

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ENGENHARIA DE ENERGIA

**ANÁLISE COMPARATIVA DE DIFERENTES SUBESTAÇÕES DE ALTA TENSÃO:
TECNOLOGIA CONVENCIONAL, HÍBRIDA E GIS ABRIGADA**

por

Kamila Osowski Tomazi

Monografia apresentada à Comissão de Graduação do Curso de Engenharia de Energia da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Bacharel em Engenharia de Energia.

Porto Alegre, novembro de 2021.



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
ENGENHARIA DE ENERGIA

**ANÁLISE COMPARATIVA DE DIFERENTES SUBESTAÇÕES DE ALTA TENSÃO:
TECNOLOGIA CONVENCIONAL, HÍBRIDA E GIS ABRIGADA**

por

Kamila Osowski Tomazi

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
BACHAREL EM ENGENHARIA DE ENERGIA.
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Flávio Becon Lemos
Coordenador do Curso de Engenharia de Energia

Orientadora: Prof. Dra. Mariana Resener

Coorientadora: Samara Trombetta

Banca examinadora:

Prof. Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro e Doutor – DELET / UFRGS

Eng. Eleandro Pasinato – BRASKEM

Eng. MSc. Roberto Arnt Tarrago – CPFL TRANSMISSÃO

Porto Alegre, 19, novembro de 2021.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família, que é meu pilar e que está sempre me apoiando em diversos momentos da minha trajetória, fazendo deste momento um pouco menos turbulento e cansativo. Elmo Tomazi, Tânia Regina Osowski Tomazi, Rodrigo Osowski Tomazi, Jakeline Osowski Tomazi e Alexandre Osowski Tomazi amo vocês, vocês são minha base, meu suporte e minhas asas. Possuem todo o meu amor, admiração, carinho e respeito.

As minhas orientadoras, Mariana Resener e Samara Trombetta, que dispuseram parte do seu tempo e compartilharam seus conhecimentos em cada reunião, cada mensagem trocada, juntamente com a empolgação e alegria, fizeram disso possível.

À oportunidade de estudar em uma universidade pública e de qualidade com a presença de excelentes profissionais no corpo docente, servidores e funcionários.

E a todos os meus amigos que me apoiaram, incentivaram e foram compreensivas com tantos não-ditos nesse momento tão importante da minha vida, muito obrigada!

TOMAZI, K. O. **Análise Comparativa de Diferentes Subestações de Alta Tensão: Tecnologia Convencional, Híbrida e GIS Abridada.** 2021. 27 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia de Energia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

RESUMO

Com o crescimento e expansão de áreas urbanas das grandes metrópoles e uma restrição de zonas para a construção de novas subestações de distribuição elétrica próximas aos centros de carga, surge um grande desafio para a compactação das novas obras de subestações. Nesta perspectiva, aliada à novas tecnologias, nascem novas opções no mercado, como subestações GIS (*Gas Insulated Switchgear*) abridada e híbridas as quais reduzem significativamente o espaço arquitetônico de uma subestação convencional. Assim sendo, neste trabalho é apresentada uma metodologia para análise comparativa entre três tipos de subestações de alta tensão, avaliando aspectos de investimento e manutenção. A metodologia é aplicada a um estudo de caso envolvendo uma subestação de 15 MVA e 138/13,8 kV, a ser implantada em uma área urbana. Para esta subestação, são apresentados os projetos considerando os arranjos convencional, híbrido e GIS. Os custos relacionados à manutenção são estimados para um determinado horizonte de planejamento, permitindo uma análise comparativa entre as diferentes tecnologias. Os resultados da aplicação da metodologia mostram que a tecnologia GIS apresenta melhor custo-benefício para os cenários analisados a longo prazo.

PALAVRAS-CHAVE: Subestação Convencional, GIS, Híbrida, Custo de instalação, Manutenção.

TOMAZI, K. O. **Comparative Analysis of Different High Voltage Substation: Conventional, Hybrid and Sheltered GIS Technology.** 2021. 27 pages. Dissertation (Completion work of the Energy Engineering Course) Scholl of Engineering Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

ABSTRACT

With the growth and expansion of urban areas in large metropolises and a restriction of zones for the construction of new electrical distribution substations close to the load centers, a great challenge arises for the compaction of new substation works. In this perspective, allied to new technologies, options emerge in the market, such as GIS (Gas Insulated Switchgear) and hybrid substations which significantly reduce the architectural space of a conventional substation. Therefore, this work presents a methodology for comparative analysis between three types of high voltage substations, evaluating investment and maintenance aspects. The methodology is applied to a case study involving a 15 MVA and 138/13.8 kV substation, to be implemented in an urban area. For this substation, projects are presented considering the conventional, hybrid and GIS arrangements. Maintenance-related costs are estimated for a given planning horizon, allowing for a comparative analysis between different technologies. The results of applying the methodology show that GIS technology presents the best cost-benefit ratio for the long-term analyzed scenarios.

KEYWORDS: Conventional Substation, GIS, Hybrid, Installation cost, Maintenance.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Motivação	1
1.2	Justificativa	2
1.3	Objetivos	2
1.3.1	Gerais	2
1.3.2	Específicos	2
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	2
2.1	Subestação Convencional - AIS	2
2.2	Subestação Híbrida	3
2.3	Subestação GIS Abridada	4
2.4	Equipamentos	5
2.4.1	Para-Raios	5
2.4.2	Chave Seccionadora	5
2.4.3	Transformador de Potencial	5
2.4.4	Transformador de Corrente	5
2.4.5	Disjuntor	5
2.4.6	Transformador de Potência	5
2.5	Manutenção	6
2.5.1	Manutenção preditiva	7
2.5.2	Manutenção preventiva	7
2.5.3	Manutenção corretiva	7
3	METODOLOGIA	7
3.1	Definição dos Equipamentos	7
3.2	Levantamento do Espaço Físico	8
3.3	Proposição de Alternativas	8
3.4	Avaliação Técnica, Econômica e Socioambiental	13
3.4.1	Aspectos Socioambientais	14
3.4.2	Aspectos Técnicos	14
3.4.3	Econômica	16
4	ANÁLISE DOS RESULTADOS	17
4.1	Área	17
4.2	Equipamentos	18
4.3	Análise das proposições	18
5	CONCLUSÃO	22

1 INTRODUÇÃO

Nos dias atuais, a energia elétrica é fundamental para a sociedade e a sua disponibilidade representa uma melhora na qualidade de vida, sendo sua utilização essencial para o desenvolvimento social e econômico do país. Um sistema elétrico de potência (SEP) viabiliza o fornecimento de energia elétrica desde centrais geradoras até consumidores finais. Para que a energia chegue até o consumidor final, são necessárias subestações que elevem ou reduzam os níveis de tensão.

O SEP pode ser dividido em três segmentos: geração, transmissão e distribuição. Na geração é onde ocorre a transformação de outros tipos de energia em energia elétrica. O sistema de transmissão faz a conexão entre as centrais geradoras e os sistemas de distribuição. Já os sistemas de distribuição fornecem energia aos consumidores através de alimentadores primários e secundários. Pode-se ainda citar o nível de subtransmissão, que interliga subestações de distribuição a sistemas de transmissão, além de atender cargas comerciais e industriais de grande e médio porte.

Conforme PRODIST, uma Subestação (SE) é “um conjunto de instalações elétricas em média ou alta tensão que agrupa os equipamentos, condutores e acessórios, destinados à proteção, medição, manobra e transformação de grandezas elétricas”. Diferentes tipos construtivos podem ser utilizados ao projetar uma subestação, sendo que a escolha depende de restrições quanto ao espaço físico, requisitos de confiabilidade e disponibilidade de recurso financeiro. Áreas disponíveis para implantar subestações convencionais, isoladas a ar, podem ser difíceis de serem encontradas em centros urbanos. Nestes casos, pode ser necessário propor alternativas que envolvam equipamentos isolados a gás, visando reduzir o espaço necessário para implantar a subestação. Ainda, subestações isoladas a gás tendem a apresentar uma maior confiabilidade na operação, uma vez que os equipamentos não estão expostos a degradações do meio ambiente.

Diversos trabalhos que analisam as diferentes subestações podem ser encontrados na literatura, abordando aspectos construtivos e requisitos de manutenção. Pereira (2020) realizou uma análise comparativa entre os procedimentos de manutenção de equipamentos convencionais de alta tensão e os procedimentos dos módulos híbridos, apresentando também os custos envolvidos nessas manutenções, considerando o período analisado de um ano. Foi observado que a permuta dos equipamentos convencionais pelos módulos híbridos é vantajosa para as concessionárias, pois os equipamentos são novos e não necessitam mais do que uma intervenção por ano.

Tarrago (2019) avaliou a confiabilidade de uma subestação de transmissão de energia elétrica que utiliza dois equipamentos não convencionais chamados de *Disconnecting Circuit Breaker* (DCB) e módulos híbridos, a partir de simulações no *software* AnSE Visual. Foram analisadas as topologias e desempenhos de DCB e módulos híbridos, onde foi observado que a utilização de equipamentos não convencionais deve ser avaliada de maneira criteriosa, sendo possível obter aumento de confiabilidade em determinadas configurações.

Meireles (2010), em seu estudo, propôs um procedimento para a instalação de subestações compactas blindadas isoladas a gás em centros urbanos, comparando subestações convencionais e híbridas através da análise de fatores que influenciam na implementação como meio ambiente, recursos financeiros, sociais e políticos, dentre outros. Ao realizar um estudo de caso, a metodologia indicou como melhor alternativa a implementação de subestação compacta isolada a gás (GIS).

Por fim, um estudo sobre diferentes tipos de subestações foi apresentado por Muzy (2012), analisando suas formas de operação e manutenção. Foram abordados os equipamentos que compõem as subestações, além de trazer conceitos relacionados a arranjos, controle e proteção.

1.1 Motivação

Segundo a Empresa de Pesquisa Energética 2021 (EPE), o Operador Nacional do Setor Elétrico (ONS) e a Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE), é projetado um crescimento médio anual da carga do Sistema Interligado Nacional (SIN) de 3,6 % para o período de 2021 a 2025. Deste modo, o sistema de distribuição, que é a principal ligação para esta conexão, também necessita se desenvolver e aprimorar suas tecnologias. Assim sendo, é de suma importância que o sistema de distribuição seja o mais adequado, incluindo as melhores soluções técnicas e econômicas, para que essa expansão ocorra da melhor forma, garantindo o fornecimento energético do país.

1.2 Justificativa

Realizar uma análise comparativa de um projeto real, entre três modelos de subestações de distribuição, dimensionando suas estruturas perante o terreno, manutenção e as despesas de capitais, conhecido como *Capital Expenditure* (CAPEX), no qual são os investimentos em máquinas, equipamentos, imóveis, bem como mão de obra para construção. A escolha de um projeto de subestação deve-se ao fato da crescente demanda de carga nos centros urbanos e, por este motivo, a alternativa mais confiável para o sistema de distribuição é a construção ou ampliação de subestações adjacentes a estas cargas, para um melhor aproveitamento, com uma redução das perdas de transmissão. Por outro lado, os terrenos nas grandes cidades estão cada vez menores e os preços cada vez mais altos, que pode acabar inviabilizando projetos de novas subestações.

Além disso, o aspecto visual muitas vezes é levado em consideração, principalmente em cidades turísticas, onde as obras não devem impactar a concepção de seu entorno. Isso fica evidenciado nos casos em que há edificações de patrimônios históricos e culturais do local, aumentando ainda mais os custos arquitetônicos do empreendimento (MEIRELES, 2010).

1.3 Objetivos

1.3.1 Gerais

Este trabalho tem por objetivo realizar uma análise comparativa dos módulos híbridos e GIS com uma subestação convencional na perspectiva de investimento de capital e de manutenção dos equipamentos utilizados.

1.3.2 Específicos

Como objetivo específico, tem-se o estudo econômico das implementações nas grandes cidades dos novos modelos de subestações como forma de substituição das subestações convencionais, chamadas de AIS (*Air Insulated Substation*). Ademais, será realizado um estudo das estratégias de manutenção utilizadas pelos proprietários das subestações convencionais, GIS e nos módulos híbridos.

Assim sendo, o trabalho propõe comparar três configurações de *layout* para um sistema de distribuição a ser instalado em uma grande metrópole: subestação convencional, GIS (*Gas Insulated Switchgear*) e híbridas, utilizando o *software AutoCAD*. Já para a análise de manutenção e de despesas de capital será utilizado o *software Excel*.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Subestações de energia elétrica (SE) são fundamentais na operação do sistema, uma vez que interligam sistemas de transmissão e distribuição e permitem o acesso de unidades consumidoras a estes sistemas. As SEs podem ser construídas a partir de equipamentos isolados a ar ou a gás, sendo possível estruturas híbridas, de acordo com critérios de projeto e disponibilidade de terreno. A manutenção varia conforme o tipo de equipamento, sendo essencial para garantir a operação da SE e a confiabilidade do fornecimento.

Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), sobre a Resolução Normativa nº 674, de agosto de 11 de agosto de 2015, publicada no Diário Oficial no dia 18 de agosto de 2015 (seção 1, página 82), é caracterizada como Subestação de Distribuição (SED) aquela conectada ao sistema de distribuição de alta tensão sendo elas de 69 kV, 138 kV e 230 kV. As SEDs interligam as redes de distribuição, contendo transformadores de força e tem como função reduzir a tensão no sistema de distribuição.

2.1 Subestação Convencional - AIS

Ser isolada pelo ar é a principal característica de uma subestação convencional, também conhecida por AIS (*Air Insulated Substation*), sendo este isolamento o mais antigo para os equipamentos de alta tensão, com ressalva aos transformadores, que possuem isolamento a óleo e aos disjuntores, que também são isolados a óleo ou gás. Ainda, em níveis de tensão até 36 kV, é frequente a utilização de disjuntores isolados a vácuo. Desta forma, os equipamentos que constituem a subestação convencional necessitam de

uma distância mínima de afastamento, que devem ser obedecidas seguindo as normas da NBR 5459, de maneira a evitar a ocorrência de curto-circuito entre os equipamentos.

A distância mínima entre os equipamentos aumenta proporcionalmente conforme a tensão nominal dos aparelhos e máquinas próprias, de modo que as construções convencionais de alta tensão se tornam cada vez mais difíceis em algumas cidades, pois acabam ocupando uma grande área, além de serem impactadas por condições atmosféricas adversas (chuva, vento, poluição etc.). Na Figura 1, pode-se observar a subestação convencional abaixadora da Incefra, indústria de cerâmicas, localizada em Cordeirópolis/SP, com tensão de 138/13,8 kV e potência de 10/12,5 MVA.

Figura 1 - Subestação convencional em Cordeirópolis/SP - SE 138/13,8 kV - 10/12,5 MVA.



Fonte: Acervo Tecnova Energia, 2020.

2.2 Subestação Híbrida

As subestações híbridas contam com os benefícios da subestação GIS, na qual os equipamentos de alta tensão são encapsulados e isolados a gás SF₆ (hexafluoreto de enxofre), e a facilidade de uma subestação convencional, isolada a ar. Compactando alguns equipamentos de alta tensão é possível conseguir uma significativa redução das distâncias elétricas e, por consequência, da área ocupada. Em virtude de sua tecnologia e configuração mais compacta, esta redução de área utilizada pode chegar a até 65% se comparada com uma AIS, segundo Mamede Filho (2020), porém este percentual pode vir a variar, conforme a quantidade de componentes compactados na subestação. Ainda, subestações híbridas tendem a apresentar reduzido tempo de comissionamento, além de serem de fácil instalação em casos de expansão ou reforços, trazendo vantagens em relação a custo e manutenção (VISION GRUPO, 2021).

Na Figura 2, é apresentada a nova subestação da Serra do Salitre de propriedade da CEMIG, utilizando módulo híbrido com tensão de 138/13,8 kV e potência de 15 MVA.

Figura 2 - Subestação Serra do Salitre da CEMIG - SE 138/13,8 kV - 15 MVA.



Fonte: Cemig/Divulgação, 2021.

2.3 Subestação GIS Abrigada

A subestação GIS (*Gas Insulated Switchgear*) abrigada é a subestação mais compacta atualmente fabricada e possui em seu princípio de isolamento o gás SF₆ (hexafluoreto de enxofre) por encapsulamento. Esta especificidade construtiva permite a redução entre os condutores e entre os próprios equipamentos, possibilitando uma diminuição significativa no tamanho da subestação, necessitando um espaço aproximado de 15% da área ocupada por uma subestação convencional, podendo variar conforme a configuração adotada (MAMEDE FILHO, 2020).

Por se tratar de um tamanho reduzido comparado a outras subestações, ela é uma ótima alternativa para ser implementada nos grandes centros comerciais de alta concentração de carga, onde o custo do terreno é elevado ou onde a carga necessita de um certo grau de confiabilidade e continuidade do serviço, como hospitais, por exemplo.

A Figura 3 mostra a subestação GIS semi-abrigada do Hospital de Clínicas de Porto Alegre, localizada na cidade de Porto Alegre, com tensão 69/13,8 kV e três transformadores de 15/20 MVA. Esta subestação é chamada de semi-abrigada, pois os transformadores de força estão localizados fora do edifício.

Figura 3 - Subestação GIS semi-abrigada em Porto Alegre - SE 69/13,8 kV - 3x 15/20 MVA Imagem da esquerda vista panorâmica da SE e imagem da direita vista interna da casa GIS.



Fonte: Acervo Tecnova Energia, 2020.

Outra característica importante é uma maior segurança para a operação em função dos monitoramentos e proteções que são incluídos nos módulos e componentes da subestação, os quais são testados em fábrica, reduzindo o tempo de montagem e ensaios de campo, atendendo os parâmetros

mínimos do Sistema Elétrico de Potência (SEP). Esta instalação pode ser realizada por módulos/blocos e em temperaturas extremas (entre -50°C e $+50^{\circ}\text{C}$). Além disso, a montagem é feita em módulos, a expansão/reforço usualmente possui um baixo custo econômico de montagem eletromecânica e civil, mas custo elevado de equipamentos. Cabe ressaltar que em subestações AIS os equipamentos também são testados em fábrica e em campo, com uma série de monitoramentos e requisitos de proteção. Portanto, fora alguns parâmetros específicos da GIS que devam ser monitorados, a obrigatoriedade de atendimento aos parâmetros mínimos do SEP se aplica tanto para a AIS como para a GIS.

2.4 Equipamentos

Nos três tipos de subestações citadas anteriormente estão presentes os mesmos equipamentos, porém com apresentações diferentes. Os principais tipos de equipamentos que compõem uma subestação de distribuição são: para-raios, chaves seccionadoras, transformador de potencial, transformador de corrente, disjuntores e transformador de potência. Cada equipamento exerce uma determinada função para o perfeito funcionamento da subestação. As principais funções dos equipamentos são descritas conforme segue.

2.4.1 Para-Raios

Os para-raios têm como função a proteção contra sobretensões ocasionadas por chaveamentos e descargas atmosféricas no sistema. Geralmente estão localizados em entradas e saídas de linhas e na extremidade de algumas barras de média tensão de subestações. (DANTAS, 2017).

2.4.2 Chave Seccionadora

As chaves seccionadoras são dispositivos de manobras, capazes de abrir ou fechar um circuito, podendo ser comandadas remotamente. São utilizadas para isolar um equipamento ou fazer a função de um *by-pass*. Normalmente as manobras de abertura ocorrem sem carga, para evitar eventos indesejados como arco elétrico (MAMEDE FILHO, 2005).

2.4.3 Transformador de Potencial

Os transformadores de potencial (TPs) são utilizados com o princípio de alterar os valores de tensão de entrada na bobina primária, possibilitando que os instrumentos de medição e proteção funcionem de maneira adequada, não havendo a necessidade de dispor de uma tensão de isolamento de acordo com a rede a qual estão ligados (MAMEDE FILHO, 2005).

2.4.4 Transformador de Corrente

Os transformadores de corrente (TCs) têm como propósito detectar ou medir a corrente elétrica que circula em um cabo ou barra de alimentação e reduzi-la para uma corrente de menor valor para alimentar os instrumentos de medição com baixa impedância elétrica, como os amperímetros e relés, que são dispositivos eletrônicos que não comportam grandes níveis de corrente (FONTI, 2000).

2.4.5 Disjuntor

Os disjuntores são equipamentos de manobra e proteção de uma subestação, permitindo a abertura e fechamento e no restabelecimento de correntes elétricas em um determinado ponto do circuito, podendo operar em várias condições, operação normal e anormal, manual ou automática. Sua principal finalidade é descontinuar, em um curto espaço de tempo, as correntes de “defeitos”, como por exemplo um curto-circuito. Os disjuntores são sempre utilizados em conjunto com relés de proteção, os quais são responsáveis pelo envio de sinal para a atuação do disjuntor (MAMEDE FILHO, 2005).

2.4.6 Transformador de Potência

Os transformadores de potência, também conhecidos como transformadores de força, são os equipamentos mais caros de uma subestação e são considerados o coração do sistema, uma vez que realizam a função principal de uma SE. O transformador é uma máquina elétrica destinada a rebaixar ou elevar a tensão e por conseguinte reduzir ou elevar a corrente de um circuito de maneira que não altere a potência. Ele atua de forma estática e por meio de indução eletromagnética, fornece a energia do primário para o

secundário, sustentando a mesma frequência, porém com tensões diferentes (MAMEDE FILHO, 2005; AZEVEDO, 2015).

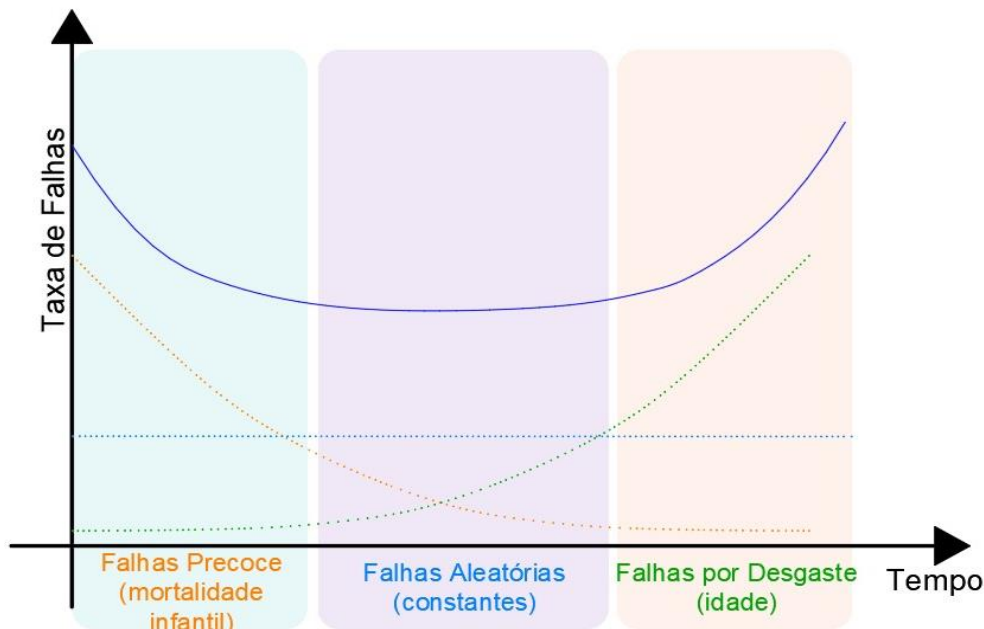
2.5 Manutenção

A manutenção de uma subestação é importante para o correto funcionamento do sistema elétrico, visto que ela atua para minimizar impactos de desgastes elétricos, físicos, mecânicos entre outros. A ocorrência do desgaste gradual dos equipamentos pode ocorrer, acarretando falhas sem motivo aparente e de forma inesperada. No entanto, é possível reduzir os impactos e as consequências causadas por esse tipo de falha sem grandes consequências, realizando as manutenções periódicas informadas pelo fabricante. Antes de apresentar os tipos de manutenção, é necessário o entendimento dos conceitos de falta, falha e defeito, que estão diretamente ligados à manutenção.

Segundo o ONS, falha é o problema mais básico para uma manutenção da rede, sendo definida como o efeito ou consequência de ocorrência em equipamentos ou linhas de transmissão, que ocasionam a indisponibilidade operativa em condições não programadas. Dessa forma, a linha ou equipamento fica impedido de executar suas funções, seja de forma permanente ou temporária. A falta pode ser definida como um curto-circuito gerado por um evento elétrico, que pode ter origem de diversas formas, como descargas atmosféricas, rompimento de cadeias de isoladores, acidentes, incêndios, entre outros (Pereira, 2020). Já um defeito, segundo o ONS, refere-se ao grau de confiabilidade e/ou desempenho especificado ou esperado do sistema, portanto é qualquer desequilíbrio detectado em uma instalação elétrica, que não impeça de continuar em funcionamento ou disponível para operação.

A manutenção tem como objetivo prolongar o ciclo de vida de um equipamento que pode ser associado com a curva da banheira, como ilustra a Figura 4. Esta curva auxilia na determinação da vida útil, da confiabilidade do equipamento, do tempo de garantia, além de fornecer subsídios para o controle da manutenção e melhor escolha de medidas necessárias para o aumento da disponibilidade dos sistemas por efeito de manutenções.

Figura 4 - Curva da banheira.



Fonte: Elaborado pelo Autor com base em KARDEC; NASCIF, 2009.

Na Figura 4, a curva pontilhada em laranja representa as falhas iniciais ou falhas precoces, que corresponde ao início da operação, quando as taxas de falhas são altas devido a erros de instalação e/ou erros de projetos e defeitos de fabricação. Nesta etapa, o maior investimento em manutenção é com melhorias, ajustes e treinamentos. Já a curva pontilhada em azul representa as falhas por aleatoriedade, correspondendo ao fundo da banheira e associada a falhas aleatórias, que não seguem um padrão de

ocorrências, aos desgastes dos equipamentos. Nesta etapa, ocorre o maior investimento em manutenções preditivas e preventivas, para aumentar ao máximo a vida útil dos equipamentos e, por consequência, da subestação. Finalmente, a curva pontilhada em verde representa as falhas por desgastes, que está associada ao fim da vida útil, quando as taxas de falhas voltam a ser consideráveis. Nesta última fase, as falhas estão relacionadas aos desgastes dos componentes e ao envelhecimento, tornando as manutenções corretivas mais recorrentes nesta etapa. A curva da banheira é a soma das três curvas pontilhadas, que está representada em pela linha contínua azul.

2.5.1 Manutenção preditiva

A manutenção preditiva é realizada antes que o defeito ocorra no equipamento, com o objetivo de manter a qualidade do nível de serviço desejado, empregando o uso de técnicas para reduzir o número de manutenções preventivas e corretivas. Dessa forma, permite-se a operação contínua dos equipamentos pelo maior tempo possível, o que leva ao aumento da confiabilidade do sistema (KARDEC; NASCIF, 2009).

Planos de manutenção são elaborados com o intuito de planejar futuras intervenções ou manutenções, prognosticando os problemas, por meio de análises técnicas e embasadas por estatísticas. Assim, pode-se agir de forma rápida e assertiva, porém esta análise só pode ser realizada em equipamentos que permitam algum tipo de monitoramento ou medição, sendo considerada uma manutenção mais sofisticada que as outras e que apresenta os melhores resultados.

2.5.2 Manutenção preventiva

Da mesma forma como na manutenção preditiva, a manutenção preventiva também é realizada antes que ocorra o defeito no equipamento, porém está relacionada a reduzir ou evitar a falha ou queda no rendimento, respeitando um planejamento prévio, baseado em intervalos pré-determinados de tempo, o que aumenta significativamente a confiabilidade no sistema (KARDEC; NASCIF, 2009). Para o planejamento desta manutenção é realizada uma análise baseada em diversos fatores, tais como a idade do equipamento, custo desta manutenção, tempo de execução, condições de uso, local de instalação do equipamento, levando em conta as orientações do fabricante e das agências reguladoras, Agência Nacional de Energia Elétrica e concessionárias de energia locais.

As atividades a serem executadas dependem dos fatores citados anteriormente, mas algumas mais comuns são: apertar, alinhar, ajustar, limpar, lubrificar, medir, observar e trocar. No entanto, vale lembrar que cada equipamento é único, havendo variações de materiais, lote, fabricantes, transportes e históricos de manutenções, por isso, é de substancial valor a manutenção ser individualizada por equipamento, mantendo assim um bom funcionamento e uma maior vida útil da subestação.

2.5.3 Manutenção corretiva

As manutenções corretivas geralmente ocorrem inesperadamente após uma ocorrência de falha ou falta, e têm por objetivo sanar o problema imediatamente para retornar às condições normais de operação. Esta correção pode vir por meio de um reparo ou uma substituição do equipamento.

Esta manutenção é considerada a de maior custo, pois normalmente não existe um plano de manutenção para elas, podendo trazer consequências relevantes para o equipamento e estendendo os danos para a interrupção de processos contínuos, prejudicando consideravelmente a vida útil dos equipamentos (KARDEC; NASCIF, 2009). Frequentemente esta manutenção ocorre no final da curva da banheira apresentada na Figura 4, quando os equipamentos já estão próximos do final da vida útil e quando ocorre uma emergência deste tipo, a vida útil do equipamento é afetada de forma significativa.

3 METODOLOGIA

No decorrer deste capítulo, será apresentada a metodologia de análise comparativa dos três tipos de subestação.

3.1 Definição dos Equipamentos

A subestação AIS possui o ar atmosférico como meio isolante e os equipamentos de pátio podem ter isolamento interna a SF₆, óleo, vácuo, entre outros. Os níveis mínimos de distanciamento entre as partes

energizadas são padronizados pela ABNT, com intuito de garantir o isolamento pelo ar. Na Figura 5, são apresentados os valores mínimos das distâncias de afastamentos, retirados da NBR 5459.

Figura 5 - Afastamentos Elétricos em Subestações Externas.

Afastamentos Elétricos em Subestações Externas											
Tensão Nominal (kV)	Tensão Máxima do Equipamento (kV)	Tensão Suportável de Impulso Atmosférico (kV crista)	Espaçamentos (m)				Espaçamento de Fases com Equipamento	Altura Mínima de Barramento Horizontal sobre o Solo (m)	Altura Mínima Recomendada sobre Estradas (m)		Número de Isoladores na cadeia
			Fase-Terra	Fase-Fase	Mesmo Circuito	Circuito Diferente			Secundária	de Serviços	
			Mínimo Metal-a-Metal								
13,8	15,0	110	0,20	0,30	---	---	3,0	---	6,0	2	
34,5	38,0	200	0,38	0,48	---	---	3,0	---	6,0	4	
69,0	72,5	350	0,69	0,79	2,0	3,0	3,0	4,55	6,0	6	
138,0	145,0	550	1,10	1,25	2,5	4,0	3,6	4,55	7,5	10	
138,0	145,0	650	1,30	1,45	3,5	5,0	3,6	5,60	7,5	10	
230,0	242,0	850	1,60	1,90	4,0	6,0	4,5	5,60	8,5	16	
230,0	242,0	950	1,70	2,10	4,0	8,0	4,5	5,60	8,5	16	
230,0	242,0	1050	1,90	2,30	4,0	8,0	4,5	5,60	8,5	16	

Fonte: ABNT NBR 5459, 1986.

Além deste afastamento mínimo, é preciso prever áreas para a circulação de carros, de equipamentos para futuras intervenções e de pessoas. Sendo assim, para a circulação em regiões internas na subestação, o distanciamento seguro é a soma do distanciamento referente aos afastamentos mínimos necessários para a passagem de pedestres, veículos e equipamentos em áreas energizadas, com o distanciamento mínimo necessário para a realização de trabalhos e manutenções, levando em conta o tamanho médio de uma pessoa (1,7 m).

Segundo informações da General Electric (GE, 2021), um dos principais fabricantes mundiais de equipamentos de alta tensão para subestações, sejam elas convencionais, híbridas ou GIS, no caso de instalação de uma subestação isolada a gás, não existe nenhum padrão ou norma regulamentadora para ser seguida em relação aos afastamentos mínimos, uma vez que os encapsulamentos dos equipamentos são totalmente desenergizados e aterrados. No entanto, caso seja efetuada uma instalação de uma subestação híbrida, em decorrência dos barramentos e demais conexões de rede aérea serem isolados a ar, o projeto deve levar em conta os critérios mais conservadores que são referentes a subestação AIS.

3.2 Levantamento do Espaço Físico

A análise da viabilidade de instalação da subestação é importante para o andamento do projeto, pois em grandes centros urbanos pode ser difícil encontrar terrenos com proporções para a implementação de uma subestação convencional, reduzindo as possibilidades para as subestações híbridas ou GIS abrigada. Outro fator relevante para a continuidade do projeto é a avaliação do solo, realizando um levantamento técnico de sondagem, para classificar quanto à dureza e ao tipo do solo, pois as instalações terão um peso significativo e necessitam de uma estrutura reforçada que as dê suporte (MEIRELES, 2010). Além disso, pode ser necessário a terraplanagem ou a construção de muros de contenção ou taludes, dependendo do local de instalação ser plano ou íngreme.

3.3 Proposição de Alternativas

A estrutura será aplicada a um estudo de caso envolvendo uma subestação de 15 MVA e 138/13,8 kV, a ser implementada em um centro urbano. Para isso foram comparadas três possibilidades de projetos para a área total analisada de 2.256,70 m², com duas entradas de energia localizadas à direita em todos os projetos, mudando somente o espaço utilizado e empregando o uso de novas tecnologias.

Na Tabela 1, são apresentados os equipamentos aparentes e quantidade que estão presentes em cada uma das subestações.

Tabela 1 - Quantidade de equipamentos aparentes por tipo de subestação.

EQUIPAMENTO	AIS	Híbrida	GIS
Transformador de Potencial (Proteção)	05	12	-
Para-raios	12	12	12
Chave Seccionadora	06	04	02
Transformador de Corrente (Proteção)	06	02	-
Disjuntor	02	-	-
Transformador de Potencial de Medição	06	-	-
Transformador de Corrente de Medição	06	-	-
Transformador de Força	02	02	02
Módulo Híbrido	-	01	-
Módulo GIS	-	-	02
Total de Equipamentos aparentes	45	32	18

Fonte: (O Autor)

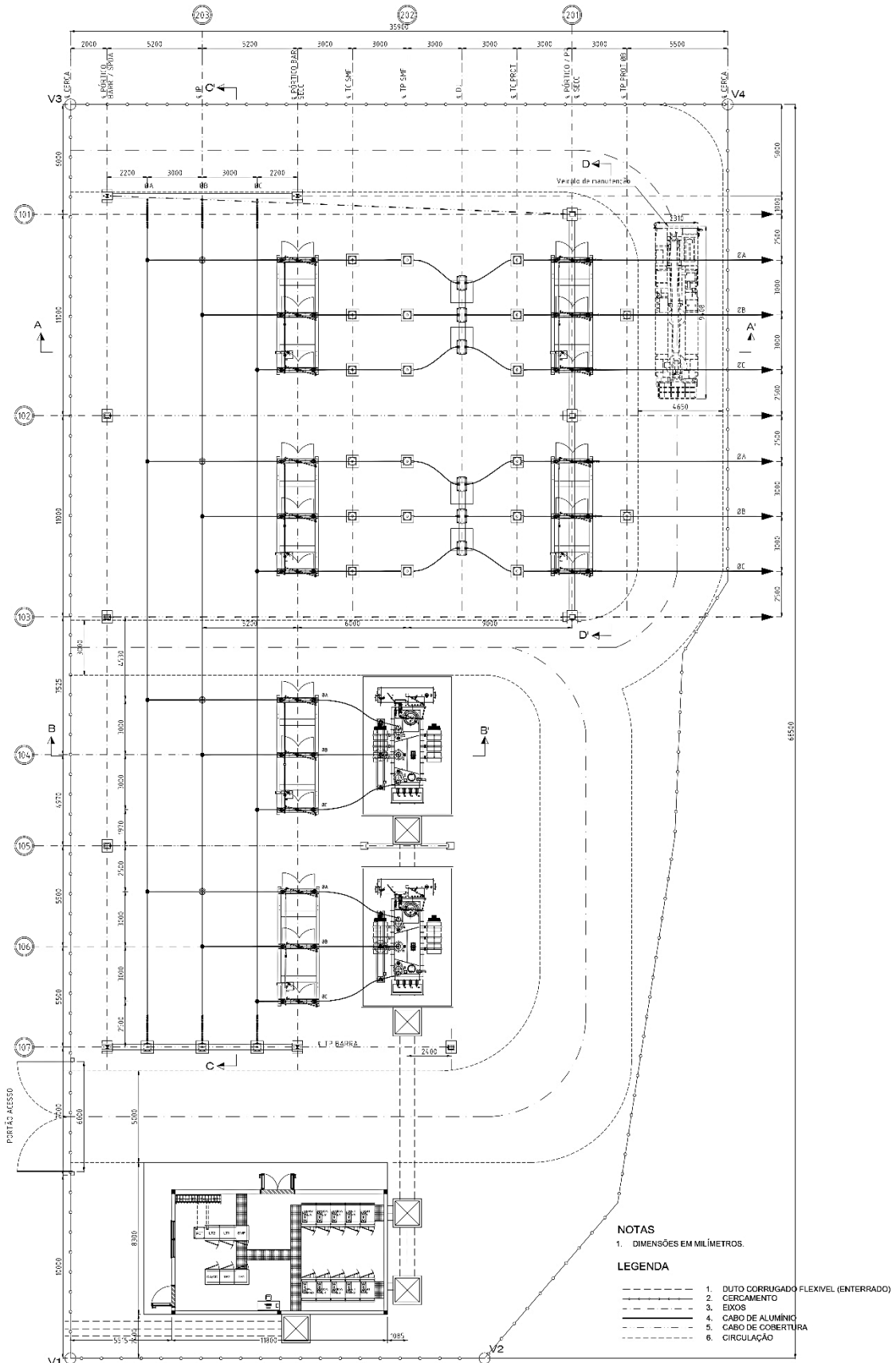
Segundo o fabricante, General Electric, subestações AIS possuem uma expectativa de vida útil de 30 anos, enquanto subestações GIS de 50 anos e híbridas de 30 a 40 anos. Essas expectativas de vida possuem períodos diferentes, justamente por estarem predispostas a intempéries e outros agravantes. Nas Figuras 6 a 8, são apresentadas as plantas baixa de cada um dos modelos de subestações analisados, obtidas a partir do projeto realizado em *software* AutoCAD.

Na Figura 6 é apresentada a planta baixa da subestação AIS, onde é possível observar a disposição e a alocação dos equipamentos e que a área disponível para a construção foi totalmente utilizada. Na casa de comando estão os equipamentos do sistema de proteção, controle e supervisão.

Na Figura 7 é apresentada a planta baixa da subestação híbrida, onde é possível observar uma significativa redução de espaço utilizando o modelo HYPact da GE, se comparada à alternativa AIS, sendo esta redução de praticamente metade da área da subestação convencional. Um módulo híbrido é definido pelo fabricante como um conjunto de equipamentos elétricos compacto e composto de disjuntores, seccionadoras, chaves de aterramento localizados em um tanque de gás comum, transformador de corrente e tensão e conectores de cabos (GE, 2017).

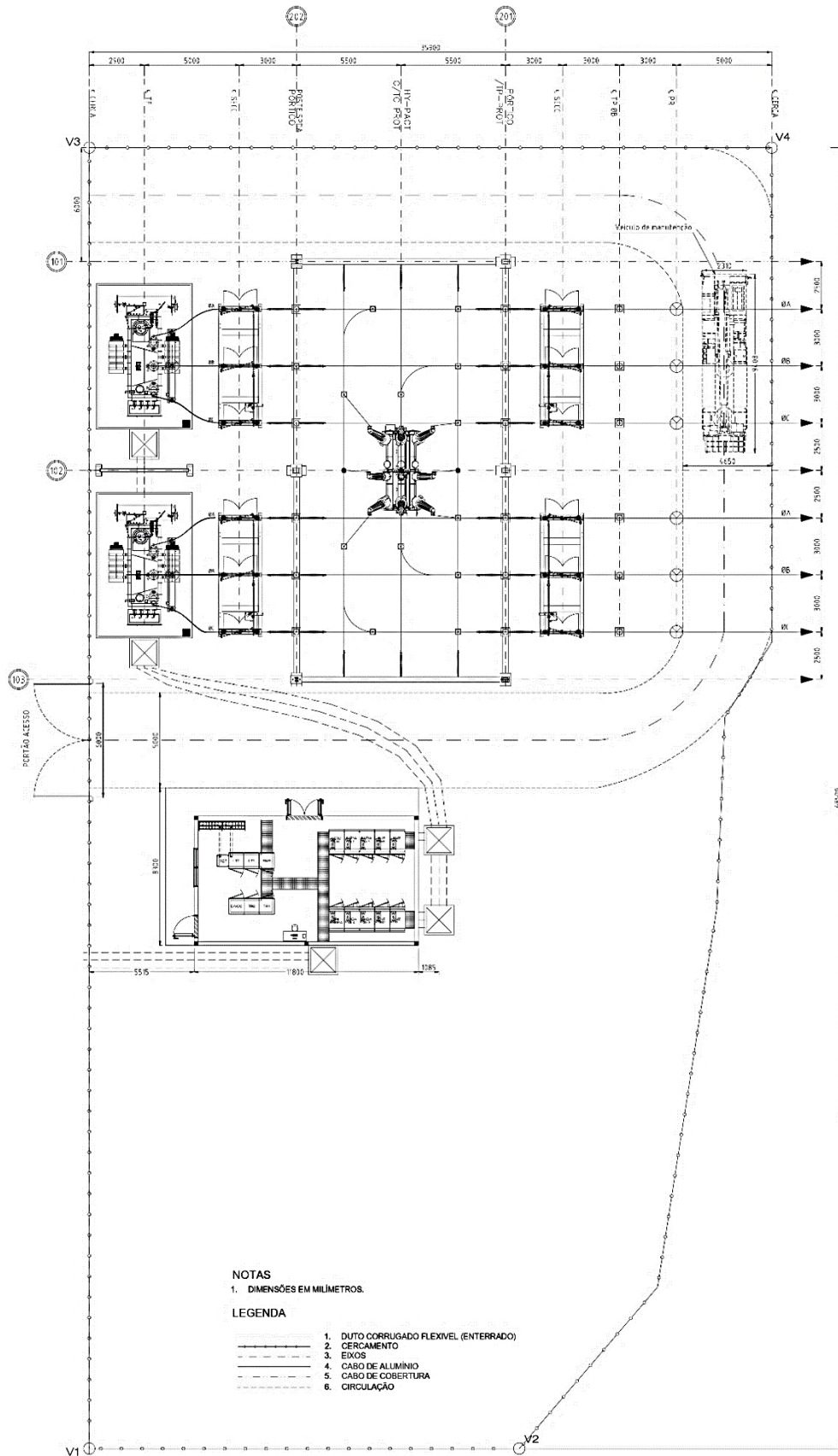
Na Figura 8 é possível observar a dimensão de uma Subestação GIS, a qual possui os mesmos equipamentos que uma Subestação AIS, porém de forma compactada, divididos em módulos acoplados, encapsulados e isolados a gás (SF₆), ocupando apenas 1/3 da área de uma subestação convencional. A edificação desta subestação possui 3 andares, sendo o primeiro andar ocupado pelas salas dos transformadores, o segundo andar pelo cabeamento e o terceiro e último andar a sala da GIS e a sala de comando. No interior do encapsulamento do módulo GIS, encontram-se o disjuntor, chave de aterramento, chave de aterramento rápida, chave seccionadora, transformador de potencial, transformador de corrente, terminais de saída do cabo e painel de controle local.

Figura 6 - Arranjo Geral da Subestação Convencional - SE 138/15 kV – 15 MVA.



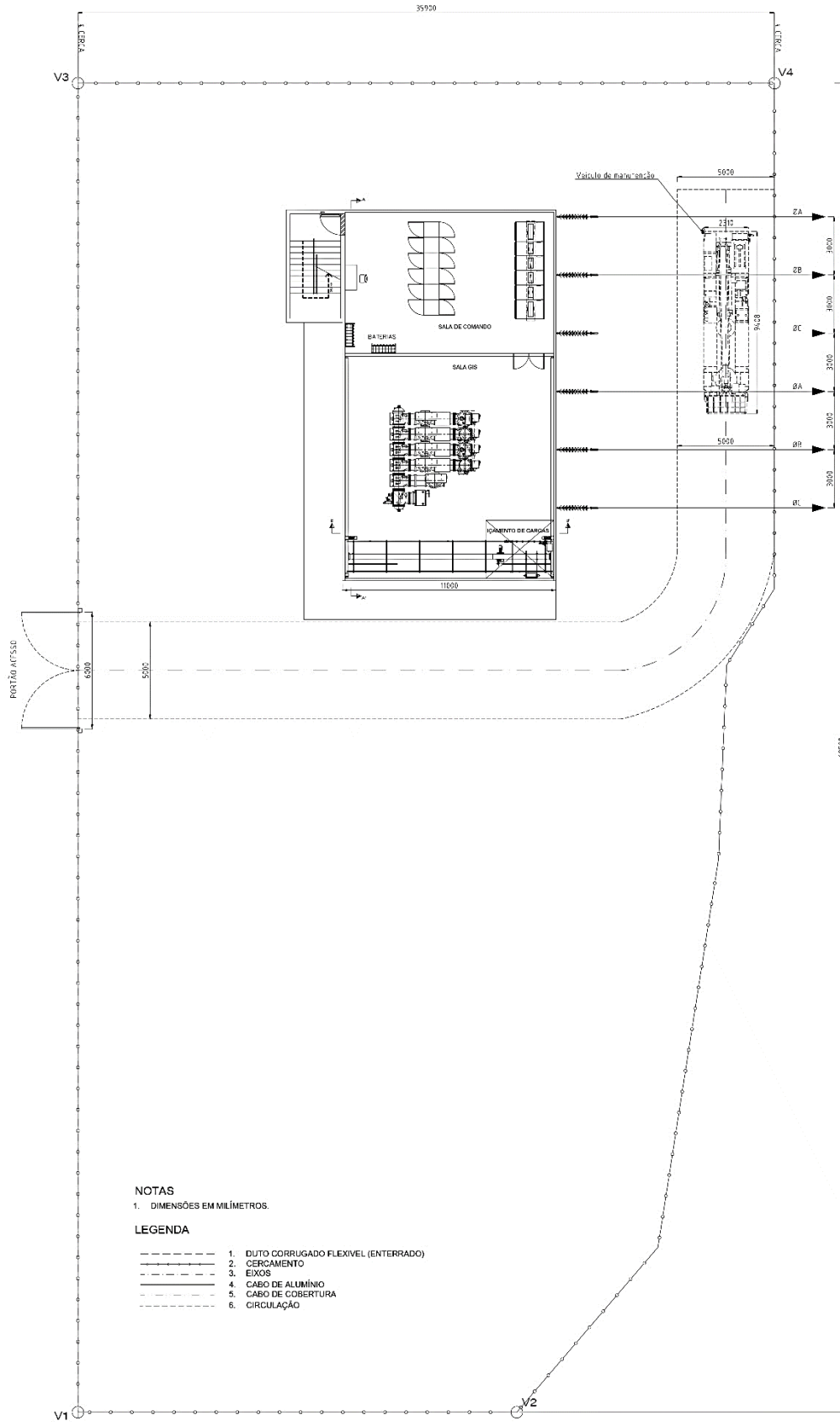
Fonte: AUTOR.

Figura 7 - Arranjo Geral da Subestação Híbrida - SE 138/15 kV - 15 MVA.



Fonte: AUTOR.

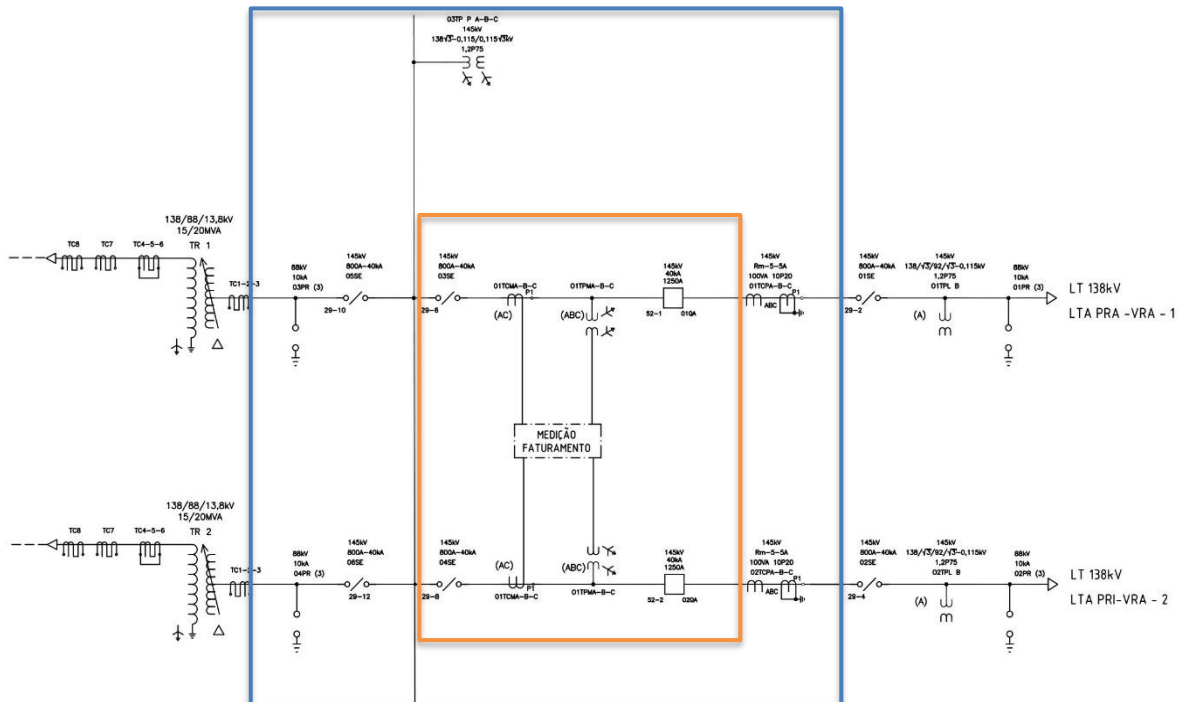
Figura 8 - Arranjo Geral da Subestação GIS Abridada - SE 138/15 kV - 15 MVA.



Fonte: AUTOR.

Na Figura 9 é apresentado o diagrama unifilar da subestação, onde é observado o arranjo de barra simples, com dois *bays* de transformador e duas entradas de linha. Também está destacado em laranja o que faz parte do módulo híbrido, em azul a GIS e o todo, sem as marcações, a AIS.

Figura 9 - Diagrama unifilar simplificado da subestação.



Fonte: AUTOR.

3.4 Avaliação Técnica, Econômica e Socioambiental

Para a avaliação técnica dos empreendimentos, foram levados em consideração a vida útil dos equipamentos, tempo de manutenção e avaliação econômica, além do CAPEX dos três tipos de subestações. A escolha da melhor opção nem sempre é trivial, pois algumas alternativas apresentam vantagens técnicas como modernização do sistema, facilidade de expansão, aumento da vida útil, maior confiabilidade, menor manutenção, porém atreladas a um alto custo econômico.

Na Tabela 2 é apresentado um estudo de importância para a implementação das novas subestações, onde são apresentados os aspectos socioambientais e técnicos mais relevantes para o estudo proposto através da classificação de cada aspecto em alta, média ou baixa importância.

O planejamento da implantação da subestação deve seguir algumas premissas, avaliar as condições presentes e prever condições futuras, como uma possível ampliação, trocas ou substituição de equipamentos. Além disso, é importante avaliar as restrições ambientais vigentes, como poluição visual e sonora, segurança do sistema, flexibilidade operacional, simplicidade da proteção e do controle e facilidade de manutenção dos componentes, principalmente em localidades históricas (CORSSSEN, 1979).

Tabela 2 -Tabela de impacto socioambiental e técnica para a implementação das Subestações.

	IMPACTO		
	AIS	Híbrida	GIS
SOCIOAMBIENTAL			
Poluição Visual	Alta	Alta	Baixa
Poluição Sonora	Alta	Alta	Baixa
Interferência Eletromagnética	Alta	Média	Baixa
Área Afetada	Alta	Média	Baixa
TÉCNICA			
Segurança	Baixa	Baixa	Alta
Degradação	Alta	Média	Baixa
Confiabilidade	Baixa	Média	Alta
Manutenção	Alta	Média	Baixa
Riscos de Incêndio	Alta	Alta	Alta
Tempo de Montagem	Alta	Baixa	Baixa

Fonte: Elaborado pelo Autor com base em CORSSSEN, 1979.

3.4.1 Aspectos Socioambientais

Pela Tabela 2 é possível perceber que a parte socioambiental se refere à poluição visual e sonora, bem como interferência eletromagnética e à área afetada. Entretanto o aspecto visual é um dos menores problemas quando existe uma subestação localizada em área urbana, porém é importante a integração da subestação com o meio que está localizada, sendo bem-vista pelos moradores do bairro.

Já a poluição sonora atrapalha de forma moderada com os zumbidos dos transformadores de potência, não agradando os moradores da região, sendo também prejudicial à saúde mental, quando não possui sistema de isolamento acústico adequado, devendo ser atendida a NBR 10.151/2019. Este barulho não agradável, pode ser reduzido utilizando um transformador de baixo ruído ou enclausurá-lo (JESUS; YOKOGAWA; OLIVEIRA, 2017). Além disso, os equipamentos não encapsulados das subestações AIS e Híbrida podem gerar interferências eletromagnéticas nos equipamentos eletrônicos (TV, rádios e celulares) e no sinal de internet (JESUS; YOKOGAWA; OLIVEIRA, 2017).

Quando falado de área afetada o fator mais impactante é a Licença Ambiental (LA) e o alvará de construção, no qual deverá ser fornecido pela prefeitura da cidade (Jesus; Yokogawa; Oliveira, 2017). Antes da LA, deve ser obtida a Licença Prévia (LP) que depende principalmente do impacto que irá ocasionar no meio ambiente da localidade envolvida, além das possibilidades de cumprimentos de medidas mitigatórias para tais impactos. As medidas mitigatórias são avaliadas e preparadas na fase inicial do projeto e apresentadas no EIA/RIMA (Estudo de Impacto Ambiental / Relatório de Impacto Ambiental) (MEIRELES, 2010).

3.4.2 Aspectos Técnicos

Dentre os aspectos técnicos, o fator segurança e o risco de incêndio estão diretamente relacionados, pois os dois estão associados à proteção da equipe e da subestação. Portanto, pode-se afirmar que uma subestação isolada a gás SF₆ possui baixo risco de explosão e maior proteção, visto que os equipamentos não ficam expostos ao tempo, evitando ou reduzindo, também, risco de acidentes decorridos de intempéries.

Dessa forma, supondo que ocorra um superaquecimento da GIS, a pressão dos módulos isolados a gás SF₆ irá aumentar devido à expansão do gás e, quando a pressão atingir o valor limite, as válvulas de escapes atuam automaticamente, liberando o gás e reduzindo a pressão, evitando uma explosão ou incêndio. O mesmo ocorre em um módulo híbrido no caso de excesso de pressão, e no caso de um vazamento de gás SF₆, também existem detectores que controlam a densidade do gás. Em uma AIS, este risco não poderia ser contornado e controlado, diminuindo a segurança e aumentando os riscos para as pessoas (HORIKAWA, 2013).

Quando falado em degradação, é levado em consideração a poluição do ar do meio em que a SE será construída, bem como a umidade do ar, prejudicando assim o nível de isolamento dos componentes, sendo necessária uma frequência maior de limpeza. Este fator também está ligado a vandalismos e invasões, e, neste caso da GIS, o risco de ocorrer qualquer um dos fatores associados é baixo, pois se trata de uma subestação abrigada. Por outro lado, para uma subestação híbrida ou AIS estes riscos aumentam significativamente.

A GIS e o módulo híbrido contam com uma maior confiabilidade por estarem isolados a gás SF₆, diminuindo a rigidez dielétrica e a existência de correntes parasitas, correntes estas que desgastam mais rapidamente o equipamento. Dessa forma, apresentam uma menor degradação quando comparados a uma AIS, onde os equipamentos estão totalmente expostos a degradações do meio ambiente e a rigidez dielétrica do ar é cerca de 3 a 4 vezes maior (HORIKAWA, 2013). Além disso, os módulos híbridos são fabricados e montados dentro da montadora, passando por diversos testes de confiabilidade, garantindo assim, uma maior confiabilidade na hora da implementação na subestação. Esses diversos testes de fábrica também são realizados nos equipamentos da AIS garantido uma confiabilidade na implementação.

O fator montagem é levado em consideração o tempo para a instalação completa dos equipamentos. No caso de uma AIS, os equipamentos vêm separados e necessitam de uma estrutura individual, sendo necessário realizar testes de medição e automação separadamente, aumentando o tempo de construção. Segundo Meireles (2010), o prazo para a implementação de uma subestação AIS é em torno de 36 meses, de uma subestação GIS é de 28 meses e de uma subestação híbrida é de 30 meses. No entanto, para uma SE no porte dos arranjos analisados (distribuição e industrial) esses prazos são reduzidos, sendo 12 meses para uma AIS, 14 meses para uma híbrida e 18 meses para uma GIS.

Na Tabela 3 é apresentado o período médio de manutenção dos principais tipos de equipamentos de alta tensão das subestações. É possível perceber que os módulos híbridos e a GIS possuem planos de inspeção visual antes que ocorra alguma manutenção mais invasiva para o equipamento, reduzindo significativamente os custos. Os procedimentos de inspeção e manutenção devem ser realizados de acordo com o cronograma disponibilizado pelo fabricante e o trabalho de manutenção e recondição só pode ser efetuado por técnicos treinados pelo fabricante do equipamento (FILHO, 2019).

Tabela 3 - Plano de manutenção dos principais equipamentos das subestações.

EQUIPAMENTO	TEMPO [ANO]
Transformador de Força	0,5
Disjuntor	1
Chave Seccionadora	0,5
Transformador de Potencial	1
Transformador de Corrente	1
Módulo Híbrido	
<ul style="list-style-type: none"> • Inspeção Visual – O módulo híbrido continua operando normalmente. Verificação quanto a danos ou corrosão. Verificação nas aberturas de ventilação e respiros dos mecanismos de operação, do gabinete de controle e da caixa de terminais do transformador. Supervisão da densidade de gás SF₆. 	6
<ul style="list-style-type: none"> • Inspeção Maior – Após 2.500 ciclos de comutação mecânica (contatos de arco) 	12
<ul style="list-style-type: none"> • Manutenção – O conjunto Híbrido deverá ser desligado, mas não é necessário abrir as três fases do módulo. Desconectar o módulo híbrido do sistema de alta tensão e aterrar o módulo nas duas extremidades. Verificação dos tempos de operação do disjuntor. Teste da resistência de contato das conexões. Verificação da conformidade do gás SF₆. Verificação de todas as conexões de cabo na caixa do mecanismo. Descarregar as molas de fechamento e abertura. 	≥ 24
GIS	
<ul style="list-style-type: none"> • Inspeção Visual - Supervisão do gás SF₆ e densidade, disjuntor, interruptor, chave seccionadora, chave de aterramento e chave a prova de fogo. 	5

- **Inspeção Menor** – Supervisão do gás SF₆ e densidade, disjuntor, interruptor, chave seccionadora, chave de aterramento. Chave a prova de fogo pós-lubrificação da engrenagem sem-fim e 1.000 ciclos de operação. 10
- **Inspeção Maior** – Supervisão do gás SF₆ e densidade. Após 2.000 ciclos de operação dos disjuntores. Após 2.000 ciclos de comutação mecânica (interruptor e chave seccionadora). Chave a prova de fogo após 2.000 ciclos de operação. 25
- **Manutenção** - Supervisão do gás SF₆ e densidade dos compartimentos isolados a gás a necessidade de abrir vai depender das inspeções. Disjuntor após 10.000 ciclos de operação e após atingir a corrente de curto-circuito acumulada. Após 10.000 ciclos de comutação mecânica (interruptor e chave seccionadora) ou após atingir a corrente de comutação de curto-circuito acumulada. Chave a prova de fogo após 2.000 ciclos de operação ou após fechar uma corrente de curto-circuito ou após a conclusão de 100 ciclos de fechamento/ abertura por corrente induzida através de linhas paralelas. ≥ 25

Fonte: Elaborado pelo Autor adaptado da GE, 2021.

3.4.3 Econômica

Quanto ao fator econômico, foi analisado o custo de manutenção e o CAPEX para a implementação dos três tipos de subestações. A análise do CAPEX foi elaborada seguindo o modelo do Corssen (1979), Equação 1, sendo realizado por uma empresa que atua no setor elétrico de subestações.

$$C_{Total} = C_e + C_{elm} + C_{cm} + C_{gi} \quad (1)$$

onde:

C_{Total} custo total da instalação sem o terreno;

C_e soma dos custos de todos os equipamentos principais (alta tensão, comando, proteção, controle e comunicação);

C_{elm} custo de materiais elétricos e eletromecânicos;

C_{cm} custo civil e montagem;

C_{gi} custo de gerenciamentos e imprevistos.

O custo dos equipamentos varia entre 50% e 65% do custo total, sendo os equipamentos da SE GIS os mais caros, seguido pelo módulo híbrido e, por último, a AIS. Na parte do custo de montagens civil e eletromecânica eles variam entre 20% e 25% seguindo a mesma lógica dos equipamentos. Já na parte de materiais elétricos e eletromecânicos possuem a lógica inversa dos equipamentos e variam entre 10 % e 15 %. Por fim, os custos de gerenciamentos e imprevistos representam entre 10% e 20%.

Jesus, Yokogawa e Oliveira (2017) realizaram um estudo comparativo econômico de manutenção em uma concessionária paranaense, para subestações AIS e GIS de tensão nominal de 138 kV, baseado em Fontanella (2005). Neste estudo, foram considerados valores médios de homens-hora por tipo de equipamento e classe de tensão, considerando todos os segmentos (salário, materiais de consumo, encargos e demais custos), previstos para 30 anos de vida útil. As conclusões obtidas indicaram um custo da manutenção para uma AIS igual a R\$ 1.556.303,23 e para uma GIS igual a R\$ 1.014.980,37.

Neste trabalho, os valores acima foram atualizados conforme o reajuste médio anual da Selic durante o período de 2017 a 2021, de 7,1% ao ano, e, para a SE híbrida, o custo de manutenção foi considerado como 38% do custo de manutenção de uma AIS (FILHO, 2019). As subestações ocupam uma área de 2.256,70 m², 1.405,91 m² e 776,11 m² para uma AIS, híbrida e GIS, respectivamente. O preço do m² foi considerado em R\$ 8.000,00, sendo este valor, informado por uma construtora.

Na Tabela 4 são apresentados os comparativos de custos para a construção de uma nova subestação de distribuição.

Tabela 4 - Custos totais para a implantação das subestações.

CUSTOS	AIS	HÍBRIDA	GIS
Equipamentos	R\$ 8.000.000,00	R\$ 11.600.000,00	R\$ 24.700.000,00
Materiais Elétricos e Eletromecânicos	R\$ 2.400.000,00	R\$ 2.400.000,00	R\$ 3.800.000,00
Civil e Montagem	R\$ 3.840.000,00	R\$ 4.600.000,00	R\$ 7.600.000,00
Gerenciamento e Imprevistos	R\$ 1.760.000,00	R\$ 1.400.000,00	R\$ 1.900.000,00
Custo Total da Subestação	R\$ 16.000.000,00	R\$ 20.000.000,00	R\$ 38.000.000,00
Manutenção	R\$ 2.047.633,00	R\$ 1.269.532,00	R\$ 1.335.413,00
Área	R\$ 18.053.602,00	R\$ 11.247.250,00	R\$ 6.208.917,00
Custo Total da Implantação	R\$ 36.101.235,00	R\$ 32.516.782,00	R\$ 45.544.330,00

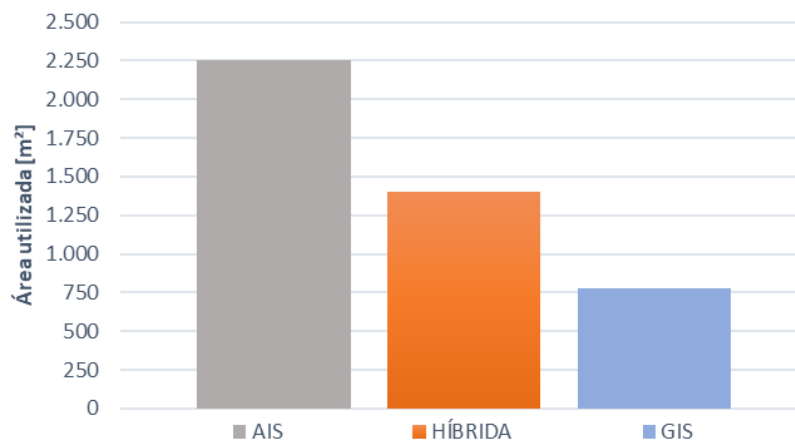
Fonte: (O Autor)

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo será realizada a análise comparativa, considerando os critérios anteriormente vistos, a instalação de uma nova subestação de distribuição de 15 MVA e 138/13,8 kV em um centro urbano. Os arranjos desenvolvidos foram devidamente pensados em obter as melhores configurações de segurança técnica, melhor aproveitamento do espaço, maior facilidade de manutenção, menores custos e previsões para futuras ampliações.

4.1 Área

Segundo estudo realizado, a área necessária para a implementação da subestação convencional isolada a ar (AIS) é de aproximadamente 2.250 m² contrapondo com a área necessária para a subestação GIS, que necessita de apenas 750 m². No Gráfico 1, é apresentado esse comparativo entre as áreas utilizadas em cada subestação. É possível perceber que a subestação GIS ocupa cerca de 34% do espaço de uma subestação convencional (AIS), enquanto a subestação híbrida ocupa 64%.

Gráfico 1 - Comparação da área utilizada.

Fonte: AUTOR.

A análise de área é de grande importância neste estudo, pois nos centros urbanos pode ser difícil encontrar terrenos com mais de 1.000 m². Além disso, deve ser levado em consideração o custo do metro quadrado em áreas urbanas, pois ele inviabilizar o projeto. No caso analisado, o terreno é adquirido pelo investidor.

Na Tabela 5, é apresentado o custo de cada área utilizada para a implementação dos três tipos de subestações. É possível observar a economia financeira de 30% na aquisição do terreno para a subestação GIS.

Esta notória diferença de áreas, deve-se ao fato de que uma subestação convencional ser isolada a ar (AIS), enquanto uma subestação GIS é isolada a gás SF₆, reduzindo significativamente o espaçamento entre equipamentos. Dessa forma, espaços menores são necessários, a exemplo do projeto analisado neste trabalho, onde a subestação foi construída na vertical, utilizando uma edificação de três andares. Nos apêndices A e B é possível verificar a planta geral da subestação GIS e seus cortes, podendo perceber esta verticalização da subestação e redução de espaço.

Tabela 5 - Custo do terreno.

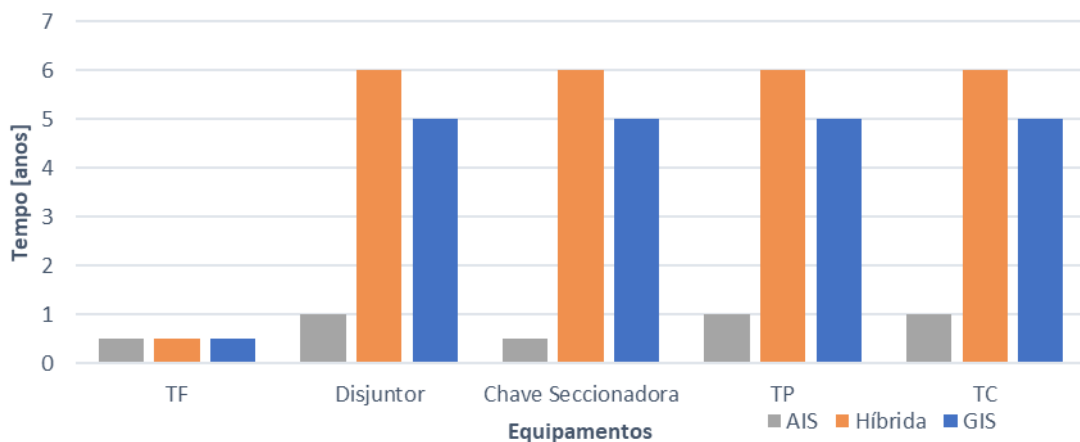
	AIS	HÍBRIDA	GIS
Preço do m ²	R\$ 8.000,00	R\$ 8.000,00	R\$ 8.000,00
Área Utilizada [m ²]	2.256,70	1.405,91	776,11
Total	R\$ 18.053.602,00	R\$ 11.247.250,00	R\$ 6.208.917,00

Fonte: (O Autor)

4.2 Equipamentos

No Gráfico 2, é possível analisar o período da primeira manutenção. Para a subestação AIS, o intervalo de manutenção é reduzido por ser isolada a ar. Já as subestações GIS e híbridas possuem um intervalo de manutenção maior comparado à AIS.

Gráfico 2 - Comparação dos períodos de manutenção dos tipos de subestações analisados.



Fonte: AUTOR.

Esta primeira manutenção realizada nos módulos híbridos e na subestação GIS é chamada de inspeção visual, que seria uma manutenção preditiva com o intuito de manter a qualidade do nível de serviço desejado. Estas manutenções ocorrem com os equipamentos funcionando e sem a abertura dos encapsulamentos blindados com o uso de câmeras de termografia, onde é possível averiguar pontos fora do padrão.

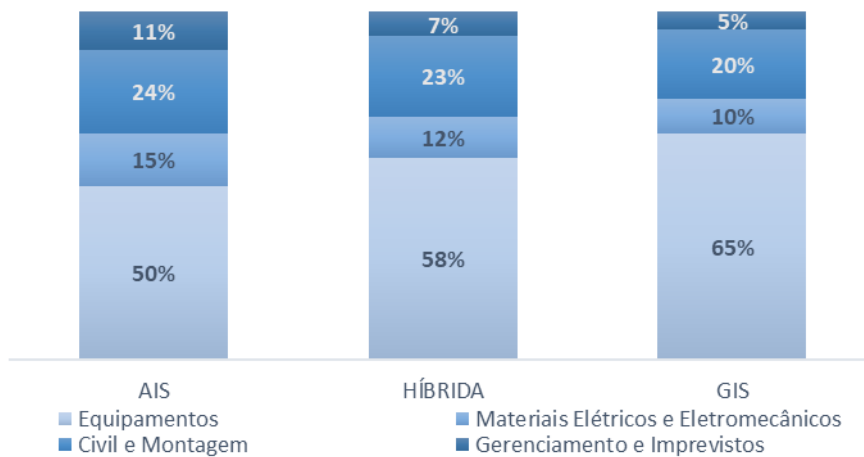
4.3 Análise das proposições

No Gráfico 3, é apresentado o comparativo entre os custos totais das subestações AIS, híbrida e GIS, onde é possível perceber que o maior custo de todas as subestações está na aquisição de equipamentos. Pode-se observar um custo 15% maior na subestação GIS e 8% maior na subestação híbrida, visto que ainda uma significativa parte dos equipamentos são de uma subestação convencional e esse aumento de 8% refere-se ao módulo híbrido.

No entanto, quando considerados os custos de gerenciamento e imprevistos, percebe-se que a subestação GIS é a que possui a menor parcela percentual, porém, em valor absoluto, é a que possui maior reservas para contingências de riscos. Isto se dá, porque a GIS é um equipamento importado e seu valor de aquisição depende da variação cambial, podendo alterar desde o momento da compra até o momento do pagamento. Outro fator de risco da GIS é a interceptação pela alfândega para verificações periódicas, que podem incorrer em despesas extras no armazenamento e atraso da entrega para a construção da SE.

Dessa forma, é possível afirmar que o gerenciamento de uma subestação GIS é mais arriscado e o mesmo pode ser observado para o módulo híbrido comparados com uma obra de uma subestação AIS.

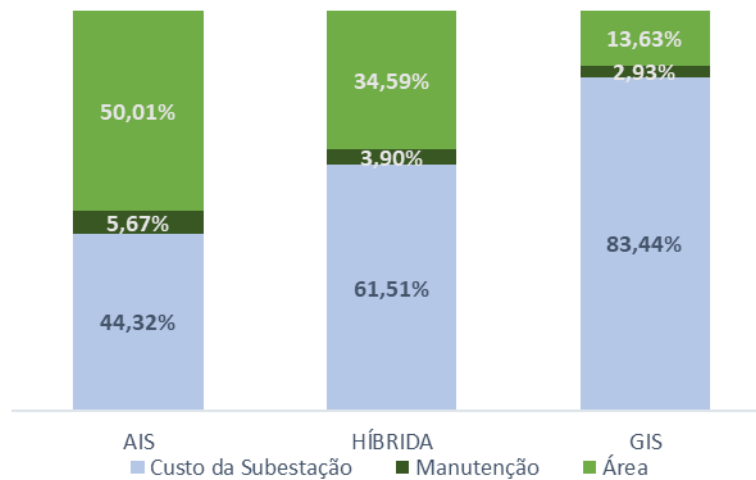
Gráfico 3 - Comparação do custo total da subestação para cada tipo analisado.



Fonte: AUTOR.

No Gráfico 4, é apresentado o comparativo percentual entre as três subestações do custo total para a implementação das subestações em um cenário de vida útil de 30 anos. Com este gráfico é possível realizar algumas análises, como por exemplo que o custo total para a implementação da subestação AIS tem origem do terreno adquirido e que o custo da subestação é quase que metade do custo de uma subestação GIS. No entanto, o custo de manutenção da subestação AIS é quase o dobro de uma subestação GIS, pois uma subestação GIS realiza menos manutenções no mesmo período.

Gráfico 4 - Comparação do custo total para a implementação de cada subestação.



Fonte: AUTOR.

Com relação ao custo total para a implementação de cada subestação, é possível observar que a subestação GIS é a mais cara das três quando comparadas para uma vida útil de 30 anos (Tabela 6).

Tabela 6 - Preços totais para implementação de cada subestação.

	AIS	HÍBRIDA	GIS
Total da implementação	R\$ 36.101.235,00	R\$ 32.516.782,00	R\$ 45.544.330,00

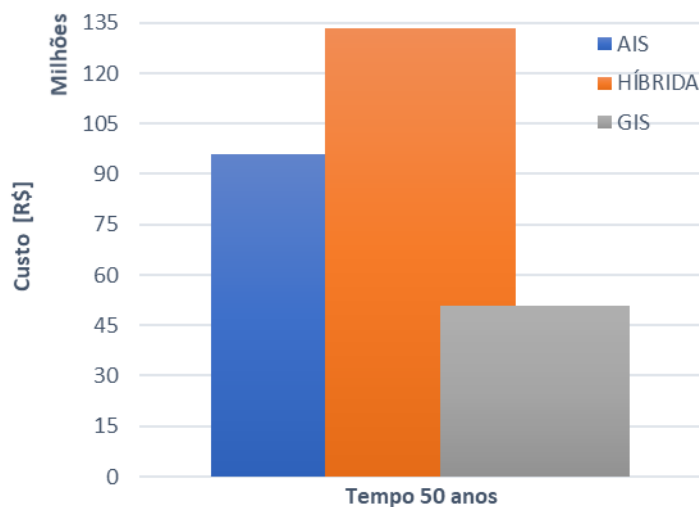
Fonte: (O Autor)

A vida útil da subestação GIS é de 50 anos, sendo superior à vida útil de uma subestação AIS que é de 30 anos, visto que ela está em um ambiente completamente isolado e monitorado. Com este monitoramento é possível controlar as condições do gás SF₆, diminuindo ainda mais a necessidade de manutenções preditiva, preventivas e corretivas e consequentemente aumentando a confiabilidade da subestação. Este monitoramento é realizado para controlar a umidade do ar, ponto de orvalho, temperatura, pressão, densidade do gás SF₆, entre outros fatores.

A título de comparação, foi simulado o custo total das subestações no período de 50 anos, pois é a maior vida útil das três subestações. Para obtenção do Gráfico 5, foi considerada a inflação do custo dos equipamentos de 4% ao ano e para o custo da manutenção um reajuste anual de 7,1% ao ano.

A partir dos valores apresentados no Gráfico 5, pode-se perceber que para o período de 50 anos a subestação GIS apresenta o menor custo, pois neste período só seria realizada a manutenção necessária dela. Por outro lado, o custo da subestação híbrida é o mais caro, pois a subestação híbrida possui uma vida útil de 30 a 40 anos, sendo considerada a aquisição de novos equipamentos no ano 41 e o reajuste dos custos de manutenção. Desta forma, a subestação híbrida não se torna viável para o período de 50 anos.

Gráfico 5 - Comparação do custo total de cada subestação para o ano 50.



Fonte: AUTOR.

Na Tabela 7, é possível perceber a diferença de custo analisando a longo prazo, onde para um horizonte de 30 anos pode-se concluir que a subestação híbrida apresenta o menor custo. No entanto, considerando que a vida útil é estimada em 10 anos menos do que no caso GIS, ao se analisar para um horizonte de 50 anos, a alternativa GIS passa a apresentar o menor custo.

Tabela 7 - Comparativo de custos de implementação com vida útil no ano 30 e no ano 50.

	AIS	HÍBRIDA	GIS
Custo total no ano 30	R\$ 36.101.235,00	R\$ 32.516.782,00	R\$ 45.544.330,00
Custo total no ano 50	R\$ 96.068.717,00	R\$ 133.542.529,00	R\$ 50.809.411,00

Fonte: (O Autor)

Na Tabela 8, é apresentado um comparativo de custo entre as máximas vida útil das subestações, e nela é possível perceber que a subestação híbrida é economicamente viável para um período de 40 anos.

Tabela 8 - Comparativo de custos de implementação com a máxima vida útil das subestações.

	AIS 30 anos	HÍBRIDA 40 anos	GIS 50 anos
Custo total	R\$ 36.101.235,00	R\$ 33.768.050,00	R\$ 50.809.411,00

Fonte: (O Autor)

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho de conclusão de curso teve por objetivo comparar três tecnologias diferentes para a implementação de uma subestação de energia elétrica de alta tensão (15 MVA e 138/13,8 kV) em uma região urbana, indicando análises técnicas, econômicas, financeiras e socioambientais. A primeira tecnologia estudada foi a do tipo convencional isolada a ar (AIS – *Air Insulated Switchgear*) instalada ao tempo. A segunda tecnologia estudada também é instalada ao tempo, porém existe um módulo híbrido que é isolado a gás SF₆ e o restante dos equipamentos são isolados a ar. A terceira e última tecnologia estudada é instalada dentro de uma edificação e é utilizado o gás SF₆ como isolante, sendo conhecida como GIS (*Gas Insulated Switchgear*).

Diante disso, realizou-se uma análise comparativa utilizando alguns critérios pré-estabelecidos relacionados à área para a implementação, tempo de implantação, recursos financeiros necessários, análise técnica, socioambiental e necessidades de manutenção.

Na primeira análise realizada, levou-se em consideração o fator de impacto de implantação a área utilizada, como também o custo de aquisição do terreno. Portanto, para esta análise a subestação GIS é que ocupa a menor área e, por consequência, o menor custo de aquisição de terreno. Apresenta assim, vantagens em relação a uma subestação AIS e híbrida.

Na segunda análise, foi utilizado o critério de intervalo de tempo para a primeira manutenção após a implantação do projeto, no qual as subestações híbrida e GIS apresentaram os melhores resultados em relação a AIS. Entre as subestações híbrida e GIS, o tipo híbrido apresenta o melhor cenário, pois a primeira manutenção ocorre apenas no sexto ano de implementação.

Para a terceira análise, foi utilizado o critério de custos, os quais foram divididos em custos da subestação e custos totais da implementação. Com relação aos custos apenas da subestação, a tecnologia AIS apresenta vantagem em relação às outras duas, pois o investimento na aquisição dos equipamentos é menor em 44,32%. No entanto, quando analisado o total do custo de implantação a subestação híbrida acaba se tornando mais vantajosa e a subestação GIS a menos vantajosa, apresentando um custo cerca de R\$ 13 milhões acima do que na subestação com a tecnologia híbrida e R\$ 10 milhões de uma subestação AIS.

Por fim, foi realizada a análise de custo para um horizonte de 50 anos, a fim de balizar todas as subestações para a maior vida útil, que é a da subestação GIS. Em um horizonte de longo prazo, a subestação GIS aparece como a alternativa mais vantajosa economicamente.

Analisando todos os resultados para o cenário proposto, pode-se concluir que a subestação GIS é mais propícia para ser implantada em grandes centros urbanos, pois além de ocupar cerca de 34 % do espaço de uma subestação convencional isolada a ar (AIS), podendo ser construída da forma vertical, ela apresenta os melhor indicativos econômicos ao longo do seu ciclo de vida útil e uma maior confiabilidade.

Para trabalhos futuros, sugere-se uma análise de confiabilidade avaliando os possíveis cortes de carga em função da indisponibilidade de fonte aplicado para os três tipos de tecnologias. Além disso, pode ser realizada uma análise de custos com energia elétrica, a partir da conexão em média e alta tensão. A partir de dados de taxas de falhas históricas para redes de média e alta tensão, pode-se também incorporar na análise o custo da indisponibilidade e o custo de conexão nos diferentes níveis de tensão.

Outra sugestão é uma análise dos impactos socioambiental e técnicos por peso, avaliando em cada tipo de subestação qual é o maior impacto, sendo atribuída uma nota e ao final poderia ser visualizado qual é o tipo de subestação que mais sofre com os impactos socioambiental e técnicos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Resolução Normativa N° 674, de 11 de agosto de 2015.**: Subestação de distribuição - SED. Brasília: ANEEL, 2015. 2 p.

AZEVEDO, Marcelo Peixoto. **Arranjos de Subestações de Alta Tensão.** 2015. 76 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Departamento de Engenharia Elétrica, Cefet-Mg, Belo Horizonte, 2015. Cap. 7.

BRASÍLIA. Aneel. Aneel (org.). **Curso EAD Fundamentos do setor elétrico.** Desenvolvido em parceria com o LabTIME/UFG. Disponível em: http://www.labtime.ufg.br/modulos/aneel/mod4_uni1_sl15.html. Acesso em: 24 ago. 2021.

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.

DIAS, Rubem Guimarães Netto; VAISER, Simone. **Detecção de Falhas em Redes Elétricas.** 2021. Disponível em: <https://osetoreletrico.com.br/deteccao-de-faltas-em-redes-eletricas/>. Acesso em: 12 set. 2021.

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.

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.

GE. **HYpact.** p. 24, 2017.

GE. **HV/MV Equipment.** Disponível em: https://www.gegridsolutions.com/hvmv_equipment.htm. Acesso em: 24 set. 2021.

GONÇALVES JUNIOR, Francisco André; KAJIKAWA, Carlos Ossamu. **Aplicação de Tecnologia Híbrida em Subestação Compacta Abrigada.** In: SEMINÁRIO NACIONAL DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 18., 2008. Olinda: Sendi, 2008. p. 1-6.

HORIKAWA, Daniel Kendy. **Estudo comparativo entre subestações ao tempo e subestações isoladas a gás.** 2013. 56 f. TCC (Graduação) Curso de Engenharia Elétrica - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2013.

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.

KARDEC, Alan; NASCIF, Júlio. **Manutenção: função estratégica.** 3. Ed. Rio de Janeiro: Qualitymark: Petrobrás, 2009. Acesso em: 12 de setembro 2021.

MAMEDE FILHO, João. PROJETO DE SUBESTAÇÃO DE CONSUMIDOR. **Instalações Elétricas Industriais**. 7. ed. São Paulo: Ltc, 2007. Cap. 12. p. 577-604.

MAMEDE FILHO, João. **Manual de Equipamentos Elétricos**. Rio de Janeiro, Rio de Janeiro: Ltc, 2005. 780p.

MAMEDE FILHO, João. **Subestações de potência: tudo o que você precisa saber**. São Paulo: Gen/ Exatas, 2020. Disponível em: <https://genexatas.com.br/subestacoes-de-potencia-tudo-o-que-voce-precisa-saber/>. Acesso em: 24 ago. 2021.

Manutenção em uma Subestação de Energia. Goiás: Cogera, 16 ago. 2018. Disponível em: <https://cogera.com.br/manutencao-em-uma-subestacao-de-energia/>. Acesso em: 12 set. 2021.

MEIRELES, Denise. **Aplicabilidade de Subestações Compactas Isoladas a Gás em Grandes Centros Urbanos: Proposta de Procedimento Aplicado à Expansão do Sistema elétrico**. 2010. 85 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, PPGEE, UFMG, Belo Horizonte, 2010. Cap. 6.

MUZY, Gustavo Luiz Castro de Oliveira. **Subestações Elétricas**. 2012. 122 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012. Cap. 9.

Nova Subestação em Serra Do Salitre. Cemig Notícias, 29 mar. 2021. Disponível em: <https://www.cemig.com.br/noticia/nova-subestacao-em-serra-do-salitre/>. Acesso em: 27 set. 2021.

ONS. Aneel. **Conhecimento Glossário**. Operador Nacional do Sistema Elétrico. Disponível em: <http://www.ons.org.br/paginas/conhecimento/glossario>. Acesso em: 25 ago. 2021.

PAOLA FONTI. Schneider Electric. **Cahier technique no. 194: current transformers: how to specify them**. 194. ed. Le Pont-de-Claix: Technical Collection, 2000.

PAULO, Assis Rogério Gomes da Silva et al. **Diagnóstico de descargas parciais em subestações isoladas a gás SF6 utilizando redes neurais artificiais**. 2006. 104 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

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.

SOUZA, Fabiano Alves de. **Detecção de Falhas em Sistema de Distribuição de Energia Elétrica Usando Dispositivos Programáveis**. 2008. 119 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Unesp, Ilha Solteira, 2008. Cap. 7.

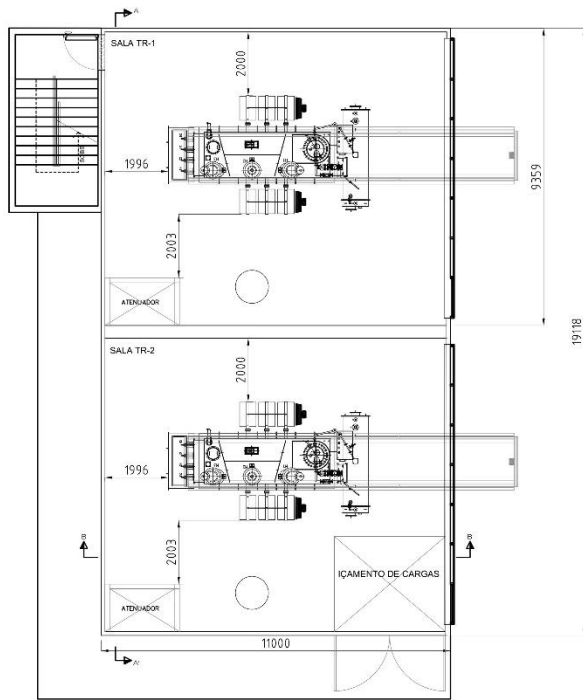
TARRAGO, Roberto Arnt. **Confiabilidade de Subestações de Transmissão de Energia Elétrica com Aplicação de Equipamentos de Manobra não Convencionais**. 2019. 114 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, UFRGS, Porto Alegre, 2019. Cap. 6.

TECNOVA ENERGIA. **SE Incefra**. Disponível em: <https://tecnovaenergia.com.br/project/se-incefra/>. Acesso em: 24 ago. 2021.

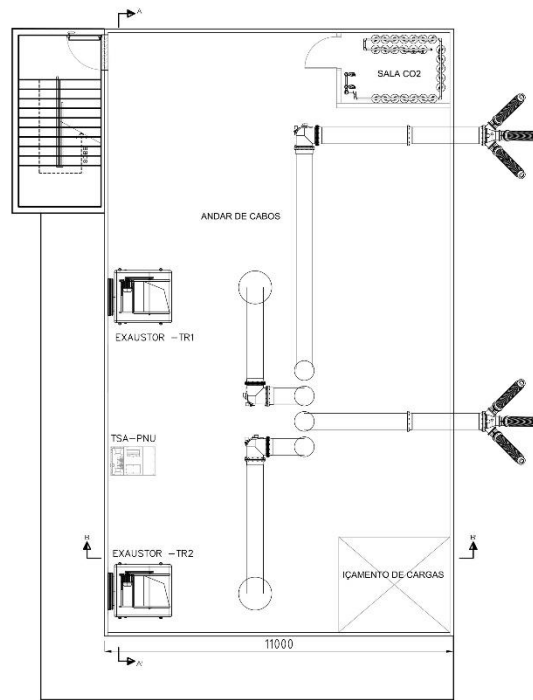
TECNOVA ENERGIA. **SE Hospital de Clínicas**. Disponível em: <https://tecnovaenergia.com.br/project/se-hospital-de-clinicas/>. Acesso em: 24 ago. 2021.

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: 24 ago. 2021.

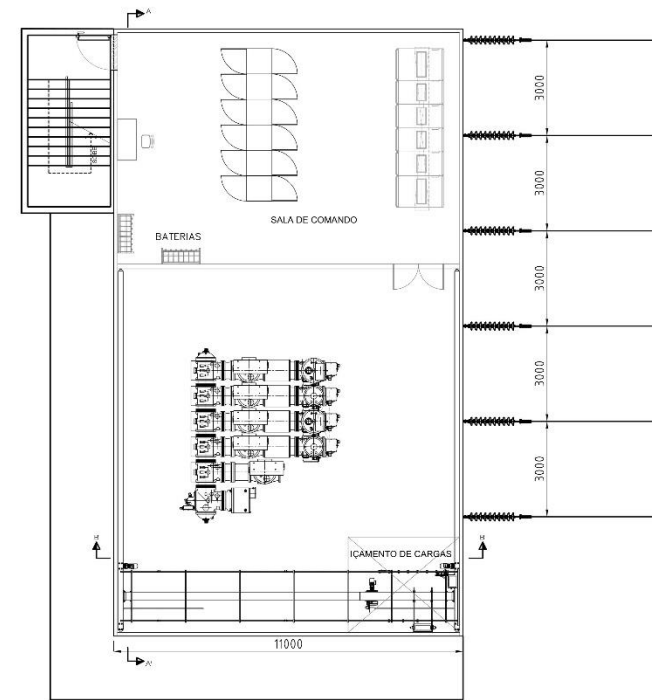
APÊNDICE A – Planta do Arranjo Geral da Subestação GIS



PAVIMENTO TERREO - PLANTA
ESCALA: 1/75



SEGUNDO PAVIMENTO - PLANTA
ESCALA: 1/75



TERCEIRO PAVIMENTO - PLANTA
ESCALA: 1/75

APÊNDICE B – Planta do Arranjo Geral da Subestação GIS Corte A-A' e B-B'

