com diferentes tipos de isolamento

O capítulo três apresenta o desenvolvimento do trabalho englobando metodologia e resultados comparativos entre as subestações convencionais, híbridas e compactas.

No capítulo quatro, são apresentadas as conclusões do trabalho. E por fim, estão incluídas as referências bibliográficas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

No sistema elétrico brasileiro existe uma grande diversidade de Subestações Elétricas, cada uma é projetada de forma que se adeque à topografia e necessidades de cada região. Conforme NBR 5460, define-se subestação como “parte de um sistema de potência, compreendendo primordialmente as extremidades de linhas de transmissão e/ou de distribuição, com os respectivos dispositivos de manobra, controle e proteção, incluindo as obras civis e estruturas de montagem, podendo incluir também transformadores, equipamentos, conversores e/ou outros equipamentos.”

Cada subestação de energia é construída para atender a determinados padrões nacionais ou estaduais. Isso é para garantir que todas as subestações de energia funcionem igualmente bem e regulem com segurança o uso de energia elétrica. Todas as subestações de energia precisam passar por rigorosos testes de segurança antes de serem autorizadas a distribuir energia elétrica para residências e empresas. As normas de segurança também se aplicam ao pessoal que opera os componentes de uma subestação de energia, todos os funcionários devem atender a requisitos rigorosos de treinamento e ter licenças antes de serem permitidos em subestações.

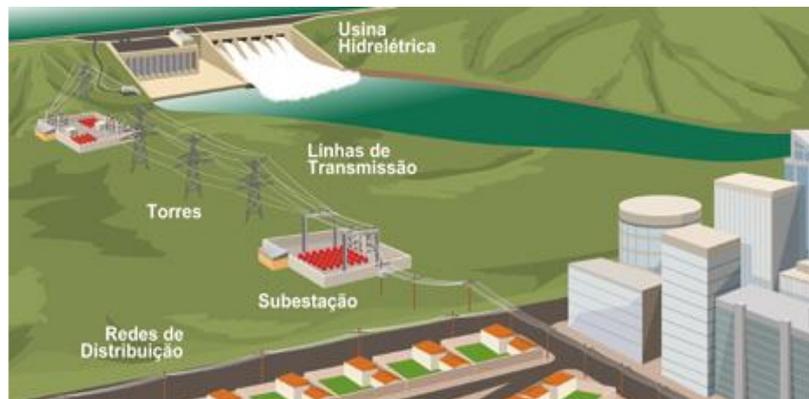
Muitas subestações de energia estão localizadas perto das principais áreas industriais. Isso ocorre porque tanto as indústrias quanto os consumidores de produtos industriais utilizam muita energia elétrica. Ter uma fonte de alimentação confiável perto de áreas industriais garante que as fábricas funcionem sem problemas. Além disso, isso mantém a poluição do ar perto das principais áreas industriais. Sem essas instalações, muitas áreas industriais não seriam capazes de funcionar adequadamente.

2.1 SUBESTAÇÕES

O Sistema Elétrico de Potência (SEP) pode ser definido como conjunto de instalações e equipamentos com finalidade de fornecer energia elétrica aos consumidores. O SEP é constituído de três etapas: geração, transmissão, distribuição de energia elétrica (CARLETO, 2019). Na Figura 1, pode-se observar um esquema

mostrando estas etapas e a subestação de energia elétrica (SE) que interliga o sistema de transmissão e distribuição.

Figura 1 – Sistema Elétrico de Potência



Fonte: CARLETO (2019)

As usinas hidrelétricas, fotovoltaicas, nucleares, termelétricas e eólicas são responsáveis pela etapa de geração de energia. As redes que interligam a geração aos outros pontos de carga correspondem a etapa de transmissão. A distribuição é a etapa final através do qual faz-se a entrega da energia elétrica ao consumidor.

As subestações são fundamentais na operação do sistema, são instalações elétricas formada por um conjunto de equipamentos responsáveis pela transmissão e distribuição da energia, e possuem também equipamentos de proteção e controle. Tem como objetivo controlar o fluxo de energia normalmente modificando os níveis de tensão e corrente elétrica nos pontos de entrega para consumidores industriais e comerciais/residenciais.

2.1.1 Classificação Geral das Subestações

As subestações (SEs) podem ser classificadas de acordo com sua função no sistema elétrico, nível de tensão, relação entre os níveis de tensão de entrada e saída, tipo de instalação, natureza da corrente elétrica, tipo de isolamento dos equipamentos da subestação, forma de operação (MUZY, 2012).

2.1.1.1 Classificação segundo a função desempenhada no Sistema Elétrico

- Subestação de Transformação: converte a tensão de suprimento para um diferente nível podendo ser SE transformadora abaixadora ou SE transformadora elevadora.
- Subestação de Distribuição: responsável pela redução do nível de tensão que recebe energia das linhas de subtransmissão e adequa para fins de distribuição.
- Subestação de Seccionamento, manobra ou chaveamento: permite conexão ou desconexão de circuitos sob o mesmo nível de tensão;
- Subestação de Conversão CA/CC: normalmente pertence ao sistema de corrente contínua e realiza a conversão de corrente contínua (CC) para corrente alternada (CA) e vice-versa.

2.1.1.2 Classificação segundo o nível de tensão operacional da SE

Esta classificação quanto ao nível de tensão foi feita de acordo com Gebran (2014) no livro “Manutenção e Operação de Equipamentos de Subestações”:

- Baixa Tensão (BT): tensão menor ou igual a 1kV;
- Média Tensão (MT): tensão de 1kV até 66kV;
- Alta Tensão (AT): tensão de 66kV até 230kV;
- Extra-Alta Tensão (EAT): de 230kV até 800kV;
- Ultra-Alta Tensão (UAT): acima de 800kV.

2.1.1.3 Classificação segundo à relação entre os níveis de tensão de entrada e saída da SE

- Subestação Elevadora: eleva o nível de tensão de saída e fica localizada na saída das usinas geradoras como usinas hidráulicas, térmicas, eólicas, etc.
- Subestação Abaixadora: reduz o nível de tensão de saída e normalmente fica localizada na periferia dos centros urbanos com

finalidade de evitar a construção de linhas de transmissão de tensão elevada no espaço urbano levando transtornos à população.

- Subestação de Manobra: mesmo nível de tensão na entrada e saída e responsável pelo chaveamento de linhas de transmissão.

2.1.1.4 Classificação segundo o tipo de instalação da SE

- Subestação a Céu Aberto, Ao Tempo ou Desabrigada: construída em locais ao ar livre, requer emprego de aparelhos e máquinas próprias para que possam funcionar nas mais diversas condições atmosféricas(chuva, vento, poluição, etc).
- Subestação Interna ou Abrigada: construída no interior de uma edificação normalmente feita com concreto armado, metal ou alvenaria e proteção de um teto.
- Subestação Blindada: instalada em locais abrigados ou ao tempo, dependendo do grau de proteção do cubículo. Os equipamentos de potência convencionais são instalados no interior de cubículos metálicos.

2.1.1.5 Classificação segundo a natureza da corrente elétrica

- Subestação de Corrente Alternada: não sofre alteração na modalidade da corrente, no número de fases ou na frequência;
- Subestação Conversora de Frequência: converte energia de uma frequência para outra diferente;
- Subestação de Alternadora ou Inversora: converte corrente contínua em corrente alternada (CC >CA);
- Subestação Retificadora: converte corrente alteranda em corrente contínua (CA > CC);
- Subestação Comutadora: converte corrente alternada em corrente contínua e vice-versa (CA > CC > CA);
- Subestação Conversora de Fases: converte energia de um número de fases para outro;

- Subestação Defasadora: responsável pela defasagem nos sinais de corrente e tensão.

2.1.1.6 Classificação segundo o tipo de isolamento dos equipamentos da SE

A partir desta classificação pode-se realizar o comparativo das subestações proposto por este trabalho.

- Subestação Convencional – AIS (*Air Insulated Switchgear*);
- Subestação Compacta - GIS (*Gas Insulated Switchgear*);
- Subestação Híbrida - HIS (*Hybrid Insulated Switchgear*).

2.1.1.7 Classificação segundo à forma de operação

- Subestação com Operador: as decisões e o controle do sistema depende quase que totalmente do operador por isso exige muito conhecimento e treinamento do operador, são utilizados computadores na supervisão e operação local quando trata-se de instalações maiores.
- Subestação Semi-Automáticas: quando o operador tem alguma atuação no sistema, possui computadores locais ou sistemas de segurança eletromecânicos que impedem operações indevidas do operador local.
- Subestação Automatizadas: controle do sistema é feito à distância por softwares e computadores.

2.2 Subestação Convencional - AIS

Também conhecida como AIS (*Air Insulated Switchgear*), é instalada a céu aberto e ter o ar como material isolante entre os equipamentos é a principal característica desta subestação. Atualmente, é a mais empregada nas redes elétricas. Na Figura 2 é mostrado um exemplo de subestação convencional.

Figura 2 - Subestação Convencional AIS – Pamplona, em Cristalina - GO



Fonte: ENEL (2021)

Com exceção dos transformadores que possuem isolamento a óleo interno e dos disjuntores que também são isolados a gás, a óleo ou ainda a vácuo, os demais equipamentos de alta tensão deste tipo de subestação possuem o isolamento mais antigo que é o ar (MEIRELES, 2010).

Os projetos destas subestações precisam obedecer uma distância mínima de afastamento dos equipamentos elétricos de acordo com Mamede (2021) para garantir a segurança. Por isto, as subestações isoladas a ar precisam de grandes áreas e são impactadas diretamente pelas condições atmosféricas adversas. Os equipamentos do sistema de proteção, controle e supervisão encontram-se dentro da casa/cabine de comando (Mamede, 2021).

2.3 Subestação Compacta - GIS

2.3.1 Subestação Compacta GIS Isolada com SF₆

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).

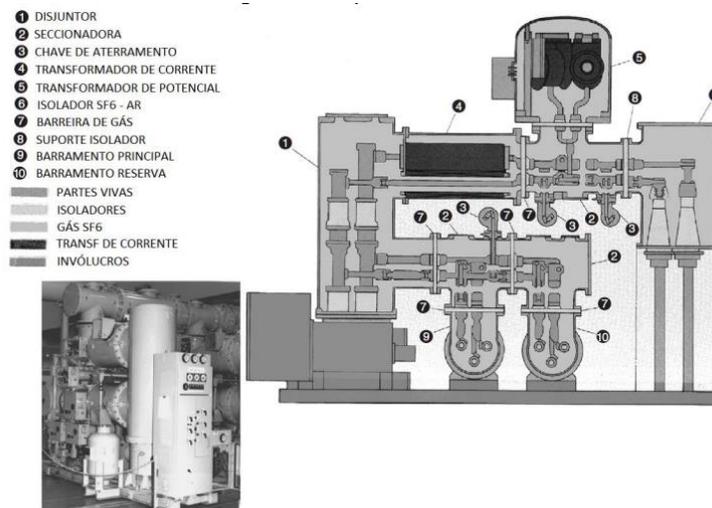
Na Figura 3 é mostrado um exemplo de subestação compacta abrigada e na Figura 4 observa-se um exemplo de uma GIS de 242kV vista em corte com encapsulamento trifásico.

Figura 3 - Subestação Compacta GIS Abrigada



Fonte: TSEA Energia (2019)

Figura 4 - Encapsulamento trifásico GIS



Fonte: MCDONALD (2006)

Nas Figuras 5 e 6, é mostrado o módulo compactado GIS da Subestação de Setúbal localizada em Recife, a primeira no país a utilizar tecnologia GIS na configuração H com cinco disjuntores de 69kV. Está localizada na área urbana, com área de aproximadamente 707m². Os cortes das estruturas do projeto eletromecânico desta subestação e o arranjo geral em planta baixa são mostrados no anexo A e no anexo B, respectivamente.

Figura 5 - Módulo GIS compacto da SE de Setúbal



Fonte: Autoria própria

Figura 6 - Módulo GIS compacto da SE de Setúbal



Fonte: Autoria própria

As subestações GIS são utilizadas em locais onde há alguma restrição de área e/ou preço elevado de terrenos como por exemplo nos grandes centros urbanos pois ocupam muito menos espaço que as subestações convencionais. Logo, o fator área é um critério muito relevante pois o custo será maior nas subestações convencionais porque elas precisam de maior área para serem instaladas.

Outro ponto a ser considerado é a necessidade de uma futura expansão na subestação, devido a possibilidade de fazer verticalização de uma subestação GIS mais uma vez abre vantagem sob a subestação AIS onde não ocorre este tipo de possibilidade e para isso seria preciso uma maior área para expansão.

Quanto aos aspectos ambientais, o impacto visual provocado pela GIS é reduzido pois os equipamentos estão encapsulados e compactados demandando menor espaço e podendo ser instalada ao lado de residências ou comércios.

A poluição sonora e as interferências eletromagnéticas também são reduzidas devido ao enclausuramento dos equipamentos e como nas subestações AIS os equipamentos não são encapsulados elas possuem um maior impacto visual, alta poluição sonora e maior interferência.

Em áreas urbanas existem maiores índices de poluição do ar tornando o ar poluído e fazendo com que seja necessária uma limpeza frequente dos equipamentos para não interferir no isolamento dos mesmos, este fator não prejudica a Subestação GIS pois seu meio isolante é o gás SF₆ e não o ar como na subestação AIS.

Este tipo de tecnologia permite que a montagem e instalação dos equipamentos sejam otimizadas, que tenha uma menor frequência de intervenções para manutenção e imprime maior confiabilidade aos sistemas. Porém, apesar da subestação GIS apresentar menor taxa de falha, o tempo necessário para reparos em caso de falhas são maiores na GIS do que na AIS.

Algumas desvantagens da subestação GIS são o maior custo dos equipamentos em comparação com as subestações convencionais comuns pois os equipamentos são mais complexos com alta tecnologia de isolamentos a gás SF₆ e isto faz com que o valor do equipamento seja mais elevado.

Em suma, algumas vantagens da GIS em comparação com as subestações AIS são a fácil instalação, baixa manutenção e conseqüentemente menor custo de

manutenção, dimensões reduzidas, não inflamável, não explosivo, menor poluição, maior confiabilidade de funcionamento.

2.3.1.1 Hexafluoreto de Enxofre (SF_6)

O hexafluoreto de enxofre (SF_6) é utilizado na maioria das subestações do mundo como gás isolante em disjuntores e outros equipamentos.

Trata-se de um gás sintético, não produzido naturalmente e que comporta-se como gás nobre pois possui as seguintes características: não tóxico, incolor, inodoro, insípido, inerte até $5000^{\circ}C$ e não inflamável, pode ser utilizado como agente que extingue o fogo por ser não inflamável e considerado refrescante. Tem excelentes propriedades como isolante e supressor de arco elétrico pois o arranjo de sua molécula é estável e muito eletronegativa então durante o arco elétrico absorve os elétrons livres protegendo o sistema (JESUS; YOKOGAWA; OLIVEIRA, 2017).

Devido a característica dielétrica, este gás quando colocado em tubos sobre pressão diminui a distância entre as partes energizadas, compactando assim as subestações e tornando viável a instalação de subestações GIS onde há restrição de espaço além de quase não requerer manutenção. O gás tem elevada rigidez dielétrica onde a um atm, é mais que duas vezes a do ar ou do nitrogênio; sua alta eficácia como supressor de arco comparado com o ar é dez vezes mais eficiente em um tempo 100 vezes maior.

Este gás é quase cinco vezes mais denso que o ar, em ambientes fechados há risco de asfixia para pessoas, por isso é preciso muito cuidado ao manusear esse gás. Os vazamentos podem ter efeito prejudicial nas operações então os técnicos devem ter meios para detectar localização e tamanho de qualquer vazamento utilizando detectores que operam por espectopia de infravermelho (MARQUES, 2020).

Durante a extinção do arco elétrico, o SF_6 é decomposto, depois se recombina e volta a seu estado original porém são formados alguns subprodutos que podem ser contaminantes, afim de evitar este acúmulo de resíduos contaminantes são colocadas peneiras especiais para filtragem no interior das GIS. O gás contaminado na maioria das vezes pode ser limpo, filtrado e reutilizado novamente.

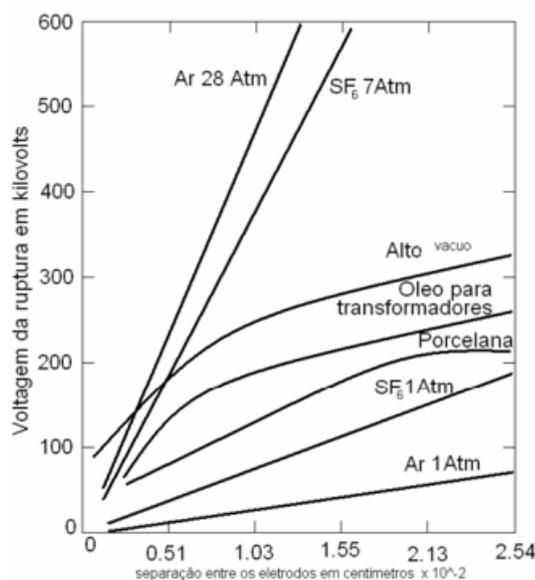
Além de ter vantagem por poupar espaço e material nas instalações de subestações, menor impacto estético nas regiões urbanas, ser menos dependente de condições climáticas, este gás também garante maior segurança de funcionamento dos sistemas e menor probabilidade de defeitos.

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).

2.3.1.2 Rigidez dielétrica

A rigidez dielétrica é a relação entre a máxima diferença de potencial que um dielétrico pode suportar sem que ocorra sua ruptura (“breakdown”), e a sua espessura (MORA, 2010). Na Figura 7, é possível observar a tensão de ruptura em função da espessura do dielétrico de alguns materiais isolantes.

Figura 7 - Esforço para ruptura de diversos dielétricos com campos uniformes. Tensão de ruptura em função da espessura do dielétrico.



Fonte: MORA (2010)

Comparando o ar com o gás SF₆ a 1 atm, nota-se que quanto maior a separação dos eletrodos maior é a voltagem da ruptura de ambos, mas nesta condição é o gás SF₆ quem apresenta maior voltagem de ruptura ou seja para 1 atm é o que possui maior rigidez dielétrica. Uma segunda comparação pode ser feita com estes gases comprimidos, ar a 28 atm e gás SF₆ a 7 atm, nesta condição o ar comprimido é quem apresenta maior voltagem de ruptura, logo é o de maior rigidez dielétrica.

Levando em consideração que a subestação convencional que tem o ar a 1 atm como isolante e a subestação compacta com gás SF₆ comprimido a 7 atm, nota-se pela Figura 7 que neste caso, a subestação compacta isolada a gás SF₆ terá o material isolante com maior voltagem de ruptura, ou seja, maior rigidez dielétrica.

A pressão interna do gás em um produto GIS ELK-04 é de 5,2 a 7 bar (ou 0,52 a 0,7 kPa), o que está de acordo com o valor de aproximadamente 7 atm citado acima. Esta é uma característica que depende do design de cada fabricante e está indicada no anexo C retirado do catálogo da Hitachi Energy.

2.3.2 Subestação Compacta GIS Isolada com Clean Air

A empresa Siemens lançou o Portfólio Azul em 2017, apresentando soluções 100% sustentáveis: disjuntores isolados a vácuo e a subestação compacta GIS com disjuntor a vácuo e clean air (ar limpo) que não é poluente.

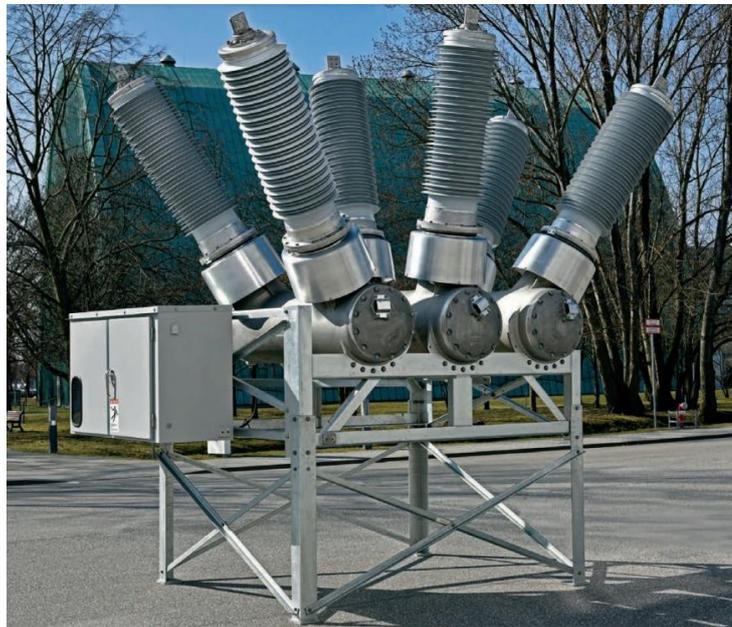
Esta subestação compacta GIS com disjuntor isolado a vácuo que funciona como alternativa aos equipamentos isolados em gás SF₆ e clean air utiliza a mistura de oxigênio e nitrogênio como meio isolante para os demais equipamentos afim de eliminar o risco de emissões de gases contribuintes para o aquecimento global. O clean air trata-se do ar processado e purificado em forma compactada com proporção de 80% de nitrogênio a 20% de oxigênio, é um produto não tóxico e não prejudicial proporcionando maior segurança (SIEMENS ENERGY 2022).

Os equipamentos com isolamento a clean air operam com zero gases de efeito estufa, manutenção praticamente zero e tratamento de fim de vida simples pois tem descarte simples e desperdício zero por conta dos estudos de reciclagem.

A Westnetz GmbH tem testado com sucesso essas soluções em um estudo de campo na subestação Hesseln, na Alemanha.

Na Figura 8, pode ser visto um disjuntor deste portfólio da Siemens: Disjuntor Siemens Energy 3AV1 Blue (72,5-145 kV) que oferece operação de alta tensão livre de gás F e habilitada digitalmente, isolamento de ar limpo reduzindo a pegada de carbono e aumentando a segurança operacional.

Figura 8 - Disjuntor a vácuo de 145 kV



Fonte: SIEMENS ENERGY (2021)

Este é o primeiro disjuntor a vácuo Dead Tank (DT) de 145 kV do mundo com isolamento de ar limpo, os disjuntores Blue atendem ao mesmo padrão de alta qualidade do portfólio SF₆: recursos confiáveis de abertura e interrupção, mecanismo operacional de alto desempenho e livre de manutenção, maior disponibilidade e duração de operação. Além disso, a tecnologia a vácuo apresenta vantagem nos seguintes recursos em relação aos disjuntores tradicionais a SF₆: 30 interrupções totais de corrente de curto-circuito, 10.000 interrupções de corrente nominal, interrupção de corrente opcional de dois ciclos, desempenho total até -60°C de temperatura ambiente e unidade de interrupção livre de manutenção durante sua vida útil (SIEMENS ENERGY, 2021).

2.4 Subestação Híbrida – HIS

A subestação híbrida conhecida também como HIS (*Hybrid Insulated Switchgear*). É o tipo de subestação que possui características da subestação GIS onde os equipamentos são isolados a gás SF₆ e da subestação convencional que possui equipamentos isolados a ar. Na Figura 9 é mostrado um exemplo de subestação híbrida.

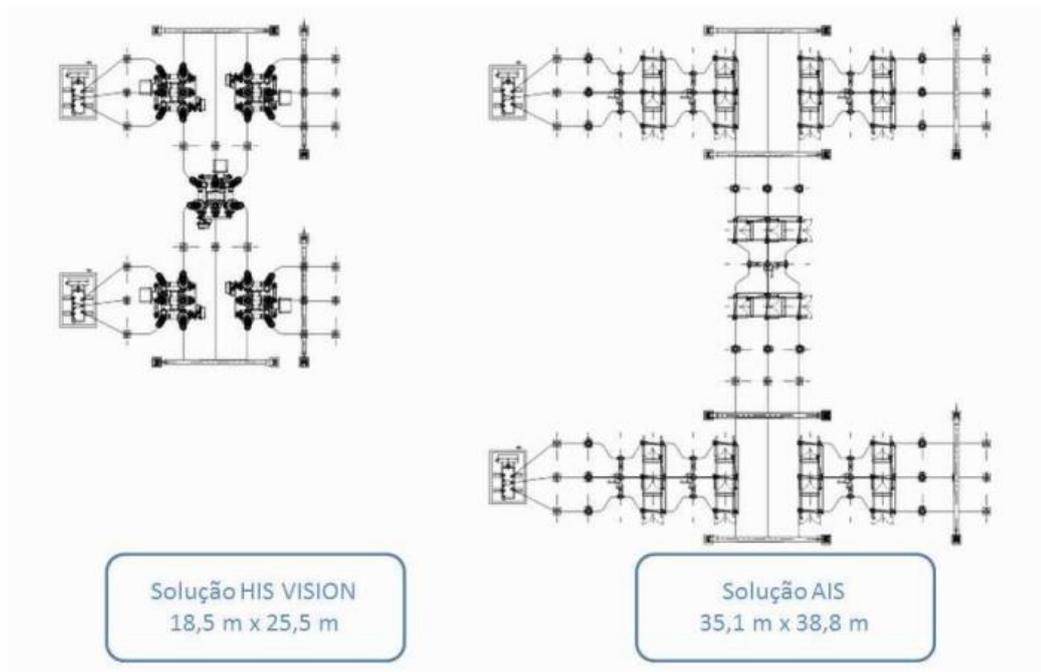
Figura 9 - Subestação Híbrida



Fonte: SIEMENS (2022)

Por este tipo de subestação ser mais compacta em relação a subestação convencional, apresenta uma redução da área utilizada em até 70% e possuem baixo tempo de comissionamento, fácil instalação e são facilmente abrigadas (Dantas, 2017). Na Figura 10 é mostrada uma comparação entre as áreas das subestações híbridas e convencionais.

Figura 10 - Comparação entre áreas utilizadas - Híbrida (HIS) x Convencional(AIS)



Fonte: VISION (2022)

Nestas subestações são utilizados condutores de alta capacidade e transformadores isolados a gás (TIG) que são equipamentos compactos cuja quantidade de gás SF₆ é tão grande quanto a utilizada numa subestação GIS, além disso os TIGs possuem ventilação forçada afim de aumentar o rendimento, podendo utilizar coolers também (Dantas, 2017).

Outro equipamento importante é o módulo híbrido integrado de alta tensão denominado PASS (*Plug And Switch System*) aplicável nas tensões de 69kV e 138kV. É chamado de híbrido porque possui características de GIS (bays isolados e blindados em SF₆) e AIS (conexão de barramentos por buchas aéreas). Este módulo é composto de um invólucro de gás para cada fase, o qual é formado por disjuntores, seccionadores, chaves de terra, transformadores de corrente e de potencial (FILHO, 2019).

Na figura 11, observa-se um módulo híbrido PASS M0 series.

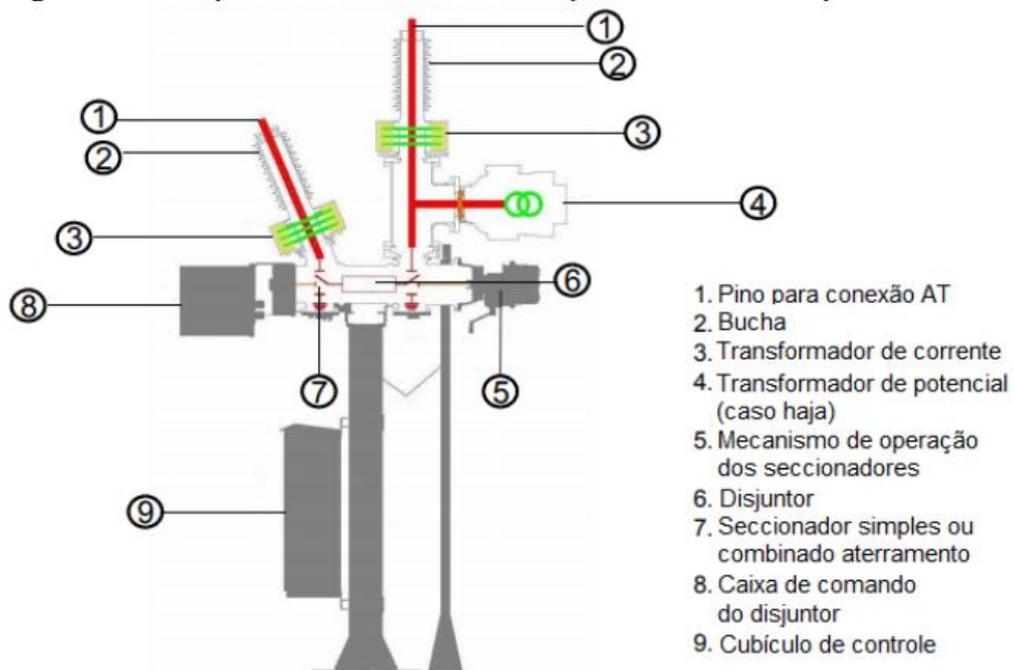
Figura 11 - Módulo híbrido - PASS M0 series



Fonte: ABB (2022)

Os módulos híbridos são flexíveis podendo ter modelos para instalação em barramentos simples ou em barramento duplo. A Figura 12, mostra os componentes de um módulo híbrido para barramento simples.

Figura 12 - Componentes do módulo híbrido para barramento simples



Fonte: PEREIRA (2020)

3 DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

Neste tópico será apresentada a comparação entre os tipos de subestações feita com base na análise de alguns fatores significativos: área disponível, meio-ambiente, definição de equipamentos, recursos financeiros, fatores técnicos.

3.1 Levantamento da Área Disponível

É importante verificar se a área disponível é suficiente para implantação de uma subestação convencional, pois nas grandes metrópoles pode ser difícil de encontrar espaço físico necessário para construção da mesma. Quando o espaço é reduzido ou menor que o esperado, tem-se as subestações GIS (“Gas Insulated Switchgear”) ou subestações híbridas como possibilidades.

Outros fatores importantes são a verificação da regularidade do terreno e a necessidade de terraplanagem ou construção de muros de contenção, o que pode aumentar o custo da implementação da Subestação - SE.

3.1.1 Resultados Referentes a Área Utilizada

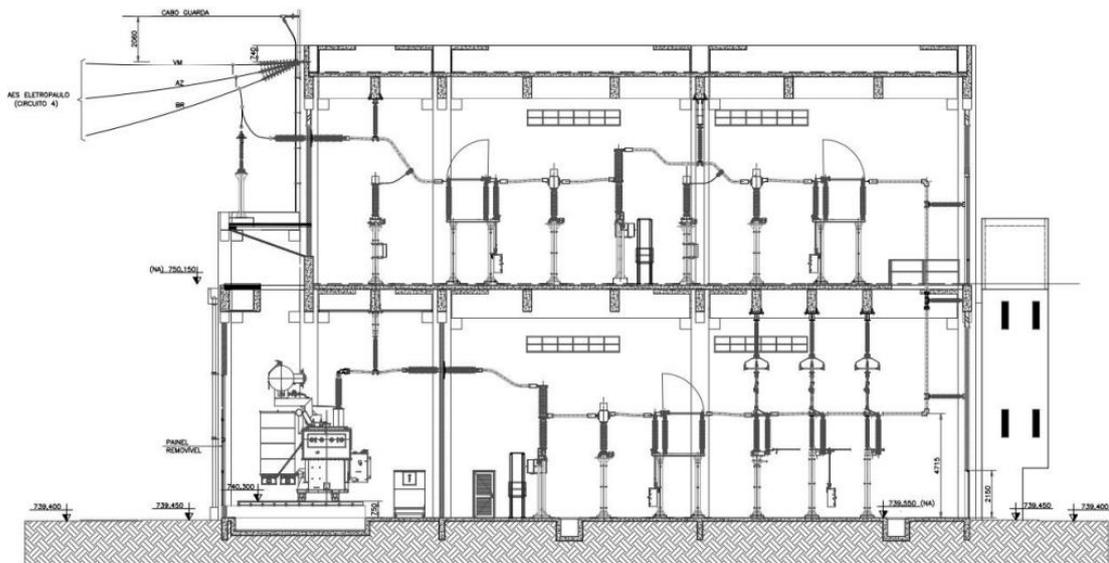
Como exemplo para esta análise, tem-se a subestação localizada em São Paulo, bairro Campo Belo: Subestação Primária Bandeirantes, cuja tensão é de 88-138/22kV que ocupa uma área de 3.589 m² (TSEA energia, 2019). Na Figura 13, observa-se a área da SE Primária Bandeirantes e na Figura 14, pode-se observar a vista lateral em Corte do arranjo AIS (“Air Insulated Switchgear”) desta Subestação.

Figura 13 - Área da SE Bandeirantes AIS



Fonte: Google Maps (2022)

Figura 14 - Vista Lateral em Corte do arranjo AIS da Subestação Primária Bandeirantes



Fonte: TSEA energia (2019)

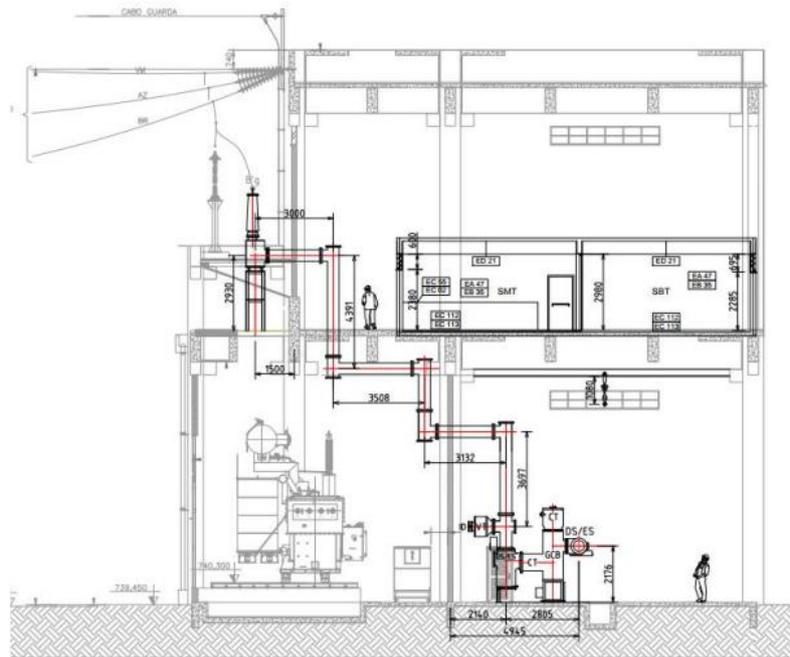
Utilizando esta mesma subestação porém com a configuração GIS ocorre uma redução na área utilizada para 1.681 m^2 , ou seja, 46% menor em comparação com a configuração AIS como mostrado na parte amarela da Figura 15. Na Figura 15, é mostrado o comparativo entre estas áreas das subestações AIS e GIS. Na Figura 16, observa-se a vista lateral em corte do arranjo GIS desta SE.

Figura 15 - Comparativo das áreas AIS x GIS



Fonte: TSEA energia (2019)

Figura 16 - Vista Lateral em Corte do arranjo GIS da Subestação Primária Bandeirantes



Fonte: TSEA energia (2019)

Na Tabela 1, observa-se a comparação das áreas dos três tipos de subestações: AIS, Híbrida-GIS e GIS, pode-se utilizar a proporção da área da subestação híbrida de 66%, este valor está dentro da margem de até 70% de redução em relação a subestação convencional, para estimar de quanto seria a área da mesma para o caso

da Subestação Primária Bandeirantes na configuração híbrida-GIS. Assim 66% de 3.589 m² seria equivalente a 2.368 m².

Tabela 1 - Comparação das áreas dos três tipos de subestações

	AIS	Híbrida - GIS	GIS
Área (m ²)	3.589 (100%)	2.368 (66%)	1.681 (46%)

Fonte: Autoria própria

Esta análise é importante pois nos centros urbanos há dificuldades para encontrar terrenos disponíveis e/ou com grandes proporções que atendam a construção de uma subestação convencional, então as subestações híbridas ou GIS são tomadas como possibilidades.

O custo do metro quadrado (m²) nas áreas urbanas é alto, então quanto maior a quantidade de área utilizada maior será o valor do empreendimento. Logo, neste quesito é mais vantajoso escolher a subestação GIS e depois a híbrida-GIS.

3.2 Meio Ambiente

Para avaliação do fator meio ambiente leva-se em conta a análise de alguns aspectos importantes como licença ambiental, impacto visual, grau de poluição atmosférica, geração de ruídos e geração de interferências eletromagnéticas.

Para a obtenção da Licença Ambiental (LA) depende-se dos impactos que a implantação da subestação irá causar no meio, os quais são analisados e avaliados pelo EIA/RIMA (Estudo de Impacto Ambiental/Resumo dos Impactos ao Meio Ambiente) (MEIRELES, 2010). Levanta-se, também, os custos para o cumprimento de medidas mitigatórias para os impactos gerados.

O impacto visual é observado nas subestações que ocupam maior espaço físico e tem seus equipamentos expostos nas áreas externas. É um dos menores problemas pois apesar da poluição visual não interfere em nada na funcionalidade da subestação nem no cotidiano das pessoas que moram próximo.

Analisando o grau de poluição atmosférica, a subestação mais prejudicada será a que possui o ar como material isolante pois este estará poluído e irá necessitar de mais limpeza nos equipamentos para evitar problemas operacionais e conseqüentemente aumento nos custos.

A geração de ruídos ou poluição sonora causada pelos zumbidos do transformadores de potência e reatores é prejudicial a saúde mental dos moradores da região onde localiza-se uma subestação por isso é muito importante avaliar este aspecto.

A geração de interferências eletromagnéticas nos equipamentos eletrônicos e no sinal de internet da vizinhança ocorre quando os equipamentos não são encapsulados (JESUS; YOKOGAWA; OLIVEIRA, 2017). Na subestação convencional isto pode ser minimizado adotando um padrão de subestação abrigada.

3.2.1 Resultados Referentes ao Meio Ambiente

Para análise deste fator, utilizou-se uma classificação com base no grau de relevância dos aspectos citados acima e com base no estudo de Tomazi (2021) que faz uma comparação entre as subestações AIS, Híbrida e GIS no que diz respeito a relevância dos aspectos analisados, como é mostrada na Tabela 2.

Este grau de relevância foi estabelecido pelo grau de importância para implantação das subestações classificando cada aspecto com baixa, média ou alta importância.

Tabela 2 - Grau de relevância dos aspectos referentes ao meio ambiente

ASPECTOS	RELEVÂNCIA		
	AIS	Híbrida	GIS
Licença Ambiental	Alta	Média	Baixa
Impacto Visual	Alta	Alta	Baixa
Poluição atmosférica	Alta	Média	Baixa
Ruídos/Poluição sonora	Alta	Alta	Baixa
Interferências eletromagnéticas	Alta	Média	Baixa

Fonte: (Adaptado) TOMAZI (2021)

3.2.1.1 Licença ambiental

O licenciamento ambiental é feito conforme o grau de impacto e a subestação convencional do tipo AIS possui maior impacto em termos de área, poluição visual e poluição sonora (ruídos causados pelos transformadores de potência). A subestação GIS tem restrições relativas ao uso do gás SF₆ por causa do Protocolo de Kyoto que tem o objetivo de reduzir a emissão de gases que agravam o efeito estufa. O Protocolo de Kyoto é um acordo internacional com o objetivo de diminuir o lançamento de gases causadores do efeito estufa e o consequente aquecimento global.

A subestação híbrida tem de se preocupar com os impactos das subestações AIS e GIS pois é composta por estas duas.

Logo, nos grandes centros urbanos é mais vantajoso optar pela GIS pois possui menor impacto ambiental e maior facilidade em adquirir licenças. Caso seja um local afastado e que não seja área de proteção ambiental este aspecto é indiferente.

3.2.1.2 Impacto visual

O aspecto visual tem grau de relevância baixo para a GIS porque é um dos menores problemas existentes em uma subestação próxima a zonas urbanas. Para as pessoas que moram no bairro onde possui uma subestação convencional, o aspecto visual pode incomodar e não agradar por isso tem alto grau de relevância, então projetos de urbanismo e paisagismos podem ser feitos para reduzir este impacto.

Em uma subestação GIS, além de ter menor área utilizada, os equipamentos ficam abrigados dentro de prédios então este impacto é bem menor e nas subestações híbridas este impacto também é alto pois possui equipamentos visíveis e expostos a céu aberto e também equipamentos abrigados que não são visíveis.

3.2.1.3 Poluição atmosférica

Nas grandes metrópoles a poluição atmosférica é uma preocupação e quando se trata deste fator relacionado a subestações pode-se dizer que a poluição prejudica o isolamento dos equipamentos de subestações AIS porque são a céu aberto e o meio

isolante é o ar que neste caso estará poluído então precisa-se de uma maior frequência na limpeza e manutenção, por isto este aspecto é de alta importância para a AIS.

Este problema não é encontrado nas subestações GIS pois os equipamentos estão abrigados em edificações sem contato com o ar poluído e conseqüentemente é um aspecto considerado baixo para GIS. Já na subestação híbrida este impacto tem posição intermediária por apresentar os dois tipos de equipamentos isolados a ar e SF₆ presentes na AIS e GIS, respectivamente.

3.2.1.4 Ruídos/Poluição Sonora

Este aspecto é de alta importância para as subestações convencionais pois nelas existem transformadores de potência com alta geração de ruído enquanto que na subestação compacta tal aspecto é de baixa relevância porque estes ruídos não existem devido aos transformadores de potência que são enclausurados dentro dos módulos isolados a gás SF₆. Em subestações híbridas, a poluição sonora também é considerado um fator de alta relevância, pois parte dos equipamentos são encapsuladas e outra parte é exposta como na SE convencional.

3.2.1.5 Interferências Eletromagnéticas

As subestações convencionais são as mais afetadas quanto a este aspecto pois seus equipamentos não são encapsulados e por isso as interferências eletromagnéticas são um fator de alta relevância. As híbridas também são muito afetadas por conta das interferências eletromagnéticas causadas pela parte dos equipamentos que não encapsulados. A subestação GIS tem este problema bem reduzido devido ao encapsulamento dos equipamentos e assim pode-se classificar este aspecto de interferências como de baixa relevância.

3.3 Definição de Equipamentos

Na Tabela 3, é mostrado o afastamento elétrico nas subestações externas onde são indicadas as mínimas distâncias padronizadas entre equipamentos e/ou partes

energizadas visando a garantia da segurança em subestações que contenham o ar como meio isolante, ou seja, as SEs convencionais.

Tabela 3 - Espaçamentos Elétricos em Subestações Convencionais

Tensão Nominal (KV)	Tensão Máxima do Equipamento (KV)	Tensão Suportável de Impulso Atmosférico (kv crista)	Espaçamento em metro				Altura Mínima de Barramento Horizontal sobre o Solo (m)	Altura Recomendada sobre Estradas(m)	
			Fase-terra (mínimo)	Fase-fase (mínimo)		Eixo a eixo de fases com equipamentos		Secundária	de Serviços
				Barramentos rígidos	Barramentos flexíveis				
13,8	15	110	0,20	0,30	-	-	3,0	-	6,0
34,5	38	200	0,38	0,48	-	-	3,0	-	6,0
69,0	72,5	350	0,69	0,79	1,25	3,0	3,0	4,55	6,0
138,0	145	550	1,10	1,25	2,50	4,0	3,6	4,55	7,5
138,0	145	850	1,30	1,45	2,50	5,0	3,6	5,60	7,5
230,0	242	850	1,60	1,90	4,00	6,0	4,5	5,60	8,5
230,0	242	950	1,70	2,10	4,00	8,0	4,5	5,60	8,5
230,0	242	1050	1,90	2,30	4,00	8,0	4,5	5,60	8,5

Fonte: MAMEDE (2021)

No caso de instalações de subestações GIS não existe padrão ou norma regulamentadora em relação aos afastamentos elétricos mínimos. Tratando-se de uma subestação híbrida, o projeto deve levar em conta os critérios da Tabela 3 para a parte dos equipamentos isolados a ar que são referentes a subestação convencional (TOMAZI, 2021).

3.3.1 Resultados Referentes a Definição de Equipamentos

Devido a esta distância mínima de afastamento dos equipamentos elétricos que as subestações isoladas a ar precisam de grandes áreas enquanto que as subestações GIS e híbridas necessitam de áreas menores. Uma subestação GIS, geralmente, possui os mesmos equipamentos de uma subestação convencional, porém de forma compacta, ocupando aproximadamente 1/3 da área de uma subestação AIS, e que se encontram divididos em módulos encapsulados e isolados normalmente a gás SF₆.

A subestação híbrida possui na parte externa equipamentos isolados a ar e a distância dos equipamentos deve obedecer aos espaçamentos elétricos apresentados na Tabela 3.

3.4 Recursos Financeiros

Para análise dos recursos financeiros foi feito um levantamento de custo investido na implantação da subestação. O custo da implantação de uma subestação compacta GIS é cerca de 60% a 70% maior em relação a subestação convencional AIS por conta de sua elevada complexibilidade tecnológica (JACOBSEN, 2001).

O custo total de uma implantação de uma SE pode ser composto por: custo do metro quadrado do terreno, custos de investimentos (obras e equipamentos), custos de manutenção, etc.

Para este fator referente aos recursos financeiros, considera-se o exemplo citado anteriormente da Subestação Primária Bandeirantes, 138kV, cuja configuração AIS ocupa uma área de 3.589 m², a configuração GIS ocupa 1.681 m² e a configuração híbrida possui 2.368 m² de área utilizada.

Outro exemplo, para fins de comparação, foi baseado nos estudos de Jesus, Yokogawa e Oliveira (2017) onde é apresentada a Subestação Bituruna do tipo AIS e a Subestação Hauer do tipo GIS, ambas localizadas no Paraná e padronizadas para 138kV.

3.4.1 Custo do Terreno

Tomando R\$ 10.000,00 como valor base do m² para instalação de qualquer uma das três configurações foi calculado o custo total do terreno.

3.4.1.1 Resultados Referentes ao Custo do Terreno

Na Tabela 4, observa-se o resultado do custo total para cada modelo de subestação analisado da Subestação Bandeirantes. A subestação AIS, como já era

de se esperar, obteve maior custo total do terreno, em seguida a subestação híbrida com economia de 34% e por fim a subestação isolada a gás que mostrou uma economia de aproximadamente 53%.

Tabela 4 - Comparação do custo total do terreno da SE Bandeirantes

	AIS	Híbrida	GIS
Custo do m ² (R\$)	10.000	10.000	10.000
Área utilizada (m ²)	3.589	2.368	1.681
Custo Total (R\$)	35.890.000	23.680.000	16.810.000

Fonte: Autoria própria

Na Tabela 5, observa-se o resultado do custo total do terreno para a Subestação Bituruna do tipo AIS, para a Subestação Hauer do tipo GIS e para a subestação híbrida adicionada sabendo que esta foi estimada e corresponde a 66% da área da subestação AIS.

A subestação AIS, como já era de se esperar, obteve maior custo total do terreno, em seguida a subestação híbrida com economia de 34% e por fim a subestação GIS que mostrou uma economia de aproximadamente 84%.

Tabela 5 - Comparação do custo do terreno das subestações Bituruna e Hauer

	AIS	Híbrida	GIS
Custo do m ² (R\$)	10.000	10.000	10.000
Área utilizada (m ²)	18.800	12.408	2.946
Custo Total (R\$)	188.000.000	124.080.000	29.460.000

Fonte: (Adaptado) JESUS; YOKOGAWA; OLIVEIRA (2017)

Em ambas as tabelas, a subestação GIS apresentou a maior economia seguida da subestação híbrida e por fim a subestação AIS.

3.4.2 Custo dos Equipamentos e Construção Civil

Os valores para a subestação do tipo híbrida possui custo de aproximadamente 50% superior a subestação AIS e a subestação compacta cerca de 80% superior a AIS (MEIRELES, 2010). Baseado nesta proporção foram estimados os custos da subestação híbrida, pois não continham estes custos no caso estudado.

3.4.2.1 Resultados Referentes ao Custo dos Equipamentos e Construção Civil

A comparação do orçamento dos equipamentos, construção civil e custo total da Subestação Primária Bandeirantes é mostrado na Tabela 6.

Desta tabela, observa-se que o custo dos equipamentos da subestação GIS é de aproximadamente 9% maior que da subestação AIS e da subestação híbrida é de 50% superior a subestação AIS. Quanto ao custo da construção civil, observa-se que o custo da AIS é 60% superior ao da GIS e 50% inferior ao custo da híbrida.

Analisando o custo total que é o equivalente a soma do custo dos equipamentos com o custo da construção civil, verifica-se que a subestação GIS apresenta custo total menor com economia de 10,49% inferior a AIS e a subestação híbrida apresenta custo maior de 50% superior a AIS.

Tabela 6 - Comparação do custo dos equipamentos, construção civil e custo total da SE Bandeirantes (em Reais)

Subestação	AIS	GIS	Híbrida
Equipamentos	12.540.000	13.700.000	18.810.000
Construção Civil	5.000.000	2.000.000	7.500.000
TOTAL	17.540.000	15.700.000	26.310.000

Fonte: (Adaptado) TSEA energia (2019)

Na Tabela 7, observa-se valores baseados nos estudos de Jesus, Yokogawa e Oliveira (2017), a subestação AIS Bituruna e a subestação GIS Hauer, localizadas no Paraná e padronizadas para 138kV, e a subestação híbrida foi adicionada neste trabalho para uma melhor comparação baseada na mesma proporção de custos da Subestação Bandeirantes.

Tabela 7 - Comparação do custo dos equipamentos, construção civil e custo total da SE Biturana - AIS e SE Hauer - GIS (em Reais)

Subestação	AIS	GIS	Híbrida
Equipamentos	8.961.259	15.623.892	13.441.889
Construção Civil	8.948.130	7.425.406	13.422.195
TOTAL	17.909.389	23.049.299	26.864.084

Fonte: (Adaptado) JESUS; YOKOGAWA; OLIVEIRA (2017)

Desta tabela, observa-se que o custo dos equipamentos da subestação GIS é de aproximadamente 74% maior que o da subestação AIS e o custo dos equipamentos da subestação híbrida é de 50% superior a subestação AIS. Quanto ao custo da construção civil, observa-se que o custo da AIS é 17% superior ao da GIS e 50% inferior ao custo da híbrida.

Analisando o custo total, verifica-se que a subestação GIS apresenta custo total de 28,7% maior em relação a AIS e a subestação híbrida também apresenta custo de 50% superior a AIS.

Diante dos resultados observados nas Tabelas 6 e 7 pode-se observar que nem sempre a subestação construída do tipo GIS tem custo maior total que a subestação do tipo AIS porque apesar do custo dos equipamentos em ambas as tabelas serem maiores na subestação do tipo GIS quando comparada a do tipo AIS, o custo da construção civil também tem que ser analisado e de acordo com os resultados da tabela este custo é maior nas subestações do tipo AIS quando comparada com as do tipo GIS.

3.4.3 Custo de Manutenção

Nas subestações convencionais o intervalo de manutenção é reduzido pois é isolada a ar e está susceptível a vários impactos relacionados a seu material isolante, com isto o custo de manutenção é maior em relação as outras subestações. O intervalo de manutenção nos equipamentos das subestações GIS e híbridas são maiores o que reduz o custo.

Levando em consideração o levantamento a respeito dos custos de manutenção feito por Fontanella (2005), foram calculados estes novos valores de manutenção

respeitando a inflação durante o período de 2005 à 2022, obtendo-se os valores atualizados: 2.767.361 reais para AIS e 2.172.838 reais para GIS.

Logo, a subestação GIS é considerada a melhor opção em termos de baixo custo de manutenção. Outro ponto a ser destacado quanto a manutenção da subestação GIS é a dificuldade de encontrar especialistas e isto pode, muitas vezes, deixar o custo da manutenção com valor mais elevado.

3.4.4 Resultado Final dos Custos Analisados

Estes resultados obtidos na Tabela 8 da Subestação Bandeirantes estão de acordo com o proposto pelo estudo de caso da TSEA energia (2017) pois espera-se que a subestação GIS tenha um custo total menor que a subestação AIS. Somou-se os custos totais da Tabela 4 com os custos totais da Tabela 6 para obtenção destes resultados da Tabela 8.

Tabela 8 - Comparação do custo total da Subestação Bandeirantes (em Reais)

Custos	AIS	Híbrida	GIS
Custo total do terreno	35.890.000	23.687.400	16.810.000
Custo total de equip. e construção civil	17.540.000	26.310.000	15.700.000
Custo Total	53.430.000	49.997.400	32.510.000

Fonte: Autoria própria

Para a comparação de custo total das subestações Bituruna e Hauer somou-se o custos totais da Tabela 5 com os custos totais da Tabela 7 para obtenção dos resultados da Tabela 9.

Tabela 9 - Comparação do custo total das subestações do Paraná (em Reais)

Custos	AIS	Híbrida	GIS
Custo total do terreno	188.000.000	124.080.000	29.460.000
Custo total de equip. e construção civil	17.909.379	26.864.084	23.049.299
Custo Total	205.909.379	152.944.084	52.509.299

Fonte: Autoria própria

Na Tabela 9, o custo total da subestação GIS foi, mais uma vez, a menor em relação as outras duas subestações.

Diante dos resultados observados nas Tabelas 8 e 9 pode-se observar que o custo total da SE GIS foi menor que a da SE AIS pois apesar dos custos dos equipamentos ser maior, o custo do terreno é bem menor pois necessita de menor área para sua implantação e conseqüentemente a subestação AIS que detém maior área utilizada tem custo maior apesar do custo dos equipamentos ser menor.

3.5 Fator Técnico

Neste quesito são avaliados os seguintes aspectos técnicos: confiabilidade, segurança, proximidade do centro de carga, tempo para implantação das obras e degradação dos equipamentos.

Por definição, confiabilidade é a probabilidade de um equipamento ou sistema fazer sua função de forma adequada durante um período de tempo determinado sob determinadas condições de operação (AMORIM; DOMINGUES; LISBOA, 2004).

3.5.1 Resultados Referentes aos Fator Técnico

Para análise deste fator, utilizou-se também de uma classificação com base no grau de relevância dos aspectos técnicos citados acima e com base no estudo de Tomazi (2021), como é mostrado na Tabela 10.

Tabela 10 - Grau de relevância dos aspectos referentes ao fator técnico

ASPECTOS	RELEVÂNCIA		
	AIS	Híbrida	GIS
Confiabilidade	Baixa	Média	Alta
Segurança	Baixa	Baixa	Alta
Proximidade do centro de carga	Baixa	Média	Alta
Tempo para implantação da obra	Alta	Baixa	Baixa
Degradação dos equipamentos	Alta	Média	Baixa

Fonte: (Adaptado) TOMAZI (2021)

3.5.1.1 Confiabilidade

As subestações GIS e as híbridas por estarem isoladas a gás SF₆ tem um baixo nível de degradação, logo sua confiabilidade é maior que nas subestações AIS que são expostas aos intempéries do meio ambiente e conseqüentemente tem mais probabilidades de falhas de funcionamento.

3.5.1.2 Segurança

Devido ao seu material de isolamento, as subestações GIS possuem maior proteção e baixo risco de explosão e/ou incêndio, o encapsulamento dos componentes é responsável por minimizar riscos de acidentes. Nas subestações híbridas assim como nas GIS, existem detectores que controlam a densidade do gás evitando explosões ou incêndios. Já nas subestações AIS não há este controle então a segurança diminui e os riscos aumentam (HORIKAWA, 2013).

3.5.1.3 Proximidade do centro de carga

A distância das subestações até o centro de carga é uma fator importante para análise comparativa pois se as cargas estiverem instaladas longe da subestação precisa-se aumentar a necessidade de obras para transmissão em média tensão (MEIRELES, 2010). Então as subestações GIS por serem mais compactas são mais fáceis de ter sua instalação próxima aos centros de carga.

3.5.1.4 Tempo para implantação da obra

O prazo da implantação de uma subestação AIS é em torno de 36 meses, de uma subestação híbrida é de 30 meses e de uma subestação GIS é de 28 meses (MEIRELES, 2010). As montagens eletromecânicas das subestações GIS saem completas e montadas de fábrica, o pré comissionamento dos equipamentos também vem de fábrica reduzindo o tempo de operações em teste, e em função de ter menor necessidade de obra civil, elas possuem menor tempo para implantação da obra.

Nas subestações AIS, os equipamentos vêm separados e levam maior tempo para instalação completa além de ter maior necessidade de obra civil devido às grandes áreas utilizadas.

3.5.1.5 Degradação dos equipamentos

A poluição do ar é a grande responsável pela degradação dos equipamentos pois prejudica o isolamento dos mesmos e exige maior frequência de limpeza. Sabendo disto, a subestação AIS cujo material isolante é o ar tem maior prejuízo quanto a degradação de seus equipamentos.

Nas subestações GIS, os equipamentos são encapsulados então tem menos risco de degradação por conta da poluição atmosférica. Já na subestação híbrida esta degradação irá ocorrer nos equipamentos que possuem isolamento a ar.

4 CONCLUSÃO

Neste trabalho foram comparados três tipos de subestações com diferentes tipos de isolamento: subestação convencional ou AIS que utiliza o ar como material isolante, a subestação compacta ou GIS que utiliza o gás SF₆, e a subestação híbrida que possui característica de ambas.

Para esta comparação foram levados em consideração análises de área, meio-ambiente, definição de equipamentos, recursos financeiros e fatores técnicos, assim pode-se avaliar as vantagens e desvantagens para uma melhor escolha.

A subestação GIS foi a que mais apresentou vantagem em relação as subestações híbridas e AIS quanto ao fator área utilizada, este estudo mostrou que é a que ocupa menor área e, por consequência apresentou menor custo do terreno, podem ser construídas de forma vertical, então é a melhor opção para os grandes centro urbanos.

No que se refere a definição de equipamentos onde é avaliada a distância mínima do afastamento elétrico nas subestações convencionais que vale também para as subestações híbridas. Quanto maior a tensão dos equipamentos maior será a distância de afastamento e maior a área utilizada. A subestação GIS é compacta e não existe padrão ou norma regulamentadora em relação aos afastamentos elétricos mínimos, então ocupar menor área avaliando este critério.

Para análise dos recursos financeiros foram utilizados custos da área e dos equipamentos, e a subestação AIS apesar de possuir maior custo referente a área apresentou menor custo no conjunto total de equipamentos. Assim o custo total da SE GIS foi menor que a da SE AIS mesmo apresentando um custo maior dos equipamentos.

Considerando os aspectos ambientais, a subestação AIS foi a que mais apresentou desvantagens por conter maiores impactos visuais, poluição sonora/ruídos, poluição atmosférica, interferências eletromagnéticas e por consequência destes impactos tem menos facilidade de conseguir uma licença ambiental para construção da subestação. E mais uma vez, a subestação GIS consegue a vantagem por apresentar menores impactos ambientais.

Analisando os aspectos técnicos, os quais podem causar grandes impactos na operação da subestação, a subestação GIS obteve melhor desempenho por apresentar maior confiabilidade e segurança, menor tempo para implantação da obra, menor degradação dos equipamentos, maior facilidade de serem instaladas próximo aos centros de carga.

Em suma, analisando todos os resultados, pode-se concluir que a subestação GIS é a melhor escolha para ser implementada nos centros urbanos para atender a demanda de energia elétrica e a subestação híbrida mostrou-se uma solução intermediária entre a AIS e GIS.

REFERÊNCIAS

- ABB, **Produtos ABB**, 2022. Disponível em: <https://www.directindustry.com/pt/prod/abb-ag/product-70728-583820.html>. Acesso em: 01 dez. 2022
- AMORIM, H. P.; DOMINGUES, Jr. L.A.M.C; LISBOA, E.F.A. **Avaliação da Confiabilidade de subestações**. 2004. CEPEL. Disponível em: <https://www.cgti.org.br/publicacoes/wp-content/uploads/2016/03/AVALIAÇÃO-DA-CONFIABILIDADE-DE-SUBESTAÇÕES.pdf>. Acesso em: 03 fev. 2023.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Sistemas Elétricos de Potência**. ABNT NBR 5460, 1992
- CARLETO, Nivaldo. **Subestações Elétricas**. NT Editora, 2ª edição, Brasília. 2019.
- CHIAPPINI, Gabriel. **Siemens Energy e Mitisubish Eletric querem substituir gás de efeito estufa em sistemas de alta tensão**. EPBR, 2021. Disponível em: <https://epbr.com.br/siemens-energy-e-mitisubish-eletric-querem-substituir-gas-de-efeito-estufa-em-sistemas-de-alta-tensao/>. Acesso em: 10 fev. 2023
- DANTAS, Felipe Barros. **Subestações Híbridas e Convencionais**. 2017. 44 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2017. Cap. 4.
- ENEL, 2021. Disponível em: [https://www.enel.com.br/pt-ceara/midia/news/d202104-Enel-investe-R\\$-14-milhoes-na-ampliacao-da-subestacao-pamplona-em-Cristalina.html](https://www.enel.com.br/pt-ceara/midia/news/d202104-Enel-investe-R$-14-milhoes-na-ampliacao-da-subestacao-pamplona-em-Cristalina.html). Acesso em: 10 dez. 2022
- FONTANELLA, Carlos Augusto do A. **Análise dos Custos de Manutenção de Subestações de 138kV**. SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, Curitiba. 2005. Disponível em: <https://www.cgti.org.br/publicacoes/wp-content/uploads/2016/01/ANA%CC%81LISE-DOS-CUSTOS-DE-MANUTENC%CC%A7A%CC%83O-DE-SUBESTAC%CC%A7O%CC%83ES-DE-138-kV1.pdf>. Acesso em: 29 de nov. 2022.
- FILHO, Stênio Rodrigues Barbosa. **Utilização de Tecnologia Híbrida para Compactação de Subestações Elétricas**. 2019. 140 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019. Cap. 6.
- HORIKAWA, Daniel Kendy. **Estudo comparativo entre subestações ao tempo e subestações isoladas a gás**. 2013. 56 f. Trabalho de conclusão de curso (bacharelado - Engenharia Elétrica) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2013.
- JACOBSEN, Ricardo Silva; NAKANO, Nelson Shingo. **Estudo Comparativo entre Subestações Blindadas a Gás SF6 e Subestações Convencionais**. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 16, 2001, Campinas, São Paulo.

JESUS, Mayron Breda de; YOKOGAWA, Renan; OLIVEIRA, Thiago de. **Análise do Desempenho de uma Subestação Isolada a Gás Em Comparação a uma Subestação Convencional**. 2017. 128 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Departamento Acadêmico de Eletrotécnica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2017. Cap. 5.

MAMEDE, Filho João. **Subestações de Alta Tensão**. 1ed. Rio de Janeiro, LTC, 2021.

MARQUES, Samuel. **O que é o Hexafluoreto de enxofre ou gás SF6?**. WIKA blog, 2020. Disponível em: https://blog.wika.com.br/know-how/o-que-e-o-hexafluoreto-de-enxofre-ou-gas-sf6/?doing_wp_cron=1678718639.6057500839233398437500. Acesso em: 03 fev. 2023.

MCDONALD, John D. **Electric power substations engineering**. CRC press, 2ª edição, Flórida. 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). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

MORA, Nora Diaz. **Apostila de Materiais Elétricos**. 2010. Disponível em: <http://www.foz.unioeste.br/~lamat/downmateriais/materiaiscap18.pdf>. Acesso em: 16 mar. 2023

MUZY, Gustavo Luiz Castro de Oliveira. **Subestações Elétricas**. 2012, 108f. Trabalho de conclusão de curso (bacharelado - Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

PEIXOTO, Gilton R. **Gestão e Planejamento Energético: Compactação de Subestações**. Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica. 2005. Disponível em: www.tec.abinee.org.br/2005/arquivos/s501.pdf. Acesso em: 20 jan. 2022.

PEREIRA, Yasmim da Silva. **Módulos Híbridos em Subestações de Alta Tensão: Uma Análise Sob o Ponto de Vista da Manutenção e Comparação com Tecnologias Convencionais**. 2020. 87 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2020. Cap. 8.

SIEMENS, **Produtos & Serviços**, 2022. Disponível em: <https://new.siemens.com/br/pt/produtos/energia/protECAO-sistemas-eletricos.html> Acesso em: 01 nov. 2022

SIEMENS ENERGY. **3AV1 Blue Dead Tank**. 2021. Disponível em: https://assets.siemens-energy.com/siemens/assets/api/uuid:6a78b6d1-ebf8-40ad-8f22-e68cb17d7d69/3av1-blue-dead-tank.pdf?ste_sid=7996a2ff89bf3bb6f71c95a7fb7e88fe

Acesso em: 23 jan. 2023

SIEMENS ENERGY. **Blue high voltage products**. 2022. Disponível em:
<https://www.siemens-energy.com/global/en/offerings/power-transmission/innovation/blue-high-voltage-products.html>

Acesso em: 23 jan. 2023

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, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

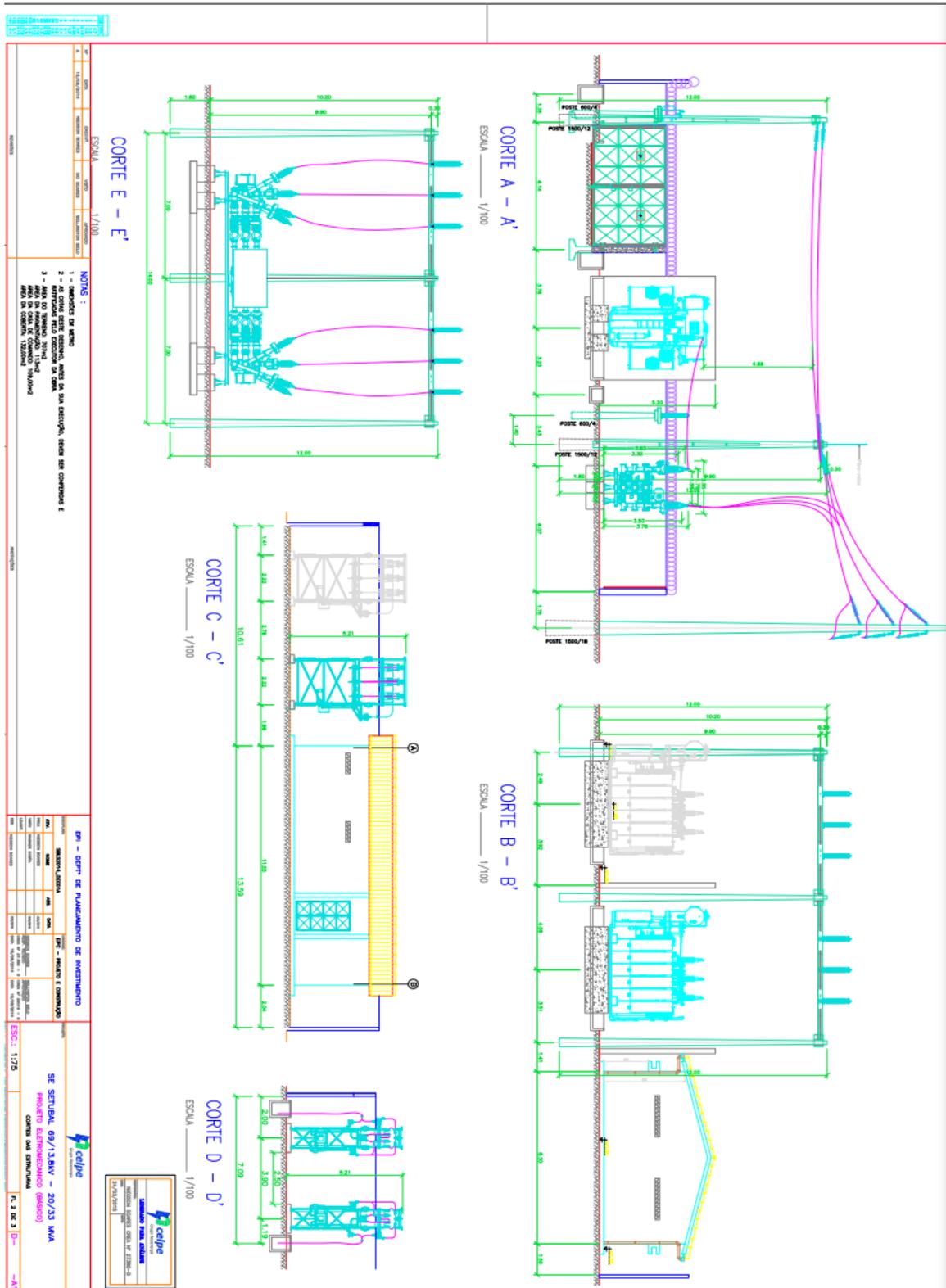
TSEA Energia, **Compactação de Subestações Tecnologia GIS da TSEA energia**, 2019. Disponível em:

<http://www.semanadetecnologia.com.br/25semana/wp-content/uploads/2019/09/T52_Paulo_Benites_TSEA_Energia.pdf. Acesso em: 10 dez. 2022

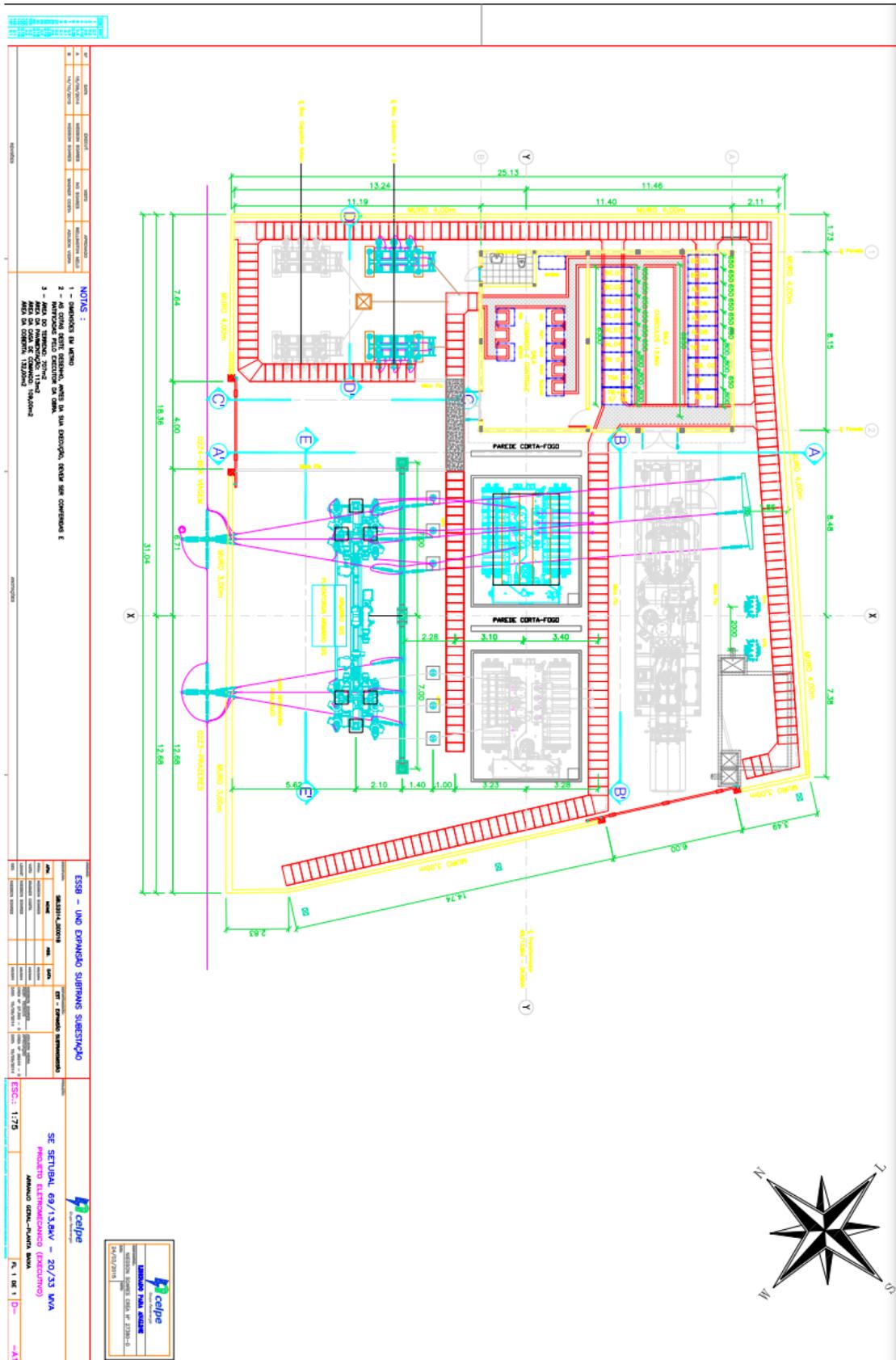
VISION. **Subestação GIS – Compacta (Isolada a Gás SF6) – 69 kV a 500 kV: Soluções > Energia > Subestação GIS – Compacta**. Disponível em:
<http://www.grupovision.com.br/solucoes/gis/>. Acesso em: 01 nov. 2022.

ANEXOS

ANEXO A – CORTE DAS ESTRUTURAS DA SE SETÚBAL



ANEXO B – PLANTA BAIXA DA SE SETUBAL



ANEXO C – RATTINGS DO PRODUTO GIS ELK-04

GAS-INSULATED SWITCHGEAR ELK-04 UP TO 170 KV | 15

Ratings

ELK-04, 145 kV ELK-04, 170 kV	Product-ID	1HDG008100M0040	1HDG008100M0050
Rated voltage	kV	145	170
Rated short-duration power-frequency withstand voltage, 1 min	kV	275	325
Power-frequency withstand voltage, 1 min across open contacts	kV	315	375
Rated lightning impulse withstand voltage, 1.2/50 μ s	kV	650	750
Rated lightning impulse withstand voltage, 1.2/50 μ s, across open contacts	kV	750	860
Rated frequency	Hz	50 / 60	50 / 60
Rated continuous current	A	up to 3150	up to 4000
Rated short-time withstand current, up to 3 s	kA	40	63
Rated peak withstand current	kA	104	164
Rated filling pressure (abs. at 20 °C) circuit-breaker / other components	kPa	0.7 / 0.6	0.7 / 0.6
Minimum functional pressure (abs. at 20 °C) circuit-breaker / other components	kPa	0.6 / 0.52	0.63 / 0.52
Temperature range (ambient)	°C	-30 ... +40	-30 ... +40
Enclosure		three-phase	three-phase
Type of installation		indoor / outdoor	indoor / outdoor
Bay width	mm	1000	1200