

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

João Vitor Carra Ziliotto

**TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA EM SUBESTAÇÕES DE  
DISPOSITIVOS *FACTS SVC* E *STATCOM***

Porto Alegre

2020

JOÃO VITOR CARRA ZILIOOTTO

**TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA EM SUBESTAÇÕES DE  
DISPOSITIVOS *FACTS SVC* E *STATCOM***

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Professor Doutor Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro

Porto Alegre

2020

JOAO VITOR CARRA ZILLOTTO

**TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA EM SUBESTAÇÕES DE  
DISPOSITIVOS *FACTS SVC* E *STATCOM***

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovado em 01 de dezembro de 2020.

**BANCA EXAMINADORA:**

---

Professor Doutor Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro  
Orientador

---

Professor Doutor Roberto Petry Homrich

---

Engenheiro Ito Capinos

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Ivani e Luis Anselmo, por todo amor e empenho em mostrar-me desde cedo a importância dos estudos. Por oportunizarem que essa graduação fosse realizada, fornecendo todos os subsídios possíveis. A minha mãe, em especial, pela generosidade de suas palavras e por toda sua dedicação singular. Ao meu pai por ser um exemplo de caráter, força e de determinação para mim.

Aos meus irmãos, Vitoria e Luis Henrique, pelo companheirismo e por terem dividido comigo a casa, a rotina e as responsabilidades durante a maior parte desta graduação.

Ao professor orientador Doutor Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro com quem aprendi verdadeiras lições de profissionalismo e de competência. Pela paciência, pela orientação e pela criteriosa avaliação feita ao meu trabalho, com apontamentos sinceros e precisos.

Ao Engenheiro Ito Capinos por quem nutro muita admiração, com quem aprendo diariamente sobre o mundo de transformadores de potência. Pela dedicação em transmitir seu conhecimento e pela amizade.

Aos demais colegas de trabalho, Adriano Ieggli, Giorjana Formigari, Maurício Fleck, Fabiano Nicolaus e Germano Zarpelon, pelo companheirismo e confiança nestes anos que trabalhamos juntos.

Aos amigos de faculdade com quem tive o privilégio de conviver durante os cinco anos, pela troca constante que tivemos dentro e fora do âmbito acadêmico, que me proporcionaram muitos momentos de alegria. Também agradeço aos meus amigos de longa data, que acompanharam minha jornada e que sempre demonstraram a sua amizade e seu afeto.

A todos que, de alguma forma, contribuíram e participaram desta jornada.

## RESUMO

O objetivo deste trabalho é discutir a aplicação de transformadores de potência em subestações compensadoras de reativos do sistema elétrico, dispositivos *FACTS SVC* e *STATCOM*. Para tanto, são discutidas as considerações necessárias no projeto do transformador de potência como perdas em vazio e em carga, presença de correntes harmônicas e sobre-excitação. Partindo da análise teórica destes tópicos e das determinações normativas, buscou-se elucidar as considerações de projeto através de um estudo de caso de dois projetos de subestações para *SVC* e *STATCOM*. Por fim, os resultados dos cálculos dos transformadores para cada subestação são comparados, evidenciando aumento nos pesos da parte ativa decorrente da necessidade de trabalhar com valor de indução magnética menor. Ainda, as perdas nos dispositivos compensadores de reativos são maiores devido às correntes harmônicas.

**Palavras-chave:** *FACTS*; *SVC*; *STATCOM*; Transformador de potência; Perda; Indução magnética.

## ABSTRACT

This work's goal is to discuss the application of power transformers in substations of reactive compensating devices of the electrical system, FACTS devices as SVC and STATCOM. Therefore, the necessary considerations in the design of the power transformer are discussed, such as no-load losses and load losses, presence of harmonic currents and over excitation. From the theoretical analysis of these topics and the normative determinations, this work sought to elucidate the design considerations through a case study of two substation projects for SVC and STATCOM. The results of the calculations of the transformers for each substation are compared, showing an increase in the weights of the active part resulting from the need to work with a lower magnetic induction value. Also, losses in reactive compensating devices are greater due to harmonic currents.

**Keywords:** FACTS; SVC; STATCOM; Power transformer; Losses; Magnetic induction.

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	11
2	OBJETIVO .....	13
3	DISPOSITIVOS FACTS.....	14
3.1	SVC ( <i>Static VAR Compensator</i> ).....	14
3.2	STATCOM ( <i>Static Synchronous Compensator</i> ).....	17
3.3	TRANSFORMADOR DE ACOPLAMENTO.....	19
3.4	COMPARAÇÃO SVC E STATCOM.....	21
3.4.1	Dispositivo de comutação da eletrônica de potência .....	21
3.4.2	Vantagem de operação .....	21
3.4.3	Tempo de resposta.....	21
3.4.4	Harmônicas do equipamento.....	21
3.4.5	Instalação .....	22
4	TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA.....	23
4.1	PERDAS .....	25
4.1.1	Perdas no núcleo.....	26
4.1.2	Perda ôhmica.....	28
4.1.3	Perda parasita nos condutores e devido ao fluxo de dispersão ...	29
4.1.4	Perda por circulação de corrente entre condutores de uma mesma espira	30
4.1.5	Perdas devido às correntes harmônicas.....	31
4.1.6	Determinações normativas .....	31
4.2	SOBRE-EXCITAÇÃO.....	33
5	ESTUDO DE CASO .....	37
5.1	CARACTERÍSTICAS DA SUBESTAÇÃO .....	37
5.2	CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA ELÉTRICO.....	39
5.3	CORRENTES HARMÔNICAS .....	40

5.4	CARACTERÍSTICAS DO TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA .....	40
5.5	AÇO SILÍCIO.....	44
6	EQUIPAMENTOS CONSIDERADOS .....	46
6.1	TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA PARA SVC.....	46
6.2	TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA PARA SE PADRÃO COM DADOS PRINCIPAIS DO TRANSFORMADOR PARA SVC.....	48
6.3	TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA PARA STATCOM.....	49
6.4	TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA PARA SE PADRÃO COM DADOS PRINCIPAIS DO TRANSFORMADOR PARA STATCOM.....	51
6.5	ANÁLISE DE RESULTADOS.....	52
7	CONCLUSÃO .....	55
8	REFERÊNCIAS.....	57



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Configuração típica do Compensador Estático de Reativos. ....	15
Figura 2: Curva característica do Compensador Estático de Reativos. ....	16
Figura 3: Conversor trifásico de 2 níveis e 6 pulsos.....	17
Figura 4: Conversor trifásico de 3 níveis e 12 pulsos.....	18
Figura 5: Curva característica do STATCOM.....	19
Figura 6: Transformador com enrolamentos primário e secundário. ....	24
Figura 7: Transformador monofásico de dois enrolamentos concêntricos. ....	25
Figura 8: Núcleo trifásico de um transformador com corte de chapas a 45°. ...	26
Figura 9: Vista superior de uma coluna de seção circular.....	27
Figura 10: Representação da corrente parasita em um condutor da espira.....	29
Figura 11: Transposição nos condutores. ....	31
Figura 12: Perdas para transformadores, em percentagem de sua potência trifásica nominal à tensão e frequência nominais.....	32
Figura 13: Envoltória de sobretensões para operação em sobrecarga de compensadores estáticos de reativos .....	33
Figura 14: Valores indicativos de sobretensões admissíveis a 60Hz para transformadores e autotransformadores em vazio e reatores.....	35
Figura 15: Esboço SE Dispositivo SVC.....	38
Figura 16: Esboço SE Dispositivo STATCOM.....	38
Figura 17: Subestações de dispositivos SVC e STATCOM. ....	39
Figura 18: Núcleo 3 colunas enroladas e 2 colunas de retorno.....	43
Figura 19: Esquema de uma fase .....	43

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Espaço previsto de instalação <i>SVC</i> e <i>STATCOM</i> . .....	37
Quadro 2: Características do Sistema.....	39
Quadro 3: Dados do transformador de potência. ....	41
Quadro 4: Perdas do aço silício por indução.....	45
Quadro 5: Transformador de potência para dispositivo <i>SVC</i> .....	47
Quadro 6: Transformador de potência para SE padrão com dados principais do transformador para dispositivo <i>SVC</i> .....	49
Quadro 7: Transformador de potência para dispositivo <i>STATCOM</i> . ....	50
Quadro 8: Transformador de potência para SE padrão com dados principais do transformador para dispositivo <i>STATCOM</i> .....	52
Quadro 9:Comparativo de resultados.....	54

## LISTA DE EQUAÇÕES

Equação (1): Perdas no núcleo caso geral .....	26
Equação (2): Perdas no núcleo (fator k).....	28
Equação (3): Perda ôhmica.....	28
Equação (4): Perda ôhmica para o cobre.....	29
Equação (5): Perda ôhmica para o alumínio .....	29
Equação (6): Peso de cobre.....	29
Equação (7): Peso de alumínio .....	29
Equação (8): Perda parasita.....	30
Equação (9): Perda parasita para o cobre .....	30
Equação (10): Indução magnética.....	34
Equação (11): Indução magnética ( <i>Vol/espira</i> ) .....	34
Equação (12): Indução magnética no joelho da curva de saturação.....	36

# 1 INTRODUÇÃO

Um sistema de energia elétrica (SEE) tem o objetivo universal de gerar energia elétrica em quantidades suficientes e nos locais mais apropriados, transmiti-la em grandes quantidades aos centros de carga e, então, distribuí-la aos consumidores individuais. Isto, em forma e qualidade apropriadas e com menores custos ecológico e econômico possíveis (ELGERD, 1976). Apesar de não detalhar os fatores que garantem o ideal fluxo de energia elétrica, a definição proposta por Elgerd mantém-se verdadeira.

A necessidade por melhoria na confiabilidade da rede de transmissão e as opções fornecidas para corrigir o desbalanço da energia têm requisitado redes interconectadas para fortalecer os sistemas de potência e aprimorar a confiabilidade. Devido a essas interconexões, os fluxos de potências ativa e reativa devem ser controlados. Os principais fatores envolvidos nisso são as diferenças de impedância em caminhos paralelos, a falta de correspondência no fator de potência e as variações entre geração e consumo. Quando linhas de transmissão paralelas são utilizadas, o fluxo de potência é distribuído conforme a impedância de cada caminho, isso significa que a maior corrente estará presente no caminho de menor impedância (AREVA T&D, 2008).

O balanço da potência reativa no sistema é parte garantidora da qualidade da energia elétrica. Dispositivos compensadores de reativos exercem essa função com precisão, tais como os dispositivos *FACTS (Flexible Alternating Current Transmission Systems)*. Estes são baseados na tecnologia da eletrônica de potência aplicada nos processos de retificação em linhas de transmissão em corrente contínua (CC) e foram expandidos para sistemas de transmissão em corrente alternada (CA), fornecendo ao sistema de transmissão CA a mesma flexibilidade já conquistada nos sistemas em CC (SPINELLA, 2013).

*SVC (Static Var Compensator)* e *STATCOM (Static Synchronous Compesator)* são dispositivos *FACTS* muito utilizados e em pleno desenvolvimento, que se baseiam em semicondutores de alta potência capazes de controlar parâmetros como tensão, impedância, corrente e fluxo de potência. Dispositivos *SVC* são baseados em elementos passivos para se realizar a compensação de reativos. Permitem o controle rápido e contínuo da tensão no

ponto de conexão, realizando a troca de potência reativa estabelecida entre a rede elétrica e os elementos reativos passivos que formam o compensador. Dispositivos *STATCOM*, por outro lado, são baseados em conversores para se efetuar a compensação de reativos. Comparativamente aos dispositivos que utilizam elementos reativos passivos, este sistema possibilita maior flexibilidade, uma vez que utiliza semicondutores auto comutados (SPINELLA, 2013).

Dentre os equipamentos que compõem o *SVC* e o *STATCOM*, o transformador de potência é comum aos dois e de alta complexidade. De núcleo ferromagnético, possui no mínimo dois enrolamentos de material condutor concêntricos, que, pela circulação de corrente em um, é induzida corrente no outro. Este processo eleva ou rebaixa a rebaixa a tensão elétrica, conforme a necessidade do sistema elétrico.

Dispositivos *FACTS* operam com níveis de potência e tensões elevados e têm a particularidade de gerarem correntes harmônicas na comutação dos semicondutores. A variação de frequência e a sobretensão pelo enrolamento de menor tensão são situações comuns e significativas nestes compensadores reativos. Desse modo, cabem estudos sobre as condições impostas ao transformador de potência, impactos relevantes e considerações necessárias em um projeto.

## 2 OBJETIVO

O presente trabalho objetiva estudar transformadores de potência utilizados em subestações de dispositivos *SVC* e *STATCOM*. O texto apresentará, por meio de discussões fundamentos teóricos dos compensadores de reativos e do transformador de potência com enfoque na operação nos dispositivos *FACTS*. Conceitos como perdas em vazio e em carga, sobre-excitação e sobretensão são aprofundados no decorrer.

Com o propósito de ilustrar as discussões teóricas, um estudo de caso foi elaborado com base em uma situação real. Da fase inicial de projeto de uma subestação, são apresentados dados do transformador de potência para versões da subestação *SVC* e *STATCOM*. Cálculos do transformador para cada condição de compensador de reativos e para hipóteses sem as especificidades dos *FACTS* elucidam a teoria.

### 3 DISPOSITIVOS *FACTS*

A necessidade de controle e estabilidade do sistema elétrico propiciou o desenvolvimento da eletrônica de potência e conseqüente surgimento dos dispositivos *FACTS* (*Flexible Alternating Current Transmission Systems*) (CHAMORRO, 2014). Segundo SPINELLA (2013), estes dispositivos são baseados em componentes semicondutores de alta potência, principalmente válvulas de tiristores, capazes de controlar grandezas elétricas como impedância, tensão, corrente e fluxo de potência e que, quando instalados, permitem maior flexibilidade no controle da rede de transmissão.

SPINELLA (2013) assinala que existem diversas classificações de dispositivos *FACTS*. Sendo que a última classificação é a mais usual. Assim, podem ser classificados:

- Pela geração (tipo de semicondutor utilizado e tipo de associação série ou paralela para compensação de reativos), sendo quatro gerações.
- Pelo tipo de comutação, comutados pela rede ou autocomutados.
- Pela forma de conexão na rede elétrica ou;
- Se são baseados em elementos reativos passivos (reatores e capacitores) ou baseados em conversores (fonte de corrente ou fonte de tensão).

Dentre a gama de dispositivos *FACTS*, o *SVC* (*Static VAR Compensator*) e o *STATCOM* (*Static Synchronous Compensator*) sobressaem-se como os de maior significância e aplicabilidade nos sistemas de transmissão e distribuição. No tangente à nomenclatura, não há divergências em relação ao *SVC* pelos fabricantes, uma vez que sua tecnologia está consolidada. Entretanto, há divergências em relação as denominações do *STATCOM*, apesar da tecnologia ser comum aos fabricantes. A Siemens denomina de *SVC Plus*. A General Electric de *STATCOM*; e a ABB de *SVC Light* ou *Hybrid STATCOM*.

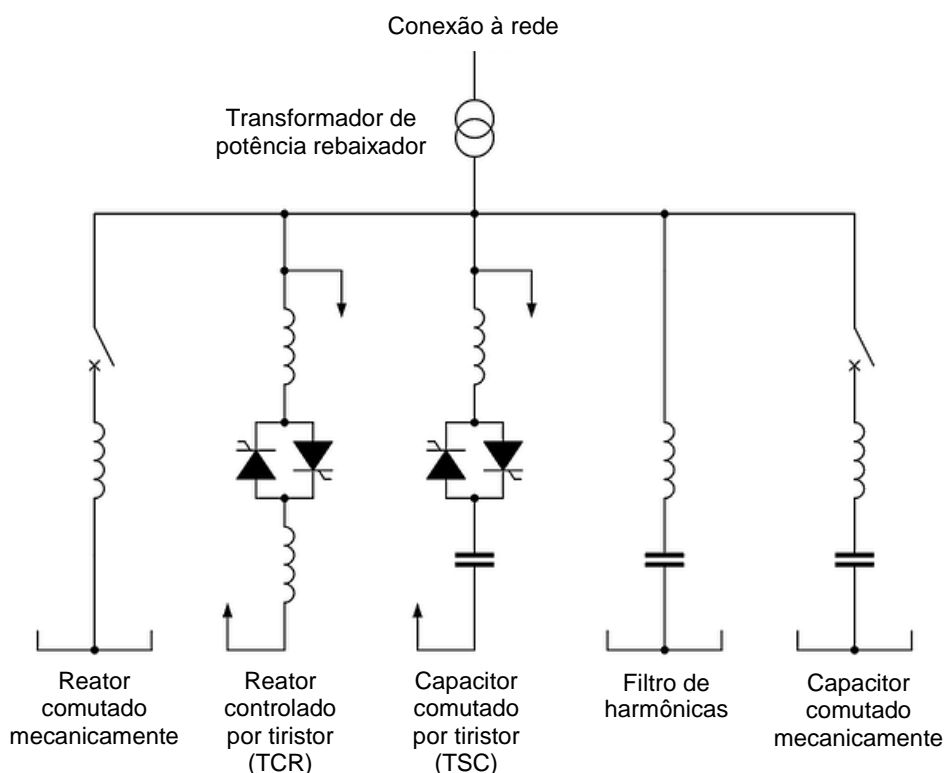
#### 3.1 *SVC* (*Static VAR Compensator*)

O Compensador Estático de Potência Reativa (CER) é um dos dispositivos *FACTS* mais utilizado e tecnologicamente desenvolvido. Utiliza válvula de tiristores para realizar a compensação de reativos e sua principal característica é o controle rápido e contínuo da tensão. Esse controle é realizado

através da troca de potência reativa estabelecida entre a rede elétrica e os elementos reativos passivos (reatores e capacitores) que formam o compensador (SPINELLA, 2013). Assim, a principal funcionalidade do SVC é regular a tensão em um barramento escolhido, controlando a injeção de energia reativa (BEKRI, 2008).

O SVC é resultado da associação de diversos equipamentos, como *TCR*, reator comutado a tiristor; *TSC*, capacitor comutado a tiristor; filtro de harmônicas; capacitor e reator mecanicamente manobráveis; e transformador de acoplamento. O filtro de harmônicas e os componentes baseados em tiristores são conectados à rede elétrica através do transformador de acoplamento. Este nada mais é do que um transformador de potência com reatância de cerca de 10 a 14% e tensão e potência elétricas adequadas ao sistema que está interligado.

Figura 1: Configuração típica do Compensador Estático de Reativos.



Fonte: Análise de *STATCOM* Operando em Sistemas Desbalanceados (CAVALIERE, 2001).

O *TCR* consiste em um reator fixo de indutância,  $L$ , e uma válvula tiristor bidirecional. A aplicação simultânea de um pulso de porta a todos os tiristores de

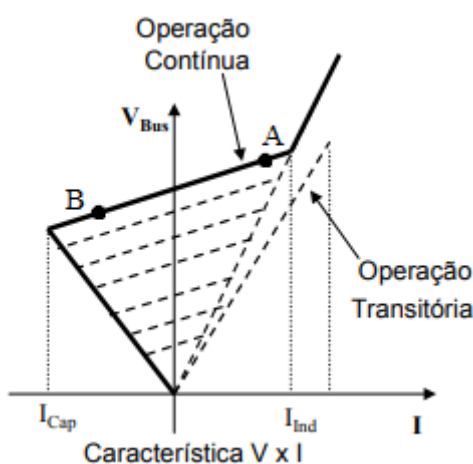


uma válvula de tiristores leva a válvula à condução. A válvula irá bloquear de forma automática aproximadamente nos cruzamentos de zero da corrente alternada, na ausência de um sinal de disparo. Assim, o elemento de controle é a válvula tiristor. O *TCR* atual é essencialmente reativo, atrasando a tensão em quase  $90^\circ$  (BEKRI, 2008). A tensão aplicada no *TCR* tem forma de onda senoidal, o que vai ao encontro da forma de onda da tensão aplicada no *SVC*, que está conectado ao barramento.

O ângulo de disparo do *TCR*,  $\alpha$ , é definido como o ângulo em graus elétricos entre o cruzamento zero positivo da tensão através do indutor e o cruzamento zero positivo da corrente através dele. Os tiristores são fixados simetricamente; portanto, o ângulo de disparo máximo possível é  $180^\circ$ . A condução total é obtida com um ângulo de abertura de  $90^\circ$  (BEKRI, 2008).

A Figura 2 apresenta a solução gráfica do compensador estático de reativos no sistema.

Figura 2: Curva característica do Compensador Estático de Reativos.



Fonte: Análise de *STATCOM* Operando em Sistemas Desbalanceados (CAVALIERE, 2001).

Se, devido a uma redução de carga, a tensão equivalente do sistema aumentar, a tensão  $V_{Bus}$  aumenta e desloca-se para cima no eixo da ordenada sem a presença do CER. Já com a presença do CER, o ponto de operação desloca-se sobre a curva para o ponto A, absorvendo corrente indutiva ( $I_{Ind}$ ) e mantendo a tensão sobre a curva de operação contínua.

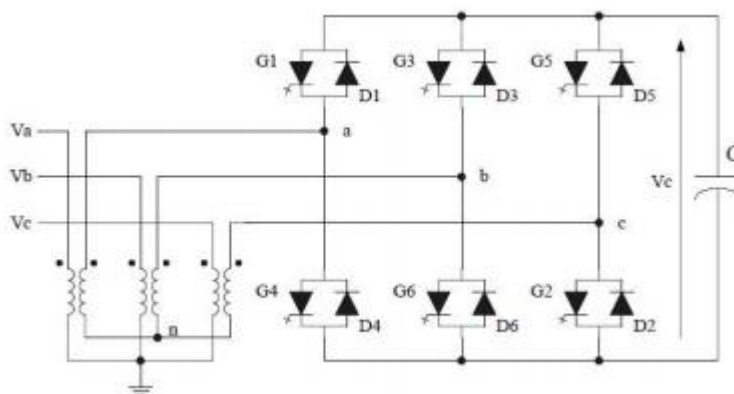
Se, devido a um aumento na carga, a tensão equivalente do sistema diminuir, a tensão  $V_{BUS}$  diminui e desloca-se para baixo no eixo da ordenada sem a presença do CER. Com a presença do CER, o ponto de operação desloca-se sobre a curva para o ponto B, injetando corrente capacitiva ( $I_{Cap}$ ) e mantendo a tensão sobre a curva de operação contínua.

### 3.2 STATCOM (Static Synchronous Compensator)

O Compensador Estático Síncrono (STATCOM) é um dispositivo FACTS baseado em um conversor de fonte de tensão, o VSC (*Voltage Source Converter*), conectado em paralelo com a rede elétrica. E, para que a troca de potência reativa (geração e absorção) entre a rede elétrica e o STATCOM seja realizada, o conversor VSC gera uma tensão com módulos e ângulos variáveis. Segundo SPINELLA (2013), é através da posição relativa da tensão gerada pelo VSC com a tensão da rede que se estabelece a troca de reativos.

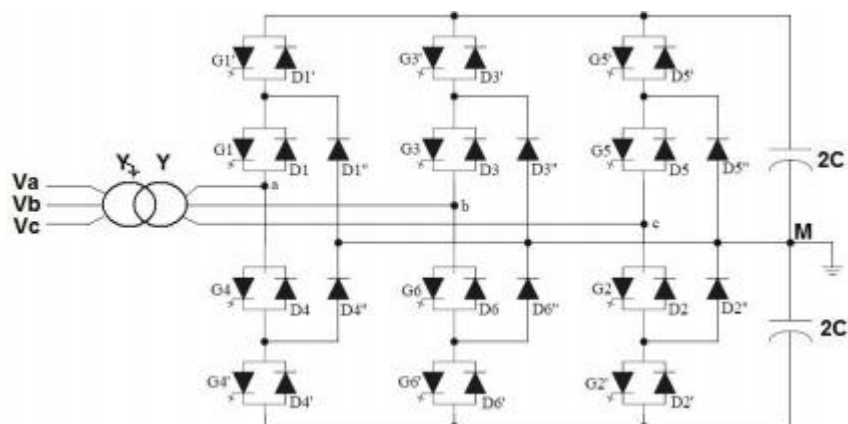
O STATCOM é composto por quatro partes básicas: inversores, transformadores, capacitor do lado de corrente contínua e um sistema de controle. Os inversores, desenvolvidos pela eletrônica de potência, são compostos pelo inversor trifásico em ponte, tendo como chaves mais usuais os IGBTs (*Insulated Gate Bipolar Transistors*) (CAVALIERE, 2001). A configuração do tipo de ponte inversora pode variar em cada projeto. Ping *et. al* (2009) apresentam algumas configurações de IGBTs utilizados em compensadores estáticos síncronos trifásicos, de 2 níveis e 6 pulsos, Figura 3; e de 3 níveis e 12 pulsos,.

Figura 3: Conversor trifásico de 2 níveis e 6 pulsos



Fonte: Aplicação de Conversores VSC em Sistemas de Transmissão de Potência (Ping, 2009).

Figura 4: Conversor trifásico de 3 níveis e 12 pulsos



Fonte: Aplicação de Conversores VSC em Sistemas de Transmissão de Potência (Ping, 2009).

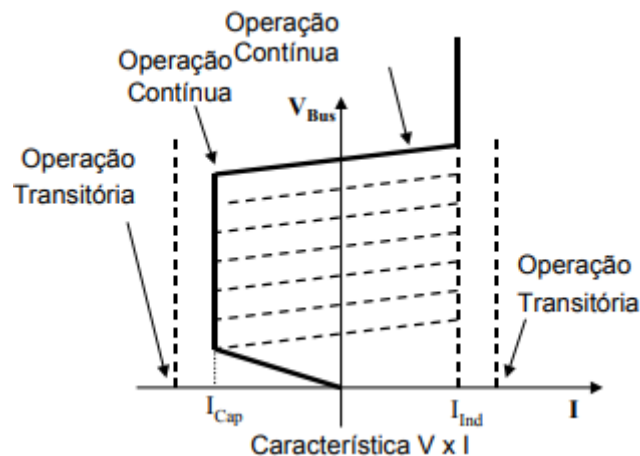
O transformador de acoplamento, novamente, este nada mais é do que um transformador de potência com reatância de cerca de 10 a 14% e tensão e potência adequadas ao sistema a que está interligado.

Outro componente que associado é o banco de capacitores (SPINELLA, 2013). A principal função do capacitor do lado de corrente contínua no *STATCOM* é servir de fonte de tensão contínua possibilitando a atuação do inversor. Também, o capacitor do lado de corrente contínua serve como acumulador temporário de energia permitindo trocas entre o sistema elétrico e o *STATCOM* (CAVALIERE, 2001).

O controle a ser aplicado ao *STATCOM* é função das necessidades do sistema: controle da potência reativa, auxílio à estabilidade, regulação de tensão, etc (CAVALIERE, 2001). Diferentemente do Compensador Estático de Reativo, o *STATCOM* é capaz de controlar, não somente a tensão de saída, mas também sua corrente de saída. Se a tensão sobre os capacitores for incrementada para um valor acima do nominal o *STATCOM* gera potência reativa. De maneira contrária, se a tensão sobre os capacitores for reduzida abaixo da nominal, o *STATCOM* está subexcitado e absorve potência reativa da rede elétrica (SPINELLA, 2013).

A Figura 5 apresenta a solução gráfica do compensador estático de reativos no sistema.

Figura 5: Curva característica do *STATCOM*.



Fonte: Análise de *STATCOM* Operando em Sistemas Desbalanceados (CAVALIERE, 2001).

Analogamente ao SVC, o compensador estático síncrono, modifica a tensão conforme o aumento ou redução da carga. A identificação da variação entre as condições nominal, de aumento ou de redução de carga é feita por transformadores de corrente conectados diretamente à rede. Na condição nominal, o *STATCOM* gera uma tensão com forma de onda similar à do sistema. Quando há aumento de carga, ou seja, a tensão equivalente diminui, o *STATCOM* atua como um dispositivo capacitivo e injeta potência reativa à rede. Quando há redução de carga, ou seja, a tensão equivalente aumenta, o *STATCOM* atua como um dispositivo indutivo e absorve potência reativa da rede.

### 3.3 TRANSFORMADOR DE ACOPLAMENTO

Os transformadores fazem a ligação com o sistema de corrente alternada, alinhando as tensões de operação do equipamento, de forma a atender os limites com a rede. E, através de formas especiais de ligação, os transformadores eliminam alguns dos harmônicos gerados pelos inversores reduzindo o conteúdo dos harmônicos inseridos na rede elétrica (GLANZMANN e ANDERSON, 2005). A ligação delta tem a particularidade de conter a transmissão de correntes harmônicas.

Basicamente, o transformador de acoplamento é um transformador de potência com as mesmas características elétricas e construtivas apresentadas no item 4. Somente recebe essa nomenclatura nos dispositivos *FACTS*, devido à particularidade de acoplar o Compensador Estático à rede elétrica.

O projeto do transformador de acoplamento deve atender a todos os requisitos estabelecidos nas normas técnicas vigentes. Todavia, alguns pontos merecem atenção extra (SPINELLA, 2013).

- Forte exposição às correntes harmônicas geradas pelos semicondutores e pelo chaveamento dos componentes do compensador de reativos.
- Perdas do transformador, porque os critérios para perdas globais no Compensador Estático são extremamente severos e a parcela de contribuição do transformador é muito relevante.
- Definição no fornecimento entre um banco de transformadores monofásicos ou um transformador trifásico. No fornecimento de banco monofásico com uma unidade reserva, uma eventual falha em uma das unidades monofásicas permite a colocação em operação rapidamente da unidade reserva. Se a falha ocorrer no transformador trifásico, a reposição poderá levar de meses a anos. Por outro lado, o espaço físico pode ser decisivo para o fornecimento;
- Operação com variação de frequência acima da regulamentada pelas normas técnicas vigentes;
- Variações de tensões acima dos parâmetros previamente definidos de suportabilidade para transformadores de potência.

O transformador de potência na subestação *FACTS* acopla, portanto, os retificadores, tiristores e reatores à rede de distribuição atuando como um transformador rebaixador (*step-down transformer*). O lado de baixa tensão está conectado ao barramento dos equipamentos do *FACTS*, enquanto o lado de alta tensão está conectado à rede de distribuição. Desse modo, o enrolamento de BT recebe diretamente as harmônicas geradas pelos semicondutores do *SVC* ou *STATCOM* e estas são refletidas no enrolamento de alta tensão e podem provocar significativos aumento de perdas e sobre-excitação no núcleo do transformador.

### 3.4 COMPARAÇÃO SVC E STATCOM

Tanto o SVC quanto o STATCOM têm o mesmo objetivo de injetar ou absorver reativos da linha de transmissão. Assim, as características de cada dispositivo serão apresentadas comparativamente a seguir para alguns tópicos, com base em material de estudos da GENERAL ELECTRIC.

#### 3.4.1 Dispositivo de comutação da eletrônica de potência

O SVC utiliza tiristores chaveados, conectados em série, operando como um conversor de fonte de corrente. Enquanto o STATCOM trabalha com IGBTs (*Insulated-gate Bipolar Transistor*), conectados em cascata, operando como conversor de fonte de Tensão (VSC). Os tiristores já provaram ser confiáveis há mais de 40 anos e os IGBTs há mais de 20 anos.

#### 3.4.2 Vantagem de operação

O SVC sobressai na compensação de sobretensão, caracterizando-se como uma admitância constante. O STATCOM sobressai na compensação de subtensão, caracterizando-se como uma corrente constante.

#### 3.4.3 Tempo de resposta

O tempo de resposta normalmente é, para o SVC, de 2 a 3 ciclos e, para o STATCOM, de 1,5 a 2 ciclos. Isto permite o controle adicional de funções (filtro ativo) ser incorporado ao STATCOM, podendo responder finalmente em 1-2ms em modo de controle aberto, ao passo que o reator controlado a tiristor do SVC toma metade de um ciclo, 8,3ms.

#### 3.4.4 Harmônicas do equipamento

A maior desvantagem é que o SVC pode sofrer severamente de distorção harmônica e os filtros instalados absorvem as harmônicas do sistema. O VSC, do STATCOM, entretanto, é uma impedância não linear do ponto de vista da rede, que pode ser controlada para que seja quase infinita para as harmônicas e, então, não há risco de ressonância série entre a rede e o VSC. Isto dá uma grande vantagem para o STATCOM, porque com a evolução da rede, haverá certeza que o VSC não causará ressonância com o sistema.

#### 3.4.5 Instalação

O espaço de instalação do *STATCOM* é entorno de 40% menor do que o espaço requisitado para a *SVC*. Ainda, o *SVC* ocupa de 50 a 60% do espaço físico utilizado pelos capacitores de derivação, ou banco de capacitores para compensação de reativos. Quanto à localização dos equipamentos de cada dispositivo, o *STATCOM* costuma tê-los mais abrigados como demonstram as figuras do item 5 deste estudo.

## 4 TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA

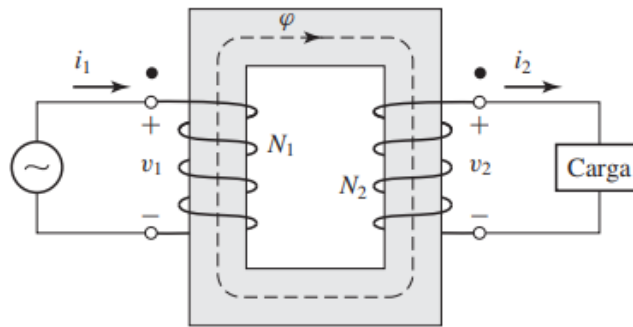
O transformador de potência foi responsável por impulsionar a transmissão de energia elétrica com tensões elevadas cobrindo grandes distâncias (RIES, 2007). Existem diversos tipos de transformadores que atuam no sistema elétrico realizando conversão, controle e medição de parâmetros como tensão e corrente, tais como: transformadores de corrente (TC); transformadores de potencial (TP); e transformadores de aterramento. Além destes, e talvez o de maior relevância e complexidade, o transformador de potência atua na distribuição e transmissão de energia elétrica. A forma como o transformador é visto pelo circuito elétrico o caracteriza como elevador ou rebaixador de tensão.

Apesar das diferentes aplicações existentes para transformadores, os conceitos da teoria de circuitos (UMANS, 2014) e da teoria eletromagnética (SADIKU, 2014) mantêm-se aplicáveis a todos. De modo que, o funcionamento do transformador baseia-se no acoplamento eletromagnético entre duas bobinas e na geração de corrente por indução devido a circulação de fluxo magnético. É constituído, fundamentalmente, por uma bobina (enrolamento) primária que recebe a energia elétrica em determinadas tensão e corrente e uma bobina (enrolamento) secundária pela qual esta energia, com tensão e corrente diferentes, é transferida a uma carga. A Figura 6 demonstra o funcionamento do transformador.

Para níveis de tensão de transmissão e distribuição que trabalham com potências elevadas, da ordem de MVA (megavoltampère), o fluxo magnético entre as bobinas precisa ser direcionado devido a sua alta intensidade. Portanto, o acoplamento magnético entre as bobinas é feito com material de alta permeabilidade magnética, normalmente utilizado aço silício de grãos orientados ou não podendo ainda ser de maior qualidade, como o aço riscado à laser.



Figura 6: Transformador com enrolamentos primário e secundário.



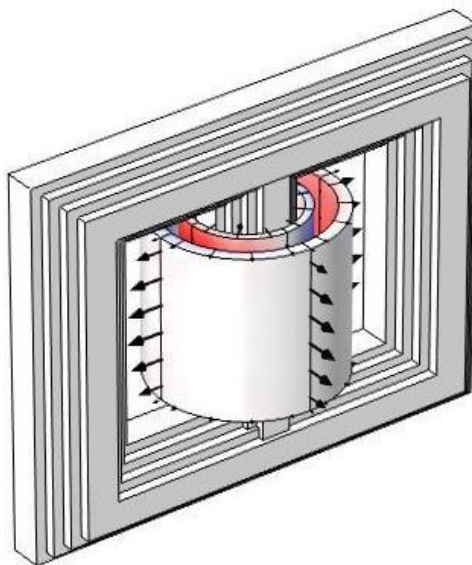
Fonte: Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley (UMANS, 2014).

Em um transformador, como o representado acima, a corrente elétrica ( $i_1$ ) a um determinado nível de tensão ( $v_1$ ) circula pelo enrolamento primário gerando um fluxo magnético ( $\phi$ ) de alta intensidade. Esse fluxo é direcionado pelo núcleo ferromagnético criando um caminho até o enrolamento secundário do transformador. Por fim,  $\phi$  induz a força eletromotriz que faz a corrente elétrica ( $i_2$ ) circular no enrolamento secundário. A relação entre a tensão e o número de espiras (*Volt/espira*) de cada enrolamento é a mesma para o transformador, assim, o número de espiras das bobinas de primário e secundário são diferentes e definem a tensão no respectivo enrolamento.

Vale ressaltar que a disposição dos enrolamentos de um transformador não segue o esquema da Figura 6, com um enrolamento em cada coluna do núcleo, todavia, esta representação é mais didática. Na prática, enrolamentos de diferentes tensões são concêntricos em uma mesma coluna do núcleo.

A Figura 7 representa um transformador monofásico com dois enrolamentos concêntricos à coluna do núcleo. O enrolamento de alta tensão (AT) costuma ser o mais externo e o de baixa tensão (BT) o mais próximo do núcleo. As colunas laterais do núcleo, colunas de retorno, são caminhos para direcionar o fluxo magnético gerado pela corrente que circula nos enrolamentos.

Figura 7: Transformador monofásico de dois enrolamentos concêntricos.



Fonte: Transformador monofásico. Google Imagens.

#### 4.1 PERDAS

Conforme definição apresentada na NBR 5356-1, Transformadores de Potência Parte 1: Generalidades, as perdas em vazio correspondem à potência ativa absorvida quando a tensão nominal à frequência nominal é aplicada aos terminais de um enrolamento, estando os outros enrolamentos em circuito aberto. As perdas em carga correspondem à potência ativa absorvida, relativa a um par de enrolamentos, à frequência nominal e à temperatura de referência, quando a corrente nominal (corrente de derivação) flui através do terminal de linha de enrolamentos, e estando os terminais do outro enrolamento curto-circuitados; os demais enrolamentos devem estar em circuito aberto (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008).

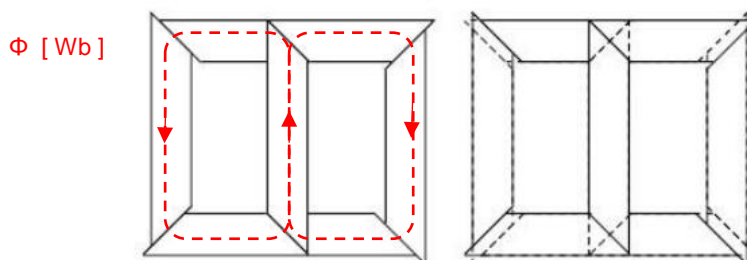
No trabalho de RIES (2007), as perdas ganham definições particulares para cada fenômeno, de modo que as perdas nos transformadores são constituídas basicamente de perdas no núcleo (ou perdas em vazio); perdas joule nos enrolamentos, divididas em perda ôhmica, perda parasita nos condutores e perda por circulação de corrente em condutores de uma mesma espira; e perdas devido às correntes harmônicas. As definições matemáticas e teóricas a seguir são baseadas no trabalho de RIES (2007).

#### 4.1.1 Perdas no núcleo

Também conhecidas como perdas ferro, as perdas no núcleo estão diretamente relacionadas ao material ferromagnético utilizado, à indução,  $B$  [T], e ao tipo de construção do núcleo.

O núcleo é construído com chapas de aço silício de grão orientado com espessuras de 0,23 a 0,35 mm, sendo que a espessura varia com a qualidade e o fabricante do aço utilizado. A montagem do núcleo é tal que a orientação dos grãos magnéticos das chapas coincida com a orientação do fluxo magnético gerado pela corrente que circula nos enrolamentos. Assim, é desejável que o mínimo possível de orientações ortogonais entre o fluxo magnético e a direção da laminação. Uma forma de se minimizar as seções ortogonais é montar o núcleo com corte de chapas a  $45^\circ$ , nessa configuração o fluxo circula com menos relutância.

Figura 8: Núcleo trifásico de um transformador com corte de chapas a  $45^\circ$ .



Fonte: Transformadores - fundamentos para projeto e cálculo (RIES, 2007).

A indução no núcleo é determinada na curva de excitação do transformador, com o valor da corrente de excitação. Como o cálculo da corrente de excitação tem uma série de dificuldades, as curvas de magnetização do material ferromagnético são utilizadas com grande vantagem.

A partir da curva característica do material ferromagnético, é possível determinar as perdas por quilograma de aço-silício ( $W/kg$ ) em função da indução calculada para o transformador. E, por fim, calcular as perdas no núcleo ( $p_0$ ) a partir da seguinte equação.

$$p_0 = (W/kg)_0 \cdot M_0 + (W/kg)_{90} \cdot M_{90} \quad [W] \quad (1)$$

Onde,

$(W/kg)_0$  = fator de perdas correspondente ao material com grãos orientados no sentido do fluxo magnético, varia conforme a indução;

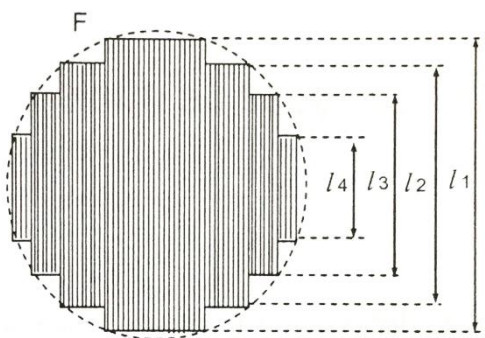
$(W/kg)_{90}$  = fator de perdas correspondente ao material com grãos orientados em  $90^\circ$  com o sentido do fluxo magnético, varia conforme a indução;

$M_0$  = massa do material percorrido com fluxo coincidente com a orientação dos grãos;

$M_{90}$  = massa do material percorrido com fluxo em quadratura com a orientação dos grãos.

Vale ressaltar que a indução magnética correspondente à massa de material com grãos orientados no sentido do fluxo magnético difere da correspondente à massa de material com grãos em quadratura com o sentido do fluxo magnético. Deve-se, portanto, calcular a indução respectiva para cada situação. A variação da indução é decorrente de a seção do núcleo não ser constante, uma vez que ele é construído objetivando a maior ocupação da seção circular (RIES, 2007). Resumidamente, deseja-se inscrever, num círculo, uma seção escalonada, de área máxima para um dado número de degraus. A Figura 9 apresenta a vista superior de uma coluna de seção circular com quatro degraus.

Figura 9: Vista superior de uma coluna de seção circular.



Fonte: Transformadores - fundamentos para projeto e cálculo (RIES, 2007).

Dado que a construção do núcleo não é regida por normas técnicas, cada fabricante tem sua tecnologia e patentes podem orientar fabricantes na construção do núcleo. A patente de Kerns (Estados Unidos da América Patente Nº US2600057, 1952), propõe um transformador de múltiplos núcleos de baixa capacitância parasita capaz de produzir e suportar pulsos de tensão

extremamente alta. Patentes mais recentes propõem a utilização de materiais amorfos na construção de núcleo, como a de Luckey *et al.* (Estados Unidos da América Patente Nº US8786390, 2014).

Entretanto, parâmetros que não se alteram para o cálculo de perdas no núcleo são o peso e o fator de perdas ( $W/kg$ ) do material. Isto posto, pode-se utilizar a equação (2) para cálculo das perdas. Onde  $k$  representa o fator de construção do núcleo, sendo obtido pela experiência de construções e ensaios passados do fabricante.

$$p_0 = (W/kg) \cdot M \cdot k \quad [W] \quad (2)$$

Onde,

$p_0$  = perdas no núcleo;

$(W/kg)$  = fator de perdas correspondente ao material, varia conforme a indução e a frequência;

$M$  = massa do material;

$k$  = fator de construção do núcleo.

#### 4.1.2 Perda ôhmica

A mais significativa das perdas joule é a perda ôhmica. É relativa à circulação de corrente no material condutor, normalmente o cobre, e é calculada para cada enrolamento. A densidade de corrente e o peso de cobre são determinantes para este cálculo de perdas. Inicialmente pode se considerar a seguinte equação para fins didáticos, onde a resistência varia com a temperatura de referência (85°C).

$$W_0 = I^2 \cdot R_{cc} \quad [W] \quad (3)$$

Onde,

$W_0$  = perda ômica;

$I$  = corrente elétrica [A];

$R_{cc}$  = resistência de curto circuito [ $\Omega$ ].

Um estudo mais aprofundado, levando em conta parâmetros do material condutor, permite calcular a perda ôhmica das seguintes maneiras dependendo se o condutor é de alumínio ou de cobre:

$$W_0 = 12,8 \cdot 10^{-12} \cdot d^2 \cdot P_{Cu} \quad [W] \quad (4)$$

$$W_0 = 2,36 \cdot 10^{-12} \cdot d^2 \cdot P_{Al} \quad [W] \quad (5)$$

$$P_{Cu} = 27,929 \cdot D \cdot s \cdot N \quad [kg] \quad (6)$$

$$P_{Al} = 8,492 \cdot D \cdot s \cdot N \quad [kg] \quad (7)$$

Onde,

$d$  = densidade de corrente que percorre o enrolamento [ $A/mm^2$ ];

$P_{Cu}$  = peso de cobre [ $kg$ ];

$P_{Al}$  = peso de alumínio [ $kg$ ];

$D$  = diâmetro médio da bobina em metros [ $m$ ];

$s$  = seção de uma espira [ $m^2$ ];

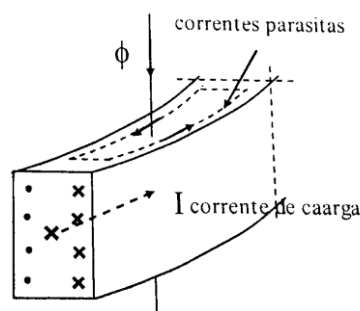
$N$  = número de espiras da bobina.

Como o projeto de um transformador é um processo iterativo, é recomendável utilizar as equações (5) a (7) para os dois tipos de condutores, assim, reduz-se a possibilidade de erros.

#### 4.1.3 Perda parasita nos condutores e devido ao fluxo de dispersão

Estas perdas são decorrentes da corrente de carga que circula pelos condutores gera uma corrente parasita devido ao fluxo que emana da espira.

Figura 10: Representação da corrente parasita em um condutor da espira.



Fonte: Transformadores - fundamentos para projeto e cálculo (RIES, 2007).

Essa corrente gera perdas que podem ser calculadas com base nas perdas ôhmicas multiplicadas por um fator.

$$W_p = k_p \cdot W_0 \quad [W] \quad (8)$$

Onde,

$W_p$  = perdas parasitas nos condutores;

$k_p$  = coeficiente de perdas;

$W_0$  = perda ôhmica;

Ou da seguinte forma, onde, para o cobre, tem-se:

$$W_p = 9,307 \cdot 10^{-11} \cdot \left( \frac{K_R N \beta}{h} \right)^2 \cdot f^2 \cdot I^2 \cdot P_{Cu} \quad [W] \quad (9)$$

Onde,

$K_R$  = coeficiente de Rogowski;

$N$  = número de espiras;

$\beta$  = dimensão radial do condutor da bobina [mm];

$h$  = altura da bobina;

$f$  = frequência da corrente que percorre o enrolamento [Hz];

$I$  = corrente que percorre o enrolamento na frequência respectiva [A];

$P_{Cu}$  = peso de cobre [kg].

O fluxo de dispersão produzido pela corrente de carga pode também produzir perdas parasitas em outras partes do transformador. Estas não podem ser calculadas com a facilidade desejada, e, normalmente, não representam mais do que 5% das perdas nos condutores. Portanto, não são consideradas no cálculo.

#### 4.1.4 Perda por circulação de corrente entre condutores de uma mesma espira

Quando se utilizam condutores em paralelo, a fim de limitar a densidade de corrente, pode surgir circulação de corrente entre os condutores. Isso, porque ao enrolar mais de um condutor paralelamente na camada de uma bobina por

diversas vezes, os condutores terminariam com comprimentos diferentes, ou seja, não teriam a mesma resistência ôhmica e a circulação de corrente, por fim, seria desigual. Nessas condições, a tensão induzida na bobina fará circular correntes diferentes nos dois condutores o que equivale a dizer que vai existir uma corrente circulante entre eles, produzindo perdas adicionais.

A forma mais simples e econômica de se mitigar essa perda é realizando transposições nos condutores. Dessa forma, a diferença de comprimento é compensada na transposição e a resistência torna-se equivalente aos condutores.

Figura 11: Transposição nos condutores.



Fonte: Transformadores - fundamentos para projeto e cálculo (RIES, 2007).

#### 4.1.5 Perdas devido às correntes harmônicas

Frequentemente o sistema elétrico a que o transformador está conectado gera harmônicas no chaveamento de máquinas e equipamentos ou nos compensadores de reativos e, dependendo da sua intensidade, devem ser consideradas no cálculo de perdas finais do transformador.

As perdas por correntes harmônicas estão relacionadas às perdas ôhmicas e parasitas nos condutores. Conseqüentemente, variam com o quadrado da frequência harmônica e com o quadrado da densidade de corrente, como evidenciam as equações (8) e (9) das perdas parasitas. Como, cada componente de corrente harmônica possui valores de corrente e frequência respectiva diferentes, a perda total é a soma de cada perda individual devido às correntes harmônicas.

#### 4.1.6 Determinações normativas

A norma NBR 5356-1, Transformadores de Potência Parte 1: Generalidades (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008) define os conceitos das perdas em vazio e em carga previamente apresentados



no item 4.1, todavia, não impõe limitações para valores de perdas. O ONS, por outro lado, no Submódulo 2.3, Requisitos mínimos para subestações e seus equipamentos não inclui os transformadores utilizados nos compensadores estáticos (OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO, 2016). Assim sendo, transformadores que compõem os compensadores de reativos *SVC* e *STATCOM* não são englobados nos limites de perda, ficando a cargo do licitante determinar as perdas máximas no processo de autorização do projeto.

Figura 12: Perdas para transformadores, em percentagem de sua potência trifásica nominal à tensão e frequência nominais.

Potência Trifásica Nominal ( $P_n^{(1)}$ )	Perdas Máximas
5 < $P_n$ < 30 MVA	0,70 %
30 ≤ $P_n$ < 50 MVA	0,60 %
50 ≤ $P_n$ < 100 MVA	0,50 %
100 ≤ $P_n$ < 200 MVA	0,40 %
$P_n$ ≥ 200 MVA	0,30 %

Nota: (1)  $P_n$ : potência trifásica nominal no último estágio de refrigeração.

Fonte: Submódulo 2.3 - Requisitos Mínimos para Subestações e seus Equipamentos (OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO, 2016).

No que tange aos compensadores estáticos de reativos, o Submódulo 2.3, item 8.3 informa que não se deve propiciar o surgimento de condições de ferroressonância, nem de saturação assimétrica de núcleos de unidades transformadores de potência (OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO, 2016). Caso o sistema imponha ao transformador situações que provoquem as condições citadas, este deve ser projetado para suportar tais níveis evitando que o transformador incorra em danos por ferroressonância ou saturação. Portanto, estes níveis de sobretensão e subfrequência devem ser previamente informados ao fabricante pelo projetista do compensador.

Segundo o OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (2016), Submódulo 2.3, item 8.3, o compensador de reativos deve ser capaz de suportar as condições de operação em sobrecarga de acordo com a envoltória de sobretensões definida pelos estudos de planejamento. Essa envoltória deve contemplar as sobretensões de manobra de elementos da rede situados eletricamente próximos e que possam submeter o ponto onde o CER está

conectado a sobretensões transitórias significativas. Essas manobras devem considerar também topologias degradadas da rede. Entretanto, na indisponibilidade da envoltória de sobretensões definida pelos estudos de planejamento, o compensador, e conseqüentemente o transformador, deve ser capaz de suportar, no mínimo, as condições de operação em sobrecarga apresentadas na Figura 13.

Figura 13: Envoltória de sobretensões para operação em sobrecarga de compensadores estáticos de reativos

Tensão (pu)	Duração mínima da sobrecarga
1,80	50 ms
1,40	200 ms
1,30	1 s
1,20	10 s
1,05 <sup>(1)</sup>	Continuamente

Nota <sup>(1)</sup>: Para as tensões de operação de 500 ou 525 kV, o ciclo deve prever a operação contínua para 550 kV (1,10 pu de 500 kV).

Fonte: Submódulo 2.3 - Requisitos Mínimos para Subestações e seus Equipamentos (OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO, 2016).

## 4.2 SOBRE-EXCITAÇÃO

Transformadores de potência são projetados para trabalharem a um valor de indução magnética que não sature o material ferromagnético do núcleo. Quando operando na região de saturação, as linhas de fluxo deixam de estar confinadas no núcleo e, também, não são mais dissipadas no meio dielétrico (óleo mineral ou vegetal), nem conduzidas por blindagens magnéticas presentes nas paredes internas do tanque. Enlaces das linhas de campo passam a ocorrer no meio isolante e até mesmo pelo tanque do transformador (BARBOSA, 2005).

O aço silício do núcleo do transformador tem ponto de saturação no valor de indução (B) 2,04 T. Assim, o transformador deve ser projetado de modo que suporte todas as condições do sistema elétrico ao qual estará conectado, seja uma subestação de compensação de reativos (*FACTS*) ou uma subestação de transmissão de energia. Principalmente em subestações *FACTS*, as variações de tensão além da nominal são bastante elevadas. Portanto, as relações entre tensão e fluxo magnético e indução magnética se tornam bastante relevantes. A

indução magnética pode ser obtida pelas expressões (10) ou (11) (SADIKU, 2014).

$$B = \frac{E_1}{4,44fN_1A_{fe}} \quad [T] \quad (10)$$

$$B = \frac{Tensão/espira}{4,44fA_{fe}} \quad [T] \quad (11)$$

Onde,

$B$  = campo magnético [T];

$E_1$  = valor eficaz da tensão do enrolamento primário ou secundário [ $V_{ef}$ ];

$f$  = frequência [f];

$N_1$  = número de espiras do enrolamento primário ou secundário;

$A_{fe}$  = seção do núcleo [ $m^2$ ];

Da equação acima, conclui-se que a indução do transformador é diretamente proporcional à tensão aplicada no enrolamento e inversamente proporcional à frequência do sistema. Também, é inversamente proporcional ao número de espiras e a seção do núcleo, apesar de estes parâmetros não estarem suscetíveis a variações do meio externo. Assim, uma sobretensão ou uma subfrequência podem produzir níveis de fluxo magnético que levariam o transformador a operar na faixa de saturação.

Os regulamentos técnicos brasileiros, NBR 5356, NT 097/2016 e Submódulo 2.3 definem requisitos mínimos de sobretensão suportáveis para o transformador. No item 5.4 da NBR 5356, Transformadores de Potência (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008), são definidos, por meio de exemplos, requisitos mínimos para o funcionamento em regime permanente sem danos para situações de tensão e frequência diferentes das nominais. Em suma, neste item, a relação tensão e frequência ( $V/f$ ) não deve ultrapassar 110% dos respectivos valores nominais. Ou seja, se o transformador for imposto à sobretensão à frequência nominal, a sobretensão deve ser menor do que 110% da tensão nominal; se o transformador for imposto à subfrequência à tensão nominal, a subfrequência deve ser menor do que 90% da frequência nominal; e, se o transformador for imposto à sobretensão ao mesmo tempo de uma subfrequência, a combinação das duas não deve provocar uma sobre-

excitação maior do que 110%. Isto, sem ultrapassar os limites de elevação de temperatura definidos no item 4.2, Quadro 1, da NBR 5356-2:2008 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008).

A sobre-excitação é ainda mencionada na Nota Técnica 097/2016 do OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (2016), que diz respeito aos Requisitos Técnicos Complementares aos requisitos funcionais para transformadores e reatores do SIN. No item 5.5, são informados valores admissíveis de sobretensões para transformadores em vazio e reatores.

Figura 14: Valores indicativos de sobretensões admissíveis a 60Hz para transformadores e autotransformadores em vazio e reatores.

<b>Tensão eficaz (pu)<sup>(1)</sup></b>	<b>Tempo (s)</b>
2,0	0,1667
1,82	0,3333
1,50	1,667
1,40	3,6
1,35	10
1,25	20
1,20	60
1,15	480
1,10 <sup>(2)</sup>	regime

(1) Valores em pu tendo por base a tensão da derivação (valor eficaz de tensão pelo qual o tape é designado na tabela de derivação do transformador).

(2) Não se aplica a reatores em derivação

(3) Reatores em entrada de linha devem atender a requisitos específicos constantes dos documentos de outorga e dos procedimentos de rede

Fonte: NT 097/2016: Requisitos Técnicos Complementares aos requisitos funcionais para transformadores e reatores do SIN (OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO, 2016).

Por fim, a nota técnica corrobora o especificado na NBR 5356, ao solicitar que o transformador seja dimensionado para suportar uma sobre-excitação de 110% (ou 1,10pu) em regime permanente.

Também atrelado à sobre-excitação, o Joelho da curva de saturação corresponde ao valor máximo de indução que o transformador pode ser submetido sem que o material ferromagnético sature. Ou seja, se especificado 1,2 pu (ou 120%) de Joelho da curva de saturação, a indução nominal do equipamento deve ser tal que, quando imposto 1,2 pu de sobre-excitação, fique

abaixo de 2,04 T. A Equação (12) exemplifica este cálculo e apresenta o valor de indução nominal para Joelho de 1,2 pu.

$$B = \frac{2,04}{1,2} = 1,70 \quad [T] \quad (12)$$

Segundo OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (2016), Submódulo 2.3, a transmissora deverá avaliar o impacto que os valores adotados, para a reatância de núcleo de ar ( $X_{ac}$ ) e para o nível do Joelho da curva de saturação, possam causar ao Sistema Interligado Nacional –SIN, em função das sobretensões de manobra e correntes de *inrush* advindas de sua energização. Os estudos recentes da (ELETROBRAS AMAZONAS, 2018) para a expansão do SIN na região de Manaus consideram 1,2 pu de Joelho da curva de saturação. Este valor é encontrado em diversos outros estudos de expansão do SIN.

## 5 ESTUDO DE CASO

Foram analisados dois projetos de subestações de dispositivos *SVC* e *STATCOM* de potência reativa  $\pm 250$  Mvar e tensão nominal 500kV (tensão da linha de transmissão que será conectado, a baixa tensão é definida conforme a necessidade de cada dispositivo compensador de reativo). Estes dois projetos de transformador de potência para dispositivos *FACTS* serão comparados com seus respectivos transformadores quando utilizados em subestações padrão de transmissão de energia elétrica.

### 5.1 CARACTERÍSTICAS DA SUBESTAÇÃO

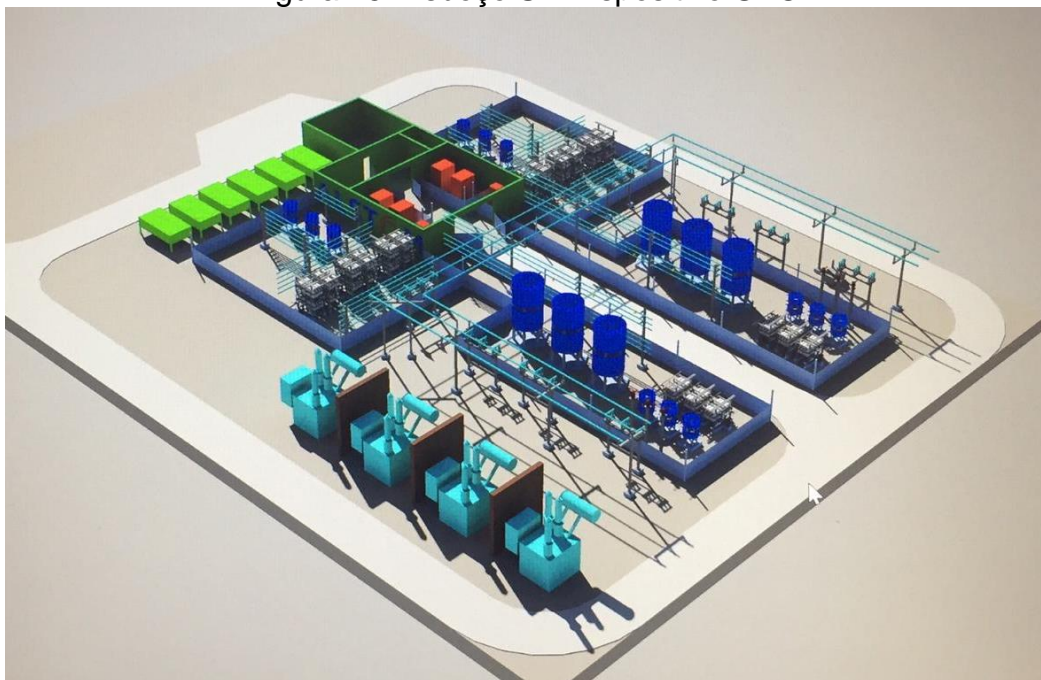
O espaço físico costuma ser um fator relevante para a definição do compensador de reativos instalado. Apesar de não ser relativo ou impactante no dimensionamento do transformador, são apresentados, a seguir, os espaços previstos para a instalação de dispositivos *SVC* e *STATCOM*.

Quadro 1: Espaço previsto de instalação *SVC* e *STATCOM*.

	<b>SVC</b>	<b>STATCOM</b>
<b>Dimensões</b>	125 x 48,8 m	68,6 x 38,1 m
<b>Área</b>	6.100 m <sup>2</sup>	2.613,7 m <sup>2</sup>

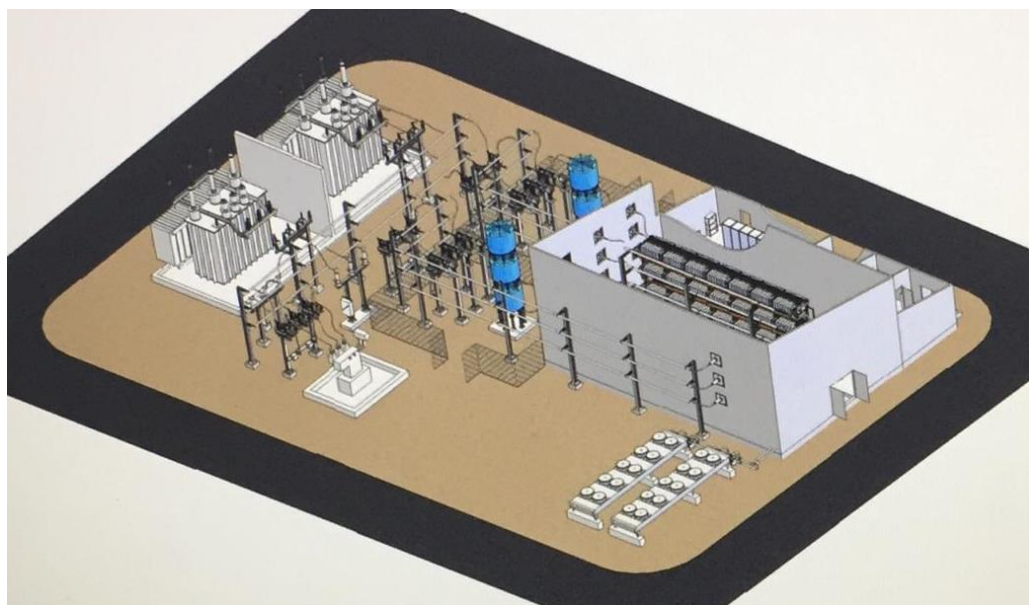
Fonte: Estudo de equipamentos - *SVC* e *STATCOM* (GENERAL ELECTRIC).

Figura 15: Esboço SE Dispositivo SVC.



Fonte: Estudo de equipamentos - SVC e STATCOM (GENERAL ELECTRIC).

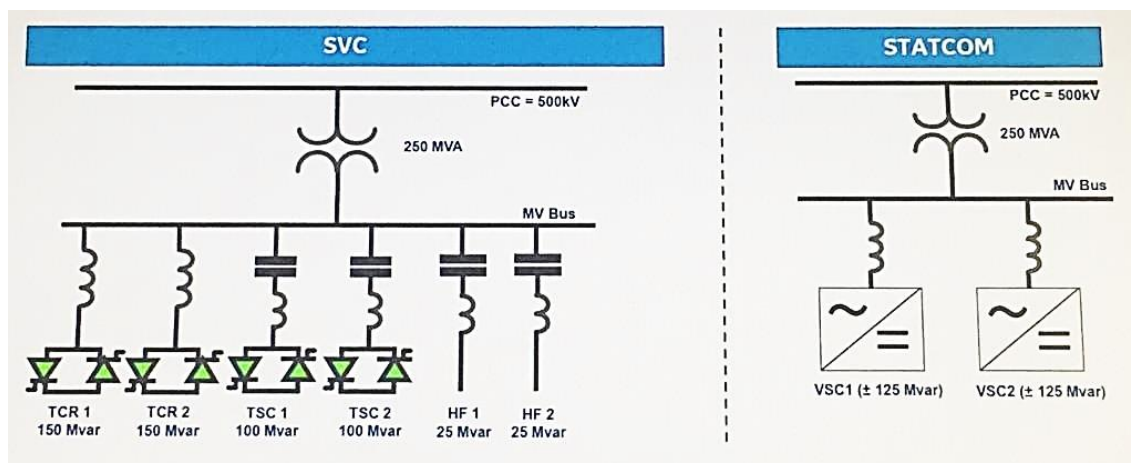
Figura 16: Esboço SE Dispositivo STATCOM.



Fonte: Estudo de equipamentos - SVC e STATCOM (GENERAL ELECTRIC).

A subestação para dispositivo STATCOM é fisicamente menor do que a para SVC, isso ocorre devido ao número de equipamentos além do transformador presente.

Figura 17: Subestações de dispositivos SVC e STATCOM.



Fonte: Estudo de equipamentos - SVC e STATCOM (GENERAL ELECTRIC).

## 5.2 CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA ELÉTRICO

O sistema no qual o transformador será instalado possui as seguintes características para os dispositivos SVC e STATCOM. Ainda, são apresentadas as características normais de um sistema elétrico que são relativas aos cálculos 2 e 4, transformadores para subestações padrão.

Quadro 2: Características do Sistema.

	<b>SVC</b>	<b>STATCOM</b>	<b>Normal</b>
<b>Frequência [Hz]</b>	60	60	60
<b>Faixa normal de frequência [Hz]</b>	59 ... 61 Hz	59 ... 61	59,9.... 60,1
<b>Faixa anormal de subfrequência [Hz]</b>	57,5 (30min)	57 (30min)	-
<b>Faixa anormal de sobrefrequência [Hz]</b>	61,5 (30min)	63 (30min)	-
<b>Tensão nominal primário [kV]</b>	500	500	500
<b>Máxima tensão contínua primário [kV]</b>	550	550	550
<b>Mínima tensão contínua primário [kV]</b>	473	473	-
<b>Tensão nominal secundário [kV]</b>	27,5	43	27,5 ou 43
<b>Máxima tensão contínua secundário [kV]</b>	33,26	51,7	30,25 ou 47,3
<b>Mínima tensão contínua secundário [kV]</b>	23,65	39,0	-



A faixa de frequência de 59,0 - 61,0 Hz dos dispositivos *FACTS* é usada para garantir a capacidade do *STATCOM* de fornecer a corrente reativa garantida em operação contínua, juntamente com as tolerâncias de fabricação do projeto. O sistema de controle pode suportar as pequenas excursões de frequência no tempo sem perder sua estabilidade, embora a corrente ou potência reativa não sejam necessariamente 1,0 pu nessas condições. O reator comutado a tiristor (do compensador estático de reativos) ou o conversor de fonte de tensão (do compensador estático síncrono) podem se adaptar a essas variações de frequência através do seu circuito de sincronização.

A variação de 59,9 a 60,1Hz do sistema elétrico normal é definida pela ANEEL como sendo a faixa para operação em condições normais e em regime permanente (AGÊNCIA NACIONAL DE ENGENHARIA ELÉTRICA, 2008). Portanto, considera-se esta faixa para fins de estudo.

Os dados apresentados na Quadro de características do sistema exemplificam como as sobretensões em dispositivos *FACTS* podem ser significativas. Tanto o sistema *SVC* quanto o *STATCOM* submetem o secundário do transformador à sobretensão maior do que 1,20pu. A mínima tensão contínua no secundário, por outro lado, não impacta o projeto do transformador

### 5.3 CORRENTES HARMÔNICAS

As correntes harmônicas são apresentadas no Apêndice A e foram fornecidas pelo projetista da subestação compensadora de reativos no documento Estudos de Equipamentos – *SVC* e *STATCOM* (GENERAL ELECTRIC). São 49 valores de correntes harmônicas geradas pelos equipamentos do dispositivo *FACTS* e que adentram no transformador de potência pelo enrolamento de baixa tensão, que está conectado no sistema do compensador.

### 5.4 CARACTERÍSTICAS DO TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA

As subestações de dispositivos *FACTS* *SVC* e *STATCOM* possuem valores distintos de tensão secundária e impedância, isto, decorrente do próprio dispositivo compensador de reativos e suas características. O Quadro 3

apresenta os dados dos transformadores de potência para ambas. As temperaturas indicadas seguem a NBR 5356-2, Transformadores de Potência Parte 2: Aquecimento.

Quadro 3: Dados do transformador de potência.

		<b>SVC</b>	<b>STATCOM</b>
<b>Equipamento</b>		Transformador	Transformador
<b>Nº de fases</b>		3	3
<b>Frequência</b>		60 Hz	60 Hz
<b>Potência</b>		± 250 Mvar	± 250 Mvar
<b>Alta Tensão</b>		500 kV	500 kV
<b>Baixa Tensão</b>		27,5 kV	43 kV
<b>Grupo de Ligação</b>		YNd11 Estrela aterrado / delta	YNd11 Estrela aterrado / delta
<b>Resfriamento</b>		ONAN / ONAF I / ONAF II	ONAN / ONAF I / ONAF II
<b>Impedância à potência e tensões nominais</b>		14%	10%
<b>Nível de impulso atmosférico (NBI)</b>	Primário	1550 kV	1550 kV
	Neutro Primário	150 kV	150 kV
	Secundário	200 kV	250 kV
	Neutro Secundário	-	-
<b>Limite de Elevação de temperatura</b>	Enrolamento médio	65°C	65°C
	Topo do óleo	65°C	65°C
	Ponto mais quente	80°C	80°C
<b>Demais características</b>		Conforme norma aplicável	Conforme norma aplicável

A fim de melhor avaliar a influência dos dispositivos FACTS, foram realizados quatro cálculos de transformadores de potência. Dois cálculos são específicos dos dispositivos *SVC* e *STATCOM*. e dois cálculos de são de transformadores para subestações normais, porque as baixas tensões e

impedâncias são bastantes diferentes, de modo que um único cálculo não permitiria um estudo comparativo preciso da situação.

- Transformador I: Transformador de potência para dispositivo *SVC*;
- Transformador II: Transformador de potência para SE padrão com dados principais do transformador para dispositivo *SVC*;
- Transformador III: Transformador de potência para dispositivo *STATCOM*;
- Transformador IV: Transformador de potência para SE padrão com dados principais do transformador para dispositivo *STATCOM*.

De posse dos resultados dos cálculos, foram comparados, entre cálculos I e II, III e IV e I e III, pesos de aço silício e cobre, não por impactarem em perdas, mas por serem um parâmetro de projeto bastante significativo, uma vez que são os componentes principais do equipamento; perdas no núcleo e joule para as condições nominais e de sobre-excitação e sobretensão; e perdas devido às correntes harmônicas. Com estas análises, objetiva-se fornecer mais uma informação ao projetista da subestação e ao cliente final do projeto, qual dispositivo *FACTS* é mais conveniente do ponto de vista do transformador. O projetista do dispositivo compensador de reativos, terá à disposição, também, informações que melhor exemplificam os efeitos de sobretensão, subfrequência e correntes harmônicas no equipamento.

Os transformadores de potência em questão foram projetados com iguais disposição de enrolamentos, sendo o enrolamento de baixa tensão (27,5 ou 43kV) o mais próximo do núcleo e o de alta tensão concêntrico; tipo de núcleo, três colunas enroladas e duas de retorno; e esquema de uma fase. Estas configurações são apresentadas na Figura 18 e na Figura 19.

Figura 18: Núcleo 3 colunas enroladas e 2 colunas de retorno.

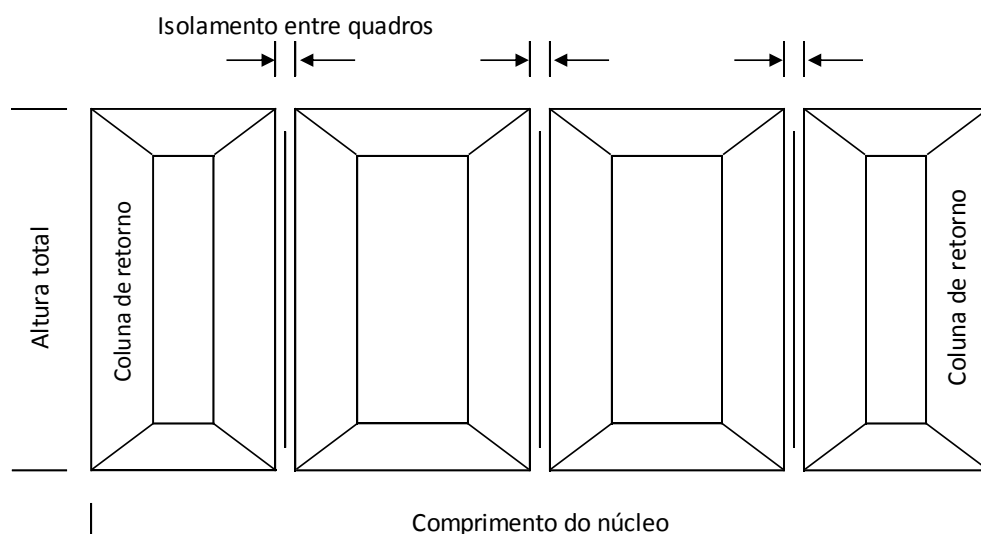
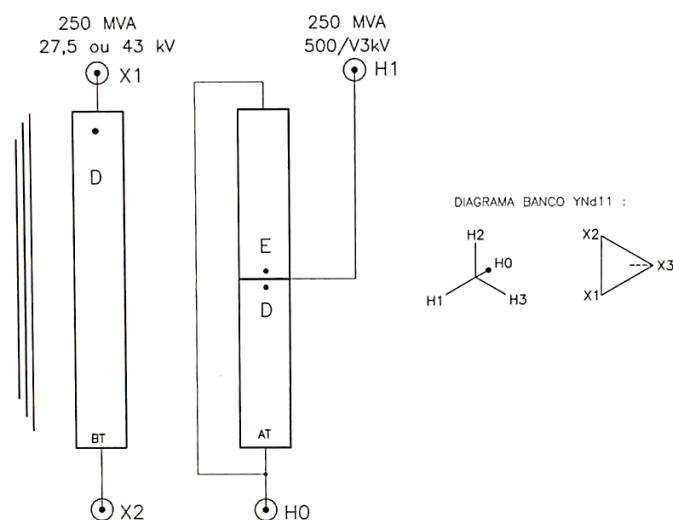


Figura 19: Esquema de uma fase



No esquema de uma fase, verifica-se, além da disposição dos enrolamentos em relação ao núcleo, as ligações de uma das fases do transformador trifásico e a representação do banco trifásico de grupo de ligação YNd11. Os enrolamentos de baixa tensão têm saída nos extremos e ligação interna no transformador entre si para formar o delta. As bobinas de alta tensão têm saída central, formando duas seções de espiras, isso, para melhor distribuir esforços elétricos e mecânicos. Em caso de uma descarga atmosférica diretamente na alta tensão, por exemplo, a descarga é distribuída entre as duas camadas mais uniformemente, se a saída do enrolamento fosse no extremo, a

parte superior da bobina sofreria grandes impactos. O neutro, H0, tem ligação interna entre as fases para formar o neutro trifásico da ligação estrela.

Como apresentado no item 4.1.6, não há limite para as perdas dos transformadores de potência utilizados em compensadores de reativos, devendo ser especificado o valor. É frequente que o cliente determine que se trabalhe com limite de perdas conforme a norma. No intuito de melhor avaliar o transformador comparativamente à sua versão para subestações não FACTS e ir ao encontro das práticas usuais foi considerado limite de perdas de 0,3% da potência nominal, 750kW, para a condição nominal de operação (sem adicional devido às correntes harmônicas e sem consumo de refrigeração).

O cálculo do transformador de potência é um processo iterativo, percorrendo diversos parâmetros de projeto que devem ser atendidos simultaneamente. Dessa forma, são utilizadas ferramentas computacionais para realizar os cálculos propostos e os resultados são apresentados na seção seguinte, seção 6.

## 5.5 AÇO SILÍCIO

Para os projetos dos transformadores foi considerado o aço silício de grãos orientados com espessura da chapa de 0,27mm que possui os fatores de perda (em watt por quilograma) por indução conforme o quadro 6. Os dados de aço silício estão disponíveis na faixa de 0,00 Tesla a 1,90 Tesla, e têm valores extrapolados até 2,04 Tesla.

Quadro 4: Perdas do aço silício por indução

Aço	M4	
	Acesita R120 0,27mm	
	60Hz	
Indução [T]	W/kg	VA/kg
1,60	1,222	1,765
1,61	1,244	1,830
1,62	1,267	1,902
1,63	1,290	1,982
1,64	1,315	2,071
1,65	1,341	2,170
1,66	1,368	2,281
1,67	1,396	2,405
1,68	1,426	2,543
1,69	1,457	2,698
1,70	1,490	2,871
1,75	1,682	5,268
1,80	1,938	7,666
1,85	2,283	10,064
1,90	2,752	12,461
1,95	3,389	14,859
2,00	4,253	17,256
2,04	5,155	19,174

Fonte: Aço Silício de Grão Orientado (APERAM, s.d.).

## 6 EQUIPAMENTOS CONSIDERADOS

Nesta seção estão apresentadas as características de quatro transformadores mencionados na seção anterior. Os resultados foram obtidos por análises matemáticas relativas às perdas e a indução e sobre-excitação apresentadas previamente e serão expandidas a seguir. Definiu-se que o tipo de aço silício utilizado de fabricante brasileiro é de grãos orientados.

### 6.1 TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA PARA SVC

Estão apresentados no Quadro 5, os resultados do cálculo para o transformador de potência para dispositivo SVC. A condição nominal de operação corresponde à frequência de 60Hz e sem consideração de harmônicas. A condição extrema de operação, situação de perdas totais máximas, corresponde ao transformador submetido à subfrequência e à sobretensão simultaneamente, onde há sobre-excitação de 1,24pu na indução do transformador, além do adicional de perdas devido às correntes harmônicas.

Os resultados são referenciados à temperatura de 85°C; à potência nominal de 250MVA; às tensões nominais de 500kV para o enrolamento de alta tensão e 27,5kV para o enrolamento de baixa tensão; e à impedância garantida de 14%.

Quadro 5: Transformador de potência para dispositivo SVC

Características do equipamento						
Equipamento:	Transformador Trifásico			Limites de Elevação de Temperatura:		
Frequência:	60 Hz			Ambiente máximo:	40	[°C]
Líquido isolante:	Óleo mineral naftênico tipo A			Ambiente mínimo:		[°C]
Tipo:	TO-NF			Topo do óleo:	65	[°C]
Diagrama fasorial:	YNd1			Enrolamento médio	65	[°C]
Altitude de instalação:	< 1000 msnm			Ponto mais quente:	80	[°C]
Terminal	Potência nominal [MVA]			Tensão nominal [kV]	Tensão máxima do equipamento [kV]	Ligação
	Sistema de resfriamento					
	ONAN	ONAF	ONAF			
AT	150	200	250	500/ $\sqrt{3}$	550/ $\sqrt{3}$	Y
BT	150	200	250	27,5	33,26	D
Desempenho						
Referências					Calculado	
Potência				kVA	250	
Relação de tensões				kV	500/ $\sqrt{3}$ - 27,5	
Volt/espira				V/espira	275	
Impedância de sequência positiva				%	14,10	
Indução				T	1,63	
Perdas em vazio				kW	128,18	
Perda em vazio na máxima indução				kW	376,85	
Perdas em carga				kW	607,02	
Perdas devido às harmônicas				kW	102,74	
Perdas totais na condição nominal				kW	735,20	
Perdas totais na condição nominal com harmônicas				kW	837,94	
Perdas totais máximas				kW	1086,61	
Massas aproximadas			Dimensões aproximadas [mm]			
Cobre	kg	21590		Montado	Transporte	
Aço silício	kg	78360	Altura	10100	4400	
Parte ativa (P.A.)	kg	110840	Comprimento	10550	9250	
Óleo mineral	litros	59310	Largura	6850	4050	
Tanque e acessórios	kg	29810				
Para transporte	kg	141800				
Massa total	kg	212600				

A impedância calculada é bastante próxima da requisitada, com diferença de 0,10%, valor que está dentro da margem de 7,5% definida pela NBR 5356-1. A tensão por espira foi escolhida por tentativas de cálculo, de modo que o valor de 275 se mostrou ser o mais adequado para atender os requisitos de perdas, mantendo uma relação de pesos de aço por cobre grande. A indução calculada atende a condição extrema de operação imposta ao transformador de potência.

No tangente às perdas, o valor de 735,20kW está dentro do limite de 750kW. Da inclusão do efeito das harmônicas na condição nominal, encontrou-



se 837,94kW, um aumento de 14%. Na condição extrema de operação, como esperado, há um aumento expressivo das perdas totais, sobretudo das perdas do núcleo devido à alta indução, provocando aumento de 65%.

## 6.2 TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA PARA SE PADRÃO COM DADOS PRINCIPAIS DO TRANSFORMADOR PARA SVC

São apresentados, no Quadro 6, os resultados do cálculo para o transformador de potência considerando as características do dispositivo SVC, mas não suas condições especiais de operação. A condição extrema de operação corresponde ao transformador submetido à sobretensão de 1,10pu na indução do transformador.

Os resultados são referenciados à temperatura de 85°C; à potência nominal de 250MVA; às tensões nominais de 500kV para o enrolamento de alta tensão e 27,5kV para o enrolamento de baixa tensão; e à impedância garantida de 14%.

Quadro 6: Transformador de potência para SE padrão com dados principais do transformador para dispositivo SVC.

<b>Características do equipamento</b>						
<b>Equipamento:</b>	Transformador Trifásico			<b>Limites de Elevação de Temperatura:</b>		
<b>Frequência:</b>	60 Hz			<b>Ambiente máximo:</b>	40	[°C]
<b>Líquido isolante:</b>	Óleo mineral naftênico tipo A			<b>Ambiente mínimo:</b>		[°C]
<b>Tipo:</b>	TO-NF			<b>Topo do óleo:</b>	65	[°C]
<b>Diagrama fasorial:</b>	YNd1			<b>Enrolamento médio</b>	65	[°C]
<b>Altitude de instalação:</b>	< 1000 msnm			<b>Ponto mais quente:</b>	80	[°C]
Terminal	Potência nominal [MVA]			Tensão nominal [kV]	Tensão máxima do equipamento [kV]	Ligação
	Sistema de resfriamento					
	ONAN	ONAF	ONAF			
AT	150	200	250	500/√3	550/√3	Y
BT	150	200	250	27,5	27,5	D
<b>Desempenho</b>						
<b>Referências</b>					<b>Calculado</b>	
<b>Potência</b>				kVA	250	
<b>Relação de tensões</b>				kV	500/√3 - 27,5	
<b>Volt/espira</b>				V/espira	275	
<b>Impedância de sequência positiva</b>				%	14,07	
<b>Indução</b>				T	1,70	
<b>Perdas em vazio</b>				kW	144,10	
<b>Perdas em carga</b>				kW	598,10	
<b>Perdas totais</b>				kW	742,20	
<b>Massas aproximadas</b>			<b>Dimensões aproximadas [mm]</b>			
Cobre	kg	20330		Montado	Transporte	
Aço silício	kg	74500	<b>Altura</b>	10060	4360	
Parte ativa (P.A.)	kg	105200	<b>Comprimento</b>	10480	9180	
Óleo mineral	litros	60100	<b>Largura</b>	6540	4040	
Tanque e acessórios	kg	29280				
Para transporte	kg	135500				
Massa total	kg	206400				

A impedância calculada é bastante próxima da requisitada, com diferença de 0,07%, valor que está dentro da margem de 7,5% definida pela NBR 5356-1. A tensão por espira foi mantida igual à do Cálculo I. A indução calculada atende a condição extrema de operação imposta ao transformador de potência. No tangente às perdas, o valor de 742,20kW está dentro do limite de 750kW.

### 6.3 TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA PARA STATCOM

São apresentados, no Quadro 7, os resultados do cálculo para o transformador de potência para dispositivo *STATCOM*. A condição nominal de

operação corresponde à frequência de 60Hz e sem consideração de harmônicas. A condição extrema de operação, situação de perdas totais máximas, corresponde ao transformador submetido à subfrequência e à sobretensão simultaneamente, onde há sobre-excitação de 1,24pu na indução do transformador, além do adicional de perdas devido às correntes harmônicas.

Os resultados são referenciados à temperatura de 85°C; à potência nominal de 250MVA; às tensões nominais de 500kV para o enrolamento de alta tensão e 43kV para o enrolamento de baixa tensão; e à impedância garantida de 10%.

Quadro 7: Transformador de potência para dispositivo *STATCOM*.

<b>Características do equipamento</b>						
<b>Equipamento:</b> Transformador Trifásico			<b>Limites de Elevação de Temperatura:</b>			
<b>Frequência:</b> 60 Hz			<b>Ambiente máximo:</b> 40 [°C]			
<b>Líquido isolante:</b> Óleo mineral naftênico tipo A			<b>Ambiente mínimo:</b> [°C]			
<b>Tipo:</b> TO-NF			<b>Topo do óleo:</b> 65 [°C]			
<b>Diagrama fasorial:</b> YNd1			<b>Enrolamento médio</b> 65 [°C]			
<b>Altitude de instalação:</b> < 1000 msnm			<b>Ponto mais quente:</b> 80 [°C]			
Terminal	Potência nominal [MVA]			Tensão nominal [kV]	Tensão máxima do equipamento [kV]	Ligação
	Sistema de resfriamento					
	ONAN	ONAF	ONAF			
AT	150	200	250	500/√3	550/√3	Y
BT	150	200	250	43	51,7	D
<b>Desempenho</b>						
<b>Referências</b>			<b>Calculado</b>			
<b>Potência</b>			kVA	250		
<b>Relação de tensões</b>			kV	500/√3 - 43		
<b>Volt/espira</b>			V/espira	311,59		
<b>Impedância de sequência positiva</b>			%	10,15		
<b>Indução</b>			T	1,63		
<b>Perdas em vazio</b>			kW	145,57		
<b>Perda em vazio máxima</b>			kW	441,32		
<b>Perdas em carga</b>			kW	598,89		
<b>Perdas devido às harmônicas</b>			kW	0,21		
<b>Perdas totais na condição nominal</b>			kW	744,46		
<b>Perdas totais na condição nominal com harmônicas</b>			kW	744,67		
<b>Perdas totais máximas</b>			kW	1040,42		
<b>Massas aproximadas</b>			<b>Dimensões aproximadas [mm]</b>			
Cobre	kg	16030		Montado	Transporte	
Aço silício	kg	85780	<b>Altura</b>	10100	4400	
Parte ativa (P.A.)	kg	112210	<b>Comprimento</b>	10350	9050	
Óleo mineral	litros	57580	<b>Largura</b>	6500	4000	
Tanque e acessórios	kg	28740				
Para transporte	kg	142100				
Massa total	kg	211800				

A impedância calculada é bastante próxima da requisitada, com diferença de 0,15%, valor que está dentro da margem de 7,5% definida pela NBR 5356-1. A tensão por espira foi escolhida por tentativas de cálculo, de modo que o valor de 311,56 se mostrou ser o mais adequado para atender os requisitos de perdas, mantendo uma relação de pesos de aço por cobre grande. A indução calculada atende a condição extrema de operação imposta ao transformador de potência.

No tangente às perdas, o valor de 744,46kW está dentro do limite de 750kW. Do efeito das harmônicas na condição nominal, o aumento é muito baixo frente às perdas nominais. Na condição extrema de operação, como esperado, há um aumento expressivo das perdas totais, sobretudo das perdas do núcleo devido à alta indução, provocando aumento de 40%.

#### 6.4 TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA PARA SE PADRÃO COM DADOS PRINCIPAIS DO TRANSFORMADOR PARA *STATCOM*

São apresentados, no Quadro 8, os resultados do cálculo para o transformador de potência considerando as características do dispositivo *STATCOM*, mas não suas condições especiais de operação. A condição extrema de operação corresponde ao transformador submetido à sobretensão de 1,10pu na indução do transformador.

Os resultados são referenciados à temperatura de 85°C; à potência nominal de 250MVA; às tensões nominais de 500kV para o enrolamento de alta tensão e 43kV para o enrolamento de baixa tensão; e à impedância garantida de 10%.

Quadro 8: Transformador de potência para SE padrão com dados principais do transformador para dispositivo *STATCOM*.

Características do equipamento						
Equipamento:	Transformador Trifásico			Limites de Elevação de Temperatura:		
Frequência:	60 Hz			Ambiente máximo:	40	[°C]
Líquido isolante:	Óleo mineral naftênico tipo A			Ambiente mínimo:		[°C]
Tipo:	TO-NF			Topo do óleo:	65	[°C]
Diagrama fasorial:	YNd1			Enrolamento médio	65	[°C]
Altitude de instalação:	< 1000 msnm			Ponto mais quente:	80	[°C]
Terminal	Potência nominal [MVA]			Tensão nominal [kV]	Tensão máxima do equipamento [kV]	Ligação
	Sistema de resfriamento					
	ONAN	ONAF	ONAF			
AT	150	200	250	500/√3	550/√3	Y
BT	150	200	250	43	43	D
Desempenho						
Referências					Calculado	
Potência				kVA	250	
Relação de tensões				kV	500/√3 - 43	
Volt/espira				V/espira	311,59	
Impedância de sequência positiva				%	10,00	
Indução				T	1,70	
Perdas em vazio				kW	153,90	
Perdas em carga				kW	590,05	
Perdas totais				kW	743,95	
Massas aproximadas			Dimensões aproximadas [mm]			
Cobre	kg	15820		Montado	Transporte	
Aço silício	kg	83150	Altura	10100	4400	
Parte ativa (P.A.)	kg	109160	Comprimento	7700	7500	
Óleo mineral	litros	58180	Largura	6480	3280	
Tanque e acessórios	kg	28820				
Para transporte	kg	139100				
Massa total	kg	209300				

A impedância calculada é exatamente a requisitada. A tensão por espira foi mantida igual à do Cálculo I. A indução calculada atende a condição extrema de operação imposta ao transformador de potência. No tangente às perdas, o valor de 743,95kW está dentro do limite de 750kW.

## 6.5 ANÁLISE DE RESULTADOS

A sobre-excitação do transformador de potência acarreta em valores de indução que podem levar à saturação do material ferromagnético do núcleo. A partir da indução de 2,04 T, o aço silício passa a perder as características do

material, aquecendo demasiadamente e ficando sujeito a entrar em ponto de fusão. Isso ocorre devido ao intenso fluxo magnético no núcleo. A Equação (10) demonstra o cálculo da indução do transformador de potência, onde, verifica-se que a tensão tem relação direta e a frequência relação inversa. Estes dois fatores são os mais relevantes em dispositivos *SVC* e *STATCOM*, uma vez que compensadores de reativos do tipo *FACTS* operam com variação de frequência além do limite imposto pelas normativas brasileiras e com sobretensões no enrolamento de baixa tensão expressiva.

Isto posto, o Quadro 9 apresenta dados e resultados dos projetos de transformadores de potência para as quatro condições propostas. Verifica-se aumento de aço silício, cobre, óleo mineral e demais massas quando o transformador é projetado para uma subestação compensadora de reativos. O que resulta da necessidade de se trabalhar com indução menor.

No quesito perdas, na condição nominal, os projetos atendem ao máximo de 750kW. O dispositivo *SVC* impõe correntes harmônicas significativas e, portanto, perdas relevantes, 102,74kW. O dispositivo *STATCOM* impõe correntes harmônicas menores, resultando em perdas insignificantes frente ao total, 0,21kW.

Quadro 9: Comparação de resultados.

		<b>Transf. I</b>	<b>Transf. II</b>	<b>Transf. III</b>	<b>Transf. IV</b>
<b>Potência</b>	MVA	250	250	250	250
<b>Relação de tensões</b>	kV	500/√3 - 27,5	500/√3 - 27,5	500/√3 - 43	500/√3 - 43
<b>Volt/espira</b>	-	275	275	311,59	311,59
<b>Impedância de sequência positiva</b>	%	14,1	14,07	10,15	10
<b>Indução</b>	T	1,63	1,7	1,63	1,7
<b>Perdas em vazio</b>	kW	128,18	144,1	145,57	153,9
<b>Perda em vazio máxima</b>	kW	376,85	-	441,32	-
<b>Perdas em carga</b>	kW	607,02	598,10	598,89	590,05
<b>Perdas devido às harmônicas</b>	kW	102,74	-	0,21	-
<b>Perdas totais na condição nominal</b>	kW	735,2	742,2	744,46	743,95
<b>Perdas totais na condição nominal com harmônicas</b>	kW	837,94	-	744,67	-
<b>Perdas totais máximas</b>	kW	1214,79	742,2	1040,42	743,95
<b>Cobre</b>	kg	21590	20330	16030	15820
<b>Aço silício</b>	kg	78360	74500	85780	83150
<b>Parte ativa (P.A.)</b>	kg	110840	105200	112210	109160
<b>Óleo mineral</b>	l	61420	60100	57580	58180
<b>Tanque e acessórios</b>	kg	29810	29280	28740	28820
<b>Para transporte</b>	kg	141800	135500	142100	139100
<b>Massa total</b>	kg	212600	206400	211800	209300

## 7 CONCLUSÃO

Este trabalho discutiu a utilização de transformadores de potência em subestações de dispositivos *SVC* e *STATCOM* para compensação de reativos do sistema elétrico. O objetivo de elucidar os efeitos aos quais o transformador é sujeito foi plenamente atendido. Os cálculos desenvolvidos para cada condição e a comparação entre os resultados elucidam a teoria.

O transformador para dispositivo *SVC* apresenta aumento de aço silício, que pode ser verificado na comparação entre os pesos de aço silício dos cálculos 1 e 2, 78,4 e 74,5 toneladas respectivamente.

O transformador para dispositivo *STATCOM* apresenta aumento de aço silício, que pode ser verificado na comparação entre os pesos de aço silício dos cálculos 3 e 4, 85,8 e 83,2 toneladas respectivamente.

Na comparação dos cálculos para dispositivos *SVC* e *STATCOM*, as diferenças de impedâncias, 10 e 14%, e de tensões, 27,5 e 43kV, entre os transformadores são extremamente significativas para os resultados de perdas e pesos do transformador. Vale ressaltar que cálculos II e IV possuem iguais valores de indução, 1,70 T. O Cálculo IV, por possuir mais aço silício, também, possui mais perdas em vazio, de modo que as perdas em carga precisam ser menores para compensar essa diferença, mantendo o total menor que 750kW. No tangente a pesos, o transformador do Cálculo II é mais leve do que o do Cálculo IV, apresentando vantagem econômica.

Por fim, da avaliação de resultados dos transformadores I e III, verifica-se similaridade com os resultados quanto a perdas na condição nominal e a pesos. O transformador para dispositivo *SVC* é mais leve, apresentando vantagem econômica. As perdas em vazio têm crescimento bastante elevado da condição nominal para a condição de maior sobre-excitação nos dois dispositivos *FACTS*. As perdas devido à circulação de correntes harmônicas são de 102,74kW e 0,21kW para os dispositivos *SVC* e *STATCOM* respectivamente, isso pois, as correntes harmônicas do *STATCOM* são substancialmente menores do que as do *SVC*. Como resultado, tem-se perdas totais máximas menores para o compensador estático síncrono.



As diferenças entre os transformadores ilustram a variação de projeto entre dispositivos compensadores de reativos e subestações padrão do sistema elétrico. Foi possível visualizar as considerações de projeto necessárias e os efeitos que as correntes harmônicas e a sobre-excitação apresentam nas perdas do transformador de potência. A escolha do tipo de compensador, todavia, cabe ao projetista da subestação, uma vez que devem ser levados em consideração outros fatores como espaço físico e exposição a correntes harmônicas.

## 8 REFERÊNCIAS

- ABB. (s.d.). *STATCOM - Hybrid*. Fonte: ABB: <https://new.abb.com/FACTS/STATCOM/STATCOM---hybrid>
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENGENHARIA ELÉTRICA. (2008). *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, Módulo 8 – Qualidade de Energia Elétrica*. Rio de Janeiro, Brasil.
- APERAM. (s.d.). *Aço Silício de Grão Orientado*. Fonte: APERAM: <http://brasil.aperam.com/>
- AREVA T&D. (2008). *Power Transformers*. Paris: AREVA T&D.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2008). NBR 5356: *Transformadores de Potência*. Rio de Janeiro, Brasil.
- BARBOSA, S. R. (2005). *Estudo dos efeitos da sobretensão em transformadores de potência aliada a carregamentos acima da potência nominal*. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais.
- BEKRI, O. L. (2008). The Static Var Compensator (SVC) Device in the power systems Using Matlab/SimPowerSystems. *ICEEA – International Conference on Electrical Engineering and its Applications*.
- CAVALIERE, C. A. (2001). *Análise de STATCOM Operando em Sistemas Desbalanceados*. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ).
- CHAMORRO, N. F. (2014). Incorporación de Dispositivos FACTS en el Sistema Nacional Interconectado. *Técnica Energia*.
- ELETROBRAS AMAZONAS. (2018). *Sistema de Transmissão Manaus*.
- ELGERD, O. I. (1976). *Introdução à Teoria de Sistemas de Energia Elétrica*. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil.
- GENERAL ELECTRIC. (s.d.). *Estudo de equipamentos - SVC e STATCOM*.

- GENERAL ELECTRIC. (s.d.). *Static Synchronous Compensator*. Fonte: General Electric: <https://www.gegridsolutions.com/PowerD/catalog/STATCOM.htm>
- GLANZMANN G., e. A. (2005). Coordinated Control of FACTS Devices based on Optimal Power Flow. *IEEE – Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos*.
- KERNS, Q. A. (1952). *Estados Unidos da América Patente Nº US2600057*.
- LUCKEY, M. e. (2014). *Estados Unidos da América Patente Nº US8786390*.
- OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. (2016). NT 097/2016: Requisitos Técnicos Complementares aos requisitos funcionais para transformadores e reatores do SIN. Rio de Janeiro., Brasil.
- OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. (2016). Submódulo 2.3 - Requisitos mínimos para subestações e seus equipamentos. Rio de Janeiro, Brasil.
- Ping, W. *et. al* (2009). *Aplicação de Conversores VSC em Sistemas de Transmissão de Potência*. Recife: XX SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica.
- RIES, W. (2007). *Transformadores - fundamentos para projeto e cálculo*. Porto Alegre: EDIPUCRS.
- SADIKU, M. N. (2014). *Elementos de Eletromagnetismo. Tradução de Anatólio Laschuck*. Porto Alegre: AMGH.
- SIEMENS. (s.d.). *Optimal dynamic grid stabilization*. Fonte: Siemens: <https://new.siemens.com/th/en/products/energy/high-voltage/facts/portfolio/svcplus.html>
- SPINELLA, M. (2013). *Equipamentos de alta tensão - prospecção e hierarquização de inovações tecnológicas*. Brasília: Teixeira.
- UMANS, S. D. (2014). *Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley*. Porto Alegre: AMGH.

## APÊNDICE A – Correntes Harmônicas

Ordem	Frequência [ Hz ]	Corrente Harmônica no secundário [ A ]		Ordem	Frequência [ Hz ]	Corrente Harmônica no secundário [ A ]	
		SVC	STATCOM			SVC	STATCOM
1	60	5248,64	3464,10	26	1560	4,47	0,42
2	120	1184,85	17,24	27	1620	8,59	0,40
3	180	83,92	14,23	28	1680	4,16	0,40
4	240	17,27	13,09	29	1740	8,88	0,39
5	300	60,10	12,33	30	1800	3,87	0,37
6	360	8,83	11,43	31	1860	7,53	0,36
7	420	45,69	10,63	32	1920	3,64	0,34
8	480	6,24	9,93	33	1980	7,04	0,34
9	540	27,21	9,28	34	2040	3,42	0,33
10	600	4,82	8,61	35	2100	6,68	0,33
11	660	26,73	1,98	36	2160	3,23	0,32
12	720	4,01	1,82	37	2220	7,21	0,31
13	780	23,99	1,74	38	2280	3,06	0,33
14	840	3,38	1,54	39	2340	5,94	0,30
15	900	15,69	1,46	40	2400	2,90	0,30
16	960	2,97	1,33	41	2460	6,41	0,31
17	1020	17,62	1,33	42	2520	2,77	0,36
18	1080	2,61	1,25	43	2580	5,57	0,34
19	1140	13,49	1,19	44	2640	2,64	0,36
20	1200	2,36	1,05	45	2700	5,15	0,29
21	1260	11,12	1,04	46	2760	2,53	0,28
22	1320	5,30	0,95	47	2820	5,14	0,28
23	1380	10,70	0,94	48	2880	2,42	0,26
24	1440	4,86	0,90	49	2940	5,22	0,29
25	1500	10,45	0,89	-	-	-	-