



**XXIV SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

CB/GSE/30

22 a 25 de outubro de 2017
Curitiba - PR

GRUPO - VIII

GRUPO DE ESTUDO DE SUBESTAÇÕES E EQUIPAMENTOS DE ALTA TENSÃO- GSE

ANÁLISE DAS SUBESTAÇÕES ISOLADAS A HEXAFLUORETO DE ENXOFRE

**WELLYSON CHIHAYA*
UTFPR**

**ELOI RUFATO JUNIOR
UTFPR**

RESUMO

O presente trabalho é um estudo sobre Subestações Isoladas a Gás (GIS), cujo gás isolante é o Hexafluoreto de Enxofre (SF₆), abordando aspectos de sua instalação e funcionamento, justificando a sua crescente utilização em subestações de distribuição na cidade de Curitiba pela Companhia Paranaense de Energia (Copel), tornando esse modelo a principal solução para áreas densamente povoadas que necessitam de um aumento no fornecimento de energia sem perder sua confiabilidade.

PALAVRAS-CHAVE

Subestação, Estudo Comparativo, SF₆, GIS, Grandes Centros.

1.0 - INTRODUÇÃO

Com o crescimento econômico e populacional do país, gera também um aumento do consumo de energia elétrica, tornando fundamental a constante adequação do sistema responsável pelo suprimento dessa demanda. Além da otimização, melhorando a eficiência do que já está em funcionamento, existe a necessidade de ampliação na capacidade de fornecimento das subestações de distribuição já construídas e a construção de novas unidades junto aos grandes centros de carga.

A realidade de espaço disponível nos grandes centros urbanos para a construção de novos empreendimentos é muitas das vezes crítica, formando um gargalo para o suprimento da demanda de energia exigida nessas regiões.

Uma solução para o problema apresentado não está relacionado a uma tecnologia nova e inovadora e sim já conhecida e estudada a vários anos, desenvolvida inicialmente na década de 60 e 70 na França, que já buscava soluções para reduzir o espaço ocupado pelas subestações. Apesar do tempo que essa tecnologia é estudada e aplicada, não a torna dispensável e menos importante, apesar de ser a mesma, as características dos grandes centros urbanos mudaram substancialmente ao longo dos anos, principalmente da demanda de energia em relação a área disponível para a construção de novas subestações. Tornando a GIS a principal solução para a realidade dos grandes centros urbanos.

As principais características que tornam a subestação GIS um modelo a ser escolhido atualmente para aplicação nos grandes centros são:

- Tamanho do terreno disponível;
- Custo elevado do metro quadrado do terreno;

-Impactos Ambientais, Visuais e Sonoros;

-Confiabilidade;

2.0 A SUBESTAÇÃO CONSIDERADA NO ESTUDO

As subestações de um modo geral, independente de da classe de tensão em que operam são muito semelhantes, porém existem algumas particularidades que alteram a estrutura de seus equipamentos, como exemplo o número de fases por invólucro, que podem ser três para subestações de até 145kV, e acima disso seria uma fase por encapsulamento. Para uma análise mais detalhada foi escolhida um modelo de subestação GIS que opera em 69kV, mas pode operar até 138kV. Assim podemos entender um pouco mais sobre o funcionamento de seus equipamentos e componentes.

2.1 ESTRUTURA GERAL

As subestações Isoladas a Gás (GIS), utilizam como gás isolante o hexafluoreto de enxofre (SF₆), ou seja, boa parte de seus equipamentos, como disjuntores, seccionadoras, transformadores de corrente, transformadores de potencial, barramentos e outras partes componentes ficam imersos no gás e envolvidos por uma estrutura metálica devidamente aterrada.

Esse modelo possui um aspecto modular que pode ser montado em diversos arranjos, atendendo as necessidades específicas de cada projeto. A interconexão dos módulos individuais, é projetado para facilitar expansões e/ou alterações futuras. O invólucro metálico utilizado é feito de alumínio não corrosivo e de baixo peso específico, favorecendo na redução dos custos das fundações.

A subestação pode ser abrigada do tempo por um edifício, isso não é uma necessidade pois a estrutura da GIS é projetada para ambientes externos, sem perder a segurança de operação de seus equipamentos, porém como as instalações estão em regiões densamente povoadas a opção predial é uma alternativa para diminuir o impacto visual e o impacto sonoro causados por seus equipamentos. Um exemplo desse modelo de subestação está na Figura 1 a seguir, uma subestação GIS de distribuição da Copel.



FIGURA 1 – Subestação GIS Bom Retiro
Fonte: Copel 2016

2.2 ÁREA

Um dos principais atrativos que favorecem a escolha por uma Subestação GIS em relação a convencional isolada a ar é a significativa redução da área ocupada, chegando em alguns casos até 15% da área de uma subestação Isolada a Ar (AIS). Uma subestação de 138kV no modelo convencional ocuparia uma área maior que 10.000m², já uma no modelo GIS na mesma classe de tensão em torno de 1.900m².

2.3 O PROJETO

A configuração da subestação GIS é um barramento duplo, classe de tensão 145kV, tensão nominal de operação para projeto 138kV e tensão nominal de operação 69kV. Para uma melhor compreensão de como são distribuídos os equipamentos e componentes de uma subestação GIS de distribuição da Copel, a seguir na Figura 2 mostra um projeto do edifício desse modelo de subestação.

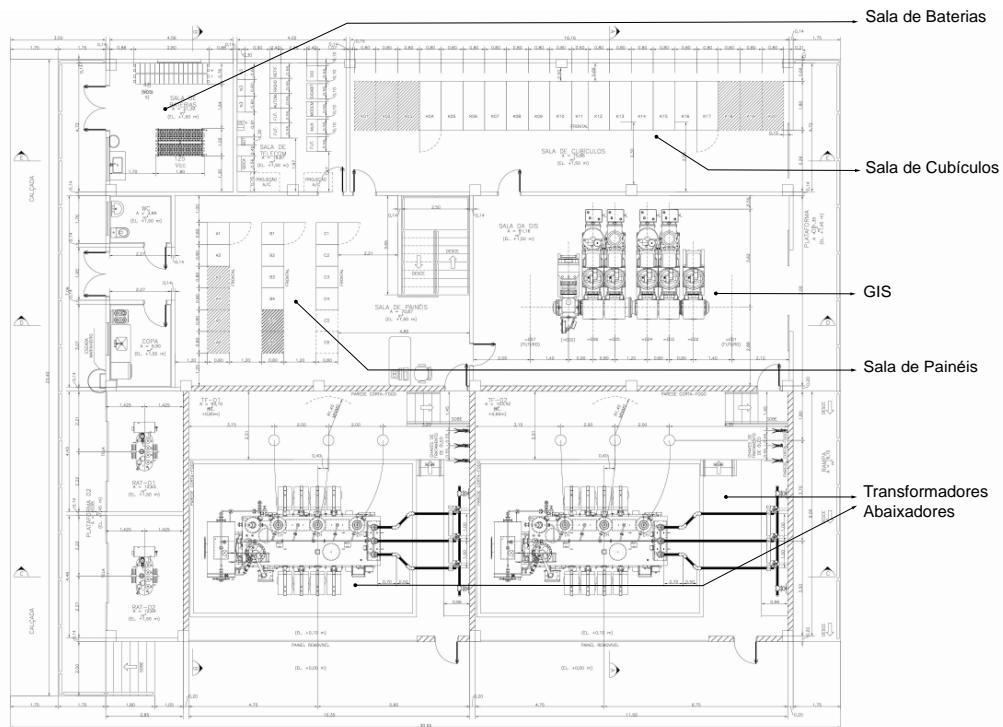


FIGURA 2 – Projeto de uma Subestação de Distribuição GIS 145kV da Copel
Fonte: Copel 2016

A subestação de distribuição da Copel possui cabos de entrada subterrâneos, e um porão aonde passam os cabos de conexão entre a GIS e os transformadores abaixadores, e ainda os cabos de saída para a rede externa, conforme mostra a Figura 3 a seguir.

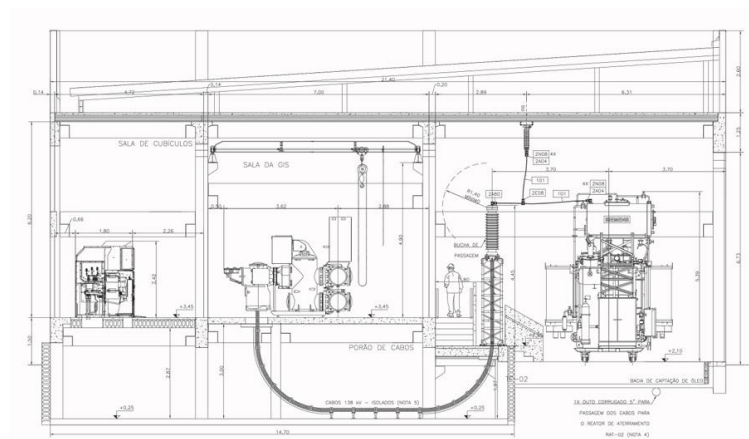


FIGURA 3 – Corte de Projeto de uma Subestação GIS 145kV
Fonte: Copel 2016

3.0 O GÁS SF6

O SF6 é um gás incombustível, incolor, inodoro, quimicamente estável e inerte até cerca de 500°C, tendo, dessa forma, um comportamento semelhante ao de um gás nobre. Isto significa que na temperatura ambiente não reage com qualquer outra substância.

Essa estabilidade vem da sua estrutura molecular, o Hexafluoreto de enxofre satisfaz os requisitos de valência da molécula de enxofre. Sua estrutura molecular é octaédrica, conforme ilustra a Figura 4 a seguir, com um átomo de Flúor em cada vértice, as seis ligações são covalentes, o que resulta na estabilidade excepcional deste composto.

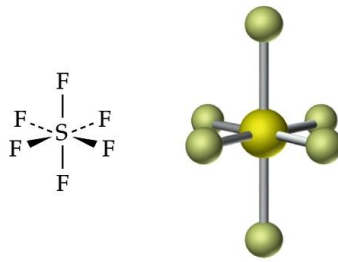


FIGURA 4 – Estrutura atômica do gás SF6
Fonte: Correia, Morales (2015).

A rigidez dielétrica do SF6 à pressão atmosférica é aproximadamente 3 vezes maior do que a do ar, ou seja, corresponde aproximadamente à capacidade isolante do óleo. Essa relação aumenta significativamente com o aumento da pressão.

A grande capacidade de transferência de calor e a baixa temperatura de ionização tornam as propriedades do SF6, excelentes contribuições para a extinção de arcos elétricos, que é bem melhor se comparado com o ar. A sua eficiência para suprimir arcos é cerca de 10 vezes maior, e o tempo que o arco é extinto é 100 vezes menor do que no ar sob as mesmas condições. Durante a extinção do arco elétrico, o gás SF6 é decomposto, essa decomposição se recombina e volta a se formar em SF6, pode ocorrer em alguns casos a formação de subprodutos, como alguns contaminantes, mas em uma quantidade muito pequena. Para evitar o acúmulo dessas substâncias residuais da decomposição do gás, é utilizado um filtro no interior da GIS, separando os subprodutos reativos (MELO, 2012).

4.0 MONTAGEM

Como a subestação é modular, a sua montagem é mais rápida quando se comparada a outras tecnologias, porém ela exige um maior cuidado, uma vez que partículas contaminantes entrem no seu interior, podem comprometer a função de isolamento do gás SF6. Por isso a sua montagem deve seguir padrões rigorosos quanto a limpeza do local e o controle de umidade.

Essas pequenas partículas de água ajudam a reduzir significativamente a rigidez dielétrica do gás SF6, e com o aumento da pressão esse efeito se intensifica.

5.0 MODELO DA GIS ESTUDADA E SEUS COMPONENTES

A subestação de distribuição GIS da Copel estudada estava equipada com o modelo 8DN8 de fabricação Siemens, 145kV, operando em 69kV, a qual possui as três fases passando juntas dentro do mesmo invólucro, o que é comum nessa classe de tensão, a seguir a Figura 5 ilustra as partes componentes que formam um bay da GIS do modelo estudado.

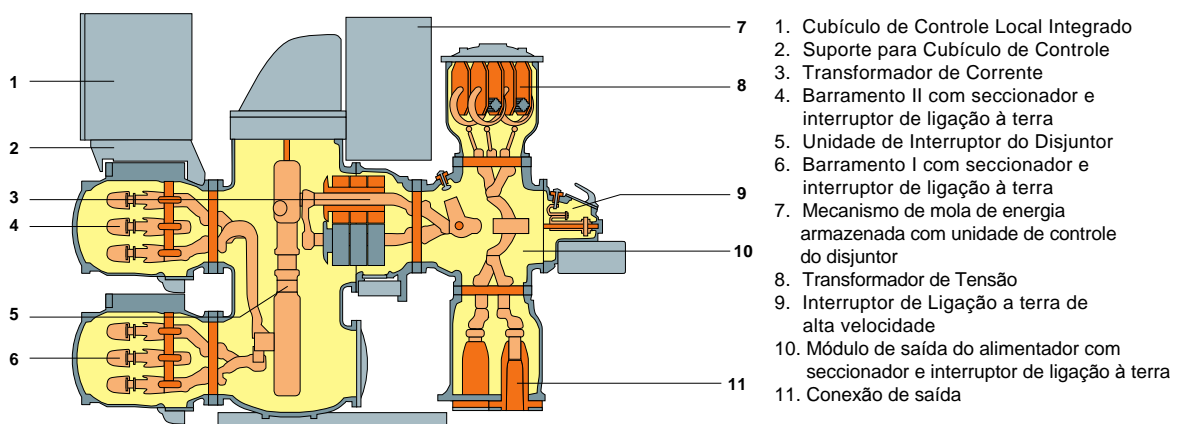


FIGURA 5 – Bay da GIS modelo 8DN8 fabricação Siemens
Fonte: Siemens (2016).

5.1 BARRAMENTOS

Os barramentos condutores de cada artéria, são montados sobre os isoladores estanques aos gases que separam as artérias individuais. Os módulos do barramento, têm um módulo de instalação transversal telescópico para facilitar as extensões. Um elemento conector separável, carregado por mola é usado nos barramentos para compensar quaisquer forças relacionadas à pressão e mudanças no comprimento, induzidas por gradientes de temperatura em barramentos longos.

O diagrama unifilar da GIS estudada é um barramento duplo conforme o diagrama unifilar da Figura 6 a seguir.

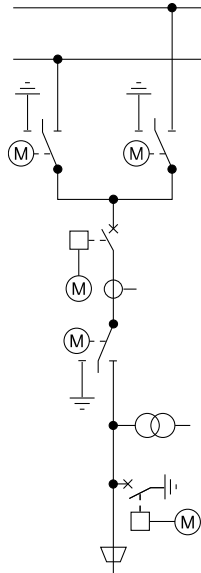


FIGURA 6 – Diagrama Unifilar da GIS 8DN8 fabricação Siemens
Fonte: Siemens (2016).

5.2 MÓDULO DISJUNTOR

É o elemento central do bay, conforme ilustra a Figura 7, esse dispositivo elétrico é capaz de interromper a corrente elétrica com carga, e inclusive condições de curto-circuito, sem sofrer os danos ocasionados pelo arco voltagem e quando acoplado a relés, proporciona um perfeito sistema de proteção aos circuitos a ele ligados.

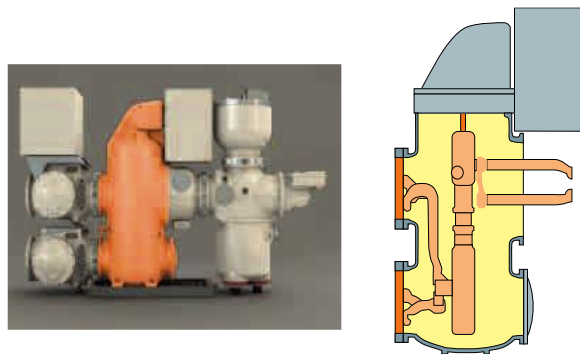


FIGURA 7 – Módulo disjuntor da GIS 8DN8 fabricação Siemens
Fonte: Siemens (2016).

5.2.1 MECANISMO DE OPERAÇÃO E ACIONAMENTO

O mecanismo de abertura do disjuntor é acionado por molas que são comprimidas por motores elétricos, pode ser acionado manualmente caso exista falha do acionamento remoto, ele é completamente isolado do invólucro de SF₆. O mecanismo e suas partes componentes é ilustrada na Figura 8 a seguir.

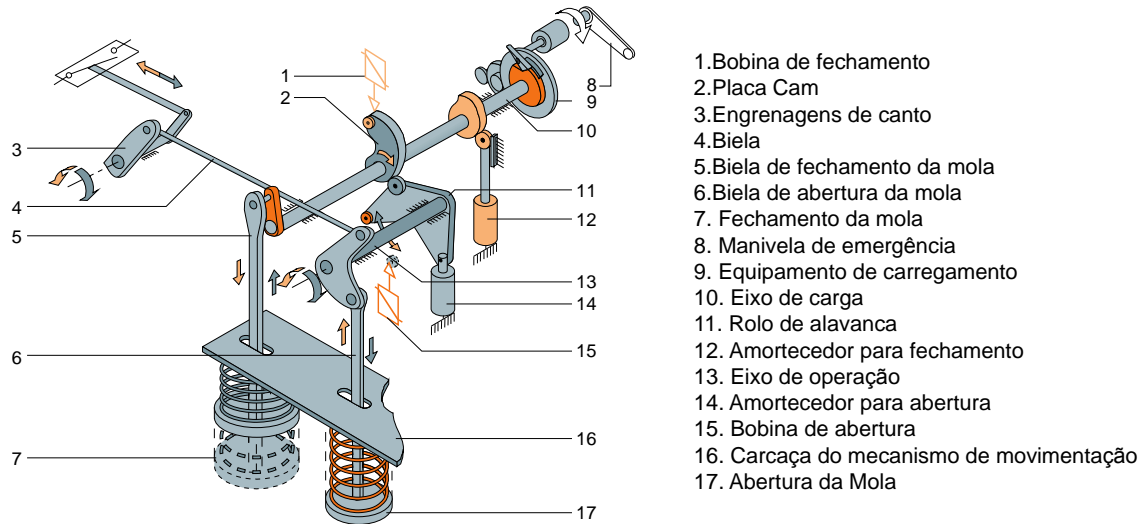


FIGURA 8 – Mecanismo de Operação do disjuntor da GIS 8DN8 fabricação Siemens
 Fonte: Siemens (2016).

5.2.2 UNIDADE DE INTERRUPTÃO

A unidade de interrupção dentro do módulo disjuntor é utilizada para extinção do arco voltaico durante sua operação de abertura, ela funciona no princípio da auto-compressão, ou seja, quando os contatos do disjuntor se afastam, a pressão aumenta na câmara de extinção, contribuindo para melhorar o isolamento e extinguir o arco elétrico, conforme ilustra a Figura 9.

A interrupção de corrente de operação durante a abertura do disjuntor, o contato (3) é o primeiro a abrir e a corrente continua a fluir no contato de arco (4), que ainda está fechado. Isso evita a erosão dos contatos principais. A medida que a operação de abertura avança, os contatos de arco (4), abrem e um arco elétrico se desenvolve entre eles. Simultaneamente, o cilindro de contato (5), move-se comprimindo o gás em (6), que flui através do cilindro de contato (5) para dentro do intervalo de contato e extingue o arco. Com o aumento da corrente de operação, irá aquecer ainda mais o gás na abertura, favorecendo para o aumento de sua pressão para a extinção do arco elétrico, consequentemente essa energia não precisa vir do mecanismo de operação. A medida que a comutação avança, o contato de arco fixo libera o fluxo na saída do bocal (2) e o gás flui para fora do cilindro de contato, finalizando a extinção do arco.

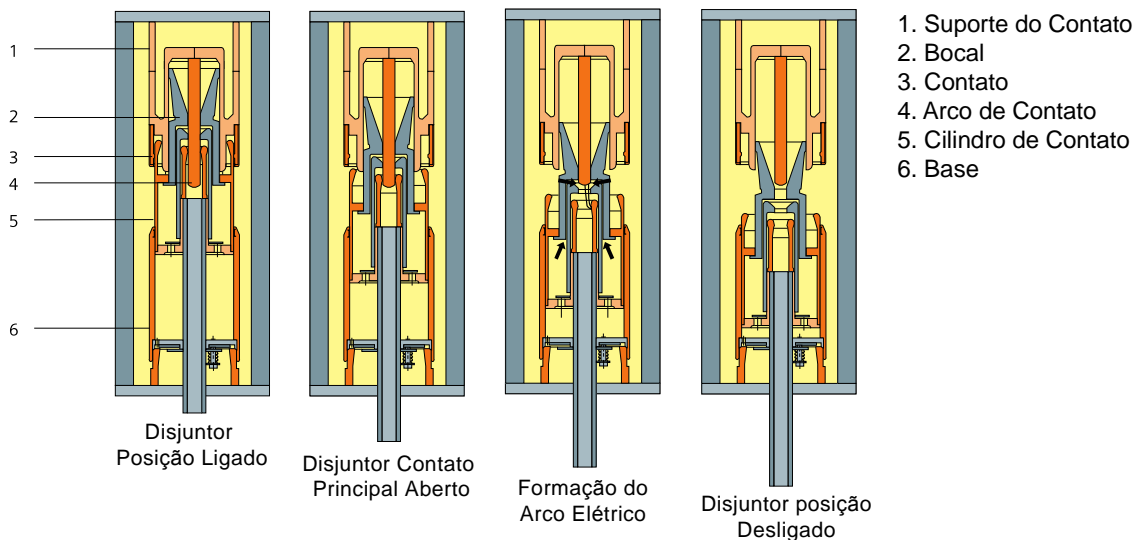


FIGURA 9 – Mecanismo de extinção do arco da GIS 8DN8 fabricação Siemens
 Fonte: Siemens (2016).

5.3 MÓDULO CHAVE DE ATERRAMENTO RÁPIDO

O comutador de aterramento de alta velocidade usado é o chamado “tipo pino”. Neste modelo de interruptor, o pino de aterramento em potencial de terra é empurrado para o contato acionado por mola, a qual é carregada por um motor elétrico, conforme a Figura 10 a seguir. Tais chaves, são necessárias para o aterramento de partes condutoras antes de serviços de manutenção, com objetivo de garantir a segurança.

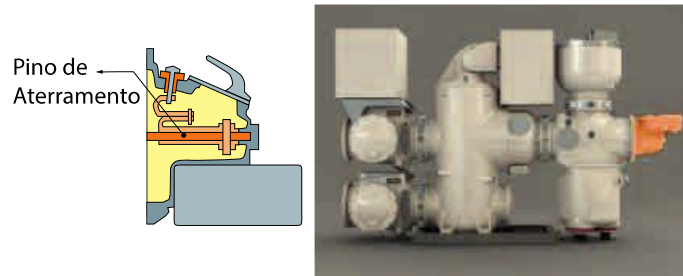


FIGURA 10 – Chave de Aterramento Rápido da GIS 8DN8 fabricação Siemens
Fonte: Siemens (2016).

5.4 MÓDULOS TRANSFORMADORES DE CORRENTE E POTENCIAL

Os transformadores de corrente e potencial são utilizados para fins de medição, proteção, monitoramento. Podem ser integrados em qualquer ponto da subestação. As conexões secundárias são conduzidas para fora do gabinete através de buchas estanques ao gás e colocadas em contatos com os terminais, que são fornecidos de diversas formas, desde transformadores de instrumentos convencionais a diferentes classes e padrões até sensores avançados de corrente e tensão. A seguir na Figura 11, ilustra como é cada modelo e sua posição dentro do bay.

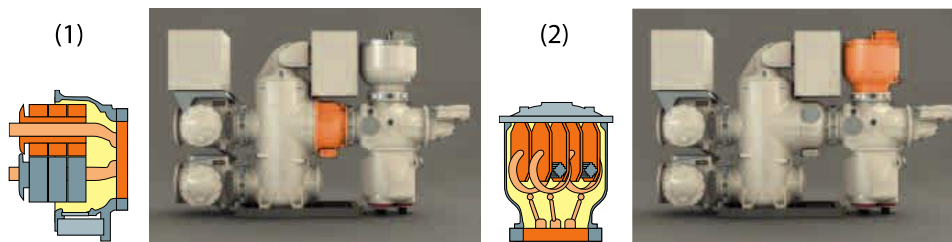


FIGURA 11 – (1) Transformador de Corrente (2) Transformador de Potencial da GIS 8DN8 fabricação Siemens
Fonte: Siemens (2016).

6.0 MANUTENÇÃO

Os componentes e equipamentos da subestação é isolado do meio externo, isso por si só já reduz o desgaste causados pelas interperes do clima, como chuva, poluição e o sol. Todas as operações realizadas na subestação ficam armazenadas em um banco de dados, assim é feito o controle para as manutenções preditivas da GIS, baseada nos ciclos de utilização do disjuntor, chaves seccionadoras, chaves de aterramento e para-raios.

7.0 CUSTOS

Os custos da subestação isolada a gás é maior que o modelo convencional isolado a ar e também maior que o da subestação híbrida, isso está agregado aos valores de seus equipamentos e componentes, porém essa diferença é diminuída, quando analisamos a área ocupada, ou seja, o valor gasto para a compra do terreno e as manutenções exigidas ao longo de sua vida útil. Na Tabela 1 a seguir, mostra os custos em Reais dos três modelos de subestações de distribuição utilizadas pela Copel, valores correspondente ao ano de 2014.

TABELA 1 – Comparativo dos custos de três modelos de subestações

SUBESTAÇÃO GIS	CUSTO
Setor de alta tensão em GIS, barra dupla composto por: 2 módulos de linha, 2 módulos de transformador e 1 módulo de interligador de barra.	R\$ 33.095.187,94
Setor de média tensão em cubículos, barra simples, com 10 alimentadores	R\$ 1.628.030,18
TOTAL	R\$ 34.723.218,12

SUBESTAÇÃO ABRIGADA	CUSTO
Setor de alta tensão com equipamento híbrido compacto, barra "H" composto por: 2 entradas de linha e 2 transformadores	R\$ 26.575.660,87
Setor de média tensão em cubículos, barra simples, com 10 alimentadores	R\$ 2.478.042,65
TOTAL	R\$ 29.053.703,51

SUBESTAÇÃO CONVENCIONAL	CUSTO
Setor de alta tensão com equipamentos convencionais, barra principal e transferência, composto por: 2 entradas de linhas, 2 transformadores e um de transferência	R\$ 20.583.328,32
Setor de média tensão, com equipamentos convencionais, barramento principal e de transferência, com 10 alimentadores	R\$ 2.716.883,74
TOTAL	R\$ 23.300.212,06

8.0 CONCLUSÃO

O modelo de subestação isolado gás (GIS), sem dúvida, será cada vez mais utilizada para instalações em grandes centros urbanos, seja pelas características já mencionadas como o aumento no domínio da tecnologia por parte das empresas de distribuição, barateamento de equipamentos, e a própria necessidade de substituição de subestações antigas e de tecnologias defasadas. Outro fator de peso é a confiabilidade que a GIS proporciona para o sistema, diminuindo as taxas de falhas de equipamentos, assim reduzindo os custos com multas da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), e ainda fornecendo uma energia de mais qualidade a população.

9.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1)SIEMENS. **Gas-Insulated Switchgear up to 145kV, 40kA, 3150 A type series 8DN8 - Operating Instructions**. Germany. 2010.
- (2)AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (Prodint)**. Módulo 1. 2008.
- (3)ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9523**: Subestações de Distribuição. Rio de Janeiro, 1995.
- (4)HORIKAWA, DANIEL K. **Estudo comparativo entre subestações ao tempo e subestações isoladas a gás**. 2013. 57f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2013.
- (5) MCDONALD, JOHN D. **Electric Power Substations Engineering**. 2. ed. Davis, CA. 2006.
- (6)MEIRELES, Denise. **Aplicabilidade de Subestações Compactadas Isoladas a Gás em Grandes Centros Urbanos: Proposta de Procedimento Aplicado à Expansão do Sistema Elétrico**. 2010. 85 f. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.
- (7)MELO, Martins. D. de. **Análise de características de subestações isoladas blindadas a gás e comparação frente a projetos convencionais**. 2012. 115 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.
- (8)MUZY, Gustavo. L. C. de O. **Subestações Elétricas**. 2012. 122 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.
- (9)RUFATO, E. J. Tecnologia SF6 em subestações blindadas e aparelhagem de média tensão. SEMINÁRIO DE MATERIAIS NO SETOR ELÉTRICO (SEMEL), 4, Curitiba, 1994.