

**FACULDADE DOCTUM DE JOÃO MONLEVADE
INSTITUTO ENSINAR BRASIL - REDE DOCTUM DE ENSINO**

**CESAR AUGUSTO DE OLIVEIRA
DEIVID MARCIO SOARES SILVA**

**ESTUDO DAS TECNOLOGIAS DE COMPENSAÇÃO DE REATIVOS EM
LINHAS DE TRANSMISSÃO**

**João Monlevade
2019**

**CESAR AUGUSTO DE OLIVEIRA
DEIVID MARCIO SOARES SILVA**

**ESTUDO DAS TECNOLOGIAS DE COMPENSAÇÃO DE REATIVOS EM
LINHAS DE TRANSMISSÃO**

**Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Coordenação do Curso
de Engenharia Elétrica da Faculdade
Doctum de João Monlevade, como
requisito parcial para a obtenção do
título de Bacharelado em Engenharia
Elétrica.**

**Área de Concentração: Sistemas de
Energia.**

**Professora Orientadora: Ana Regina
Lara Bretz.**

**Professora Coorientadora: Francisca
Daniella Andreu Simões Moraes Lage.**

**João Monlevade
2019**



FACULDADE DOCTUM DE JOÃO MONLEVADE

FOLHA DE APROVAÇÃO

O Trabalho de Conclusão de Curso intitulado: ESTUDO DAS TECNOLOGIAS DE COMPENSAÇÃO DE REATIVOS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO, elaborado pelo aluno CÉSAR AUGUSTO DE OLIVEIRA, foi aprovado por todos os membros da Banca Examinadora e aceito pelo curso de Engenharia Elétrica do Instituto Ensinar Brasil de João Monlevade, como requisito parcial da obtenção do título de:

BACHAREL EM ENGENHARIA ELÉTRICA

João Monlevade 09 de julho 2019.

BANCA EXAMINADORA

Prof orientadora Esp Ana Regina Lara Bretz

Prof Coorientadora M.Sc. Francisca Daniella Andreu Simões Moraes Lage

Esp Douglas Cabral da Cruz



FACULDADE DOCTUM DE JOÃO MONLEVADE

FOLHA DE APROVAÇÃO

O Trabalho de Conclusão de Curso intitulado: ESTUDO DAS TECNOLOGIAS DE COMPENSAÇÃO DE REATIVOS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO, elaborado pelo aluno DEIVID MARCIO SOARES SILVA, foi aprovado por todos os membros da Banca Examinadora e aceito pelo curso de Engenharia Elétrica do Instituto Ensinar Brasil de João Monlevade, como requisito parcial da obtenção do título de:

BACHAREL EM ENGENHARIA ELÉTRICA

João Monlevade 09 de julho 2019.

BANCA EXAMINADORA

Prof orientadora Esp Ana Regina Lara Bretz

Prof Coorientadora M.Sc. Francisca Daniella Andreu Simões Moraes Lage

Esp Douglas Cabral da Cruz

Dedicamos esse trabalho de conclusão a
nossos familiares, que nos apoiaram
desde o princípio desta jornada.

AGRADECIMENTOS

Cesar Augusto de Oliveira

Agradeço a Deus, à minha mãe Maria, minha irmã Natalia e ao meu cunhado Anderson que me deram força para prosseguir e nunca desistir. Em principal à Faculdade de Ensino Rede Doctum da cidade de João Monlevade MG. Aos professores e mestres, que ao longo desses 5 anos nos instruíram para que esse dia chegasse. Aos meus colegas de classe, que sempre me deram apoio nos momentos de angústia. Ao meu amigo e dupla de TCC Deivid Marcio, que nunca me deixou desistir, até mesmo quando eu pensava que era impossível prosseguir. Agradeço em especial as nossas professoras, Ana Regina, Francisca Daniella e Thais Araújo, já que esse trabalho só foi possível com a ajuda de vocês. Meu muito obrigado!

Deivid Marcio Soares Silva

Agradeço primeiramente a Deus pela oportunidade de chegar até este trabalho de conclusão. Agradeço a minha família, meu pai Ronilton, minha mãe Lucila e minha namorada Isabella pela força durante essa jornada. Agradeço aos professores pelo conhecimento passado em sala de aula, em especial às nossas professoras orientadoras: Ana Regina Lara Bretz, Francisca Daniella Andreu Simões Moraes Lage, Thais Araújo. Agradeço também à Rede Doctum e meus amigos, em especial ao Cesar, no desenvolvimento deste trabalho e todos aqueles que contribuíram de alguma maneira para minha formação.

A todos, meu sincero e humilde obrigado!

“Há uma força motriz mais poderosa que o vapor, a eletricidade e a energia atômica: a vontade.” **Albert Einstein**

RESUMO

Este trabalho foi desenvolvido como resultado de uma extensa pesquisa realizada junto a livros e artigos de autores renomados, que demonstram os impactos da energia reativa e os benefícios da compensação. Com isso, intitulamos nosso trabalho de conclusão como “ESTUDO DAS TECNOLOGIAS DE COMPENSAÇÃO DE REATIVOS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO”, apresentado durante a matéria de Transmissão de Energia Elétrica, do curso de Engenharia Elétrica. Desta feita, a partir de uma detalhada revisão bibliográfica, foi realizado um levantamento sobre os principais parâmetros de uma linha de transmissão, tipos de cargas dentro do Sistema Elétrico de Potência – SEP e os métodos de compensação.

Com a crescente estrutura da eletrônica de potência, estes dispositivos têm sido estudados cada vez mais, devido à sua aplicação oferecer uma flexibilidade no controle contínuo da energia reativa no sistema. O trabalho apresenta um estudo técnico da compensação de reativos que tem a finalidade de atender o crescente fluxo de demanda reativa da carga com qualidade, aliviando os sistemas e reduzindo as perdas (custos). Essa amplificação dos sistemas de geração, transmissão e distribuição permite a elevação da vida útil dos equipamentos e das instalações possibilitando o aumento da demanda reativa para atender às cargas necessárias.

Portanto, o trabalho aqui apresentado foi motivado pela necessidade de avaliar os impactos que influenciam diretamente na qualidade de energia elétrica, frente à crescente demanda do consumo de energia elétrica. Assim, torna-se necessária a qualidade no transporte de energia elétrica. Dito isso, nosso trabalho listou os 4 principais tipos de compensação e dentre eles o que melhor se aplica. Isto se deve ao fato do aumento das correntes elétricas, através das energias reativas em excesso, causar sobrecargas perigosas para as linhas. Porém, para compensar tais sobrecargas, deve-se investir em elementos ao longo das instalações onde o custo é elevado, focando que os benefícios são ainda maiores.

Palavras-chave: Fator de Potência, Energia Reativa, Compensação de Reativos, Linhas de Transmissão.

ABSTRACT

This work was developed as a result of an extensive research carried out with books and articles by renowned authors that demonstrate the impacts of reactive energy and the benefits of compensation, with which we refer to the title of our conclusion work as "STUDY OF TECHNOLOGIES OF COMPENSATION OF REACTIVES IN TRANSMISSION LINES "presented during the transmission of electric energy, of the electrical engineering course. And from a detailed bibliographical review, a survey was made on the main parameters of a transmission line, types of loads within the Electric Power System - SEP and the compensation methods.

. With the increasing structure of power electronics, these devices have been studied more and more, because their application offers a flexibility in the continuous control of the reactive energy in the system. The work presents the technical study of the reactive compensation that has the purpose of attending to the increasing flow of reactive demand of the load with quality, relieving the systems and reducing losses (costs). This amplification of the generation, transmission and distribution systems allows to increase the useful life of the equipment of the installations allowing the increase of the reactive demand to meet the necessary loads.

Therefore, the work presented here was motivated by the need for the impacts that directly influence the quality of electric power, as the increasing consumption of electric energy increasingly requires quality transportation, so our work listed the 4 main types of compensation and the best that applies to them. Increases in electrical currents through excess reactive energies cause dangerous overloads to the lines. However, to compensate for these overloads one must invest in elements throughout the facilities, where the cost is high, yet the benefits are even greater.

Keywords: Power Factor, Reactive Energy, Reactive Compensation, Transmission Lines.

ABREVIATURAS E SIGLAS

A1 – Tensão Acima de 270 kV.

A2 – Tensão Acima de 83 kV.

A3 – Tensão Acima de 69 kV.

ABRADEE – Associação Brasileira de Distribuidores de Energia Elétrica.

ABRATE – Associação Brasileira das Empresas de Transmissão de Energia Elétrica

AC – *Alternating Current*.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica.

BC – Banco de Capacitor

BCS – Banco de Capacitor em Série.

CA – Corrente Alternada.

CC – Corrente Contínua

CBIE – Congresso Brasileiro de Informática da Educação.

CCPE – Coordenação de Critérios de Planejamento Elétrico.

CTET – Comitê Técnico de Estudos de Transmissão

CODI – Comitê de Distribuição de Energia Elétrica.

DC – *Direct Current*.

DP – Distribuição Primária

DS – Distribuição Secundária

DDP – Diferença de Potencial.

DIT – Demais Instalações da Transmissão.

FACTS – Sistemas Flexíveis de Transmissão de Corrente Alternada.

FP – Fator de Potência.

FSC – Compensação Série Fixa.

IFSC – Instituto Federal de Santa Catarina.

LT – Linha de Transmissão.

LT's – Linhas de Transmissões.

MME – Ministério de Minas e Energia.

ONS – Organização Nacional do Sistema Elétrico.

POD – Power Oscillation Damping.

RCT – Reator Controlado a Tiristores

SE – Sistema Elétrico.

SEP – Sistema Elétrico de Potência.

SP – São Paulo.

SIL – *Surge Impedance Loading.*

SIN – Sistema Interligado Nacional.

SRD – Superintendência de Regulação dos Serviços de Distribuição.

SSSC – *The Static Synchronous Series Compensator.*

STATCOM – *Static Synchronous Compensator.*

SVC – *Static Var Compensator.*

TCR – Reator Controlado a Tiristor.

TCSC – *Thyristor Controlled Series Capacitor.*

TSC – Capacitor Chaveado a Tiristor.

UPFC – *Unified Power Flow Controller.*

LISTAS DE FIGURAS

Figura 1 - Geração, Transmissão e Distribuição.	21
Figura 2 - Interligação em kV.	24
Figura 3 - Extensão da Rede de Transmissão.	25
Figura 4 - Efeito Corona na Linha de Transmissão.	30
Figura 5 - Etapas do Sistema Elétrico de Potência.	31
Figura 6 - Triângulo das Potências, Carga Indutiva.....	32
Figura 7 - Triângulo das Potências, Carga Indutiva.....	32
Figura 8 - Definição do Fator de Potência.	34
Figura 9 - Capacitores Localizados nos Grupos de Cargas.	37
Figura 10 - Banco de Capacitores.....	38
Figura 11 - Motor Síncrono.....	39
Figura 12 - Banco de Reatores.	44
Figura 13 - Equipamentos FACTS.	48
Figura 14 - SVC no Sistema.....	50
Figura 15 - SVC Real.	50
Figura 16 - Controlador STATCOM.....	51
Figura 17 - Esquema Básico do STATCOM.....	51
Figura 18 - Esquema Básico TCSC.	53
Figura 19 - TCSC.	53
Figura 20 - Configuração do TSSC.	54
Figura 21 - Modelo SSSC.....	54
Figura 22 - UPFC Esquema Básico.	55
Figura 23 - Diagrama UPFC.....	56
Figura 24 - Diagrama Fasorial de Thevenin.	62
Figura 25 - Banco Capacitor Série.	64
Figura 26 - Tipos de Ligação.....	65
Figura 27 - Corrente na Energização do Capacitor.	66
Figura 28 - Tensão do Banco de Capacitor na sua Energização.	66
Figura 29 - Aplicação de Reatores Shunt.....	67
Figura 30 - Forma Características das Curvas de um Gerador.....	70
Figura 31 - SVC Composto por TCS.	75
Figura 32 - Representação do SVC na Linha.....	76

Figura 33 - Configuração Básica do STATCOM.....	77
Figura 34 - Curva Característica.	78
Figura 35 - Diagrama TCSC.....	79
Figura 36 - TCSC na Linha de Transmissão.	80
Figura 37 - UPFC Esquema Básico.	81
Figura 38 - Diagrama UPFC.....	82
Figura 39 - Fluxograma Desvantagens.	88
Figura 40 - Fluxograma Desvantagens.	88
Figura 41 - Fluxograma de Vantagens.	89
Figura 42 - Fluxograma de Vantagens.....	89
Figura 43 - Fluxograma de Vantagens.....	90
Figura 44 - Fluxograma de Vantagens.....	90

LISTA DE SÍMBOLOS

KM – Quilômetros.

kV – Kilovolts.

kW – Kilowatt.

kWH – Kilowatt Hora.

kVA – Kilovolt Ampere.

kVAr – Kilo Volte-Ampere Reativo.

MW – Mega Watt.

P – Potência Ativa.

Q – Potencia Reativa.

R – Resistência.

S – Potência Aparente.

V – Volts.

VA – Volte-Ampere.

X – Reatância.

W – Watt.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
1.1. Problema de Pesquisa	17
1.2. Hipótese	18
1.3. Objetivos	20
1.3.3. Objetivos Específicos	20
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	21
2.1. Sistema Elétrico de Potência	21
2.1.1. Geração.....	22
2.1.2. Transmissão.....	22
2.1.2.2. <i>Classificação pelo Nível de Tensão.....</i>	<i>25</i>
2.1.2.3. <i>Classificação pelo Comprimento da Linha</i>	<i>25</i>
2.1.2.4. <i>Parâmetros da Linha de Transmissão.....</i>	<i>26</i>
2.1.2.5. <i>Barramento Infinito</i>	<i>27</i>
2.1.2.6. <i>Fenômenos na Linha de Transmissão</i>	<i>28</i>
2.1.3. Distribuição.....	30
2.2. Órgãos Responsáveis pelo SEP	31
2.3. Fator de Potência	32
2.3.1. Classificação das Energias	33
2.3.2. Técnicas para Correção do Fator de Potência	35
2.3.2.1. <i>Banco de Capacitor</i>	<i>37</i>
2.3.2.2. <i>Motor Síncrono Superexcitado</i>	<i>38</i>
2.4. Energias Reativas Elevadas em Linhas de Transmissão	40
2.4.1. Compensação do FP em Linhas de Transmissão	41
2.4.1.1. <i>Banco de Capacitor em Linhas de Transmissão</i>	<i>42</i>
2.4.1.1.1. <i>Banco de Capacitor em Série.....</i>	<i>42</i>
2.4.1.1.2. <i>Banco de Capacitor em Derivação.....</i>	<i>42</i>
2.4.1.2. <i>Compensador Síncrono.....</i>	<i>43</i>
2.4.1.3. <i>Reatores.....</i>	<i>44</i>
2.4.1.3.1. <i>Reatores em Série.....</i>	<i>45</i>
2.4.1.3.2. <i>Reatores em Derivação.....</i>	<i>45</i>
2.4.1.4. <i>FACTS.....</i>	<i>46</i>

2.4.1.4.1. Compensador Estático de Reativos – SVC,.....	48
2.4.1.4.2. Compensador Série Controlado a Tiristor – TCSC.....	52
2.4.1.4.3. Compensador Série Síncrono Estático– SSSC.....	54
2.4.1.4.4. Controlador Unificado de Fluxo de Potência – UPFC.....	55
3. METODOLOGIA	57
4. PESQUISA E ANÁLISE DE DADOS	61
4.1. Cargas	62
4.2. Equipamentos de Compensação de Energia Reativa em Linhas.....	63
4.2.1. Banco de Capacitores	63
4.2.1.1. <i>Instalação do Banco de Capacitores.....</i>	65
4.2.2. Banco de Reatores.....	66
4.2.2.1. <i>Instalação do Banco de Reatores.....</i>	68
4.2.3. Compensação Síncrona	69
4.2.4. Compensadores Inteligentes.....	72
4.2.4.1. SVC.....	74
4.2.4.2. <i>Fluxo de Potência em uma LT com um SVC.....</i>	75
4.2.4.3. STATCOM.....	76
4.2.4.4. TCSC.....	79
4.2.4.5. UPFC.....	81
5. DADOS DO FATOR DE POTÊNCIA EM LINHAS DE TRANSMISSÃO	83
5.1 Análise e Discussão.....	88
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	91
REFERÊNCIAS.....	94

1. INTRODUÇÃO

O SEP – Sistema Elétrico de Potência é dado por circuitos destinados a levar elevados níveis de energia da geração até os centros consumidores. Na procura de tal objetivo, o planejamento e a operação dos sistemas de energia fazem uso de técnicas sofisticadas na solução de problemas.

No sistema de energia elétrica, a operação e o planejamento estão relacionados à confiabilidade e à segurança. Durante a operação desse sistema é fundamental que a capacidade de transmissão seja similar à projetada. Existem situações que a capacidade é menor que a projetada devido ao fato de o sistema operar com sobtensões, sobretensões e perdas, além dos custos operacionais e de manutenção.

Nessa situação, é necessário o aumento da capacidade de transmissão de potência. O principal obstáculo da operação estável no sistema é a instabilidade de tensão, responsável pela minimização progressiva das tensões das barras no circuito. Tal motivo dessa instabilidade advém da incapacidade dos sistemas de atender à crescente demanda relacionada à energia reativa.

Assim, este trabalho realiza o estudo da compensação de reativos nas linhas de transmissão (LT) que, devido ao fluxo de carga, controla a absorção e injeção de reativos no sistema. Logo, tal controle permite a estabilidade dos níveis de tensão nas barras.

Para a manutenção de reativos são utilizados alguns equipamentos compensadores, tais como os Sistemas Flexíveis de Transmissão de Corrente Alternada - FACTS, o compensador síncrono, banco de reatores e banco de capacitores. Daí, a dinâmica de utilização desses dispositivos no sistema é essencial para que se possa otimizar os sistemas de geração, transmissão e distribuição de energia, trabalhando com eficiência, aumentando a capacidade de transmissão, controlando o fluxo de potência e reduzindo o custo. Com isso, evitando que novas linhas possam ser construídas e cessando o desgaste ambiental devido às construções físicas de novas torres.

1.1. Problema de Pesquisa

No decorrer da operação de um sistema de transmissão de energia elétrica podem acontecer impactos negativos devido aos parâmetros da linha. Os mesmos são dados por resistência, indutância, capacitância e condutância, que inviabilizam a plena utilização do sistema, ou seja, reduzem a capacidade de transmissão, além da ocorrência dos custos elevados de manutenção devido ao baixo fator de potência (FP).

Uma das principais causas do FP estar desequilibrado é pelo excesso de reativos no sistema de transmissão. Tal energia reativa influencia diretamente na potência aparente do sistema, medida em Volt Ampere (VA).

Ao longo da operação de um sistema elétrico de potência, podem ocorrer variações na intensidade do fluxo de potência de energia reativa, isto se relaciona com o tipo de carga que está instalada. Daí, devido à variação do fluxo drenado da rede, formam-se oscilações de energia reativa indutiva para energia capacitiva, causando no sistema sobretensões e sobtensões, podendo resultar em desligamentos de cargas de grande porte.

Se tais situações acima não forem reparadas, o atendimento à demanda no sistema pode ser prejudicado, devido ao excesso de reativos na rede, diminuindo o fluxo de potência ativa na transmissão. Caso essa situação se mantenha, será necessária uma possível aplicação no sistema, implicando em custos onde os principais componentes são: sistema de comando e proteção, condutores, transformadores, visto que tais equipamentos são dimensionados através da potência aparente no sistema.

Outros impactos que são gerados pelo excesso de reativo no sistema são chamados de Efeito Ferranti. O mesmo é responsável pelo aumento da tensão ao decorrer da linha de transmissão longa, juntamente com o aumento da corrente, as quedas de tensões e as perdas na transmissão de energia elétrica.

Tal fato pode gerar prejuízo para as concessionárias de energia elétrica e ainda prejudicar a qualidade da energia na distribuição. Logo, é necessário incluir a compensação de reativos para suprir essas adversidades.

Caso seja realizado o controle de reativos, os custos são reduzidos com ampliações relacionadas a parâmetros estruturais como a instalação de linhas em paralelo, gerando custos nas construções de torres de transmissões e impactos nas áreas de preservação ambiental. Daí, visando a redução da impedância série na linha, sendo um dos principais fatores que contribuem para a redução da qualidade do transporte da energia elétrica. A seguir, a Tabela 1 indica o índice dos níveis de energia reativa (VAr) no Brasil.

Tabela 1 - Índice de Energia Reativa (VAr) nas Regiões do Brasil

Região	Carga		Geração	
	MW	Mvar	MW	Mvar
Norte	2.987,5	661,6	5.994,0	-301,7
Nordeste	8.381,3	2.225,4	8.047,1	-624,9
Sul	10.260,3	2.676,8	9.075,6	333,9
Sudeste/ C.O.	36.237,1	9.988,9	37.899,9	1.186,5
Total	57.866,1	15.552,7	61.016,6	593,8

Fonte: Affonso; Silva; Silva, (2008)

Neste caso, o problema envolto por este trabalho se dá pelo entendimento de qual a indicação adequada da tecnologia de compensação nas LT atuais, visto que existem quatro técnicas principais de utilização sendo: banco de capacitores, motor síncrono superexcitado, reator e FACTS?

1.2. Hipótese

O baixo fator de potência é um indicativo de mau funcionamento no sistema elétrico. Daí, para amenizar o excesso de energia reativa no circuito, alguns métodos de compensação podem ser utilizados. Existem algumas técnicas, já citadas que são capazes de suprir tal potência.

Atualmente, o banco de capacitores é um dos mais utilizados métodos para correção nas linhas de longas distâncias. Isto se deve ao fato de serem compactos e de fácil instalação. Logo, o investimento possui retorno rápido e garantido. Vale citar ainda que o motor síncrono superexcitado, reatores e FACTS também atuam na correção do FP.

Na compensação de reativos são utilizados dispositivos rotativos e estáticos. Os rotativos são constituídos por motores síncronos, já os estáticos são constituídos por banco de capacitores e reatores, em série ou derivação. Os dispositivos FACTS são identificados como compensadores estáticos, se diferenciando dos rotativos devido ao seu custo e forma de atuação no sistema, na qual se toma como premissa para este trabalho de conclusão.

Com o crescente consumo da energia elétrica no Brasil e o desenvolvimento dos centros consumidores de carga, tem-se a ocorrência de um sistema de geração descentralizado. Isto porque as grandes e principais centrais geradoras estão localizadas a milhares de quilômetros de distância dos principais consumidores de carga no país (Rio de Janeiro e São Paulo). Com a possível implantação dos dispositivos FACTS, poderão ser obtidos vários ganhos no sistema de transmissão, sendo os mesmos listados abaixo:

- Controle no fluxo de potência;
- Elevação da segurança através do aumento da estabilidade dinâmica, sendo este que se limita às sobretensões e correntes de curto;
- Ampliação da capacidade de transmissão das LT's;
- Operação de linhas em paralelo com diferentes capacidades de carga;
- Ocorrência do fluxo de potência em locais mais adequados;
- Rápido ajuste ao suporte de reativos durante a operação;
- Estabilização eficiente das oscilações de tensão e ângulo;
- Realização da integração entre sistemas de corrente contínua e corrente alternada, aproveitando as vantagens de ambos.

Através das tecnologias ditas acima para compensação, é possível indicar qual melhor dispositivo a ser usado para correção do fator de potência atualmente na linha de transmissão. Dessa forma, o principal benefício é a minimização das consequências mostradas na problemática, evitando gastos elevados, preservando o meio ambiente, a qualidade no transporte de energia elétrica, além da eficiência energética, permitindo assim, a concretização de estudos neste trabalho.

1.3. Objetivos

De forma geral, o presente trabalho objetiva a apresentação de um estudo que diz respeito à correção do fator de potência em linhas de transmissão longas de alta tensão, além de indicar as mais eficientes nos dias de hoje no SEP.

1.3.3. Objetivos Específicos

De forma específica, deseja-se:

- Efetuar um estudo bibliográfico de técnicas para correção do FP em linhas de transmissão;
- Analisar a aplicação dos bancos de capacitores, motor síncrono superexcitado, reatores e FACTS;
- Comparar a teoria de autores renomados sobre a compensação de energia reativa nas linhas;
- Pesquisar normas vigentes relacionadas ao fator de potência;
- Indicar os melhores dispositivos para compensação atualmente na LT.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo serão tecidas algumas discussões de conceitos centrais relacionados ao tema deste trabalho: sistemas elétricos de potência (SEP). Com base principalmente nos estudos sobre o fator de potência (FP) em linhas de transmissão e equipamentos para compensação deste fator.

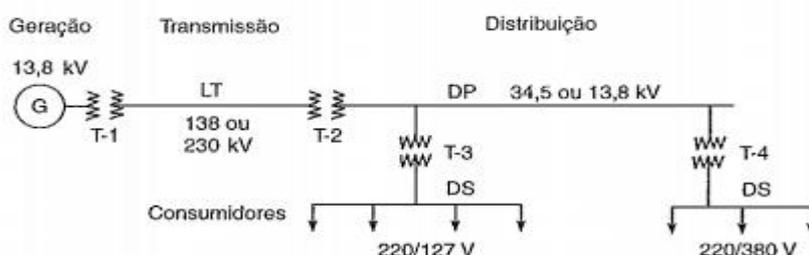
2.1. Sistema Elétrico de Potência

O SEP tem por objetivo fornecer prontamente energia elétrica com qualidade a pequenos, médios e grandes consumidores.

Nas palavras de Neri (2015), os Sistemas Elétricos de Potência são um conjunto de sistemas compostos por geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. Atualmente, o sistema elétrico possui as mais complexas máquinas já construídas pelo homem, o que exige estudos de técnicas contundentes para construir, manter e operar tais sistemas.

De acordo com Araújo (2014), o SEP é definido pela geração, transmissão e distribuição, como pode ser observado na Figura 1.

Figura 1 - Geração, Transmissão, Distribuição e Consumidores



Fonte: Creder, 2016.

A geração de energia produz cerca de 13,8 kV (Kilovolts). Em seguida, essa tensão é elevada, passando pelo transformador elevador, podendo chegar até 230 kV nas linhas de transmissão. Na distribuição primária os valores de tensão podem ser 13,8 kV ou 34,5 kV. Logo, tal energia passa pelos transformadores de distribuição reduzindo a tensão para 220 V (volts) e 127 V, eletricidade utilizada nas residências.

De acordo com Araújo (2014), considera-se “baixa tensão” quando a mesma for superior a 50 V em corrente alternada (CA) ou 120 V em corrente contínua (CC) e igual ou inferior a 1000 V em CA ou 1500 V em CC. Dessa forma, a “alta tensão” fica sendo dada quando for superior a 1000 V em CA ou 1500 V em CC, entre fases ou então fase e terra.

2.1.1. Geração

A energia elétrica é realizada pela transformação por qualquer fonte de energia em energia elétrica. No Brasil, cerca de 74% (por cento) da energia gerada se dá através das hidroelétricas, as termoelétricas 21% e 2,1% nucleares.

O princípio de funcionamento das hidroelétricas ocorre quando a energia cinética é conseguida através da movimentação do eixo de uma turbina que rotaciona o núcleo do um gerador denominado (rotor) dos geradores de eletricidade, necessitando de uma turbina (Hidráulica ou Térmica) por intermédio de um motor síncrono. Outras fontes de geração de energia elétrica podem ser citadas, sendo fotovoltaica, eólica, biomassa, etanol, biodiesel, geotérmica, ondas e marés.

De acordo com Marujo (2017) a geração utiliza, na maioria das vezes, geradores síncronos. Esses são ligados à rede através de um transformador que eleva a tensão (entre 10 kV a 20 kV) a um nível apropriado para a transmissão. Como característica, tais sistemas são compostos por um pequeno número de plantas de geração de energia com capacidades elevadas.

2.1.2. Transmissão

O sistema de transmissão tem como função transportar energia elétrica dos centros geradores até as áreas de consumo. Daí, os mesmos são constituídos por LT's, sistemas de proteção (relés, disjuntores, dentre outros) e subestações.

As linhas de transmissão são utilizadas para o transporte de energia eletromagnético, guiando a eletricidade de uma fonte geradora até uma carga consumidora constituída por torres e cabos coaxial, fios torcidos ou paralelos.

Os sistemas de proteção têm a função de detectar condições anormais e ocorrência de faltas ao longo da linha. Tais sistemas atuam para que se evite anomalias no circuito. Isso porque trabalham com disjuntores que têm a função de interromper o fornecimento para evitar consequências maiores, tais como um possível curto-circuito.

As subestações são responsáveis por elevar e rebaixar os níveis de tensão através dos transformadores. As linhas de transmissão são formadas por cabos condutores, isoladores e torres metálicas, podendo ser subterrâneas ou aéreas.

Segundo a Associação Brasileira de Distribuidores de Energia Elétrica ABRADEE (2018), o conjunto de torres estruturais e cabos de alta tensão é conhecido como rede de transmissão de energia elétrica.

Pelos estudos de Fuchs (1977), o mesmo afirma que o desempenho de uma linha aérea de transmissão depende exclusivamente das suas características físicas, definindo seus parâmetros elétricos e determinando seu comportamento no estado normal de operação.

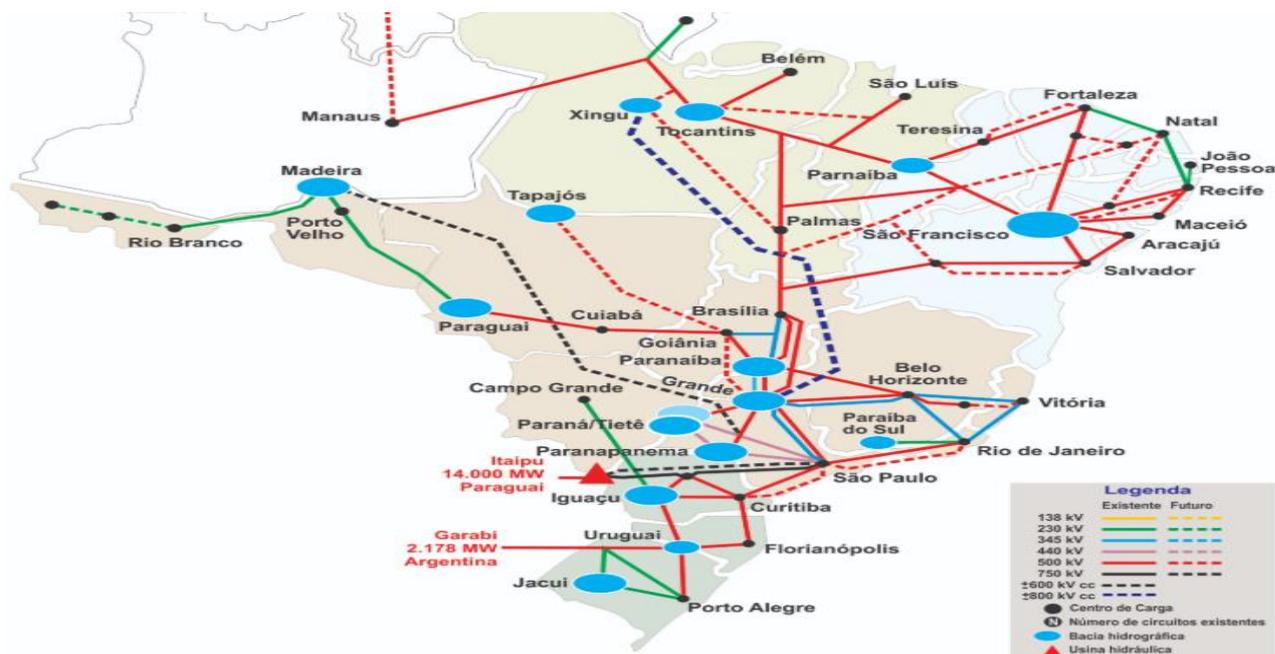
Em síntese, os sistemas de transmissão operam em níveis de tensão elevados e as perdas são proporcionais à corrente. Daí, quando se aumenta a tensão, reduz-se a corrente e, conseqüentemente as perdas.

Em se tratando das três grandes subdivisões do SEP (geração, transmissão e distribuição), esta pesquisa tem foco na transmissão de energia. Portanto, é relevante citar o aprofundamento destes conceitos /ou o conhecimento dos tipos de linhas de transmissão que se dá através da sua classificação.

2.1.2.1. Classificações das Linhas de Transmissão

O sistema brasileiro de produção e transmissão de energia é um sistema hidro-termo-eólico de elevadas proporções, com predominância das usinas hidroelétricas e com diversos proprietários. Daí, tem-se o Sistema Interligado Nacional (SIN) sendo composto por quatro subsistemas: Sul, Sudeste/Centro-Oeste e Nordeste, conforme a Figura 2.

Figura 2 - Interligação em kV



Fonte: Abrate, 2019.

A interconexão dos sistemas elétricos ocorre através da malha de transmissão, proporcionando a transferência de energia elétrica entre subsistemas. Tal fato permite a obtenção de ganhos sinérgicos, aprofundando a diversidade entre os regimes hidrológicos das bacias. Assim, a integração desses recursos de geração e transmissão auxilia o atendimento ao mercado com segurança e economia (ONS, 2019).

Tradicionalmente, a transmissão de energia é decomposta por redes de transmissão e subtransmissão. Desta feita, a rede primária tem a responsabilidade pela transmissão de elevados "blocos" de energia, visando suprir os altos índices de consumidores e a alimentação dos consumidores de médio e grande porte.

Já a rede secundária é dada pela extensão da transmissão denominada subtransmissão, realizando o atendimento de cidades pequenas e consumidores de grande porte, tais como as indústrias. Assim, o modelo de transmissão citado faz a realocação dos elevados blocos de energia, recebidos das subestações de transmissão e de distribuição (ELETROBRÁS, 2002 apud ANEEL, 2019).

2.1.2.2. Classificação pelo Nível de Tensão

No Brasil, de acordo com a ABRADÉE (2018), as LT's são contextualizadas através dos níveis de tensão em sua operação, dada em Kilovolt. Para cada faixa de tensão tem-se um código representativo para o conjunto de linhas de transmissão das classes. São eles: A1 – tensão igual ou acima de 230 kV; A2 – tensão entre 88 kV e 138 kV; A3 – tensão até 69 kV.

Para o Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS (2018), as empresas cujas são responsáveis pelas instalações de transmissão e receberam outorga da União para prestação de serviços públicos relacionado a transmissão de energia elétrica. São caracterizadas pela regulamentação das instalações ligadas a rede básica denominadas, Demais Instalações de Transmissão (DIT), a seguir a figura demonstra os índices de extensão em km no Brasil e suas projeções.

Figura 3 – Extensão da Rede de Transmissão

Extensão da Rede de Transmissão (km)		Projeção ONS - 2023
800 kV	4.600	9.636
750 kV	2.683	2.683
600 kV	12.816	12.816
500 kV	47.750	71.891
440 kV	6.748	6.969
345 kV	10.320	11.492
230 kV	56.471	69.997
Total	141.388	185.484

Fonte: Cbie, 2019.

2.1.2.3. Classificação pelo Comprimento da Linha

Pode-se classificar as linhas de transmissão como linhas curtas, médias ou longas. De acordo com Rajput (2006), um sistema de transmissão com comprimento inferior a 80 km é considerado uma LT curta, são encontradas em redes de distribuição, subtransmissão e em média tensão.

Já as linhas de transmissão médias, são linhas que variam entre 80 a 240 km. A capacitância da LT média é considerada como concentrada em um ou mais pontos das linhas. Ainda nas palavras do autor, os sistemas de transmissão com comprimento superior a 240 km são considerados linhas longas.

Nelas, os parâmetros são distribuídos uniformemente ao longo de todo o comprimento da linha e podem ser divididas em várias seções, cada seção consiste em uma indutância, capacitância, resistência e condutância, esses fenômenos serão abordados abaixo.

2.1.2.4. Parâmetros da Linha de Transmissão

Pelos estudos de Stevenson Jr. (1986), as linhas de transmissão possuem parâmetros distintos que influenciam no seu comportamento, esses 4 fenômenos já citados, podem impactar diretamente na qualidade e transporte de energia elétrica. Ainda de acordo com o mesmo autor, a condutância entre os condutores ou condutor e terra leva em consideração a corrente de fuga nos isoladores da LT ou na isolação de cabos subterrâneos. Portanto, a condutância entre os condutores de uma linha aérea pode ser nula, devido à fuga nos seus isoladores.

No que tange à resistência, esta influencia diretamente no transporte de energia elétrica, sendo um parâmetro inerente ao tipo condutor e bitola, além de ser o principal responsável pelas causas da perda de potência na LT. Em se tratando da indutância, ela depende da geometria da linha e do estado no qual se encontram os condutores, sendo considerada como um dos principais parâmetros que afetam a capacidade de transporte da energia elétrica.

Ainda nas palavras de Stevenson Jr. (1986), a resistência e a indutância uniformemente distribuídas na LT geram a impedância em série. A condutância e a capacitância existentes nos condutores de uma linha monofásica ou condutor e neutro de uma LT trifásica geram a admitância em derivação. Apesar da resistência, a capacitância e a indutância são distribuídas e o circuito equivalente da LT é constituído de parâmetros concentrados. Tal autor relata que a “indutância é o parâmetro do circuito na qual está relacionada a tensão induzida devido à variação de fluxo com a taxa de variação da corrente”.

Além da indutância característica existe a mútua. Esta ocorre quando se tem dois circuitos, sendo definida pelo fluxo concatenado em relação ao outro circuito devido à corrente.

Para Chaves (2014), o parâmetro mais importante na definição da capacidade de transmissão de uma LT é a impedância da linha que depende basicamente da indutância mútua. Sabe-se que a corrente elétrica produz um campo magnético e um fluxo magnético associado a ele. Essa intensidade do fluxo varia com a magnitude da corrente que também depende de sua distribuição espacial no meio da qual o condutor está inserido.

A diferença de potencial entre dois condutores resulta na capacitância. Tal fenômeno afeta o transporte de energia elétrica, tendo como seu responsável o campo elétrico. De acordo com Stevenson Jr. (1986) a capacitância de uma LT é o resultado da diferença de potencial entre os condutores de alta tensão, fazendo com que está se torne carregada, de modo parecido às placas de um capacitor entre as quais existe uma diferença de potencial (DDP). Ainda nas palavras do autor a capacitância entre os condutores em paralelo possui uma constante que depende das proporções e afastamento entre condutores. Já para as linhas menores que 80 km de comprimento, o efeito da capacitância é reduzido e desprezado. Já, para as linhas longas de tensões elevadas, tornam-se importantes nos efeitos da capacitância.

Para mais, o autor contextualiza que “[...] existe capacitância entre condutores podendo ser definidas pela carga nos condutores por unidade de DDP entre eles[...]”.

Para Chaves (2014), os condutores que estabelecem a linha apresentam também uma capacitância que tem efeito sobre o comportamento reativo da linha. Ainda assim, existe um dado nível de carregamento da linha na qual o consumo de reativos na indutância série da linha é compensado pela geração de reativos de sua parte *Shunt*.

O efeito da capacitância é desprezado em linhas curtas devido a seu baixo impacto, porém nas linhas longas se faz essencial seu estudo, pois ela está ligada diretamente a perda de energia na LT.

2.1.2.5. Barramento Infinito

Quando se tem uma máquina síncrona ligada a um barramento infinito, esse sistema é capaz de absorver e fornecer qualquer potência, seja ela ativa ou reativa, além de manter tensão e frequência constante independente de quaisquer perturbações externas e absorver qualquer transitório.

Segundo Mello (1977), algumas quantidades de informações podem ser extraídas de um sistema bastante simplificado em termos de topologia, constando de uma máquina síncrona, uma barra infinita e uma linha de transmissão interligadas. Ainda de acordo com autor, um estudo da estabilidade transitória de uma máquina síncrona pode ser feito utilizando-se este sistema citado acima. Logo, os efeitos dos reguladores devem ser incluídos e testados, e após os ajustes e testes neste sistema reduzido, a máquina é simulada no sistema elétrico real em relação à outras máquinas elétricas próximas. Aplicando-se essa ideia, esta seção realça os principais aspectos e eventos decorrentes de um caso de estabilidade transitória.

Já, para Neto (2016), os geradores síncronos conectados em um barramento infinito operam de forma interligada, tendo como vantagens confiabilidade, flexibilidade e facilidade de manutenção. Daí, permitem uma redistribuição de energia elétrica entre outras unidades do sistema, caso uma unidade de geração falhe.

Entretanto, ainda para o autor acima, devido às diversas situações em que os SEP's estão continuamente sujeitos, tais como faltas e variações de carga e transitórios rápidos. Isso pode acarretar em variações nos fluxos de potência nas linhas de transmissão, redução das margens de estabilidade do sistema, limitação na capacidade de transmissão de potência elétrica e, em casos extremos, diminuição de desempenho e perda de sincronismo com o barramento infinito.

2.1.2.6. Fenômenos na Linha de Transmissão

Na linha de transmissão de alta tensão existem efeitos que proporcionam o aumento de tensão e a ineficiência no transporte de energia elétrica. Esses fenômenos são chamados de Efeitos Ferranti e Corona, tais nome foram dados em referência aos físicos que os descobriram.

O Efeito Ferranti é o aumento da tensão no receptor em relação ao transmissor na LT quando não se tem o alívio de carga. Esse efeito é causado pelo fluxo da corrente capacitiva através da indutância série perante a LT. Os impactos causados pelo Efeito Ferranti podem trazer consequências nas linhas de transmissão, sendo elas:

- Aumento da perda pelo Efeito Corona;
- Necessidade do aumento dos níveis de isolamento;
- Perda na eficiência da rede;
- Aumento do Efeito Joule;
- Aumento de custo na manutenção;
- Limitação do efeito térmico.

Para minimizar esse efeito, a LT deve ser composta por algum dispositivo compensador de energia reativa, diminuindo a tensão para níveis aceitáveis de forma que não prejudique o transporte da eletricidade.

Para Araújo e Neves (2005), o fenômeno conhecido por Efeito Ferranti faz com que a tensão sustentada na extremidade aberta de uma linha de transmissão seja superior à tensão no lado da geração. Isso ocorre devido ao fluxo de corrente capacitiva por intermédio da indutância série da linha.

Já o efeito Corona acontece devido a ionização em torno do campo elétrico. Este é um dos principais motivos que se dá por causa da mudança de geometria de seu material ou pelo acúmulo de material. Tal fenômeno está ligado diretamente com Efeito Ferranti, pois quanto maiores os níveis de tensão, maiores serão as perdas por Efeito Corona. Outras causas que contribuem para essa particularidade são isoladores defeituosos e cabos danificados.

Segundo Wedy (2009), o Efeito Corona é definido pela descarga eletrostática, devido à ionização de um material isolante, tradicionalmente um gás, exposto a um campo elétrico de intensidade elevada em um nível crítico.

Esse efeito é comum na LT devido ao campo elétrico de outros condutores e partículas de ar. Suas consequências são perdas de energia, podendo danificar isolamento de transformadores, capacitores e motores elétricos. A seguir, a Figura 4 ilustra o efeito com seu respectivo aspecto visual.

Figura 4 - Efeito Corona na Linha de Transmissão



Fonte: Angola Power Services, 2019.

As manifestações do Efeito Corona estão relacionadas com o grau dos condutores, sendo que as perdas relacionadas a energia desse efeito não são exatas.

De acordo com Freitas (2007), em sistemas elétricos de alta tensão, o estudo do Efeito Corona é de suma importância. Devido, as ondas de tensões e correntes referentes as descargas atmosféricas que percorrem nas linhas são significativamente influenciadas por tal fenômeno.

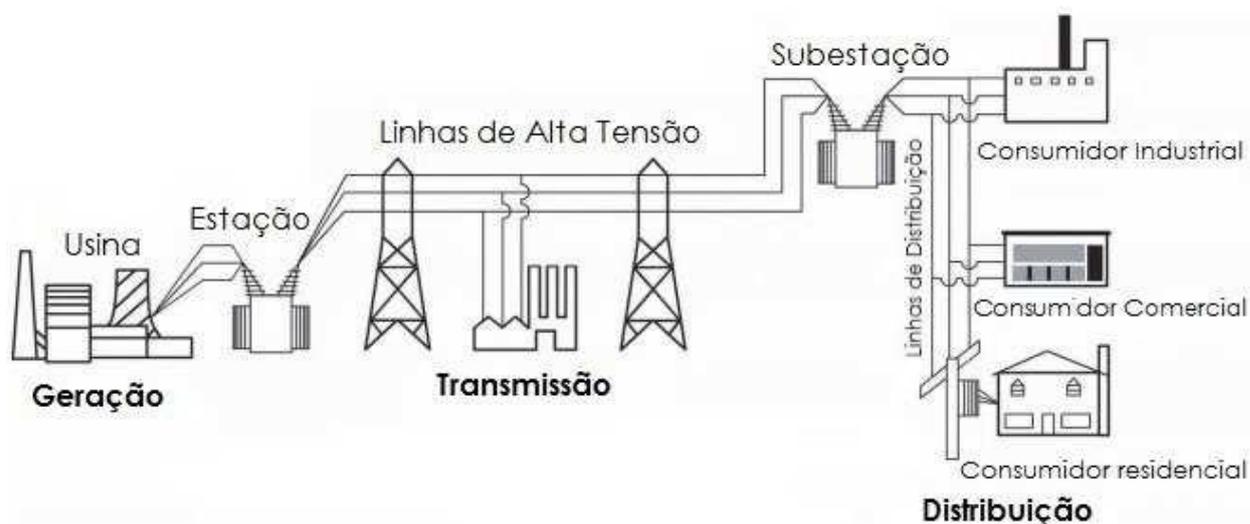
2.1.3. Distribuição

Conforme ABRADDEE (2018), a distribuição de energia é relacionada com a própria topografia das cidades, derivadas ao longo das avenidas para ligar fisicamente o sistema de transmissão elétrico.

Para a Aneel (2015), a distribuição é o setor destinado à redução da tensão está relacionada ao sistema elétrico de transmissão e conexão das centrais geradoras além do fornecimento de eletricidade ao consumidor.

O sistema de distribuição é um conjunto de instalações e equipamentos que operam em níveis de elevadas tensões sendo (superiores a 69 kV e inferiores a 230 kV), os de média tensão são (superiores a 1 kV e inferiores a 69 kV) e baixa tensão (igual ou inferiores a 1 kV).

Figura 5 - Etapas do Sistema Elétrico de Potência



Fonte: Silva, 2019.

2.2. Órgãos Responsáveis pelo SEP

Além da infraestrutura física das linhas de transmissão apresentada, mecanismos de regulamentação, fiscalização e comercialização estabelecem as diretrizes do setor elétrico de um país. A boa qualidade na prestação do serviço é garantida aos clientes conforme os padrões adotados pelos órgãos reguladores e fiscalizadores do setor.

A ANEEL começou suas operações em dezembro de 1997, sendo vinculada ao Ministério de Minas e Energia (MME), tendo como principais atribuições:

“Regular a geração (produção), transmissão, distribuição e comercialização de energia elétrica”;
 “Estabelecer tarifas”;
 “Dirimir as divergências, na esfera administrativa, entre os agentes e entre esses agentes e consumidores, além de Promover as atividades de outorgas de concessão, permissão e autorização de empreendimentos e serviços de energia elétrica, por delegação do Governo Federal. (ANEEL, 2019)”.

O Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) é o órgão responsável pelo controle da operação das instalações do SEP e do Sistema Interligado Nacional (SIN) além das operações dos sistemas isolados do Brasil, sob a fiscalização da Aneel.

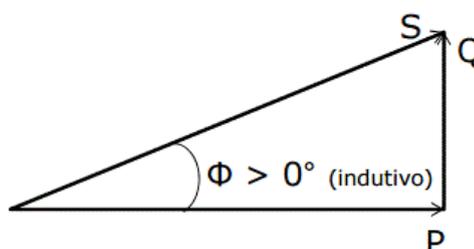
2.3. Fator de Potência

O FP é uma medida que demonstra o quanto de potência elétrica consumida está de fato sendo transformada em trabalho útil, demonstrando a eficiência com a qual a energia está sendo utilizada na instalação. Um fator de potência elevado indica uma eficiência alta, enquanto um baixo fator de potência indica que o circuito elétrico não está aproveitando plenamente a energia (COPEL, 2019).

Matematicamente, o FP é o cosseno do ângulo de fase θ entre a tensão e corrente. Um circuito indutivo leva em consideração um fator de potência em atraso, e um circuito capacitivo seu ângulo é adiantado (STEVENSON JR., 1974).

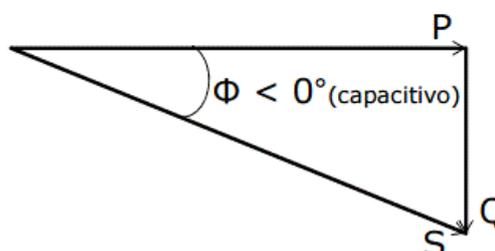
As Figuras 6 e 7 a seguir contextualizam o triângulo das potências, sendo elas de carga indutiva e capacitiva. As siglas no triângulo das potências, são P - “potência ativa”, Q - “potência reativa” e S - “potência aparente”.

Figura 6 - Triângulo das Potências: Carga Indutiva



Fonte: IFSC, 2017.

Figura 7 - Triângulo das Potências: Carga Capacitiva



Fonte: IFSC, 2017.

2.3.1. Classificação das Energias

Em qualquer instalação alimentada em corrente alternada, a energia elétrica absorvida pela carga pode ser decomposta em energia ativa e energia reativa. De acordo com Cotrim (2009), a energia ativa, medida em kWh (Kilowatt Hora), é transformada em energia mecânica, em calor ou em outra modalidade.

A relação entre a energia ativa consumida em um período de tempo pode ser definida como potência ativa desse intervalo, medida em kW (Kilowatt), e geralmente representada pela letra P. A energia reativa, medida em KVAR (Kilo Volt-Ampère Reativo), é necessária à geração do campo eletromagnético responsável pelo funcionamento dos equipamentos indutivos (motores, transformadores e indutores).

A demanda de energia reativa em um período é chamada potência reativa média, medida em KVAR, e geralmente representada pela letra Q - “potência reativa”.

A potência ativa é a potência real, que realiza trabalho, sendo a diferença de potencial entre terminais e todo trabalho realizado pela corrente em um intervalo de tempo, medida em Watts (W).

A potência reativa, medida em Volt-Ampère reativo (VAR), é necessária para formar o campo magnético. A mesma é transmitida a partir de fontes geradoras distantes das indústrias, no entanto contribui para perdas no sistema de transmissão e distribuição.

A potência ativa e a potência reativa constituem a potência aparente, ou potência total, medida em Volt-Ampère (VA), que é a relação entre a tensão e a corrente. Com esses dados, é possível fazer o dimensionamento de cabos e sistemas de proteção elétricos.

De acordo com Mamede Filho (2006), em termos matemáticos o fator de potência é caracterizado como a relação entre os componentes ativo da potência (P), em kW, e a potência aparente ou potência total da carga (S), em kVA.

Veja:

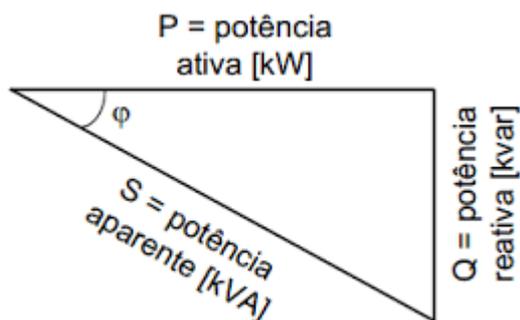
Equação

(1)

$$F_p = \frac{P_{at}}{P_{ap}}$$

O fator de potência pode ser definido também, segundo Mamede Filho (2006), como o cosseno do ângulo de defasagem entre o componente ativo e reativo, conforme a Figura 8.

Figura 8 - Definição do Fator de Potência



Fonte: Mamede Filho, 2006.

De acordo com Creder (2016), a expressão geral da potência em circuitos monofásicos de corrente alternada é o produto da tensão (V), corrente (I) e o fator de potência:

Equação

$$P = V \times I \times \text{Fator de Potencia}$$

(2)

Já, para os circuitos trifásicos, ainda segundo Creder (2016), tem-se um outro fator, resultante da composição vetorial das três fases, conforme a equação abaixo:

Equação

$$P = 1,73 \times I \times \text{Fator de Potencia}$$

(3)

Como visto, a energia reativa é essencial para funcionamento de equipamentos e sistemas elétricos e está diretamente relacionada ao fator de potência. No entanto, a energia reativa deve ser minimizada a fim de não prejudicar as instalações elétricas, como as linhas de transmissão. O próximo tópico trata das técnicas para correção do fator de potência.

2.3.2. Técnicas para Correção do Fator de Potência

O baixo FP como à energia elétrica está sendo usada inadequadamente, ou seja, está trabalhando com ineficiência, podendo acarretar em multas e consequências técnicas em equipamentos para as instalações. Para correção do FP, podem ser utilizados os seguintes dispositivos: banco de capacitores, motores e síncronos superexcitado.

Já os reatores e FACTS (*flexible alternating current transmission systems*), em sua maioria, são utilizados em linhas de transmissão de alta tensão, proporcionando a compensação da linha, visando a redução do excesso de reativo.

Nas palavras de Cotrim (2009), a elevação ou adequação do fator de potência é realizada com a instalação de sistemas de compensação de energia reativa compostos por capacitores, também chamados de bancos de capacitores, em ligação em paralelo (tipo Shunt) conectados no mesmo ponto de carga ou por motores síncronos superexcitados. A determinação da potência reativa dessa instalação adicional pode ser feita com o auxílio das expressões utilizadas nas definições do “triângulo ou tetraedro das potências”. Com isso, é possível obter uma série de benefícios, como por exemplo, a diminuição de perdas, redução no estresse dos transformadores devido ao aquecimento excessivo, redução da interferência nos sistemas de telefonia e comunicação, entre outros (MARTINS, 2008).

No Brasil, a ANEEL gerencia estas relações sendo respaldada pela legislação brasileira através de decretos (62.724 de 1968, 75.887 de 1975 e 479 de 1992) que determinam o fator de potência mais próximo de 1, porém, permitindo uma taxa mínima de 0,92. Esses decretos também regulamentam o critério de faturamento da energia reativa que exceder os limites.

Se o fator medido na instalação do consumidor estiver inferior a 0,92 será cobrada uma taxa de consumo reativo que é calculada através do valor mensal de energia ativa e reativa. Em outros países como Espanha e Argentina conforme a Tabela 2, contemplam valores iguais, sendo regulamentadas pelo órgão nacional de cada país.

Tabela 2: Valores de Potência em Outros Países

País	Fator de Potência
Colômbia	0,90
Espanha	0,92
Argentina	0,92
Brasil	0,92

Fonte: Engeletrica, 2019

As classes consumidoras podem ser indústrias, shoppings e alguns edifícios. alguns países, como Alemanha e Suíça, já contemplam em seus valores de potência 0,95. O valor 0,92 foi estabelecido após vários estudos técnicos de expansão do sistema elétrico. Os mesmos foram idealizados por técnicos e engenheiros da Coordenação de Critérios de Planejamento Elétrico – CCPE, e com o Comitê Técnico de Estudos de Transmissão – CTET. Esse estudo técnico do FP está sendo idealizado para o aumento do fator de potência para 0,95 no futuro (ANEEL, 2017).

Atualmente são utilizados para correção do FP banco de capacitores, motores síncronos e reatores. Porém, a falta de flexibilidade dessas tecnologias e o crescimento da eletrônica de potência motivaram a pesquisa na busca de equipamentos mais flexíveis. Nesse contexto, surgiram novos dispositivos compensadores de reativos, os FACTS, que proporcionam qualidade de energia no sistema elétrico de potência (SEP) e eficiência.

De acordo com Song e Johns (1999 *apud* FURINI E ARAUJO, 2008), a utilização de compensação de reativos tem sido amplamente utilizada para aumentar a capacidade de transmissão e, recentemente, também para o amortecimento de oscilações eletromecânicas no sistema.

Os autores ainda explicam que esta compensação era realizada pela inserção manual de um banco de capacitores (BC) em série com a linha de transmissão, resultando na diminuição da reatância efetiva da LT e tornando o sistema de potência eletricamente mais robusto.

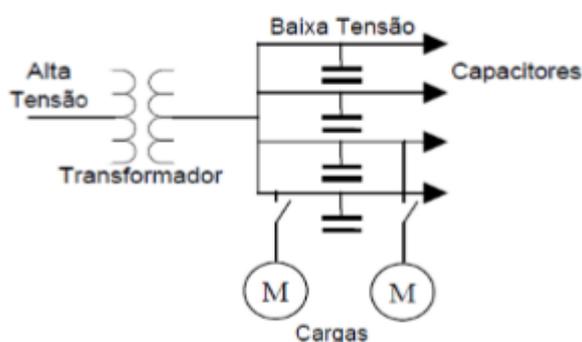
2.3.2.1. Banco de Capacitor

Banco de capacitor é um grupo de vários capacitores da mesma classificação que são conectados em série ou paralelo entre si para armazenar energia elétrica. O uso mais comum de um banco de capacitores para correção é em ambientes industriais e concessionárias que utilizam um grande número de transformadores motores elétricos. Esse dispositivo tem a função de adiantar a corrente em relação a tensão, compensando a defasagem entre corrente e tensão.

Na definição de Mamede Filho (2006), os capacitores são equipamentos constituídos basicamente de duas placas condutoras em paralelo e separadas por um meio isolante, capazes de acumular eletricidade, através da geração de um campo eletrostático.

O banco de capacitores, conforme ilustrado nas Figuras 9 e 10, é instalado para compensar um conjunto de máquinas indutivas, o mesmo é instalado na sala elétrica. (CODI, 2004:7 *apud* ANICETO, 2016).

Figura 9 - Capacitores Localizados nos Grupos de Cargas



Fonte: CODI, 2004.

Figura 10 - Banco de Capacitores



Fonte: MP Engenharia Elétrica, 1998.

Cotrim (2009) destaca que o método dos capacitores é o mais utilizado nas instalações industriais por ser o mais econômico e o com maior flexibilidade de aplicação.

2.3.2.2. Motor Síncrono Superexcitado

O motor síncrono superexcitado não tem como finalidade converter energia elétrica em energia mecânica ou vice-versa, mas sim ajustar as condições na rede de transmissão de energia elétrica. Seu campo é controlado por um regulador de tensão para gerar ou absorver energia reativa conforme necessário para ajustar a tensão da rede ou para melhorar o fator de potência.

De acordo com Lamb (2015), o motor síncrono é utilizado em esquemas de correção do fator de potência, conhecidos como condensadores síncronos. Esse método usa um aspecto do motor pelo qual ele consome energia em um fator de potência adiantado quando seu rotor é superexcitado. Para a fonte de alimentação, ele parece ser um capacitor e pode então ser usado para corrigir o fator de potência atrasado que geralmente é apresentado à fonte de energia pelas cargas indutivas.

Uma vez que as fábricas são taxadas pelo seu consumo extra de eletricidade, se o fator de potência é muito baixo, isso pode ajudar a corrigir o perfil de potência de uma planta. A excitação é ajustada de forma automática até que um fator de potência próximo da unidade seja obtido. Os motores usados para essa finalidade são facilmente identificados, pois não possuem extensões de eixo.

Aniceto (2016) destaca que motores síncronos podem ser utilizados para corrigir o fator de potência por produzirem energia reativa capacitiva, da mesma forma que um gerador convencional.

Para Creder (2016), os motores síncronos demonstrados na Figura 11, podem também ser utilizados no melhoramento do FP de uma instalação, desde que sejam superexcitados (capacitivos).

Figura 11 - Motor Síncrono



Fonte: Reviax, 2019.

Kamalpathi *et al.* (2018), ressaltam que novas estratégias para a correção surgem no mercado a todo instante, destacando o motor DC Brushless um motor sem escovas. Esse equipamento comparado ao motor síncrono convencional utilizado na correção tem menor taxa de manutenção devido a sua estrutura construtiva não conter escovas.

2.4. Energias Reativas Elevadas em Linhas de Transmissão

As linhas de transmissão em suas características naturais requerem energia reativa em maior ou menor quantidade para o transporte de energia ativa. No entanto, níveis de energia reativa elevados, o que ocorre principalmente em linhas de grande comprimento, podem sobrecarregar as instalações, além de ocupar uma capacidade de condução da corrente elétrica que poderia ser melhor aproveitada para realizar trabalho útil.

O excesso de energia reativa também pode gerar danos para equipamentos, dispositivos de proteções e qualidade de energia.

De acordo com Kagan, Oliveira e Robba (2005), qualquer linha de transmissão, aérea ou subterrânea, apresenta parâmetros série, sendo: resistências ôhmicas, indutâncias próprias e mútuas, e parâmetros em derivação: condutâncias, geralmente desprezíveis e capacitâncias.

A resistência e a indutância uniformemente distribuídas ao longo da linha formam a impedância em série. A condutância e a capacitância existentes entre condutores de uma linha monofásica ou entre o condutor e o neutro de uma linha trifásica formam a admitância em derivação (STEVENSON JR, 1974).

Com o aumento da carga, tem-se a elevação da carga reativa. Sendo assim, existe a tendência de as tensões diminuírem durante os períodos de pico de carga, elevando a corrente no sistema.

A consequência de um baixo fator de potência para Zheng e Zhang (2017), é dada por um sistema elétrico ineficiente e também pode ser menos vantajosa, economicamente falando, para os operadores do sistema.

Para Engeletrica (2011), o efeito capacitivo é causado pelas linhas de transmissão longas de alta tensão, resultado esse na qual resulta em aumenta os níveis de potência na linha. Tal fato mostra que esses surtos podem gerar grandes perdas financeiras para a concessionária.

Essas situações resultam no aumento da corrente total que circula nas redes de distribuição de energia elétrica, fazendo sobrecarregar as subestações elétricas, as linhas de transmissão e de distribuição, afetando a estabilidade e as condições. Isso pode causar problemas tais como perdas na rede, quedas de tensão e subutilização da capacidade instalada (ENGELETRICA¹, 2011).

Quando o sistema tem excesso de reativo é necessário fazer a compensação dessa energia, sendo necessário inserir dispositivos consumidores de reativos para controlar níveis de tensão em alguns pontos da linha. Quando se minimiza a energia reativa, conseqüentemente se corrige o fator de potência. O tópico seguinte aborda a correção do fator de potência em linhas de transmissão.

2.4.1. Compensação do FP em Linhas de Transmissão

Kabir, Mohsin, e Khan (2017), destacam as vantagens de corrigir o fator de potência. Sendo as principais delas, a redução das perdas de tensão no sistema de potência, maior capacidade de carga, tensões aprimoradas, dentre outras.

Além dessas vantagens, segundo Franchi (2008), para a concessionária de energia elétrica os benefícios são: a potência reativa e baixa no sistema de transmissão e distribuição, minimização das perdas pelo Efeito Joule, aumento da capacidade de transmissão e o aumento da potência ativa, que é a que realmente gera trabalho, diminuindo os custos de geração.

A compensação em série reduz a impedância da linha, que é a causa principal da queda de tensão e o fator mais importante na determinação da máxima potência que pode ser transmitida (STEVENSON JR, 1974).

Na compensação o controle de energia reativa é, na visão de Ahmed e Alam (2006), parte essencial em um sistema de energia para minimizar a perda de transmissão de energia, maximizando a capacidade de transmissão de energia e mantendo a tensão do sistema dentro do nível desejado.

A correção do FP pode ser realizada através de diferentes compensadores, sendo: banco de capacitores, compensadores síncrono, reatores e FACTS, entre outros, que serão abordados nos subtópicos seguintes.

¹ A empresa Engeletrica foi fundada em 1988, com 31 anos de mercado é especialista de fornecimento de matérias elétricas, serviços de finalização e laudos técnicos, possuem diversos clientes em diversos setores, sendo assim motivo de confiabilidade para citação neste trabalho de conclusão.

2.4.1.1. Banco de Capacitor em Linhas de Transmissão

Os BCS (banco de capacitores em série) são utilizados para reduzir a impedância da linha e aumentar a capacidade de transmissão, já em derivação são utilizados primordialmente para fornecer energia reativa no sistema.

2.4.1.1.1. Banco de Capacitor em Série

Os BCS são dispositivos que têm a função de compensar a LT através da inserção de energia capacitiva, sua localização ideal para instalação é no meio da linha, através de uma subestação no local para pleno funcionamento.

Segundo Kundur (1994), a utilização de banco de capacitores em série (BCS) chaveados representa um menor custo em relação ao sistema FACTS, sigla resultante da expressão inglesa “*Flexible AC Transmission Systems*”, entretanto o seu chaveamento no decurso de uma instabilidade transitória pode ser que não seja rápido na prevenção a instabilidade de tensão.

Em se tratando da compensação série, emprega se banco de capacitores que têm a função de compensar a indutância da linha, aumentando a capacidade de transporte em vista da sua estabilidade.

Para Fuchs (1977), a compensação da energia reativa e feita através de banco de capacitores conectados em série com a linha, capazes de reduzir os efeitos da indutância da linha de transmissão.

Nestas condições, o BCS na LT apresenta as seguintes vantagens: uma solução mais econômica para os requisitos dos limites de estabilidade estática e transitória; contribuem para regulação das frequências das linhas e ajudam no controle de reativos no sistema

2.4.1.1.2. Banco de Capacitor em Derivação

A compensação em derivação tem a finalidade de gerar reativo ou absorver reativo atuando direto na capacitância da linha de transmissão, visando a redução de perdas no sistema.

De acordo com Cotrim (2008), a elevação ou adequação do fator de potência é realizada com a instalação de sistema de compensação de energia reativa compostos por capacitores, também chamados de bancos de capacitores, em ligação em paralelo (tipo Shunt) conectado no mesmo ponto da carga ou por motores síncronos superexcitados.

A determinação da potência reativa dessa instalação adicional pode ser feita com o auxílio das expressões utilizadas nas definições do “triângulo ou tetraedro das potências” como já mostrado em figuras anteriores.

Já, na visão de Gomes *et al.* (2018), a ligação em paralelo tem como finalidade compensar perdas do sistema e trabalhar em níveis seguros de tensão durante o carregamento. A desvantagem é a geração de reativos proporcional ao quadrado da tensão, com isso, em uma queda de tensão no sistema a geração de reativos será menor que a necessidade no momento.

Através da compensação em derivação se consegue obter resultados satisfatórios como evitar as perdas no sistema, além da eficiência da rede.

2.4.1.2. Compensador Síncrono

As máquinas síncronas permitem o controle de reativos na LT, podendo ser para cargas indutivas ou capacitivas, operando a vazio e também sendo utilizada para compensar variações de tensão.

O compensador síncrono, para Ragnev (2005), é uma máquina síncrona que é utilizada para compensar variações lentas de tensão, de forma a atender o que se procura em um sistema transmissão, ou seja, a possibilidade de entregar para consumo a máxima potência ativa possível sob um valor nominal de tensão.

As máquinas de compensação síncrona necessitam de estudos para identificar o melhor local de instalação visto que, esse posicionamento influencia no valor do projeto.

Esse dispositivo traz grandes vantagens para correção do fator de potência, visto que é possível controlar a inserção de reativos, porém seu custo de instalação é elevado.

Além da correção do FP, a compensação na linha tem outros benefícios como: garantir um melhor aproveitamento do sistema elétrico existente, ajustar os módulos de tensão e eliminar a utilização inadequada de equipamentos controlados como, por exemplo, a utilização de geradores síncronos, atendendo à potência reativa da carga (CHAVES, 2007).

2.4.1.3. Reatores

Os bancos de reatores podem ser ligados nas linhas de transmissão ou nas barras das subestações, em série ou em paralelo. Os reatores foram os primeiros equipamentos de compensação na transmissão de energia elétrica, atuando nas reatâncias capacitiva das linhas, fenômeno de característica natural da LT.

De acordo com Rezende et al. (2015), utilizam-se reatores para compensar as reatâncias dos níveis das energias capacitivas naturais das LT's, conforme na Figura 12. Através dessa compensação, visa neutralizar o Efeito Ferranti.

A compensação utilizando reatores visa neutralizar a impedância da linha, quando o sistema opera com baixo carregamento, além de aumentar a capacidade de transmissão de energia elétrica e neutralizar as altas tensões que prejudicam o transporte de eletricidade.

De acordo com Lopes, Silva e Chaves (2014), os reatores são equipamentos fabricados para reduzir a indutância em um circuito elétrico, consistindo de uma série de voltas de um fio condutor bobinado.

Figura 12 - Banco de Reatores



Fonte: GridEnergy, 2018.

2.4.1.3.1. Reatores em Série

O banco de reatores em série, segundo Nashawati (2013), se instalado em série com a linha, contribui para limitar a corrente de curto-circuito na mesma, já que a impedância série equivalente dessa combinação tende a ser maior. Caso ligado em derivação, a regulação de tensão na linha é feita por meio da absorção do excesso de reativos.

Esta tecnologia é similar aos transformadores de potência, e utilizado para compensação em linhas porem possuem restrições quanto a seu controle além das perdas por linearidade.

Segundo Harlow (2004), um reator série pode ser um dispositivo eficaz para implementar a capacidade de transmissão de energia. A impedância necessária do reator é facilmente determinada por estudos do sistema. Reatores série pode ser inseridos de forma permanente para melhorar o compartilhamento de carga entre as linhas de impedância diferentes ou temporariamente.

Estes reatores são utilizados para prover a reatância indutiva de forma que possa limitar a corrente de falta e melhorar o perfil entre o compartilhamento das cargas nas linhas.

2.4.1.3.2. Reatores em Derivação

Os reatores em derivação atuam diretamente para compensar a energia reativa capacitiva gerada pelas condições de carga leve na linha, geralmente são conectados junto ao terciário de um transformador de potência.

Os reatores em derivação são utilizados para compensação de energia reativa capacitiva gerada pelos em cabos subterrâneos ou carga leve, esses dispositivos são conectados ao terciário dos transformadores (LOPES; SILVA; CHAVES, 2014).

A compensação em derivação atua direto no efeito capacitivo das linhas, além de neutralizar o efeito das reatâncias, sob o cenário de carga leve ou cabos subterrâneos.

Para Brasil (1996), a busca de maior eficácia dos sistemas de transmissão, isto é, o cumprimento dos seus objetivos a um mínimo custo, promoveu o surgimento de novas concepções de linhas de transmissão em extra e ultra alta tensão, como, por exemplo, as linhas compactas e as linhas de potência natural elevadas. Estas linhas, por sua vez, apresentam uma produção de potência reativa capacitiva substancialmente maior que as linhas de transmissão convencionais.

A aplicação de reatores em derivação nestas linhas permite a energização das mesmas e auxilia no controle de tensão no sistema, no regime permanente quanto ao transitório.

2.4.1.4. FACTS

Um sistema de transmissão de corrente alternada flexível FACTS (do inglês, *Flexible AC Transmission Systems*), é um sistema composto de equipamentos estáticos usados para compensação de energia reativa em linhas de transmissão. Ele destina-se a melhorar a capacidade de controle e aumentar a capacidade de transferência de energia da rede. Geralmente é de um sistema baseado em eletrônica de potência, trata-se de um tipo de compensador inteligente.

Com a finalidade de se obter um sistema elétrico mais confiável e com melhor qualidade muitos estudos estão em desenvolvimento e uma área que hoje tem sido muito estudada devido a essa necessidade de controle é a área de eletrônica de potência. Os dispositivos que vem recebendo grande atenção são os chamados FACTS os quais são desenvolvidos para o controle do fluxo de potência. Este controle pode ser efetuado através de grandezas como impedância, tensão, corrente e ângulos de fase (RIBEIRO JÚNIOR, 2015).

Essa tecnologia visa melhorar a qualidade de transmissão, melhorando a eficiência da linha e fornecendo energia indutiva ou reativa para rede. São dispositivos eletrônicos utilizados no sistema de transmissão de energia elétrica, com componentes estáticos modernos, porém gerando muito harmônicos.

Para Deckmann e Pomilio (2009), alguns benefícios que a tecnologia dita acima traz são: ampliar a capacidade de transmissão; operação de linhas em paralelo, mesmo com capacidades distintas; redirecionar o fluxo de potência; fazer ajustes controlados de reativos durante a operação; estabilizar perturbações de tensão com eficiência; integrar sistemas CC e CA.

De acordo com Castro (2011), o desenvolvimento da eletrônica de potência possibilitou o surgimento dos dispositivos flexíveis. Atualmente, estes dispositivos são usados principalmente no controle de fluxos de potência e na melhoria do perfil de tensão na linha de transmissão, e sua utilização no amortecimento de oscilações já vem sendo estudada e implementada.

Esses dispositivos comparados a outros compensadores possuem diversas vantagens sendo ela o controle do fluxo reativo e ativo da LT, além de, estabilizar as perturbações no sistema.

Masuda (2006) lista diferentes tipos de controladores e destaca suas funções próprias:

SVC: “Controle de tensão, compensação de reativos, amortecimento de oscilações”;

STATCOM: “Controle de tensão, compensação de reativos, amortecimento de oscilações, estabilidade transitória”;

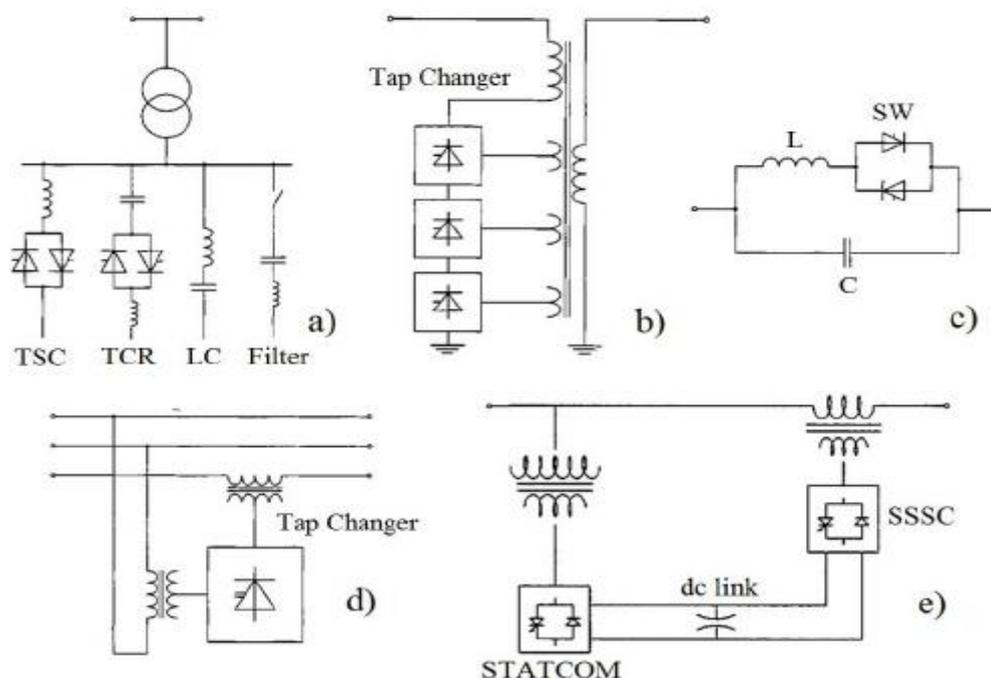
TCSC: “Controle de potência, controle de tensão, controle de impedância série, amortecimento de oscilações, estabilidade transitória”;

Transformador “Desfasador Chaveado a Tiristor: Controle de potência, controle de tensão, amortecimento de oscilações, estabilidade transitória”;

UPFC: “Controle de potência, controle de tensão, compensação de reativos, amortecimento de oscilações, estabilidade transitória”. (MASUDA, 2006).

Os diferentes tipos de controladores FACTS, ilustrado na Figura 13 e suas particularidades serão abordados nos subtópicos a seguir.

Figura 13 - Equipamentos FACTS



Fonte: Researchgate, 2012.

2.4.1.4.1. Compensador Estático de Reativos – SVC.

O SVC, do inglês *Static VAR Compensator*, é um conjunto de dispositivos eletrônicos que fornece energia reativa de ação rápida em redes de transmissão de alta tensão. Os mesmos fazem parte da família de dispositivos do sistema de transmissão em corrente alternada flexível, regulando tensão, fator de potência, harmônicos e estabilizando o sistema (GOMES *et al.*, 2018).

Esse dispositivo é um dos mais utilizados da família dos componentes FACTS, tendo a função de regular a rede através da inserção de energia reativa, além de ter uma rápida resposta no sistema. Tal dispositivo pode gerar ou absorver potência reativa da rede. Silva (2004), destaca que antes de surgir o SVC, por volta de 1960, era necessário que a compensação fosse feita por dispositivos compensadores síncronos, tendo suas perdas de potência ativa supridas pela própria rede. A aplicação de um dispositivo como este maximiza a capacidade de potência da rede tornando as perdas por reativos em níveis aceitáveis.

A proposta principal desses equipamentos era de conseguir uma ação rápida, precisa ao ajustar a necessidade de compensação de potência reativa do sistema no qual estão fazendo parte. Para isso eles adicionam ou retiram capacitância ou mesmo fazem uso de capacitores controlados a chaves tiristorizadas.

Em outro arranjo, junta-se em paralelo com um desses capacitores e reatores controlados a chaves tiristorizadas que também fazem a compensação através do ajuste dos ângulos de disparo dos tiristores.

Este dispositivo é composto por um reator controlável e um capacitor fixo. Ambos dispositivos podem ser ajustados para controle de tensão e a potência reativa dos seus terminais. O mesmo tem a função de controlar a tensão, em sua configuração básica ele é constituído por um Reator Controlado a Tiristor- TCR que fica em paralelo com Capacitor Chaveado a Tiristor – TSC.

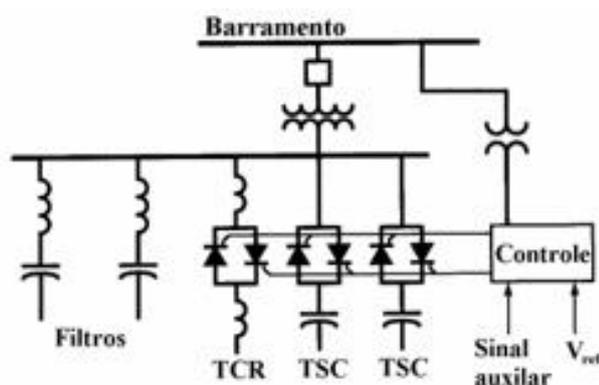
Os compensadores Shunt controlados por tiristores (SVC) são uma associação de reatores Shunt controlados por tiristores e capacitores fixos ou chaveados a tiristores com a função de, pela injeção de corrente reativa (em quadratura com a tensão) controlar o nível de tensão e/ou compensar o fator de potência da carga. A presença de reatores e capacitores permite a compensação reativa nos dois sentidos (indutivo e capacitivo).

Deckmann e Pomilio (2009), completam que a comutação do reator controlado a tiristores (RCT) produz componentes harmônicas na corrente pelo sistema. Na Figura 14 o banco capacitivo possui reatores em série de modo que na frequência fundamental o efeito é capacitivo, enquanto na frequência de sintonia o ramo atua como um filtro para as harmônicas do RCT.

Para Paixão (2006), a utilização de bancos de capacitores chaveados possui a vantagem de apresentar um custo muito menor em relação ao SVC e ao STATCOM, que será explicado mais adiante, mas também possui algumas desvantagens.

O chaveamento de um BC, durante a instabilidade transitória pode ser que não seja rápida para prevenir uma instabilidade de tensão. Apesar disso, caso aconteça uma queda de tensão o capacitor em paralelo fornecerá uma quantidade menor de energia reativa capacitiva.

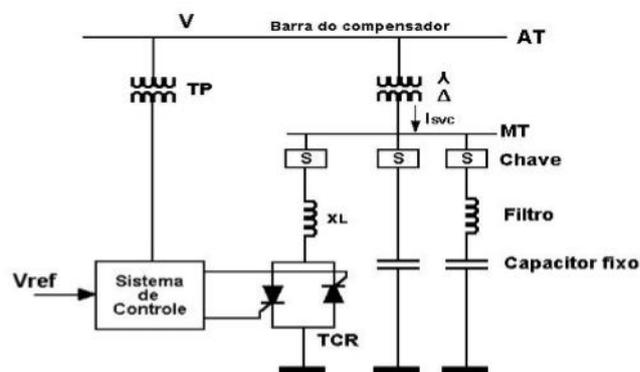
Figura 14 - SVC no Sistema



Fonte: Paixão, 2006.

Segundo Naturesa (2001), o SVC real é constituído por reator variável e um capacitor fixo. Os componentes podem ser observados separadamente na Figura 15, onde é analisado a tensão versus corrente.

Figura 15 - SVC Real

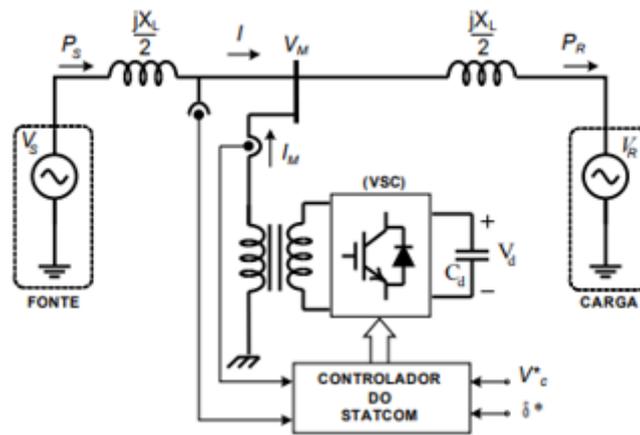


Fonte: Naturesa, 2001.

3.1.1. Compensador Síncrono Estático - STATCOM

O STATCOM (*Static Synchronous Compensator*) tem a função de controlar a energia reativa capacitiva e indutiva, além de controlar a tensão no ponto de conexão melhorando a estabilidade dinâmica do circuito elétrico, conforme a Figura 16.

Figura 16 - Controlador STATCOM

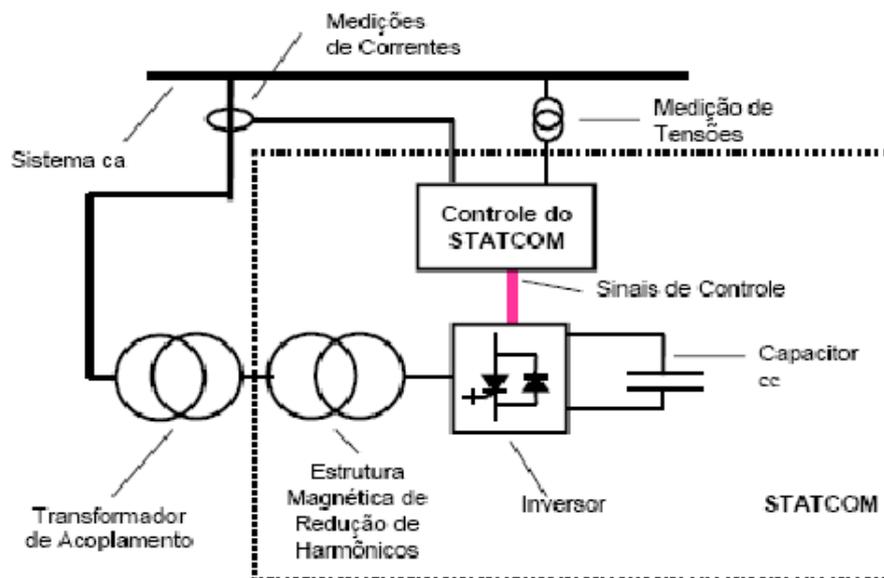


Fonte: Souza e Barbosa, 2018.

De acordo com Souza e Barbosa (2018), o STATCOM é um dispositivo compensador de energia reativa que funciona conectado em paralelo com o sistema elétrico. Tem a função de controlar a tensão de um barramento. Na literatura possuem diferentes estratégias propostas para controlar esse equipamento.

O STATCOM é dividido em componentes (fontes CC, capacitores, transformadores, reatores, pontes de semicondutores - chaves comutadas), como demonstra a Figura 17, onde cada componente é dimensionado em função da aplicação e dos níveis de tensão e corrente do sistema.

Figura 17 - Esquema Básico do STATCOM



Fonte: Silva, 2004.

O controle da potência reativa é feito sem a necessidade de chaveamento de bancos de capacitores ou reatores. O STATCOM utiliza conversores de fonte de tensão que convertem a tensão em corrente contínua.

Esta compensação de potência reativa pode ser usada para manter as perdas na transmissão em um valor mínimo. Desta forma, pode-se aumentar a capacidade de transmissão de potência ativa e, com isso, aumentar a estabilidade do sistema (RAHIM, 2001, apud SANTOS, 2003).

Este dispositivo é utilizado para fazer o controle FP e a regulação da tensão no ponto intermediário, melhorando a estabilidade dinâmica do sistema elétrico.

2.4.1.4.2. Compensador Série Controlado a Tiristor – TCSC

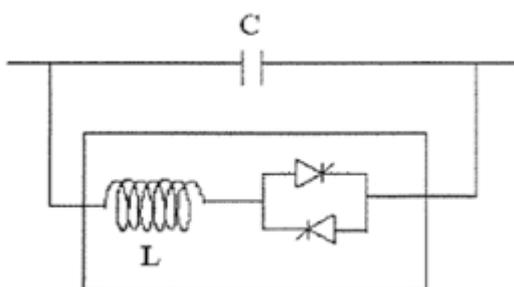
O TCSC (*Thyristor controlled series capacitor*), é um equipamento de capacitância fixa e um reator controlado a tiristores. Sua reatância é modificada através do controle do ângulo de disparo dos tiristores.

Ele é um dos equipamentos mais eficazes, pois fornece soluções adequadas devido ao controle flexível do tiristor. O TCSC é conectado em série com os condutores da linha de transmissão. Choudekar, Sinha e Siddiqui (2018) conceituam o TCSC como um dispositivo FACTS em série que altera a reatância da linha de transmissão e, portanto, controla o fluxo de energia através dessa linha, levando à redução do congestionamento e melhorando o carregamento da linha de transmissão.

O TCSC atribui as seguintes vantagens em relação à compensação série fixa (FSC): usado para controle de fluxo de carga; fornece amortecimento das oscilações de potência ou sobre a associação com o POD (*Power Oscillation Damping*); que permite um grau mais elevado de compensação.

Na Figura 16 está representado o esquema básico do TSSC com a capacidade de controle do fluxo de corrente. Normalmente são aplicados nas interconexões de sistemas de distribuição, propiciando a conexão a outros sistemas de forma gradual causando menor impacto possível com relação as variações e perturbações no sistema.

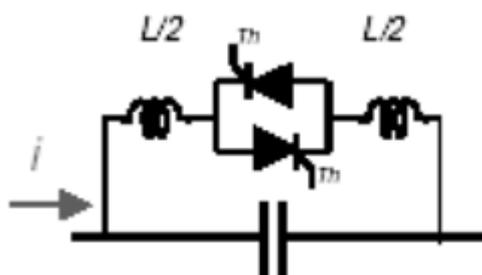
Figura 18 - Esquema Básico TCSC



Fonte: Silva 2004.

A Figura 19 representa o TCSCS com as características semelhantes ao TSSC com aplicação de reatores e capacitores de acoplamento, normalmente aplicados nas interconexões de sistemas de distribuição. Tal fato propicia a conexão a outros sistemas de forma gradual causando menor impacto possível com relação às variações e perturbações no sistema.

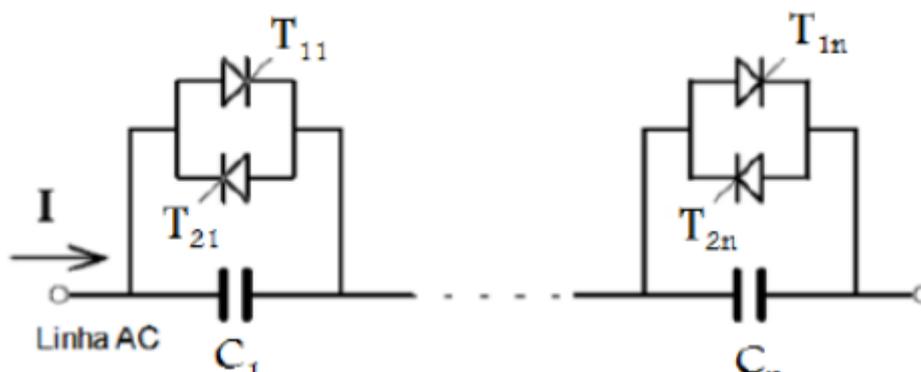
Figura 19 - TCSC



Fonte: Ribeiro Júnior, 2015.

Para Ribeiro Júnior (2015), o Compensador Série Chaveado a Tiristor (TSSC) tem a vantagem de ser bem simples como pode ser visto na Figura 20, porém não admite um controle contínuo da reatância série.

Figura 20 - Configuração do TSSC



Fonte: Ribeiro Júnior, 2015.

2.4.1.4.3. Compensador Série Síncrono Estático– SSSC

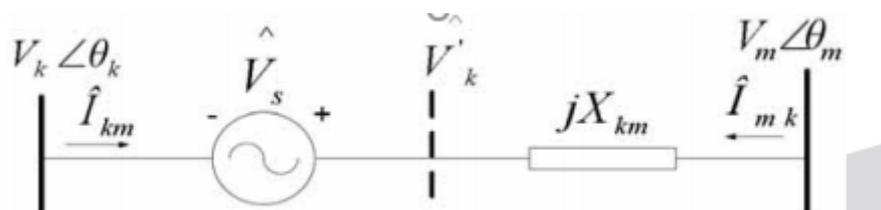
Este dispositivo funciona não apenas como um compensador de potência reativa, mas tem a capacidade de fornecer e absorver energia ativa da linha de transmissão. No sistema de controle do SSSC (*The Static Synchronous Series Compensator*). Além da compensação de potência reativa, o SSSC também fornece melhoria do perfil de tensão no sistema.

Para Cárdenas (2005), o dispositivo citado acima opera como um gerador síncrono operado sem uma fonte de energia elétrica, atua como compensador série cuja sua tensão de saída está em relacionada com a corrente da linha.

Em sua construção física ao invés de utilizar banco de capacitores e reatores, o SSSC é composto por conversores de tensão e corrente, baseado nas chaves auto comutadas, responsáveis pela produção de tensão trifásica em quadratura com a corrente da LT.

O modelo do SSSC em estudo, de acordo com Ayres et al. (2010), é representado por uma fonte de tensão V_s , conforme ilustrado na Figura 21.

Figura 21 - Modelo SSSC



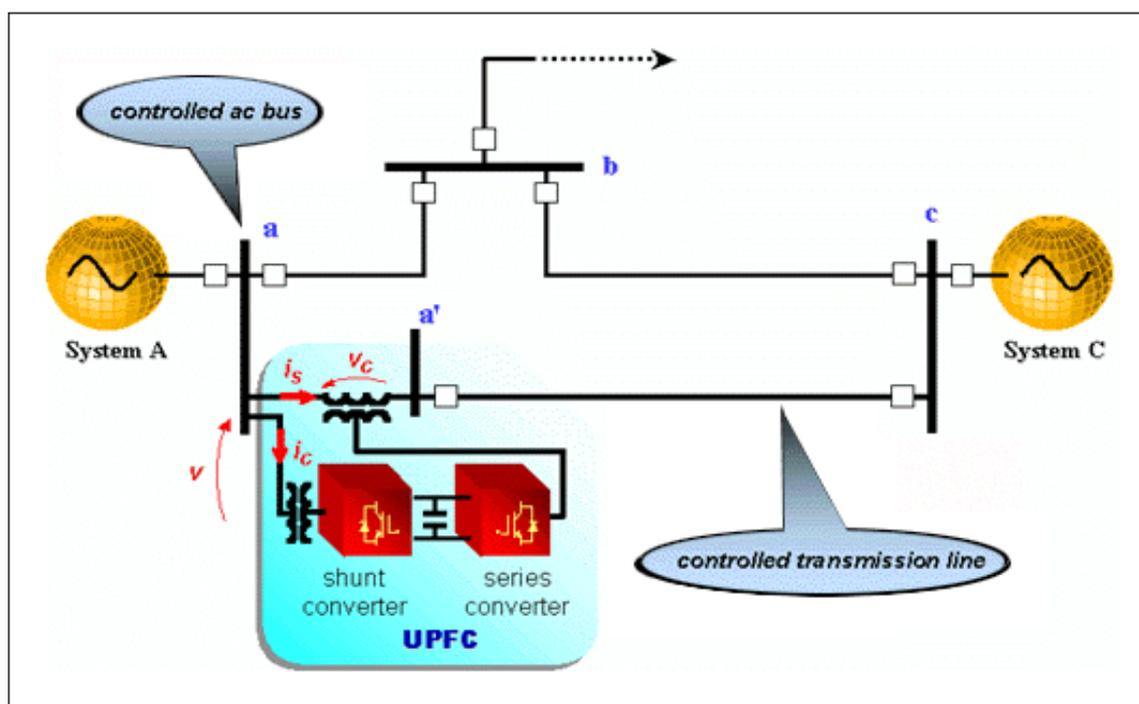
Fonte: Ayres, 2010.

2.4.1.4.4. Controlador Unificado de Fluxo de Potência – UPFC

De acordo com Valle e Araújo (2012), esse equipamento é destinado a controlar o fluxo de tensão na barra de instalação além de fornecer amortecimento para oscilações no SEP, este dispositivo é composto por um dispositivo POD (*Power Oscillation Damping*).

Este dispositivo pode ser visto como a combinação de um SSSC com um STATCOM, ambos trabalhando simultaneamente e acoplados via um link corrente contínua, o esquema básico do UPFC e ilustrado na Figura 22.

Figura 22 - UPFC Esquema Básico



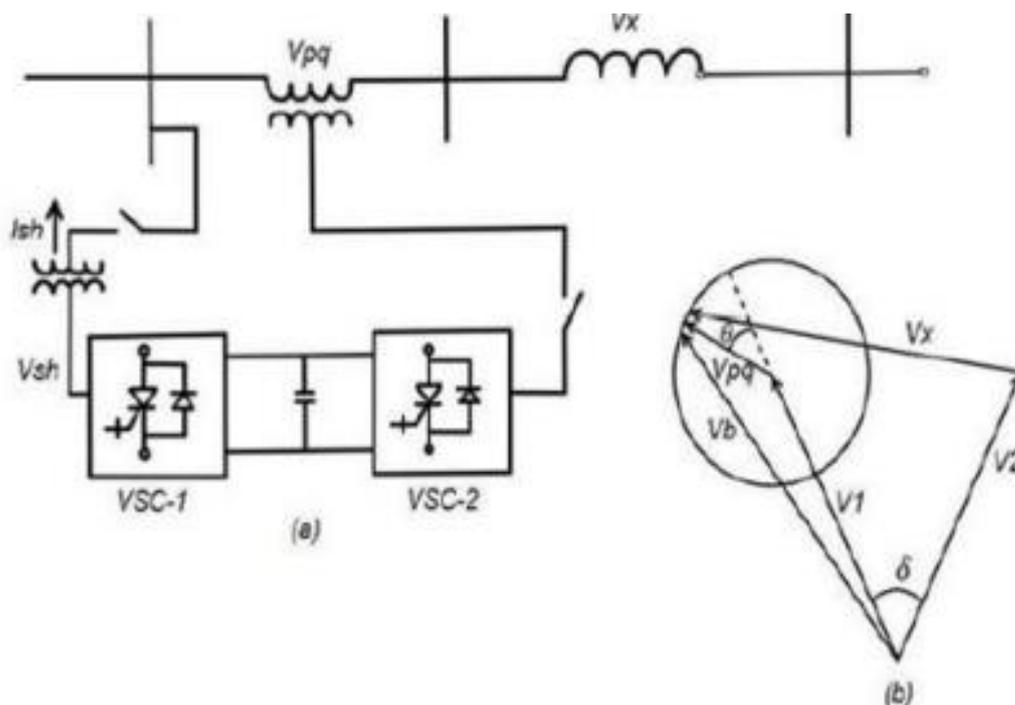
Fonte: Santini, Gandin, Correia, 2009.

Com essa configuração acima, o UPFC tem a capacidade de fornecer uma compensação série reativa controlável na linha de transmissão que está conectado e controlar a tensão da barra. Adicionalmente, o UPFC torna-se uma opção para a melhoria da estabilidade dinâmica quando equipado com sinais estabilizadores suplementares em sua malha de controle (VALLE; ARAUJO, 2012).

O UPFC faz o controle na barra mantendo os níveis de tensão estável, fazendo com que a linha de transmissão opere com segurança e qualidade no transporte de energia elétrica.

De acordo com Ribeiro Júnior (2015), o UPFC tem muitas funções, tais como a compensação da potência reativa e ativa no sistema, elevação da capacidade de transmissão, o aumento da estabilidade do sistema. Seu diagrama pode ser visto na Figura 23.

Figura 23 - Diagrama UPFC



Fonte: Ribeiro Júnior, 2015.

A principal vantagem do UPFC é controlar os fluxos de energia ativa e reativa na linha de transmissão. Se houver quaisquer distúrbios ou falhas no lado da fonte, o UPFC não funcionará. Além disso, ele opera somente sob uma fonte de onda senoidal balanceada.

3. METODOLOGIA

Este trabalho é composto por uma pesquisa bibliográfica com base em referências teóricas publicadas em teses, livros e artigos. Sua metodologia busca identificar os impactos do baixo FP nas linhas longas e as tecnologias para correção, além de estudar seus benefícios. Dito isso, as etapas abaixo foram assinaladas no intuito de maior esclarecimento da efetivação por estudos feitos.

Inicialmente, buscou-se instruir sobre linhas de transmissão e a energia elétrica que possui enormes quantidades de quilômetros em corrente alternada, até chegar a seu destino final. De tal forma, para que essa energia chegue às residências, hospitais, e indústrias, ela precisa ser transportada a unidade de geração por meio de LT's. Passando de área em área, a correção do fator de potência nas mesmas é de suma importância por está diretamente relacionada com a qualidade e os custos da energia elétrica.

Assim, na primeira etapa, foram realizados estudos bibliográficos, como já citados, relacionados ao funcionamento a variação do fator de potência, já que este é tem um significado matemática entre as potências ativas e reativas do fator de potência. Com isso, foi possível entender que em um circuito elétrico existem três tipos de potências; potência ativa: sendo aquela que realiza trabalho útil gerando calor, luz, sua unidade de medição é dada em (kW). Potência reativa: usada para estabelecer os níveis dos campos eletromagnéticos das cargas indutivas, sua medida é dada em (kVAr). E por fim, a potência aparente que é a soma vetorial entre potências ativa e reativa, sua medida é dada em (kVA).

Na segunda etapa foi possível identificar quais tipos de cargas ocorrem no sistema elétrico brasileiro com base em pesquisas de livros, artigos e dissertações sendo reforçadas por sites e órgãos como ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), SIN (Sistema Interligado Nacional) e ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico). Feito isso, os autores deste trabalho, procuraram se instruir com relação às linhas de transmissão e quanto à correta correção do fator de potência nas LT's.

Este estudo também elucida sobre possíveis benefícios e malefícios que estas técnicas podem gerar, como confiabilidade do sistema, redução no consumo de energia elétrica, redução nas contas de energia, perdas materiais, danos a equipamentos e pessoas.

Desta feita, outro estudo bibliográfico necessitou ser realizado para amenizar dúvidas relativas ao Efeito Ferranti, como um possível malefício dentro da correção do fator de potência, sendo ele o aumento de tensão no receptor em relação ao transmissor.

Esse efeito é causado devido ao fluxo de corrente capacitiva através da indutância série da linha de transmissão, desta forma deve haver a compensação perante a LT.

Em outra etapa, foi possível entender sobre os impactos da energia reativa em linhas de transmissão, essa energia é proveniente das características naturais da LT, na qual requer energia reativa em menor ou maior quantidade para efetivação do transporte da energia ativa, quando os valores de reativo estão em excesso pelo sistema pode acarretar em vários impactos como instalação de linhas em paralelo, gerando custos nas construções de torres de transmissões e impactos nas áreas de preservação ambiental, além de prejudicar dispositivos de proteção e isoladores.

Os autores também se preocuparam em entender sobre o SEP (Sistema Elétrico de Potência) que tem o principal objetivo a geração, transmissão e distribuição de energia elétrica de forma que possa atender aos consumidores finais com uma energia com custo reduzido e nos padrões de qualidade, esse sistema engloba, subestações, centrais elétricas, transformadores, interligação de linhas, receptores, o sistema elétrico de potência nos dias atuais representam as maiores e complexas máquinas já construídas, exigindo estudos e técnicas precisas para manter e operar, além de ser expostas a adversidades que podem provocar sua má operação e problemas que podem prejudicar a energia elétrica.

Explorar sobre a geração de energia elétrica, transmissão de energia, seus conceitos, características, parâmetros que comprometem a qualidade do transporte e distribuição de energia, esses parâmetros podem ser definidos como: a resistência, indutância, capacitância e condutância, características que são geradas pelas próprias linhas, porém causando impactos negativos e prejudicando o transporte e a qualidade da energia elétrica no sistema de potência.

Pesquisar sobre barramento infinito ou barra infinita quando conectado a máquina síncrona pode trazer benefícios para compensação de energia reativa na LT, além de outros aspectos que contribuem positivamente, esse método é constituído por uma máquina síncrona ligada a um barramento infinito, esse sistema é capaz de absorver e fornecer qualquer potência ativa ou reativa na LT, além de, absorver qualquer transitório, trazendo diversos benefícios que contribuem para a eficiência do sistema.

Pesquisar sobre os tipos de cargas indutivas tendo essa o ângulo do fator de potência atrasado e as capacitivas adiantadas, e as resistivas quando não existe defasagem entre corrente e tensão nas linhas de transmissão. As cargas são os componentes fundamentais consumidores de potência reativa, devido a sua construção físicas haver bobinas, podem ser do tipo industrial ou residencial, ou pelo sistema de compensação de energia reativo instalado na subestação de distribuição.

Orientar-se sobre os efeitos de banco de capacitores nas Linhas de Transmissão, os benefícios da compensação utilizando esta tecnologia, seu princípio de funcionamento e sua construção física, o banco de capacitor pode ser distribuídos ao longo da LT, mas devido a seu custo são instalados nas extremidades ou em pontos intermediários, a localização ideal para instalação seria no meio da linha, são dispositivos com baixo custo comparado a outros porém não tem a mesma eficácia comparado com o FACTS ou motor síncrono.

Orientar-se sobre os efeitos do motor síncrono superexcitado e seus benefícios frente ao fator de potência, seu modo de aplicação na LT, seu funcionamento e as principais características. Algumas concessionárias usam compensadores síncronos como forma de auxiliar o controle de tensão e diminuir o excesso de reativo no sistema. Se trata de grandes equipamentos rotativas, construídas como um gerador, mas operando como motor. Esses compensadores tem a função de controlar a corrente de excitação

Pesquisa sobre reatores e seus efeitos na compensação de reativos, os benefícios de utilizar essa técnica, suas características na LT, sua construção física, além do seu princípio de funcionamento. Tal dispositivo tem a função de controlar os níveis de reativo no sistema, foi um dos primeiros equipamentos introduzidos na linha de transmissão para compensação de reativos, seu custo é inferior comparado a outros dispositivos.

Instruir-se sobre os benefícios da correção do fator de potência nas linhas de transmissão, a compensação da energia reativa que influencia diretamente na qualidade do transporte de energia elétrica a longas distâncias, além de proporcionar vários benefícios que atuam diretamente nas características naturais das linhas sendo alguns deles: Ajuste rápido ao suporte de reativos durante a operação, estabilização eficientemente oscilações de tensão e ângulo, integração entre sistemas CC e CA, aproveitando as vantagens de ambos.

Orientar-se sobre o uso de dispositivos FACTS e seus benefícios na linha de transmissão, sua funcionalidade visto que existem variados tipos de utilização desses equipamentos como: SVC, STATCOM, TCSC e UPFC, além das suas características construtivas, demonstrando a sua atuação, Os Controladores FACTS trazem vários benefícios, pois permitem uma transferência de potência com maior capacidade de ação rápida no controle do fluxo de potência, sendo um dos melhores dispositivos atualmente para compensação em linhas, servindo de base para estudo neste trabalho de conclusão.

Indicar o melhor método atualmente para correção do fator de potência em linhas de transmissão, com estudo e pesquisa aprofundado nas tecnologias existentes para compensação da energia reativa em linhas, além de, tabelas comparativas dos dispositivos explicando as vantagens e desvantagens, mediante a pesquisas documentais em livros, artigos e dissertações.

4. PESQUISA E ANÁLISE DE DADOS

Através do fator de potência nas cargas se tem uma noção da qualidade do suporte da energia em relação a como ela está sendo aproveitada. Se houver déficit de energia reativa no SEP pode causar baixo perfil relacionado às tensões, podendo causar problemas em sua estabilidade e incrementar os níveis de perdas na transmissão.

No caso de excesso de reativos sobre o sistema, os barramentos apresentam perigosas tensões que podem comprometer o isolamento dos equipamentos, além de aumentar os níveis de perda ao longo da transmissão.

Tecnologias armazenadoras de energia auxiliam na compensação e oferecem uma maior flexibilidade para o controle do sistema de transmissão. Este método ocorre devido às tensões do sistema de transmissão se encontrar fora dos limites. Ajustando assim o controle da tensão na barra. A seguir as tabelas indicam os métodos de compensação, demonstrando as vantagens e desvantagens na utilização das tecnologias de correção de FP.

Para transmissão de potência reativa de certo ponto a outro, é necessário ter uma diferença de tensão entre os nós receptor e emissor. Tal fato de transporta grandes quantidades de energia reativa resulta em aumento das perdas relacionadas à potência ativa que inclusive origina tensões reduzidas, tudo isso comprometendo a qualidade da energia, a confiabilidade na operação do sistema e a segurança, sendo ideal não transmitir essa energia, que na prática é muito difícil.

O Quadro 1 demonstra as consequências do excesso de reativos no sistema de transmissão.

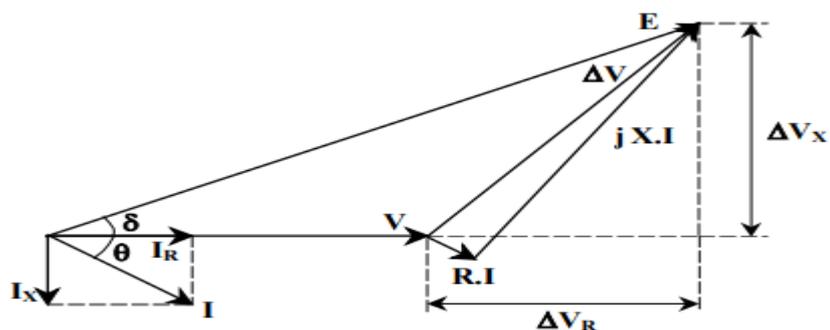
Quadro 1 - Consequências da Energia Reativa em Excesso

Consequências
Aumento das perdas técnicas de potência ativa, subtensões ou sobretensões e em consequência baixa qualidade da energia elétrica;
Instabilidade de tensão e provável colapso do sistema;
Necessidade de uma capacidade adicional de geração, transmissão e distribuição;
Aumento dos custos operacionais pela necessidade de operar usinas com maior custo de produção, com a finalidade de compensar a insuficiência de potência reativa

Fonte: Mathur e Varma, 2002.

Para regular a tensão nesse perfil, a razão é definida entre a variação da corrente de carga e a magnitude da tensão. Isto é causado devido à impedância da linha. o sistema elétrico (SE) pode ser representado pelo circuito equivalente de Thevenin, como se demonstra a Figura 24.

Figura 24 - Diagrama Fasorial de Thevenin.



Fonte: Flores, 2002.

R: Resistência

I: Corrente

X: Reatância

E: Tensão

4.1. Cargas

Nos sistemas de distribuição, o consumo da potência reativa pelos alimentadores de média e baixa tensão não requerem tamanha importância, visto que o efeito capacitivo do alimentador é mínimo em comparação com a existente da LT de alta tensão.

Nas LT's curtas, a energia reativa não interfere a qualidade do transporte de energia elétrica pois, sua variação dos limites de tensão é mínima e encontra-se em níveis toleráveis. As cargas são os elementos fundamentais consumidores de potência reativa, que podem ser do tipo industrial ou residencial.

A diferenciação dos tipos de carga se dá pelo FP. Esse fator depende exclusivamente do tipo de equipamento elétrico. Por exemplo, um motor elétrico que produz campos magnéticos é responsável pela criação da potência reativa. Esta energia é absorvida pelo sistema elétrico que acaba sendo penalizado em valores mediante pagamento de multas.

4.2. Equipamentos de Compensação de Energia Reativa em Linhas

Nas linhas de transmissões são utilizados equipamentos compensadores de reativo, que visam reduzir esses níveis, pois quando estão em grandes proporções pode vir a comprometer a qualidade do transporte de energia elétrica, além de, elevar os custos com manutenções.

O dispositivo de compensação estática e atualmente instalado em lugares próximos dos consumidores, desta forma é possível obter controle direto do consumo reativo. Entre os meios de compensação estática encontram-se os capacitores, reatores, gerador síncrono e FACTS.

O dispositivo de compensação estática pode ser conectado em série ou paralelo. Os compensadores em série e utilizado para reduzir a impedância da linha e aumentar a capacidade de transmissão, já os em derivação são utilizados primordialmente para fornecer energia reativa no sistema.

A seguir são apresentados os dados técnicos relacionados aos equipamentos assim como suas vantagens e desvantagens.

4.2.1. Banco de Capacitores

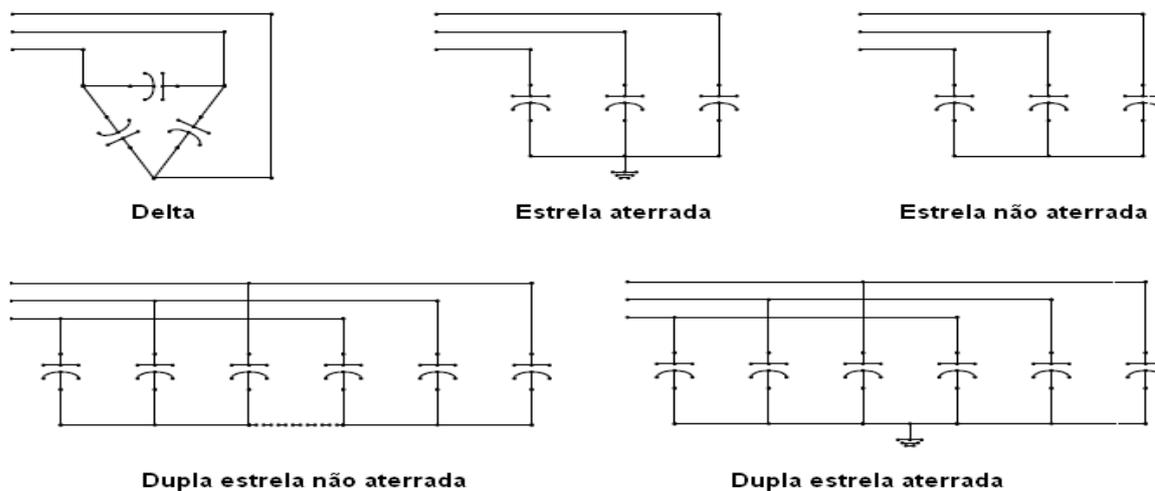
Os parâmetros série das linhas de transmissão, resistência e reatância, são os responsáveis pelas elevadas quedas de tensão. O equipamento utilizado para essa correção é o capacitor, sendo um dispositivo capaz de reduzir a indutância da linha em seus terminais.

Os capacitores devem ser distribuídos ao longo da linha, mas devido ao custo são instalados nas extremidades ou em pontos estratégicos como pontos intermediários, a localização ideal para instalação seria no meio da linha, juntamente com uma subestação no local.

4.2.1.1. Instalação do Banco de Capacitores

O BCS pode ser ligado em estrela (dupla ou simples, com aterramento ou sem) ou então em triângulo duplo ou simples, demonstrado na Figura 26.

Figura 26 - Tipos de Ligação

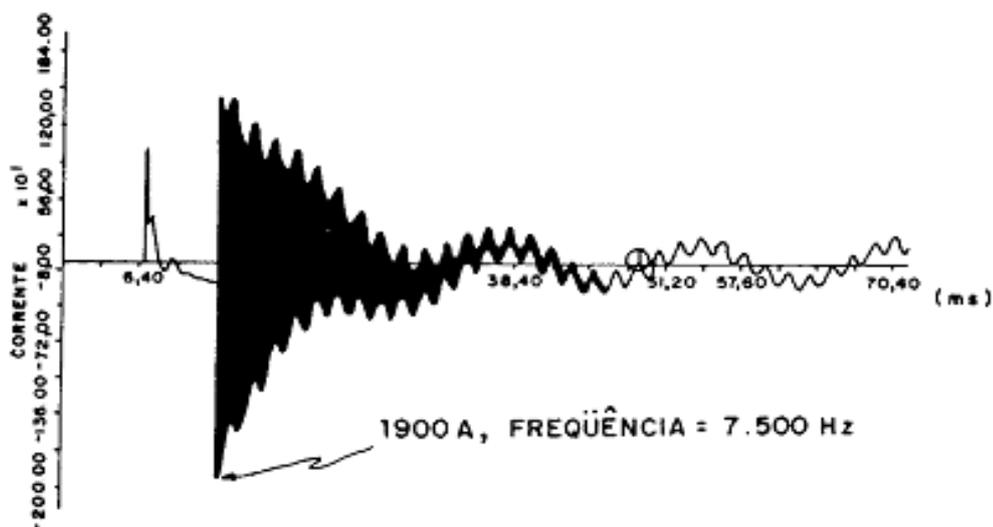


Fonte: Silva Filho e Delgado, 2010.

Esses dispositivos são empregados por motivos econômicos, funcionando como filtro natural do terceiro harmônico. Quando há maiores tensões deve-se usar a ligação, em estrela onde cada tipo de fechamento apresenta índices diferentes. No sistema elétrico de potência, nas linhas de transmissão, geralmente é preferida a ligação em estrela-aterrada.

O BC pode ter sua vida útil afetada e sua funcionalidade reduzida quando submetida a certos fenômenos transitórios, como demonstrado na Figura 27.

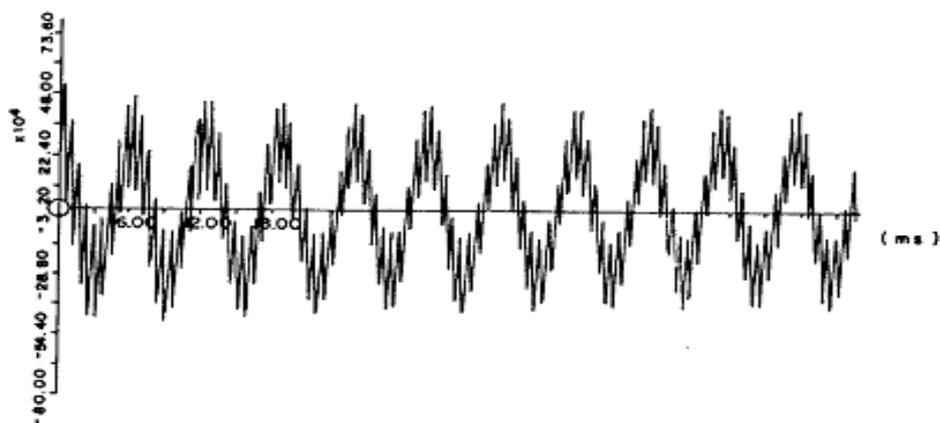
Figura 27 - Corrente na Energização do Capacitor



Fonte: Silva Filho e Delgado, 2010.

A Figura acima mostra a corrente quando se ocorre a energização de um banco de capacitor. Nessa ilustração, a corrente transitória é cerca de 18 vezes o valor da corrente nominal conforme a Figura 28.

Figura 28 - Tensão do Banco de Capacitor na sua Energização



Fonte: Silva Filho e Delgado, 2010.

4.2.2. Banco de Reatores

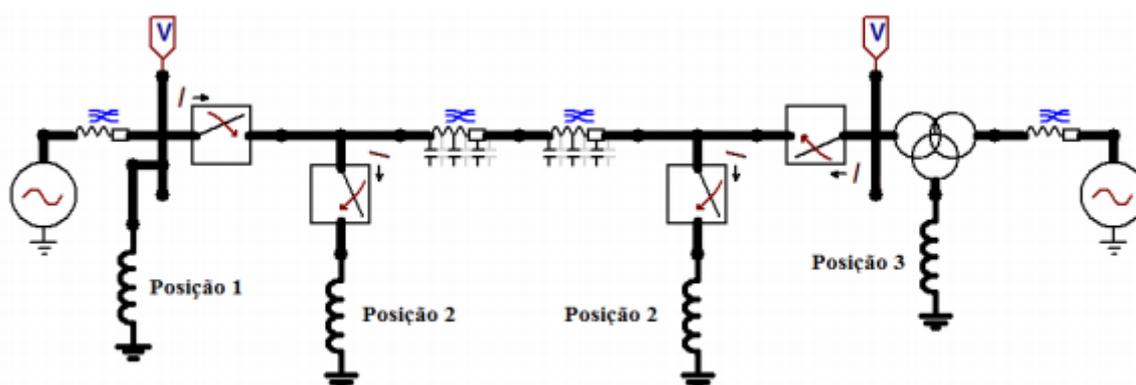
É habitual a inserção de dispositivos compensadores “reatores” nos períodos na qual o sistema opera com carregamento reduzido. Daí, as tensões podem elevar-se, para evitar que ultrapassem os níveis de reativo dos equipamentos no SEP

Os mesmos são ligados em série ou derivações nas barras das subestações ou na LT, através de estudos para o melhor local de instalação.

Estes dispositivos de compensação consomem reativos do sistema de modo que possa reduzir os níveis de tensão na LT. É bastante habitual inserir reatores nos períodos na qual o sistema opera com baixo carregamento, onde as tensões podem se elevar, para evitar que estes ultrapassem os limites aceitáveis dos dispositivos do SEP.

Também de acordo com o referencial teórico, pode-se afirmar que os bancos reatores são utilizados para compensar reduzir à capacitância na LT, evitando limitando a tensão na abertura do circuito.

Figura 29 - Aplicação de Reatores Shunt



Fonte: Rodrigues e Silva, 2014.

Um exemplo de perturbação ocorreu no SIN entre as cidades Itaberá e Ivaiporã – SP, dia 10 de novembro de 2009, com a interrupção de 24.436 MW, correspondente à 40 % da carga do sistema interligado nacional. A proteção de sobrecorrente do reator shunt da LT 765 kV atuou para corrigir uma falha na barra da SE de Itaberá. Ocorreu o desligamento da LT remanescente do tronco e interrompeu-se totalmente a conexão entre as salas elétricas de Itaberá e Ivaiporã, rejeitando a geração de 5.564 mW da usina de Itaipú 60 Hz, para o SIN.

Essas atuações trazem diversas consequências negativas para o sistema elétrico, sendo elas:

- Agravamento dos impactos no sistema, aumentando a sua área de abrangência;
- Bloqueios no fechamento dos disjuntores, retardando a recomposição do sistema;
- Direcionamento das equipes de manutenção, indisponibilizando os Reatores e prejudicando a operação do sistema,
- Impacto financeiro.

Tais atuações incorretas para falhas e manobras no sistema, se destacam pela atuação dos seguintes tipos de proteção: (1) proteção diferencial durante manobras de fechamento de paralelo entre subsistemas; (2) proteção de sobrecorrente de neutro o fechamento do disjuntor do dispositivo de compensação com a linha de transmissão desenergizada e (3) proteção de sobrecorrente de neutro.

São utilizados para limitar a corrente de curto-circuito, atuando na impedância da LT e proporcionar um melhor funcionamento. Quando instalado em derivação a regulação de tensão da linha e feita através absorção do excesso de reativo no sistema.

4.2.2.1. Instalação do Banco de Reatores

Os reatores podem ser conectados em estrela ou delta, sendo a ligação em estrela a mais comum, pois, neste caso, os enrolamentos ficam submetidos às tensões de fase, requerendo menor isolamento e, conseqüentemente, menor custo. Em sistemas de alta e extra-alta tensão, o mais comum é a utilização de banco de reatores monofásicos, pois a potência dos mesmos está acima dos limites de um reator Shunt trifásico, conectados em estrela aterrada solidamente ou através de reator de aterramento.

O objetivo da utilização deste reator de aterramento é aumentar a reatância de sequência zero total da linha de transmissão à qual o reator está conectado, visando reduzir as correntes para faltas monofásicas. Isto facilita a inexistência do arco quando da abertura monopolar dos disjuntores da linha, o que implica no aumento de sucesso nos religamentos monopolares da mesma.

Para níveis de tensão mais baixos é comum a conexão de reatores em estrela não aterrada nos enrolamentos terciários dos transformadores de potência.

Reatores “Shunts” podem ser conectados ao sistema de transmissão através do terciário do transformador ligado à linha de transmissão a ser compensado; tipicamente 13.8kV, 34.5kV e 69 kV.

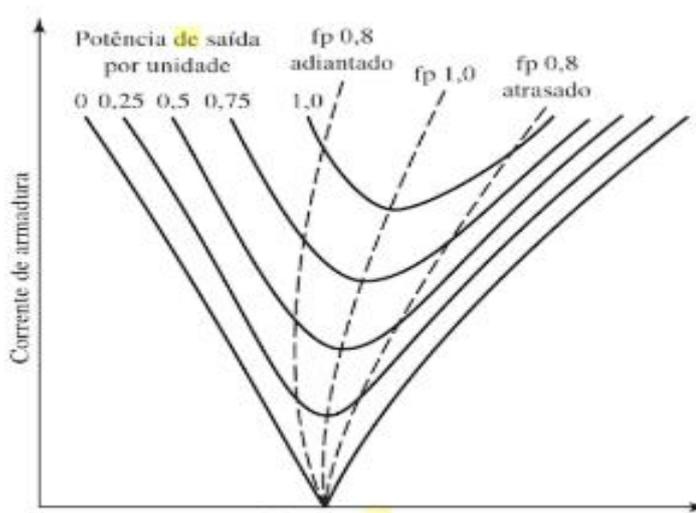
4.2.3. Compensação Síncrona

Algumas empresas instalam compensadores síncronos como forma de auxiliar o controle de tensão. Trata-se de grandes equipamentos rotativos, construídos como um gerador, mas operando como motor. Esses compensadores tem a função de controlar a corrente de excitação, fazendo com que eles gerem ou absorva a energia reativa. Quando a tensão no sistema está reduzida, a corrente de campo do dispositivo é aumentada, resumindo as técnicas de controle de tensão.

Uma das desvantagens da compensação síncrona e seu investimento inicial elevado e o custo de manutenção. Por essa razão, este método é menos utilizado nos sistemas elétricos modernos de transmissão.

Quando o gerador passa a operar como compensador síncrono, a água é retirada da turbina através da injeção de ar sob pressão. Essa turbina livremente gira em sincronia com o sistema elétrico, com isso o gerador passa a gerar apenas potência reativa sobre o sistema, havendo menos desgaste das partes mecânicas, pois a água não passará mais pelo tubo, somente ar. Haverá apenas um pequeno gasto de potência ativa, na qual será necessário para o compensador trabalhar em sincronia com o sistema, a Figura 30 mostra a forma característica de um gerador síncrono.

Figura 30 - Forma Características das Curvas de um Gerador



Fonte: Fitzgerald, Kingsley e Umans, 2006.

A máquina síncrona girando a vazio consegue uma potência suficiente para superar as perdas internas como ventilação, aquecimento, atrito, etc. Além de oferecer a possibilidade da variação da tensão no terminal, fornece reativos necessários ao sistema elétrico de potência.

Segundo já apresentado no referencial teórico, os geradores síncronos contribuem para o amortecimento do sistema através de sua inércia, colaboram para regulação da frequência pelo controle de velocidade e proporcionam a regulação local da tensão ou do fluxo de potência reativa. Tal capacidade em especialmente a resposta inercial e de amortecimento, são comuns a todas as máquinas síncronas.

Esses geradores, assim como todas as máquinas, têm limites de capacidade que devem ser respeitados, afim de que possa se obter a máxima confiabilidade do sistema, os limites estabelecidos serão apresentados neste trabalho de conclusão, sendo eles:

- Limite de estabilidade;
- Limite de excitação mínima;
- Limite de aquecimento da armadura;
- Limite de potência primária.

Quando um gerador está sub-excitado, o mesmo fornece corrente adiantada em relação à tensão. O gerador síncrono recebe a potência reativa do sistema e tal ação pode ser exemplificada pela FMM (força eletromotriz) interna e a corrente adiantada da tensão no terminal.

Define-se compensador síncrono como sendo uma máquina utilizada para compensar variações lentas de tensão no sistema elétrico de potência, de forma que possa atender o sistema de transmissão, tendo a finalidade de entregar para o consumo o máximo de potência ativa sob um valor nominal em relação à tensão.

Desta forma a compensação utilizando a máquina síncrona consome um pouco de potência ativa do sistema através da variação da sua excitação, que pode fornecer ou absorve reativo do sistema. Em situações de carga pesada quando a tensão possa abaixar nos pontos de consumo o compensador pode trabalhar como sobreexcitado, fornecendo energia reativa na medida necessária para variação suave de seu sistema, fazendo na qual a tensão se eleve o conforme exigido para o sistema.

Perante a situação de carga leve em que a tensão tende-se aumentar devido ao efeito capacitivo na LT, o compensador deverá ser sub-excitado, afim de que possa absorver energia reativa e reduzir a tensão nos pontos de consumo.

Vale ressaltar as vantagens que o compensador síncrono tem sobre as linhas de transmissão sendo eles:

1. Oferece maior disponibilidade de potência ativa nos geradores, para atender as cargas. Isto porque, é necessário manter a tensão do consumidor no valor nominal nas horas de potência de carga, sendo que esses geradores trabalham com tensões mais elevadas, gerando assim uma potência reativa mais elevada, que dificulta o bom funcionamento do sistema elétrico.
2. Essa correção evita que os geradores trabalhem com as tensões que geram valores próximos dos limites, além de evitar a variação constante nos tap's dos transformadores de elevação.
3. Reduz o número em relação a manobras com reatores ou linhas de transmissão, quando estas são necessárias para correção do valor de tensão.
4. Tem-se a facilidade de ajuste da tensão, apenas com o ajuste da excitação do compensador, esse dispositivo tem atuação simples e rápida, evitando outras manobras.

Para amenizar os impactos do excesso de reativo no sistema, o gerador síncrono pode ser instalado junto aos terminais das linhas, e uma das formas mais eficiente para corrigir o fator de potência apesar do seu custo elevado.

4.2.4. Compensadores Inteligentes

Os dispositivos controladores FACTS foram elaborados por Hingorani no ano de 1980. Desde então, diversos equipamentos baseados na eletrônica de potência foram desenvolvidos e inseridos no SEP.

Atualmente a procura pelo aumento da capacidade de transmissão disponível do sistema de transmissão é cada vez maior, resultando na construção de novas LTs, reinstalação de linhas de transmissão existentes (relocalização) e a instalação de equipamentos estáticos, eletromecânicos para a melhoria da transmissão elétrica.

Existem algumas formas tradicionais para a melhoria da capacidade da transmissão de potência como exemplo:

- Recondicionar os condutores das linhas de transmissão/recolocação dos equipamentos terminais. Se a linha de transmissão é inadequada para transferência do fluxo de potência programado, o recondicionamento pode ser com um condutor com uma maior capacidade de transferência;
- Aumento do nível de tensão. Por exemplo, de 230 para 345kV, a razão nominal da linha seria incrementada até 150%, usando o mesmo condutor. Isto leva a uma atualização das subestações pelo nível de tensão, assim como do sistema de proteção.
- Instalação de novas linhas de transmissão. Serve para aliviar a sobrecarga, fornecendo trajetos adicionais para o fluxo de potência. Existem dificuldades como as restrições ambientais, restrições da área a ocupar, etc.
- Converter um circuito simples a circuito duplo. Implica na modificação do suporte existente das linhas, acondicionado para adicionar outra linha, podendo implicar uma modificação total até a troca do suporte.

- Compensação em série. Instalação de compensador em série com razão adequada nas linhas de transmissão de longas distâncias. A compensação série diminui a impedância de transferência da linha, incrementando a capacidade de transmissão.

Os Controladores FACTS tem um impacto favorável para o sistema de transmissão, pois eles permitem uma transferência de potência confiável com maior capacidade e flexibilidade de ação rápida no controle do fluxo de potência. Sendo que as linhas de transmissão pelo geral operam próximas aos seus limites de tensão e/ou limites de estabilidade e abaixo dos seus limites térmicos

Os principais equipamentos FACTS são:

- Compensador estático de potência reativa (SVC - *static VAR compensator*),
- Compensador em série controlado por tiristores (TCSC - *thyristor controlled series compensator*),
- Controlador unificado de fluxo de potência (UPFC - *unified power flow controller*),
- Compensador estático síncrono (STATCOM - *static synchronous compensator*),
- Compensador estático em série síncrono (SSSC - *static synchronous series compensator*).

Segundo Fogaça (2006), a Controladores FACTS instalados em diversos continentes pelo mundo, na Ásia: China, Índia e Japão. Na Europa: Alemanha, França, Inglaterra, Polônia, Noruega e Suécia. Na América do sul: Argentina, Brasil e Peru e na América do Norte: México, Canadá e Estados Unidos, sendo este último o país com maior número de FACTS instalados.

Atualmente, existe uma busca pelas metodologias que quantifiquem e qualifiquem os benefícios desses controladores no SEE. Os agentes do SEP na fase de planejamento devem se ter uma estimativa do investimento econômico, verificando se é ou não conveniente instalar estes equipamentos controladores ou novas linhas, avaliando o impacto técnico em novas decisões. Sendo assim os controladores FACTS possuem os seguintes dispositivos.

4.2.4.1. SVC

O SVC é um dispositivo eletrônico que tem a função de controlar a tensão de um sistema a qual é conectado, esse dispositivo foi o primeiro sistema da linha FACTS implantado para a compensação de reativo. Foi utilizado na década de 60 em indústrias de grandes cargas e fornos a arco. Por volta da década de 70 passou a ser utilizado no sistema de transmissão com a função de melhorar o sistema dinâmico de tensão. Na sua configuração é composto por um “reator controlado a tiristor” – TCR, em paralelo a um “capacitor chaveado a tiristor” – TSC, ainda possui um transformador para conexão do equipamento com a rede, filtros e um sistema de controle.

Na prática, esta tecnologia é utilizada em combinação com um capacitor fixo, o que proporciona uma compensação de reativos no sistema de transmissão elétrico. O termo estático diz que, ao contrário dos compensadores síncronos “geradores”, o SVC não possui partes ou componentes móveis ou rotativas, sendo assim uma compensação ocorre dinamicamente.

Normalmente, esses dispositivos são conectados a uma barra do sistema elétrico de potência, o SVC irá absorver ou injetar energia reativa capacitiva ou indutiva no sistema de transmissão para manter a tensão da barra próxima da tensão de referência.

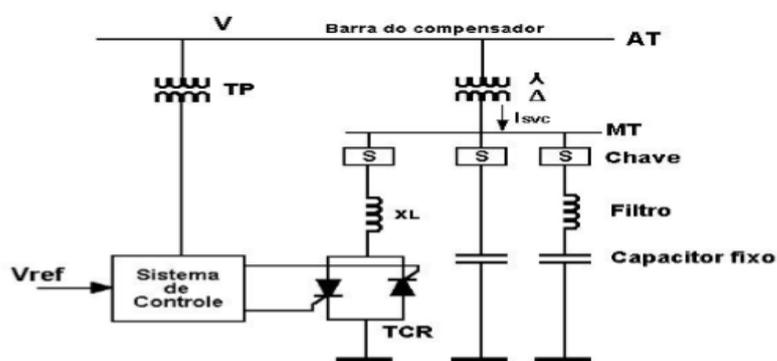
A parti do chaveamento de tiristores, o SVC atua em alta velocidade comparado a bancos de capacitores e reatores chaveados, proporcionando uma maior estabilidade no sistema durante possíveis perturbações no sistema.

É um conversor estático ligado em Shunt capaz de absorver ou gerar, cuja saída é ajustada para a trocar corrente capacitiva ou indutiva afim de manter ou controlar parâmetros específicos do sistema de potência.

As vantagens desse dispositivo são: a dinâmica e velocidade de regulação e sua instalação podendo ser instalado em pontos distantes das zonas de produções, manter os níveis constantes de tensão, melhorar estabilidade, melhorar fator de potência e reduzir a reatância indutiva, esse dispositivo e similar aos compensadores síncronos usados para absorver ou injetar energia reativa.

As desvantagens desse dispositivo e as harmônicas que em níveis proibitivos que eles geram pois podem influencia na leitura de instrumentos e dispositivos de acionamentos.

Figura 31 - SVC Composto por TCS

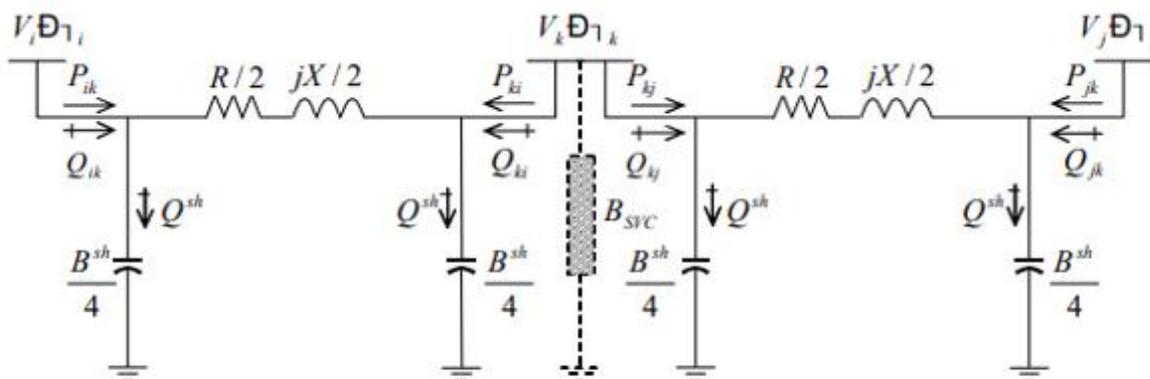


Fonte: Domingues, 2001.

4.2.4.2. Fluxo de Potência em uma LT com um SVC

A Figura 32 apresenta se um compensador estático de reativos interligado a uma linha de transmissão, estando ligado no ponto médio entre as barras i e j. O ponto médio está na melhor localização para a conexão do compensador já que a maior tensão.

Figura 32 - Representação do SVC na Linha



Fonte: Machado, 2003.

Este conceito deve ser expandido para o uso de diversos compensadores, encontrados em iguais segmentos da linha de transmissão, onde teoricamente, a potência a ser transmitida poderia duplicar a cada segmentação. Além disto, com o aumento do número de segmentos, a variação de tensão ao longo da linha aumentaria, obtendo-se no limite de um caso ideal, um perfil de tensão plano considera-se que o compensador troca somente potência reativa com a linha de transmissão.

Além do controle de tensão, o SVC pode ter outras aplicações como: suporte de tensão em barras remotas de linhas de transmissão radiais para prevenir instabilidades de tensão em caso de contingências ou em sistemas pouco amortecidos, proporciona um aumento da margem de estabilidade e amortecimento da oscilação de potência.

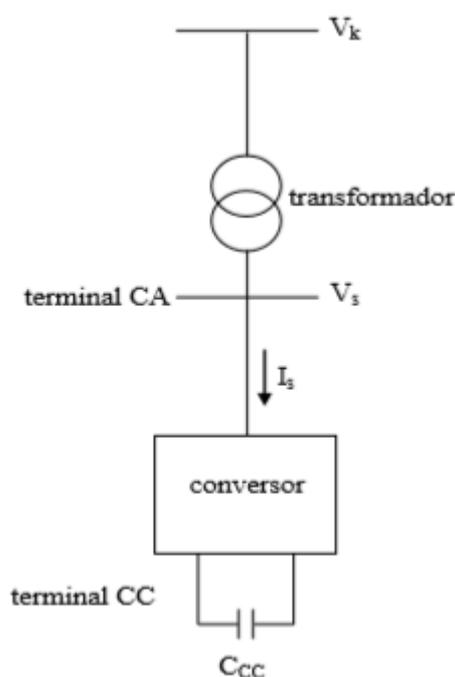
4.2.4.3. STATCOM

Sua característica é operar como gerador síncrono estático, é conectado em shunt e sua corrente indutiva ou capacitiva pode ser sem considerar a tensão e corrente do sistema, sua semelhança é parecida com aspectos das máquinas rotativas usadas para compensação de reativos e está entre os principais dispositivos FACTS.

De maneira geral, os compensadores estáticos de reativos são responsáveis pela geração ou absorção de potência reativa controlável por chaveamento sincronizado de capacitores ou reatores. Na prática, estes dispositivos funcionam como uma impedância Shunt que pode ser ajustada de acordo com a necessidade de compensação da rede de transmissão.

A Figura 33 mostra o dispositivo alimentado por uma fonte de tensão e outro a partir de uma fonte de corrente. Sob o ponto de vista de custos, o conversor alimentado em tensão pode ser o preferido.

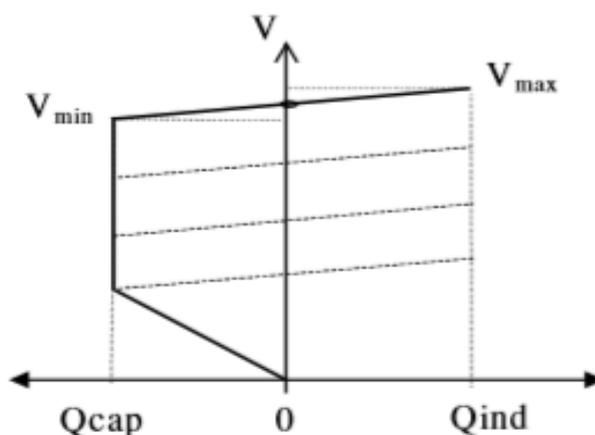
Figura 33 - Configuração Básica do STATCOM



Fonte: PINA, 2010.

A curva característica da tensão e corrente do STATCOM é mostrada na Figura 34 de onde se pode observar que o STATCOM pode ser operado com fornecimento de corrente nominal a um nível de tensão do sistema pequeno.

Figura 34 - Curva Característica



Fonte: Deckmann e Pomilio, 2009.

Entretanto, quando o limite do modo de operação capacitivo é atingido, o STATCOM é capaz de manter em níveis elevados a corrente que ele injeta no sistema, que lhe confere melhor desempenho do que o dispositivo FACTS de primeira geração SVC no suporte de reativos, sobretudo quando o sistema está sujeito a grandes perturbações.

Se a amplitude da tensão de saída for aumentada de forma a superar a tensão do sistema, o conversor gera potência reativa; se for diminuída abaixo da tensão do sistema, o conversor absorve potência reativa; se for igual, não haverá fluxo de potência reativa.

O STATCOM é comparado aos outros compensadores estáticos que utilizam reatores e capacitores chaveados ou controlados através de tiristores nas suas construções físicas e apresenta significativas vantagens como seu desempenho em baixa tensão e uma menor produção de harmônicos

As vantagens do STATCOM são: prover o suporte de tensão nas áreas críticas do sistema elétrico, sua capacidade de injetar elevadas correntes capacitivas em períodos de subtensão.

As desvantagens deste equipamento e o tempo de resposta lento, a baixa impedância de curto-circuito, necessita de manutenções frequentemente e não atende os requisitos modernos de flexibilidade no controle de tempo real relacionado ao fluxo de potência dentro dos conceitos atuais de FACTS.

A instalação do STATCOM é feita em derivação a uma linha de transmissão na qual sua corrente de saída, independente da tensão, esse dispositivo realiza a compensação por seção, ou pontos intermediários mantendo a tensão do barramento no qual está acoplado dentro dos limites aceitáveis e ainda pode ter a capacidade de transmissão elevada se instalado em ponto médio da linha.

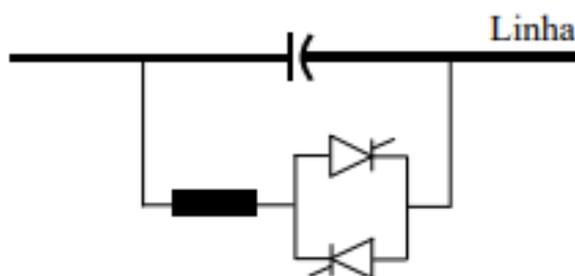
4.2.4.4. TCSC

TCSC são uma extensão dos capacitores série convencionais através da adição de um reator controlado a partir de um tiristor em paralelo com o capacitor, o que permite uma contínua e rápida variação da compensação série do sistema. Os principais benefícios dos TCSC são o amortecimento de oscilações eletromecânicas, o aumento da energia transferida, o amortecimento de ressonâncias subsíncronas e o controle do fluxo de potência nas linhas.

Um compensador sendo composto por BCS com a linha e por um indutor controlado a tiristor. Através do ajuste da reatância do indutor é possível controlar continuamente a impedância resultante do compensador, e desta forma, a impedância série da linha.

O TCSC, Figura 35, é constituído por tiristores convencionais. De tal forma o reator controlado a tiristor (TCR), o TCSC possui um reator variável ligado em paralelo com o capacitor, sendo que o ângulo de disparo do tiristor for 180° , o reator não conduz e o capacitor fica com a impedância nominal. À medida que o ângulo de disparo decresce de 180° , a impedância capacitiva aumenta.

Figura 35 - Diagrama TCSC

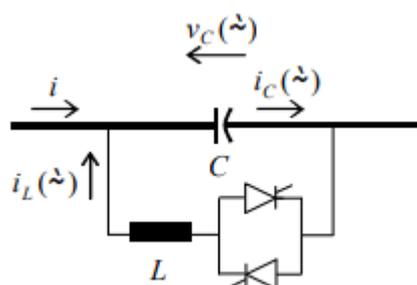


Fonte: Machado, 2003.

O TCSC é composto por um capacitor série em conjunto com um reator controlado por tiristores. Com esta composição, o equipamento é capaz de alterar a sua impedância equivalente impondo diferentes níveis de compensação série à linha de transmissão. A variação da reatância série permite o controle da potência ativa transmitida através da linha de transmissão ao qual esteja conectado.

Sua modelagem é feita em regime permanente por uma reatância conectada entre duas barras que varia entre valores especificados, de modo a manter o fluxo de potência ativa de acordo com uma referência. Na Figura 32 é representado um TCSC associado à uma linha de transmissão.

Figura 36 - TCSC na Linha de Transmissão



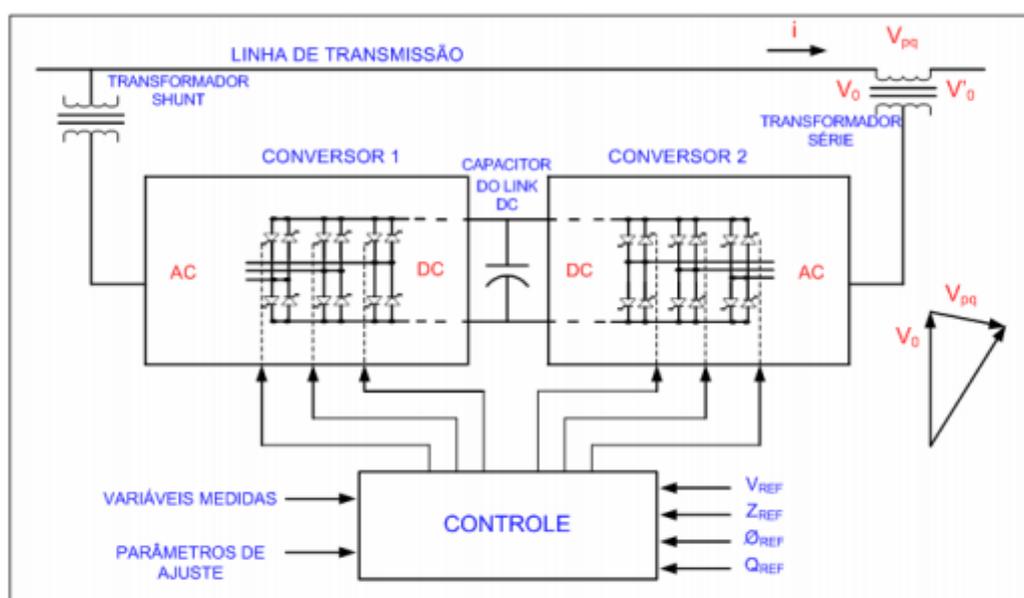
Fonte: Machado, 2003.

A finalidade básica de um TCSC é de prover uma capacitância continuamente variável por meio do cancelamento parcial da capacitância através do TCR. Além da propriedade que os TCSCs possuem de controlar o fluxo em linhas de transmissão, podem também ser utilizados para:

- -Redução da reatância série de modo a também reduzir a variação da tensão terminal, diminuindo assim a possibilidade de colapso de tensão;
- Aumento da estabilidade transitória através do aumento da capacidade de transmissão de potência;
- Amortecimento de oscilações de potência pela variação da compensação série, neutralizando as oscilações de acelerações e desacelerações provenientes de distúrbios de máquinas;
- Amortecimento de oscilações subtransitórias; - controle do fluxo de potência por caminhos paralelos na rede de transmissão.

Independentemente se UPFC estiver operando na forma simultânea ou seletiva o modelo de injeção de potência desse dispositivo não se modifica na Figura 38, é apresentado o diagrama esquemático do UPFC.

Figura 38 - Diagrama UPFC



Fonte: Masuda, 2006.

A aplicação do UPFC utiliza fontes série e "Shunt" que trocam energia entre si. Desta forma se consegue modular a potência ativa para amortecer oscilações eletromecânicas entre áreas.

As vantagens que o dispositivo pode exercer um controle simultâneo através dos compensadores ligados em série e em derivação, ou pode utilizar a propriedade de cada um deles, separadamente, dependendo da necessidade de compensação da linha, podendo ter uma compensação de reativos exercida pelo compensador em derivação diferente da compensação exercida pelo compensador em série, no mesmo instante. Isso mostra a grande flexibilidade que há no controle do fluxo de potência da linha, aumenta a capacidade de transmissão da LT, estabilidade na linha é o consequente controle do fluxo de reativos.

Existem desvantagens como o investimento visto que é um dos mais caros entre o FACTS, e aquisição ou modificação de infraestrutura para sua instalação além devido a seu porte.

Esses dispositivos podem ser conectados ao sistema através dos transformadores de acoplamento, sendo responsável por controlar o fluxo de potência ativa e reativa.

5. DADOS DO FATOR DE POTÊNCIA EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

Na Tabela 1 apresentam-se as faixas de um compensador por unidade de potência aparente e para diversos fatores de potência, os valores indicam o quanto de reativo é gerado relacionado ao FP. A carga pode ser parcialmente compensada, sendo que o grau de compensação está determinado por uma decisão técnica e essencialmente econômica, onde a mesma trata de balancear o custo do compensador e o custo de se obter a potência reativa do sistema de geração por uma eventual existência de multas associadas ao consumo, com um fator.

Tabela 1 - Relação de Energia Reativa

Fator de Potência da Carga ($\cos\phi$)	Faixa de Compensação Q_T (por unidade da faixa de Potência Aparente da Carga)
1.00	0.000
0.95	0.312
0.90	0.436
0.80	0.600
0.60	0.800
0.40	0.917
0.00	1.000

Fonte: Mathur e Varma, 2002.

Uma deficiente utilização da potência reativa nos sistemas origina:

- Aumento das perdas de potência ativa, sobtensões
- instabilidade de tensão;
- aumento dos custos operacionais.

5.1. Consideração para Equipamentos de Compensação

O sistema elétrico de energia conta com vários dispositivos compensadores de energia reativa, sendo que estes podem ser síncronos ou estáticos, em ativa ou passiva. Desta feita, a compensação passiva é somente um indutor ou um capacitor fixo, este não varia de acordo com a tensão.

Já a compensação ativa varia de acordo com o sistema para manter uma das características elétricas da linha de transmissão em variação, tais como a reatância ou a resistência, e assim poder controlar a potência ativa e/ou reativa e/ou a tensão de um barramento, conforme Quadro 2.

Quadro 2 - Considerações Essenciais para Escolha do Equipamento de Compensação

Item	Descrição
1	Requerimento de potência reativa contínua e em curto tempo
2	Classificação de tensão e limite de variação de tensão
3	Aproximação de regulação de tensão requerida
4	Tempo em resposta do compensador para perturbações específicas
5	Máxima distorção de harmônica com compensador em serviço
6	Performance com fornecimento de tensão desbalanceado e/ou com carga desbalanceada
7	Fatores ambientais: nível de ruído interno /externo da instalação; temperatura, umidade, contaminação, vento e fatores sísmicos; derrame do transformador, capacitores, sistema de esfriamento.
8	Requerimentos de planos das instalações; acessos, delimitações, estrutura; previsão para uma expansão futura, previsões de manutenção e outros.
9	Disposição de proteção para o compensador e coordenação com outros sistemas de proteção, incluindo os limites de potência reativa se for necessário.
10	Procedimentos e precauções para a energização.

Fonte: Mathur e Varma, 2002.

5.2. Comparação dos Métodos de Compensação

Um resumo das vantagens e desvantagens dos principais equipamentos de compensação estática de potência reativa utilizada no sistema elétrico de potência foi apresentada por Mathur e Varma (2002), no Quadro 3.

Quadro 3 - Vantagens e Desvantagens dos Equipamentos de Compensação

Equipamento de compensação	Vantagens	Desvantagens
Shunt indutivo	Princípio simples. Fácil instalação.	Valores fixos.
Shunt capacitivo	Princípio simples. Fácil instalação.	Valores fixos. Transitórios por comutação.
Compensador Síncrono	Capacidade útil para sobrecarga. Completamente controlável. Baixos harmônicos.	Alto requerimento de manutenção. Resposta de controle lenta. Funcionamento sensível da localização. Requer investimentos elevados.
Capacitor em série	Princípio simples. Funcionamento sensível da localização.	Requer proteção para sobretensões. Filtro de sub-harmônicos.
SVC	Resposta de controle rápida. Completamente controlável. Podem ser rapidamente reparados.	Geram harmônicos. Funcionamento sensível à localização.

Fonte: Mathur e Varma, 2002.

Já, na Tabela 3, os autores fazem uma comparação entre compensadores de potência reativa, demonstrando as características das técnicas de compensação avaliando seu desempenho e dos parâmetros na linha de transmissão.

Tabela 3 - Características dos Dispositivos de Compensação

SVC	Características	SR/FC	FC-TCR/TSC- TCR	TSC	TSC-TCR	MSC-TCR
1	Faixa de controle	Indutivo e capacitivo	Indutivo e capacitivo (com FC)	Capacitivo	Indutivo e capacitivo	Indutivo e capacitivo
2	Controle natural	Ativo contínuo	Contínuo inerente	Ativo discreto	Ativo contínuo	Ativo consumo
3	Tempo de resposta	Lento	Rápido, sistema pendente, correção, capacitor e filtro dependente	Rápido controle dependente		
4	Capacidade de controle Controle de tensão Sinal auxiliar estabilizante Controle de fase individual	Bom Limitado Limitado	Limitado Não Limitado	Limitado Não Limitado	Bom Bom Bom	Bom Bom Bom
5	Geração de harmônicos	Nenhum	Muito lento(até 16 th)	Nenhum		
6	Límite de sobre tensão Capacidade de sobrecarga	Muito bom	Muito bom, limitado por correção da pendente capacitor	Nenhum		Não
7	Inércia de rotação	sim	Não	Não	Não	Não
8	Sensitividade para desvio de frequência	Sim	Não	Não	Não	
9	Perdas	Moderado	Moderado incrementa com atraso da corrente	Pouco: Incrementa com o atraso da corrente	Pouco depende da configuração	Pouco depende da configuração
10	Conexão com alta tensão	Não	SR: não FC: sim	Não	Não	TCR: Não MSC: Sim
11	Energização	Lento	Rápida com ação de controle, mínimos transitorios	Rápida com ação de controles, alguns transitorios	Rápida com ação de controle e alguns transitorios	Rápida com ação de controle e alguns transitorios

Fonte: Mathur e Varma, 2002.

Já, na Tabela 4, foi desenvolvido pelos autores deste trabalho uma comparação entre os dispositivos, através das cores na tabela é possível identificar a semelhança das características entre dispositivos além das vantagens, desvantagens, parâmetros e cenário. Dessa forma, é possível avaliar os equipamentos atualmente de compensação com base no referencial teórico e desenvolvimento do trabalho.

Tabela 4 - Comparação dos Dispositivos de Compensação

Dispositivos	Parâmetros	Desvantagens	Vantagens	Cenários
Banco de Capacitor em série	Impedância da linha	Em uma instabilidade transitória, não seja rápido na prevenção à instabilidade de tensão.	Aumenta capacidade de transmissão.	Utiliza capacitores automáticos em situações de média e carga pesada
		Valores Fixos	Investimento mais baixo comparado com outras técnicas	
Banco de Capacitor em Derivação	Capacitância da linha	Em uma instabilidade sua transitória, não seja rápido na prevenção à instabilidade de tensão.	Melhora a regulação de tensão	Garantir níveis seguros de tensão em condições de carga pesada
		Valores Fixos	Fornecer energia reativa capacitiva no sistema.	
Banco de Reator em Série	Impedância da linha	Em uma instabilidade sua transitória, não seja rápido na prevenção à instabilidade de tensão.	Reduz efeito Ferranti	Inserção de reatores nos períodos de baixo carregamento
		Valores Fixos	Evitar as perdas no sistema	
Banco de Reator em Derivação	Efeito capacitivo das linhas Reatâncias Das linhas	Em uma instabilidade sua transitória, não seja rápido na prevenção à instabilidade de tensão.	Aumenta capacidade de transmissão	Sob carga leve ou cabos subterrâneos
		Valores Fixos	Consumem reativos do sistema	
Gerador Síncrono	Controle contínuo de reativos	Investimento inicial elevado	Fornecer energia reativa capacitiva no sistema.	Em situações de carga pesada
		Custo de manutenção	Reduz efeito Ferranti	
FACTS	Controla os níveis de reatância e impedância	Geram harmônicos	Aumenta capacidade de transmissão	
		É necessária uma estimativa do investimento econômico	Estabiliza oscilações de tensão e corrente	
			Maior controle sobre os fluxos de potência ativa e reativa	

Fonte: Os autores, 2019

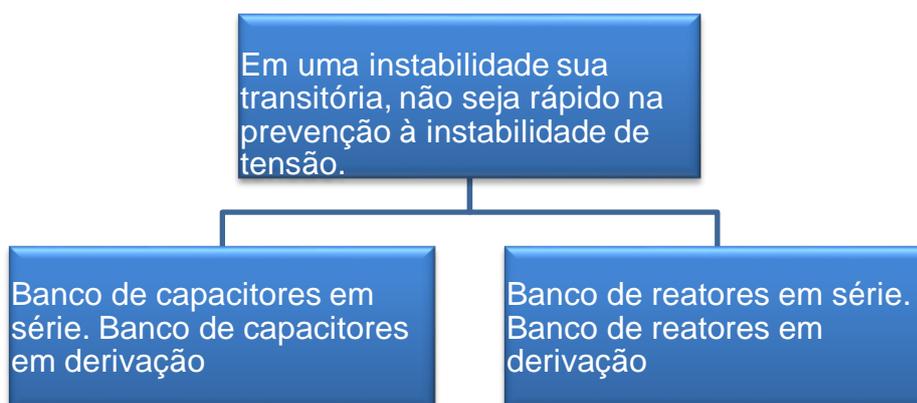
5.1 Análise e Discussão

Os fluxogramas a seguir associam as particularidades dos equipamentos de modo explicativo. Fazendo assim uma síntese das teorias reunidas na tabela 8.

Eles estão divididos em desvantagens e vantagens, facilitando assim identificar as semelhanças e avaliar a melhor característica técnica de cada dispositivo.

A utilização de dispositivos chaveados, banco de capacitores e reatores apresenta um menor custo em relação ao FACTS, porém esse chaveamento durante uma instabilidade transitória pode ser lento dificultando a instabilidade da tensão, podendo ocorrer perturbações na rede e elevação de tensão.

Figura 39 – Fluxograma de Desvantagens



Fonte: Os autores, 2019.

Os valores fixos têm o valor de sua capacitância definido e são dedicados a um único circuito, ou seja, operam durante todo tempo com plena potência podendo prejudicar o funcionamento em cenários diferente de carga.

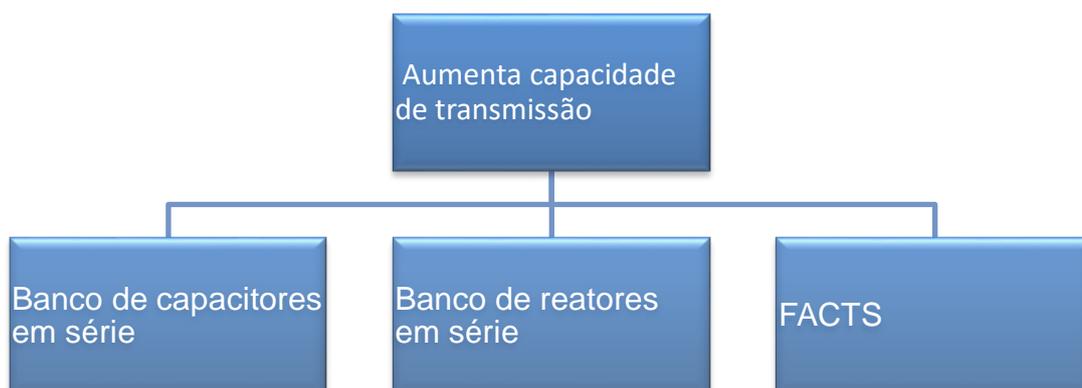
Figura 40 – Fluxograma de Desvantagens



Fonte: Os autores, 2019.

As vantagens a seguir descrevem os equipamentos responsáveis pela boa funcionalidade da linha de transmissão, através do aumento da capacidade de transmissão é possível transporta eletricidade com baixas perdas, trabalhando de forma eficiente

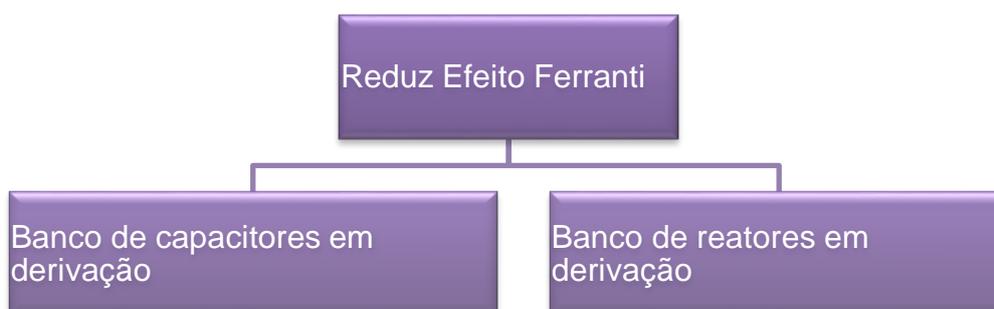
Figura 41 - Fluxograma de Vantagens



Fonte: Os autores, 2019.

As vantagens em diminuir o Efeito Ferranti é que se pode aumentar o nível de isolamento nos terminais quando houver decorrência de sobretensão, além das perdas por dispersão.

Figura 42 - Fluxograma de Vantagens



Fonte: Os autores, 2019.

Os dispositivos de compensação banco de capacitores e reatores têm seu custo reduzido de implementação comparado com outras técnicas como: compensador síncrono e FACTS, com isso as responsáveis pelas transmissões de energia utilizem essas técnicas capazes de mitigar as perturbações no sistema.

Figura 43 - Fluxograma de Vantagens



Fonte: Os autores, 2019.

Já os dispositivos que tem o melhor desempenho atualmente na linha de transmissão e o dispositivo FACTS, suas vantagens supera suas desvantagens e desempenho comparado a outros equipamentos. O grande porte do SEP e a elevação dos custos fazem com que esses equipamentos sejam usados amplamente desde seu surgimento como uma confiável e efetiva resposta para os problemas na LT, trazendo confiabilidade e maior estabilidade no sistema.

Figura 44 - Fluxograma de Vantagens



Fonte: Os autores, 2019.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho de conclusão de curso teve o intuito de pesquisar e estudar os impactos da energia reativa em excesso na linha de transmissão e seus efeitos no sistema, além de apresentar os métodos para controlar o excesso de reativo, porém cada uma das técnicas de controle apresenta características diferentes em relação ao outro dispositivo permitindo as seguintes conclusões:

De acordo com os estudos realizados, foi possível perceber que a correção do fator de potência em linhas se faz necessária devido seu controle permitindo a otimização dos sistemas de geração, transmissão e distribuição, evitando problemas operacionais como sobreaquecimento de geradores, perdas técnicas no sistema de transmissão e distribuição, além da perda de sincronismo de máquinas elétricas.

Outro ponto relevante de ser citado é que novas filosofias relacionadas às tecnologias estão sendo estudadas com isso irá permitir que os sistemas de transmissão e geração alcancem os seus limites de operação atendendo a crescente demanda de cargas reativas do sistema, trazendo um sistema eficiente para todo SEP.

É importante ressaltar ainda que a correção do fator de potência atua diretamente com benefícios ambientais, tendo uma redução significativa no desperdício de energia. As geradoras de energia reduzem a emissão de gases denominados efeito estufa, que são responsáveis por produzir aumento da temperatura global, além de outros problemas ambientais como a chuva ácida.

Daí, na presente busca incansável pela economia e melhoria contínua, é essencial que se obtenha esses resultados, mantendo fator de potência elétrico dentro do valor indicado pela legislação. Dentro dessa necessidade, foram estudadas as 4 principais técnicas para correção do fator de potência nos dias atuais, com o intuito de indicar qual é a melhor técnica para cada cenário, com os estudos e pesquisas foi possível gerar dados suficientes para realizar uma tabela comparativa e indicativa com as vantagens e desvantagens de cada tipo de correção.

Através da Tabela 4, fez-se a comparação entre os dispositivos demonstrando a atuação dos compensadores estáticos, sendo eles o banco de capacitor e reator em série, possuindo vantagens como aumento da capacidade de transmissão de energia elétrica e redução da impedância no sistema. Já a compensação em derivação visa fornecer energia capacitiva para o sistema diminuindo o excesso de energia reativa indutiva e também minimizar os níveis do Efeito Ferranti.

Logo, percebeu-se que a compensação síncrona é uma das melhores técnicas para compensação na linha de transmissão. Viu-se também que sua função permite operar com o fator de potência indutivo ou capacitivo inserindo ou absorvendo reativos, porém seu custo é elevado e sua manutenção deve ser frequente, com isso abrindo oportunidades para escolhas de novas técnicas mais baratas e eficazes.

Vale citar que o FACTS permite a otimização dos sistemas de elétrico de potência evitando diversas perturbações operacionais como perda de sincronismo de máquinas elétricas, tendo a função de evitar sobrecargas, ação rápida no controle sobre os fluxos de potência ativa e reativa, aumenta a capacidade de transmissão. Comparando com outras técnicas o FACTS possui mais funções do que os compensadores tradicionais como banco de capacitor, reator e gerador síncrono devido a seu controle e ação rápida sobre o sistema, porém seu custo é elevado, mas os resultados acabam sendo satisfatórios.

Respondendo ao problema desta pesquisa, os dispositivos FACTS diante dos prós e contras fica evidente que, mesmo sendo complexa e tendo um custo elevado as vantagens desses dispositivos superam e muito todas as desvantagens relacionadas a este equipamento, superando também todos outros métodos de compensação de reativos pois é o meio mais rápido eficiente e eficaz para controlar os excessos de reativos de um sistema aumentando a capacidade de transmissão de energia, fazendo com que o sistema trabalhe com eficiência evitando custos adicionais como construções de novas linhas, fazendo assim essencial o investimento nessa topologia eletrônica no sistema de transmissão.

Concluindo, conforme o crescimento da eletrônica de potência nos sistemas elétricos, este trabalho deverá contribuir de forma categórica para futuras pesquisas bibliográficas e o desenvolvimento da absorção de conhecimento no campo da compensação de reativos em linhas, principalmente nas tecnologias FACTS, objeto de pesquisa desse trabalho. Sendo assim, os estudos sobre essa área se fazem essenciais devido ao fato desses dispositivos estarem sendo estudados e desenvolvidos até hoje, nos dias atuais.

REFERÊNCIAS

ABRADEE, Associação Brasileira de Distribuidores de Energia Elétrica. **Redes de energia elétrica**. 2018. Disponível em: <<http://www.abradee.org.br/setor-eletrico/redes-de-energia-eletrica/>>. Acesso em: 05 abr. 2019.

ABRATE, Associação Brasileira das Empresas de Transmissão de Energia Elétrica. **Integração eletroenergética**. 2019. Disponível em: <<https://abrate.org.br/integracao-eletoenergetica/>>. Acesso em: 05 abr. 2019.

AFFONSO, Carolina de M ; SILVA, Luciano J. da; SILVA, Luis C. P. da. **Avaliação da estabilidade de tensão do sistema brasileiro - um caso de estudo**. SBA Controle e Automação, Natal, July/Sept. 2008. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-17592008000300008>. Acesso em: 05 abr. 2019.

AHMED, M. R.; ALAM, M. J. **Power factor improvement by pulse width modulated switched single capacitor**. 2006 India International Conference on Power Electronics, Chennai, 2006, pp. 212-215. doi: 10.1109/IICPE.2006.4685370. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/4685370>>. Acesso em: 07 abr. 2019.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. **Aspectos institucionais**. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/aspectos_institucionais/2_3.htm>. Acesso em: 07 abr. 2019.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. **Bem-vindo à ANEEL!** 2019. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/a-aneel>>. Acesso em: 07 abr. 2019.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. **Documento 065/2012 – Resolução 414 2010**. Aneel, 2017. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/documents/656827/16228368/ren2010414_Texto_Atualizado_Compacto_28rev_800_2017-29.pdf/6f42da02-7ce0-b9b7-7a8f-041731263807> Acesso em: 2 nov. 2018.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. **Regulação dos Serviços de Distribuição**. 2015. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/regulacao-da-distribuicao/-/asset_publisher/nHNpDfkNeRpN/content/regulacao-dos-servicos-de-distribuicao/656827?inheritRedirect=false&redirect=http%3A%2F%2Fwww.aneel.gov.br%2Fregulacao-da-distribuicao%3Fp_p_id%3D101_INSTANCE_nHNpDfkNeRpN%26p_p_lifecycle%3D0%26p_p_state%3Dnormal%26p_p_mode%3Dview%26p_p_col_id%3Dcolumn-2%26p_p_col_count%3D4>. Acesso em: 07 abr. 2019.

ANGOLA POWER SERVICES. **Ruído das linhas de transmissão de energia elétrica**. 23 de fev de 2011. Disponível em: <<http://angolapowerservices.blogspot.com/2011/02/ruido-das-linhas-de-transmissao-de.html>>. Acesso em: 10 abr. 2019.

ANICETO, Diego Machado. **Importância da correção do fator de potência nas instalações elétricas industriais**. Revista Especialize On-line IPOG - Goiânia - Edição nº 11 Vol. 01/ 2016 julho/2016. Disponível em: <<https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:mMouWJCnhz0J:https://www.ipog.edu.br/download-arquivo-site.sp%3Farquivo%3Ddiego-machado-aniceto-16133917.pdf+&cd=1&hl=pt-BR&ct=clnk&gl=br>>. Acesso em: 10 abr. 2019.

ARAÚJO, Antônio E. A.; NEVES, Washington L. A. **Cálculo de transitórios eletromagnéticos em sistemas de energia**. Belo Horizonte: UFMG, 2005. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=q3h_fRjbcOgC&printsec=frontcover&dq=inauthor:%22WASHINGTON+L.A.+NEVES%22&hl=pt-BR&sa=X&ved=0ahUKEwi8t-#v=onepage&q&f=false>. Acesso em: 10 abr. 2019.

ARAÚJO, Giovanni Moraes. **Normas Regulamentadores Comentadas**. 11. ed. Rio de Janeiro: GVC, 2014. Volume 2. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=vaUwi3BLLboC&pg=PA1318&dq=sistema+elétrico+de+potencia+definicao&hl=pt-BR&sa=X&ved=0ahUKEwi12srXtebhAhWAlbkGHZCJDRYQ6AEILTAB#v=onepage&q=sistema%20eletrico%20de%20potencia%20definicao&f=false>>. Acesso em: 10 abr. 2019.

AYRES, H.m. et al. A didactic procedure for designing power oscillation dampers of FACTS devices. **Simulation Modelling Practice And Theory**, v. 18, n. 6, p.896-909, jun. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.simpat.2010.02.007>. Disponível em: <<http://faraday1.ucd.ie/archive/papers/psatpod.pdf>>. Acesso em: 10 abr. 2019.

BRASIL, Dalton de Oliveira Camponês do. **Aplicação de reatores saturados em sistemas de transmissão**. Tese (mestrado) – Curso de Engenharia Elétrica, Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Pernambuco, 1996. Disponível em: <https://www.ufpe.br/documents/39830/1359036/044_DaltonBrasil/ae116c44-d701-47cc-ab71-19589052f0ff>. Acesso em: 12 abr. 2019.

CÁRDENAS, Sergio León Escalante. **Technical and economic aspects of use of drivers FACTS in the operation of systems electrical energy**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Maranhão, São Luis, 2005. Disponível em: <<http://tedebc.ufma.br:8080/jspui/handle/tede/376?mode=full>>. Acesso em: 12 abr. 2019.

CASTRO, Alexandre César de. **Oscilações eletromecânicas: um método de amortecimento**. São Paulo: Braúna, 2011. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=oB1swgMdRKIC&pg=PA19&lpg=PA19&dq=o+desenvolvimento+da+eletronica+de+potencia+possibilitou+o+surgimento+dos+dispositivos+chamados+facts&source=bl&ots=RULHMr7euf&sig=ACfU3U20QdfJzRkVnGPbOvKwbTUQZusugw&hl=pt-BR&sa=X&ved=2ahUKEwjB9_airPXhAhUnw1kKHdSdBloQ6AEwAHoECAgQAQ#v=onepage&q=o%20desenvolvimento%20da%20eletronica%20de%20potencia%20possibilitou%20o%20surgimento%20dos%20dispositivos%20chamados%20facts&f=false>. Acesso em: 12 abr. 2019.

CBIE, Centro Brasileiro de Infraestrutura. **Quantos quilômetros de linha de transmissão de energia temos no Brasil?** Artigos, 18 de abril de 2019. Disponível em: <<https://cbie.com.br/artigos/quantos-quilometros-de-linha-de-transmissao-de-energia-temos-no-brasil/>>. Acesso em: 12 abr. 2019.

CHAVES, Fabrício Silveira. **Análise da Tensão ao Longo da Linha de Transmissão**. CPDEE / UFMG: 2014. Disponível em: <<https://pt.scribd.com/document/356841273/Analise-de-tensao-em-LT-Frabricios-Chaves-pdf>>. Acesso em: 15 abr. 2019.

CHAVES, Fabrício Silveira. **Avaliação técnica do desempenho da compensação reativa Shunt capacitiva aplicada à expansão de sistemas elétricos**. Tese (doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007. Disponível em: <<https://www.ppgee.ufmg.br/defesas/546D.PDF>>. Acesso em: 15 abr. 2019.

CHOUDEKAR P., SINHA, S., SIDDIQUI A. Congestion Management of IEEE 30 Bus System Using Thyristor Controlled Series Compensator. **2018 International Conference on Power Energy, Environment and Intelligent Control (PEEIC)**, Greater Noida, India, 2018, pp. 649-653. Doi: 10.1109/PEEIC.2018.8665413. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8665413>>. Acesso em: 17 abr. 2019.

CODI. **Manual de orientação aos consumidores: Energia Reativa Excedente**. Comitê de Distribuição de Energia Elétrica, 2004. Disponível em: <<https://pt.slideshare.net/CtiaSanchezRoboredo/manual-de-orientao-aos-consumidores-energia-reativa-excedente>>. Acesso em: 17 abr. 2019.

COPEL Distribuição. **Fator de potência**: Em busca da eficiência energética nas instalações elétricas. 2019. Disponível em: <[https://www.copel.com/hpcopel/root/sitearquivos2.nsf/arquivos/fator_de_potencia/\\$FILE/fator_potencia.pdf](https://www.copel.com/hpcopel/root/sitearquivos2.nsf/arquivos/fator_de_potencia/$FILE/fator_potencia.pdf)>. Acesso em: 17 abr. 2019.

COTRIM, Ademaro A. M. B. **Instalações Elétricas**. 5. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009. Revisão e adaptação técnica José Aquiles Baesso Gromoni e Hilton Moreno. Disponível em: <<https://www.ebah.com.br/content/ABAAAhJfQAA/instalacoes-eletricas-5-edicao-ademaro-a-m-b-cotrim#>>. Acesso em: 22 abr. 2019.

CREDER, Hélio. **Instalações elétricas**. Rio de Janeiro: LTC, 2016. Atualização e revisão Luiz Sebastião Costa. Disponível em: <<https://pt.scribd.com/document/368212842/instalacoes-eletricas-16-edicao-helio-creder-pdf>>. Acesso em: 22 abr. 2019.

DECKMANN, S. M., POMILIO, J.A. **Condicionamento de Energia Elétrica e Dispositivos FACTS**. Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. Julho de 2009. Disponível em: <<http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdf/files/it741/cap1.pdf>>. Acesso em: 22 abr. 2019.

DOMINGUES, Adriano Fávaro. **Aplicação de dispositivos FACTS para o amortecimento de oscilações eletromecânicas de baixa frequência em sistemas de energia elétrica**. Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Campinas, 2001. Disponível em: <http://repositorio.unicamp.br/jspui/bitstream/REPOSIP/260105/1/Domingues_AdrianoFavaro_M.pdf>. Acesso em: 23 abr. 2019.

ENGELETRICA. **Manual correção fator de potência.** São Paulo: 2011. Disponível em: <http://www.engeletrica.com.br/manual_correcao_fatordepotencia.pdf>. Acesso em: 23 abr. 2019.

FITZGERALD, A.E.; KINGSLEY JR. C.: UMANS, S. D. **Máquinas elétricas:** com introdução à eletrônica de potência. 6. ed. Bookman, 2006. Disponível em: <<https://www.ebah.com.br/content/ABAAAgSGUAC/maquinas-eletricas-com-introducao-a-eletronica-potencia-fitzgerald>>. Acesso em: 05 mai. 2019.

FLORES, Marcos Júlio Rider. **Metodologia de análise para um mercado competitivo da potência reativa.** Dissertação (mestrado) – Curso de Engenharia de Eletricidade, Universidade Federal do Maranhão, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, São Luís, 2002. Disponível em: <<http://tedebc.ufma.br:8080/jspui/bitstream/tede/302/1/Marcos%20Julio%20Rider%20Flores.pdf>>. Acesso em: 05 mai. 2019.

FOGAÇA, Ana Letícia Borille. **Análise de controladores FACTS em sistemas de energia elétrica.** Trabalho de graduação - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Paraná Setor de Tecnologia, Centro Politécnico Departamento de Eletricidade, Curitiba, 2006. Disponível em: <<http://www.cricte2004.eletrica.ufpr.br/ufpr2/tccs/119.pdf>>. Acesso em: 05 mai. 2019.

FRANCHI, Claiton Moro. **Acionamentos elétricos.** 3. ed. São Paulo: Editora Érica, 2008. Disponível em: <<http://evtech.com.br/usuario/LIVRO%20Acionamentos%20EI%C3%A9tricos%20-%20Claiton%20Moro%20Franchi.pdf>>. Acesso em: 10 mai. 2019.

FREITAS, Michelly Alcantara de. **Uma Contribuição ao Estudo do Efeito Corona em Linhas de Transmissão.** 90 f. Dissertação (mestrado) – Curso de Engenharia Elétrica, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007. Disponível em: <http://repositorio.unicamp.br/jspui/bitstream/REPOSIP/259380/1/Freitas_MichellyAlcantarade_M.pdf>. Acesso em: 10 mai. 2019.

FUCHS, Rubens Dario. **Transmissão de Energia Elétrica.** Rio de Janeiro: LTC. Itajubá: EFEI, 1977. Disponível em: <<https://www.ebah.com.br/content/ABAAAhDFIAA/livro-transmissao-energia-eletrica-linhas-aereas-autor-rubens-dario-fuchs-volume-1>>. Acesso em: 10 mai. 2019.

FURINI, Marcos Amorielle; ARAUJO, Percival Bueno de. **Melhora da estabilidade dinâmica de sistemas elétricos de potência multimáquinas usando o dispositivo FACTS**. Departamento de Engenharia Elétrica Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - FEIS/UNESP, Ilha Solteira, SP, Brasil. Revista Controle & Automação/Vol.19 no.2/Abril, Maio e Junho 2008. p 214 -225. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/ca/v19n2/a09v19n2>>. Acesso em: 10 mai. 2019.

GOMES, Gabriel De Novais et al. **Compensação de reativos e os seus efeitos sobre o SEP (Sistema Elétrico de Potência)**. Rev. Esfera Acadêmica Tecnologia (ISSN 2526-4141), v. 3, n. 1, 2018. Disponível em: <<https://multivix.edu.br/wp-content/uploads/2018/10/revista-esfera-tecnologia-v03-n01-artigo08.pdf>>. Acesso em: 13 mai. 2019.

GRID ENERGY. **Banco de Reatores**. 2018. Disponível em: <<https://gridse.com.br/areas-de-negocios/banco-de-reatores/>>. Acesso em: 13 mai. 2019.

HARLOW, James H. **Electric power transformer engineering**. CRC Press LLC: Boca Raton, 2004. Disponível em: <<http://prof.usb.ve/bueno/Libros/Electric%20Power%20Transformer%20Engineering.pdf>>. Acesso em: 13 mai. 2019.

IFSC, Instituto Federal de Santa Catarina. **AULA 12 - Circuitos 2 – Engenharia**. 10 de maio de 2017. Disponível em: <https://wiki.ifsc.edu.br/mediawiki/index.php/AULA_12_-_Circuitos_2_-_Engenharia>. Acesso em: 13 mai. 2019.

KABIR, Yasin; MOHSIN, Yusuf Mohammad; KHAN, Mohammad Monirujjaman. Automated power factor correction and energy monitoring system. **2017 Second International Conference On Electrical, Computer And Communication Technologies (icecct)**, fev. 2017. IEEE. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1109/icecct.2017.8117969>>. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/314572350_Automated_Power_Factor_Correction_and_Energy_Monitoring_System>. Acesso em: 15 mai. 2019.

KAGAN, Nelson. OLIVEIRA, Carlos César Barioni de. ROBBA, Ernesto, João. **Introdução aos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica**. São Paulo: Edgard Blucher, 2005. Disponível em: <<https://www.ebah.com.br/content/ABAAAgw48AE/introducao-aos-sistemas-distribuicao-energia-eletrica-nelson-kagan-carlos-oliveira-enertos-robba#>>. Acesso em: 15 mai. 2019.

KAMALAPATHI, K.; PRIYADARSHI, N.; PADMANABAN, S.; HOLM-NIELSEN, J.B.; AZAM, F.; UMayAL, C.; RAMACHANDARAMURTHY, V.K. **A Hybrid Moth-Flame Fuzzy Logic Controller Based Integrated Cuk Converter Fed Brushless DC Motor for Power Factor Correction**. Electronics 2018, 7, 288. Disponível em: <<https://www.preprints.org/manuscript/201809.0462/v1>>. Acesso em: 24 out. 2018.

KHAN, Qasim. AHMAD, Furkan. IMRAN, Mohd. Congestion management in Indian Power Transmission System. In: **International Journal of Engineering and Technology**. 9(3S), p. 26-31, July 2017. DOI: 10.21817/ijet/2017/v9i3/170903S005. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/318656877_Congestion_management_in_Indian_Power_Transmission_System>. Acesso em: 15 mai. 2019.

KUNDUR, Prabha. **Power System Stability And Control**. Palo Alto: McGraw-Hill, 1994. Disponível em: <<https://www.ebah.com.br/content/ABAAAFJuUAH/power-system-stability-and-control-by-prabha-kundur>>. Acesso em: 15 mai. 2019.

LAMB, Frank. **Automação Industrial na Prática**. Porto Alegre: AMGH Editora, 2015. Tradução: Márcio José da Cunha. Revisão técnica: Antonio Pertence Junior. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=X5XzCQAAQBAJ&pg=PA135&dq=motor+sincrono+superexcitado&hl=pt-BR&sa=X&ved=0ahUKEwiw8fn0kf3hAhWmlbkGHdQJC48Q6AEIODAD#v=onepage&q=motor%20sincrono%20superexcitado&f=false>>. Acesso em: 15 mai. 2019.

LIMA, Manfredo Correa et al. **Experiência da CHESF no projeto dos bancos de capacitores série em 500kV instalados na se São João do Piauí**. SNPTEE, GSE 33, 16 a 21 de outubro de 2005, Curitiba – PR. Disponível em: <<http://www.mfap.com.br/pesquisa/arquivos/20081205115606-GSE33.pdf>>. Acesso em: 15 mai. 2019.

LOPES, Igor Lazarino. SILVA, Thiago Borges Teixeira. CHAVES, Fabrício Silveira. **O uso de compensadores estáticos na qualidade da energia elétrica**. UNIBH, 2014. Disponível em: <https://semanaacademica.org.br/system/files/artigos/tcc_definitivo_mod_para_artigo_0.pdf>. Acesso em: 15 mai. 2019.

MACHADO, Ruy Luiz. **Aplicação de dispositivos FACTS no sistema de transmissão da Eletrosul**. Dissertação (mestrado) – Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação Em Engenharia Elétrica, Florianópolis, 2003. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/84898/193333.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 15 mai. 2019.

MATHUR, R. Mohan; VARMA, Rajiv K. **Thyristor-based FACTS controllers for electrical transmission systems**. Mohamed E. El-Hawary, Series Editor, IEEE, a John Wiley & Sons, Inc. Publication. 2002. Disponível em: <http://research.iaun.ac.ir/pd/bahador.fani/pdfs/UploadFile_8100.pdf>. Acesso em: 15 mai. 2019.

MAMEDE FILHO, João. **Instalações elétricas industriais**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006. 932p. Disponível em: <<http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM249/Instalacoes%20EI%E9tricas%20IndustriaisJo%E3o%20Mamede%20Filho%207%AA%20Edi%E7%E3o/4.Fator%20de%20Potencia.pdf>>. Acesso em: 17 mai. 2019.

MARTINS, Alexandre. **Entendendo o fator de potência**. Porto Alegre: CP Eletrônica, 2008.

MARUJO, Diogo. **Estabilidade de sistemas elétricos de potência com a presença de redes de distribuição ativas**. 199 f. Tese (Doutorado) – Curso de Engenharia Elétrica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2007. Disponível em: <https://repositorio.unifei.edu.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/803/tese_marujo_2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 00 abr. 2019.

MASUDA, Mario. **Aplicação do dispositivo FACTS em sistema de distribuição – Simulação de desempenho**. Dissertação (mestrado) – Curso de Engenharia Elétrica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006. Disponível em: <<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3143/tde-08122006-161400/publico/DissertacaoMarioMasudaFC.pdf>>. Acesso em: 17 mai. 2019.

MELLO, F. P. **Electrical Machines Dynamics I. Power Technology Course**. Power Technologies, Inc., 1974.

MP ENGENHARIA ELÉTRICA. **Banco Capacitor. 1998**. Disponível em: <<http://www.mp.srv.br/banco-capacitor>>. Acesso em: 17 mai. 2019.

NASHAWATI, Eithar et al. **Impacts of Shunt Reactors on Transmission Line Protection**. Revised edition released November 2013. Originally presented at the 38th Annual Western Protective Relay Conference, October 2011. Disponível em: <https://cdn.selinc.com/assets/Literature/Publications/Technical%20Papers/6515_ImpactsShunt_NF_20131121_Web2.pdf?v=20151125-161608>. Acesso em: 17 mai. 2019.

NATURESA, Jim Silva. **A influência de compensadores estáticos de reativos na estabilidade de tensão de sistemas de energia elétrica.** Dissertação (mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas, Departamento de Sistemas e Controle de Energia, Campinas, 2001. Disponível em: <http://repositorio.unicamp.br/bitstream/REPOSIP/260083/1/Naturesa_JimSilva_M.pdf>. Acesso em: 17 mai. 2019.

NERI, Thiago Fernandes. **Proteção de perda de sincronismo:** aplicação e avaliação no sistema interligado nacional brasileiro. 189 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015. Disponível em: <<http://www.pee.ufrj.br/index.php/pt/producao-academica/dissertacoes-de-mestrado/2015-1/2015063003-2015063003/file>>. Acesso em: 17 mai. 2019.

ONS, Operador Nacional do Sistema Elétrico. **Energia no futuro: transmissão.** 2019. Disponível em: <<http://ons.org.br/paginas/energia-no-futuro/transmissao/instalacoes>>. Acesso em: 17 mai. 2019.

ONS, Operador Nacional do Sistema Elétrico. **Sobre o ONS:** o que é ONS. 2019. Disponível em: <<http://ons.org.br/paginas/sobre-o-ons/o-que-e-ons>>. Acesso em: 17 mai. 2019.

ONS, Operador Nacional do Sistema Elétrico. **Sobre o SIN:** o que é o SIN. 2019. Disponível em: <<http://ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-que-e-o-sin>>. Acesso em 17 mai. 2019.

PAIXÃO, Richard Lester Damas. **A compensação série chaveada como solução para o problema do colapso transitório de tensão na interligação Norte-Nordeste.** Dissertação (mestrado) – Curso de Engenharia Elétrica, Universidade De Brasília, Faculdade De Tecnologia, Departamento De Engenharia Elétrica, Brasília/DF, 2006. Disponível em: <http://www.gsep.ene.unb.br/producao/marco/Dissertacao_RichardLester.pdf>. Acesso em: 17 mai. 2019.

PINA, Aline Petean. **Comparação entre modelos do dispositivo FACTS STATCOM para o estudo da estabilidade a pequenas perturbações.** Dissertação (mestrado) – Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual Paulista Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Programa De Pós-Graduação Em Engenharia Elétrica, Ilha Solteira, 2010. Disponível em: <https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaelettrica/pos-graduacao/261-dissertacao_aline_petean_pina.pdf>. Acesso em: 00 abr. 2019.

RAGNEV, Walter. **Estudo de potência reativa, tensão, contingência e perdas em empresas de energia elétrica localizadas na Grande São Paulo**. Dissertação (mestrado) – Curso de Engenharias Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2005. Disponível em: <<https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/14659>>. Acesso em: 17 mai. 2019.

RAHIM, A. H. M. A., S. A. Al-Baiyat, and F. M. Kandlawala, 2001. **A robust STATCOM controller for power system dynamic performance enhancement**. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Vol. 2 (July), p. 887-892.

RAJPUT, R. K. **Power System Engineering**. New Delhi: Laxmi Publications, 2006. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=E7Em_V7Zq9sC&pg=PA518&dq=short+transmission+lines&hl=pt-BR&sa=X&ved=0ahUKEwiGrdeD0-bhAhWII7kGHZmoDQAQ6AEIKDAA#v=onepage&q=short%20transmission%20lines&f=false>. Acesso em: 17 mai. 2019.

REVIAX. **Motores e compensadores síncronos**. 2019. Disponível em: <<https://www.reivax.com/pt/aplicacoes/motores-e-compensadores-sincronos%E2%80%8B/>>. Acesso em: 22 mai. 2019.

REZENDE, Paulo H. O. et al. **Compensação de reativos em linhas de transmissão utilizando compensadores estáticos fixos**. In: XI CEEL, 2013, UFU, Uberlândia. Disponível em: <https://www.peteletricaufu.com/static/ceel/doc/artigos/artigos2013/ceel2013_065.pdf>. Acesso em: 22 mai. 2019.

RIBEIRO JUNIOR, Luiz Carlos. **Dispositivos e Conversores Utilizados em FACTS**. Artigo de TFG. UNIFEI, Itajubá, 2015.

RODRIGUES, João Paulo Carneiro. SILVA, Larissa de Paiva. **Avaliação da proteção de reatores shunt de linhas de transmissão**. Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Curso de Engenharia Elétrica, Departamento de Engenharia Elétrica, Faculdade De Tecnologia, Universidade De Brasília, Brasília, 2014. Disponível em: <http://bdm.unb.br/bitstream/10483/13522/1/2014_JoaoPauloCarneiroRodrigues_LarissadePaivaSilva.pdf>. Acesso em: 22 mai. 2019.

SANTINI, Dionadas. GANDIN, Luciano. CORREIA, Vitor Teles. **Controladores FACTS**. UFPR, Curitiba, 2009. Disponível em: <<https://pt.scribd.com/document/204062904/Controladores-Facts>>. Acesso em: 22 mai. 2019.

SILVA, Angelo Leite da. **Aplicação dos dispositivos FACTS na qualidade de Energia Elétrica**. Faculdade Politécnica de Jundiaí. Anuário, 2004. Disponível em: <<https://repositorio.pgsskroton.com.br/bitstream/123456789/495/1/artigo%2023.pdf>>. Acesso em: 22 mai. 2019.

SILVA FILHO, Dilson Ricardo da; DELGADO, Francisco Vasquez. **Bancos de capacitores**. Departamento de Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2010. Disponível em: <<https://www.ebah.com.br/content/ABAAA5QcAG/banco-capacitores>>. Acesso em: 22 mai. 2019.

SOUSA NETO, Cecílio Martins de. **Estabilizador de Sistema de Potência para máquinas Síncronas de Polos Salientes Utilizando a Transformada Wavelet**. Dissertação (mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e da Computação, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, RN, 2013. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/jspui/bitstream/123456789/15474/1/CecilioMSN_DISSERT.pdf>. Acesso em: 22 mai. 2019.

SOUZA, Rômulo Miranda Lima de. BARBOSA, Pedro Gomes. **Aplicação de STATCOM em redes de distribuição de energia elétrica – Topologias e estratégias de controle para compensação de cintilação luminosa**. 2018. Disponível em: <<https://periodicos.ufjf.br/index.php/principia/article/view/25538>>. Acesso em: 22 mai. 2019.

STEVENSON JR, William D. **Elementos de análise de sistemas de potência**. 2. ed. São Paulo: Mc Graw-hill, 1986. Tradução e revisão técnica Arlindo Rodrigues Mayer, Hoão Paulo Minussi, Somchai Ansuaj. Disponível em: <<https://www.mediafire.com/file/l7f249wry4yhxi9/Elementos.de.Analise.de.Sistemas.de.Potencia.-.William.Stevenson.pdf>>. Acesso em: 22 mai. 2019.

VALLE D. B.. ARAUJO P. B. **Análise de Estruturas de Controle do UPFC no Amortecimento das Oscilações Eletromecânicas do Sistema Elétrico de Potência**. Anais SBSE 2012. Disponível em: <<http://www.swge.inf.br/anais/sbse2012/PDFS/ARTIGOS/96853.PDF>>. Acesso em: 22 mai. 2019.

WEDY, Germano Ferreira. **Inclusão do efeito corona em modelos de linhas de transmissão bifásica utilizando a técnica de variáveis de estado**. 116 f. Dissertação (mestrado) – Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Ilha Solteira, 2009. Disponível em: <https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/pos-graduacao/249-dissertacao_germano_wedy.pdf>. Acesso em: 22 mai. 2019.

ZHENG, Fu; ZHANG, Wang. Long term effect of power factor correction on the industrial load: A case study. **2017 Australasian Universities Power Engineering Conference (aupec)**, nov. 2017. IEEE.
<http://dx.doi.org/10.1109/aupec.2017.8282382>. Disponível em:
<<https://ieeexplore.ieee.org/document/8282382>>. Acesso em: 22 mai. 2019.