

JORGE LUIS PEREDO JUNIOR

**COMPORTAMENTO DE UM SISTEMA DE POTÊNCIA  
DEVIDO À COMPENSAÇÃO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO  
POR MEIO DE BANCOS DE CAPACITORES SÉRIE**

Ilha Solteira — SP

2022

JORGE LUIS PEREDO JUNIOR

**COMPORTAMENTO DE UM SISTEMA DE POTÊNCIA  
DEVIDO À COMPENSAÇÃO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO  
POR MEIO DE BANCOS DE CAPACITORES SÉRIE**

Trabalho de graduação apresentado à  
Faculdade de Engenharia do Câmpus de  
Ilha Solteira — UNESP como parte dos  
requisitos para obtenção do título de  
Engenheiro Eletricista.

Prof. Dr. Dionízio Paschoareli Júnior  
Orientador

Ilha Solteira — SP

2022

#### FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

P434c Peredo Junior, Jorge Luis.  
Comportamento de um sistema de potência devido à compensação de linhas de transmissão por meio de bancos de capacitores série / Jorge Luis Peredo Junior. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2022  
47 f.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2022

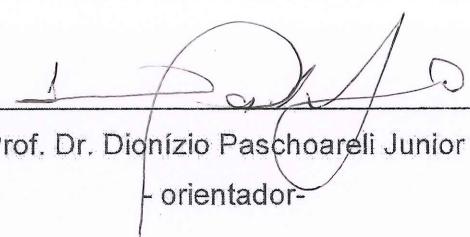
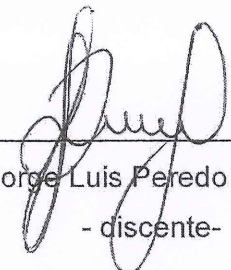
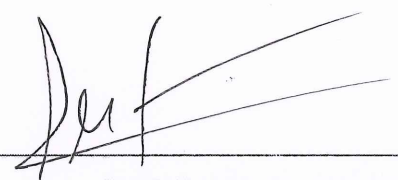
Orientador: Dionízio Paschoareli Júnior  
Inclui bibliografia

1. Linhas de transmissão. 2. Indutância. 3. Compensação série. 4. IEEE-5-Bus System. 5. Sistema de potência.

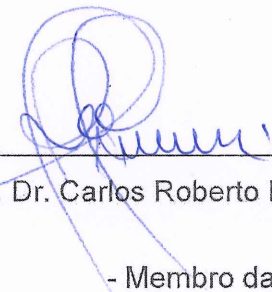
  
Raiane da Silva Santos

**ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE GRADUAÇÃO**

Aos cinco dias do mês de agosto do ano de dois mil e vinte e dois, o discente **Jorge Luis Peredo Junior**, matriculado sob o nº 142054089, tendo como banca examinadora o seu orientador, o Prof. Dr. Dionízio Paschoareli Junior, o Prof. Dr. Sérgio Kurokawa e o Prof. Dr. Carlos Roberto Minussi, apresentou o Trabalho de Graduação intitulado "**Comportamento de um Sistema de Potência devido à Compensação de Linhas de Transmissão por meio de Bancos de Capacitores Série**" obtendo a nota 10,0 ( DEZ ) e conceito APROVADO.

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Dionízio Paschoareli Junior  
- orientador -  
\_\_\_\_\_  
Jorge Luis Peredo Junior  
- discente -  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Sérgio Kurokawa

- Membro da Banca -

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Carlos Roberto Minussi

- Membro da Banca -

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a todos os familiares, amigos, docentes e funcionários da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP, que contribuíram não somente para a realização deste trabalho, mas também agregaram muito durante o período de graduação. Em especial, dedico meus agradecimentos:

- Aos meus pais, Jorge e Jane, meus avós Osvaldo e Dulcília, meus tios Ailton, Osvaldo Junior, Nádia e Fabiana, meu primo Ailton Filho e minha namorada Mariana pelo apoio, incentivo e confiança;
- Ao Prof. Dr. Dionízio Paschoareli Júnior, por todo auxílio, conhecimento e orientação;
- Aos meus companheiros de empresa Bruno Magalhães e Matheus Oliveira, por sua paciência, incentivo, conhecimento e apoio;
- Aos meus companheiros de moradia Bruno, Felipe, Fernando, Luiz e Vinicius, fundamentais para o aprendizado durante a graduação, responsáveis também por muitas risadas e muitos momentos memoráveis.
- Aos amigos do 14/2 e agregados, que compartilharam os momentos incríveis e difíceis também, sempre auxiliando durante os estudos;
- E por fim, agradeço a Siemens Energy pela oportunidade de estágio e, não menos importante, aos amigos que fiz durante este período: Auro, Nelson, Flávia, Thaís, José Carlos, Nicole, André, Dinael, Danilo, Eduardo, Indaléssio, William, Elisângela e Isabella. Vocês foram e continuam sendo essenciais para o meu crescimento pessoal e profissional.

## RESUMO

Espera-se uma expansão no consumo de energia elétrica no Brasil na década atual. Para permitir esse crescimento de maneira que haja confiabilidade, flexibilidade e qualidade, torna-se necessário ampliar e modernizar o Sistema Interligado Nacional (SIN) brasileiro. Devido às dimensões continentais brasileiras, em alguns casos utilizam-se linhas de transmissão de comprimento elevado. Para linhas de grande extensão operando em corrente alternada, enfrenta-se o problema da elevada indutância, que causa perda significativa na transmissão de energia. Para evitar esse fenômeno, busca-se utilizar dispositivos FACTS. Um dos dispositivos FACTS empregados são os FSCs, que consistem em bancos de capacitores conectados em série com linhas de transmissão. Esse tipo de compensação série possibilita um aumento na capacidade de transmissão de potência do sistema elétrico, assim como uma melhora na sua confiabilidade. Levando isso em consideração, nesse trabalho analisou-se o comportamento de um sistema de potência com cinco barras (*IEEE 5-Bus System*), inicialmente sem a compensação série de linhas de transmissão através de capacitores. Os parâmetros desse sistema com cinco barras foram inseridos na ferramenta Simulink, do software MatLab, coletando assim as principais informações para possibilitar o estudo do comportamento desse sistema. Em seguida, os bancos de capacitores (FSCs) foram conectados em série com algumas linhas de transmissão, sendo possível observar os efeitos causados no sistema de potência. Posto isto, compararam-se os resultados anteriores a conexão dos bancos de capacitores com os obtidos posteriormente, possibilitando um melhor entendimento dos motivos pelos quais em alguns casos é recomendada a compensação série de linhas de transmissão através de bancos de capacitores.

**Palavras-chave:** Linhas de transmissão. Indutância. Compensação série. IEEE 5-Bus System. Sistema de potência.

## ABSTRACT

An expansion in electricity consumption in Brazil is expected in the current decade. To allow this growth in a way that there is reliability, flexibility and quality, it is necessary to expand and modernize the Brazilian National Interconnected System (SIN). Due to the continental dimensions of Brazil, in some cases long transmission lines are used. For long-distance lines that operate in alternating current, the problem of high inductance is faced, which causes a high loss in energy transmission. To avoid this phenomenon, it is sought to use FACTS devices. One type of FACTS devices employed are the FSCs, which consist of capacitor banks connected in series with transmission lines. This type of series compensation allows an increase in the power transmission capability of the electrical system, as well as an improvement in its reliability. Taking this into account, this work analyzed the behavior of a power system with five buses (IEEE 5-Bus System), initially without series compensation of transmission lines through capacitors. The parameters of this system with five bars were inserted in Simulink, of the software MatLab, thus collecting the main information to study the behavior of this system. Then, the capacitor banks (FSCs) were connected in series with some transmission lines, making it possible to observe the effects on the power system. That said, the results prior to the connection of capacitor banks were compared with those obtained later, allowing a better understanding of the reasons why in some cases it is recommended the series compensation of transmission lines through capacitor banks.

**Keywords:** Transmission lines. Inductance. Series compensation. IEEE 5-Bus System. Power system.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                   |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 - Mapa do Sistema de Transmissão brasileiro — Horizonte 2024 .....                       | 12 |
| Figura 2 - Interligação norte-sul através de uma linha de transmissão em corrente alternada ..... | 13 |
| Figura 3 - Subestações intermediárias da linha de transmissão norte-sul .....                     | 15 |
| Figura 4 - Linha de Transmissão interligando os sistemas A e B.....                               | 16 |
| Figura 5 - Esquema de banco de Capacitores série, protegidos por meio de varistores .....         | 23 |
| Figura 6 - Características de descarga do capacitor .....                                         | 25 |
| Figura 7 - Plataforma para suporte dos equipamentos de uma fase de um FSC.....                    | 25 |
| Figura 8 - Esquema de ligação dos componentes de uma plataforma.....                              | 26 |
| Figura 9 - Unidades capacitivas de um banco de capacitores .....                                  | 27 |
| Figura 10 — Eletrodos de um centelhador .....                                                     | 28 |
| Figura 11 — Banco de varistores de um FSC .....                                                   | 29 |
| Figura 12 — Banco de capacitores com disjuntores à frente .....                                   | 30 |
| Figura 13 — Reator de núcleo de ar similar ao de um FSC.....                                      | 31 |
| Figura 14 — Transformadores de corrente utilizados na plataforma de um FSC.....                   | 32 |
| Figura 15 — Colunas de sinais de um FSC .....                                                     | 33 |
| Figura 16 — Diagrama unifilar simplificado do sistema de potência com 5 barras IEEE .....         | 34 |
| Figura 17 — Modelo do sistema de potência IEEE-5-bus System na ferramenta Simulink.....           | 37 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                                                         |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 - Dados das barras do sistema de potência IEEE-5-bus System .....                                                              | 35 |
| Tabela 2 - Dados das linhas de transmissão do sistema de potência IEEE-5-bus System .....                                               | 35 |
| Tabela 3 - Valores de tensão e ângulo das barras no estudo sem o FSC conectado as linhas de transmissão.....                            | 38 |
| Tabela 4 - Valores de tensão e ângulo das barras no estudo com os FSCs conectados as linhas de transmissão .....                        | 39 |
| Tabela 5 - Comparação dos resultados obtidos nas simulações antes e após a conexão dos FSCs em série com as Linhas de Transmissão ..... | 41 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|       |                                                   |
|-------|---------------------------------------------------|
| FACTS | Flexible Alternating Current Transmission System  |
| FSC   | Fixed Series Capacitor                            |
| EPE   | Empresa de Pesquisa Energética                    |
| PDE   | Plano Decenal de Expansão de Energia              |
| MME   | Ministério de Minas e Energia                     |
| ONS   | Operador Nacional do Sistema                      |
| SIN   | Sistema Interligado Nacional                      |
| IEEE  | Institute of Electrical and Electronics Engineers |
| MW    | megawatt                                          |
| MOV   | Metal Oxide Varistor                              |
| CA    | Corrente Alternada                                |
| CC    | Corrente Contínua                                 |
| kV    | quilovolts                                        |
| MVAr  | megavolt-ampère reativo                           |
| p.u.  | por unidade                                       |
| km    | quilometro                                        |
| TCSC  | Thyristor Controlled Series Compensator           |
| SE    | Subestação                                        |
| LT    | Linha de Transmissão                              |

## SUMÁRIO

|        |                                                                                                                       |    |
|--------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.     | Introdução Teórica.....                                                                                               | 11 |
| 2.     | Características, peculiaridades e funcionamento de um FSC .....                                                       | 21 |
| 2.1.   | Esquema elétrico e funcionamento de um FSC .....                                                                      | 22 |
| 2.1.1. | Unidades capacitivas.....                                                                                             | 26 |
| 2.1.2. | Centelhadores .....                                                                                                   | 27 |
| 2.1.3. | Varistores .....                                                                                                      | 28 |
| 2.1.4. | Disjuntor .....                                                                                                       | 29 |
| 2.1.5. | Circuito de amortecimento.....                                                                                        | 30 |
| 2.1.6. | Plataforma .....                                                                                                      | 31 |
| 2.1.7. | Comunicação plataforma-solo.....                                                                                      | 32 |
| 2.1.8. | Proteção dos componentes.....                                                                                         | 33 |
| 3.     | Sistema de potência IEEE-5-bus e os efeitos da compensação série de suas linhas de transmissão por meio de FSCs ..... | 34 |
| 3.1.   | Modelo IEEE-5-bus System na ferramenta Simulink .....                                                                 | 36 |
| 3.2.   | Simulação sem a presença dos FSCs .....                                                                               | 37 |
| 3.3.   | Escolha das linhas de transmissão para compensação série e dimensionamento dos bancos de capacitores. ....            | 38 |
| 3.4.   | Simulação com a presença dos FSCs .....                                                                               | 39 |
| 3.5.   | Análise do comportamento do sistema por meio das simulações antes e após a conexão dos FSCs.....                      | 40 |
| 4.     | Conclusão.....                                                                                                        | 42 |
| 5.     | Bibliografia.....                                                                                                     | 44 |
| 6.     | APÊNDICE A.....                                                                                                       | 47 |
| 6.1.   | Resultados das simulações antes e após a compensação série de linhas de transmissão .....                             | 47 |
| 6.1.1. | Simulação sem a compensação série das linhas de transmissão entre as barras 1-3 e as barras 4-5.....                  | 47 |

|                                                                                                             |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 6.1.2. Simulação com a compensação série das linhas de transmissão entre as barras 1-3 e as barras 4-5..... | 47 |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

## 1. Introdução Teórica

Quando se trata de energia elétrica, o Brasil tem um grande desafio para a década que se iniciou em 2020, em que é promover a expansão da oferta de energia de modo a sustentar a retomada do crescimento econômico nacional. A segurança energética, o acesso à energia por meio de preços competitivos e principalmente as metas ambientais, são objetivos que devem ser cumpridos.

Consoante o PDE 2029 (Plano de Decenal de Expansão de Energia 2029), elaborado pela EPE (Empresa de Pesquisa Energética) e pelo MME (Ministério de Minas e Energia), o investimento necessário para os próximos 10 anos no setor de energia é da ordem de R\$ 2,3 trilhões, sendo R\$ 1,9 trilhões em petróleo, gás natural e biocombustíveis e R\$ 456 bilhões em geração e transmissão de energia elétrica. Além disso, espera-se um crescimento médio de 3,3% a.a. da economia mundial, impulsionado na maioria pelos países em desenvolvimento. No Brasil, a expectativa é que o consumo total de eletricidade cresça cerca de 15% a mais que a economia no período em questão.

Outro desafio pela frente é o envelhecimento do sistema de transmissão brasileiro. Há que garantir a substituição da infraestrutura do sistema elétrico (modernização do sistema elétrico), de modo que a malha de transmissão possa operar com os níveis de confiabilidade, flexibilidade e qualidade exigidos pela sociedade atual.

O plano de obras apresentado no PDE 2029 estima que haverá um acréscimo de 56 mil quilômetros de novas linhas de transmissão no decênio, totalizando cerca de 204 mil quilômetros de linhas de transmissão em operação em 2029. A expectativa é que os investimentos totais em transmissão atinjam cerca de R\$ 103 bilhões ao longo da década, sendo R\$ 73 bilhões em linhas de transmissão e R\$ 30 bilhões em subestações. (MME/EPE, 2029).



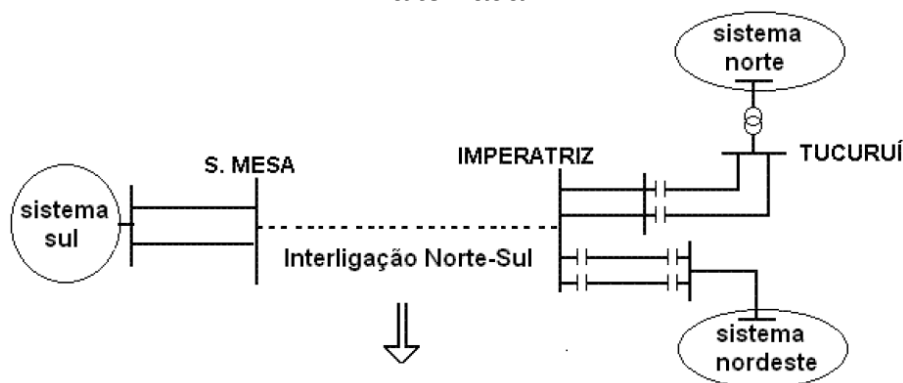
ineficácia da transmissão em corrente alternada para longas distâncias, passou-se a utilizar linhas de transmissão em corrente contínua.

Um exemplo onde se utiliza a transmissão em corrente contínua é a usina hidrelétrica de Belo Monte, que fica na bacia do rio Xingu, no norte do estado do Pará. Sua capacidade de geração instalada é de 11.233,1 MW, o que a coloca como a maior hidrelétrica 100% brasileira. Belo Monte foi inaugurada oficialmente em 27 de novembro de 2019, data em que estava pronta para plena operação.

Belo Monte conta com duas linhas de transmissão em corrente contínua com a classe de tensão de 800kV. A primeira conecta a SE Xingu à SE Estreito, percorrendo aproximadamente 2.083 km. Já a segunda, que conecta às SEs Xingu e Terminal Rio, tem uma extensão de 2.552 km, segundo o aplicativo Webmap EPE, da Empresa de Pesquisa Energética.

Para a transmissão em corrente alternada, pode-se citar a linha de transmissão norte-sul, que possui 1.020 km de extensão e utiliza a classe de tensão de 500kV, que liga Serra da Mesa, em Goiás, a Imperatriz, no Maranhão, conforme mostra a Figura 2.

Figura 2 - Interligação norte-sul através de uma linha de transmissão em corrente alternada



Fonte: Gama, 1999.

Ao projetar uma linha de transmissão, busca-se otimizar o máximo possível o seu custo, porém sem perder a qualidade na transmissão da energia. No entanto, para projetos de linhas de transmissão em corrente alternada de longo comprimento, enfrenta-se uma grande barreira: a elevada indutância causada pela longa distância percorrida pela linha. A indutância, assim como a resistência ôhmica, é um dos parâmetros que mais afetam a capacidade de transporte de energia em linhas de

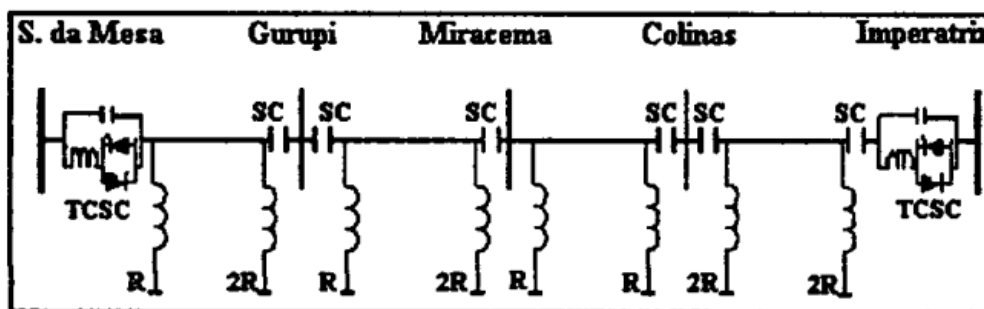
transmissão. O excedente de reativos resulta em um aumento na corrente total, ocasionando perdas por calor (aquecimento dos condutores e equipamentos) e queda de tensão elevada.

A expansão e modernização do SIN (Sistema Interligado Nacional) implicam na utilização de tecnologias que modificam e controlam os parâmetros do sistema, sendo comumente conhecidos pelo acrônimo FACTS (*Flexible Alternating Current Transmission Systems*). Essas tecnologias são, na maioria das vezes, utilizadas em linhas de transmissão de longos comprimentos. A utilização de dispositivos FACTS no sistema de transmissão de energia proporciona diversas melhorias, dentre elas:

- Controle do fluxo de potência de modo a direcionar os fluxos para rotas predefinidas;
- Aumento da capacidade das linhas de transmissão;
- Prevenção de desligamentos de grandes áreas através da limitação de corrente nas linhas e desligamento de linhas críticas;
- Melhoria da produtividade na geração de energia através de uma distribuição adequada de cargas entre os geradores;
- Controle da expansão e redimensionamento do sistema;
- Redução do fluxo de potência reativa pelo sistema;
- Auxílio na manutenção da estabilidade através dos amortecimentos de oscilações transitórias e sub-transitórias;

Diante disso, a linha de transmissão em questão possui algumas subestações intermediárias, conforme se observa na Figura 3, além das subestações de Serra da Mesa e Imperatriz. Nessas subestações, utilizam-se tecnologias FACTS, como compensadores série controlado a Tiristores (TCSC — *thyristor controlled series compensator*) assim como compensadores série por meio de bancos de capacitores fixos (FSC — *Fixed Series Capacitor*). Esses dispositivos têm basicamente o mesmo objetivo, diferenciando apenas no fato que os TCSCs conseguem evitar ressonâncias sub-síncronas, o que não é o caso dos FSCs.

Figura 3 - Subestações intermediárias da linha de transmissão norte-sul



Fonte: Gama, 1999.

Uma parcela desses dispositivos FACTS passou por uma modernização nos últimos anos e outra parcela passará por um *retrofit* em breve, uma vez que o tempo de vida útil está se encerrando.

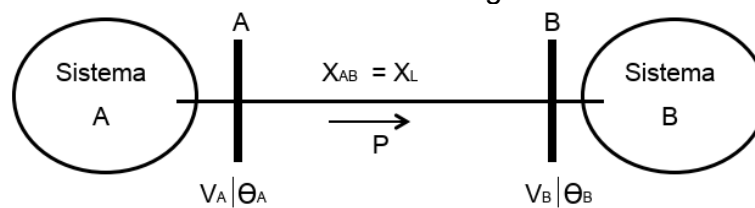
Como observado anteriormente, um dos artifícios para reduzir os impactos causados pela alta indutância é a compensação série de linhas de transmissão através de bancos de capacitores em série, causando assim a diminuição da reatância série da linha de transmissão. A utilização dos capacitores em série com as linhas de transmissão proporciona:

- Aumento da capacidade de transmissão de potência da linha;
- Afastamento do sistema do limite de estabilidade dinâmica, cujo ângulo máximo permitido entre as barras do sistema seria de  $90^\circ$ ;
- Diminuição dos equipamentos de controle da tensão, pois proporciona menor queda de tensão ao longo da linha.

A melhor utilização de uma linha de transmissão, em termos econômicos, se dá com carregamento alto. Nessa condição, sua característica indutiva é predominante, bem como maiores diferenças nas tensões de suas barras terminais, em módulo e ângulo. A compensação série capacitiva permite a redução dessas diferenças e a utilização da linha de transmissão de uma maneira mais eficiente.

Uma maneira matemática para analisar os feitos da compensação série de linhas de transmissão pode ser feita utilizando o sistema simplificado da Figura 4. Nele, observam-se as tensões terminais, a máxima potência transmitida e a reatância da linha de transmissão que liga o Sistema A no Sistema B (FRONTIN, 2013).

Figura 4 - Linha de Transmissão interligando os sistemas A e B



Fonte: Frontin, 2013.

Pode-se dizer que a potência que pode ser transmitida do sistema A para o sistema B é fornecida pela equação (1):

$$P = \frac{V_A \times V_B}{X_{AB}} \text{sen}(\alpha) \quad (1)$$

onde:

$P$ : Potência que pode ser transmitida do sistema A para o sistema B.

$V_A$ : Módulo da tensão na barra A.

$V_B$ : Módulo da tensão na barra B.

$X_{AB}$ : Reatância série da linha de transmissão.

$\alpha$ : Diferença entre os ângulos das barras A e B ( $\alpha = \theta_A - \theta_B$ ).

Ao analisar a equação (1), pode-se chegar as seguintes considerações:

- A elevação das tensões nas barras dos sistemas A e B ( $V_A$  e  $V_B$ ) proporcionam um aumento da capacidade de transmissão de potência da linha de transmissão;
- O aumento da diferença entre os ângulos de barra ( $\alpha$ ) até  $90^\circ$  proporciona um aumento na capacidade de transmissão de potência ainda mais significativo entre os sistemas A e B. Porém, quando surge um defeito no sistema, para uma mesma potência transmitida, quanto menor o valor do ângulo de transmissão, maior será a margem de estabilidade dinâmica do sistema para o período “pós-defeito”;
- A redução da reatância série da linha de transmissão também proporciona um aumento da capacidade de transmissão de potência dela. Um dos artifícios utilizados para alterar esse parâmetro da linha de transmissão é inserir bancos de capacitores em série com a linha de transmissão. A reatância negativa do capacitor conectado em série permite uma redução significativa na reatância entre os sistemas A e B. Há casos onde a compensação chega a 90%, reduzindo a reatância da

linha de transmissão ( $X_{AB}$ ) a 10% da reatância indutiva da linha ( $X_L$ ), causando um expressivo aumento da capacidade de transmissão de potência da linha de transmissão entre os sistemas, possibilitando também a redução do ângulo entre barras,  $\alpha$ , o que possivelmente melhora também a estabilidade dinâmica do sistema.

Bancos de capacitores com diferentes valores de capacitâncias e potências reativas podem ser conectados em série com uma linha de transmissão. Para escolher um valor que atenda aos objetivos da compensação série, necessita-se saber qual o grau de compensação desejado, ou seja, qual a parcela da indutância total da linha de transmissão que será compensada. Esse valor depende muito da condição em que se encontra a linha de transmissão, como a extensão, geração e carga alimentadas pela linha.

O cálculo do valor da capacitância para realizar a compensação através da conexão de um FSC é simples. O primeiro passo é calcular o valor da reatância capacitiva do banco de capacitores, que depende do grau de compensação da linha de transmissão, conforme mostra a equação (2):

$$X_C = GC \cdot X_L \quad (2)$$

onde:

$X_C$ : Reatância capacitiva do banco de capacitores a ser conectado em série com a linha de transmissão.

$GC$ : Grau de Compensação desejado da linha de transmissão.

$X_L$ : Reatância indutiva da linha de transmissão antes da compensação série.

Após obter-se o valor da reatância capacitiva do banco de capacitores ( $X_C$ ) a ser conectado em série com a linha de transmissão, é possível encontrar qual o valor da capacitância total do banco de capacitores. A equação (3) mostra como é calculada a reatância capacitiva conhecendo-se o valor da capacitância dos capacitores.

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} \quad (3)$$

Escrevendo a equação de uma maneira que a capacitância ( $C$ ) fique isolada, têm-se:

$$C = \frac{1}{2\pi f X_C} \quad (4)$$

onde:

$C$ : Capacitância do banco de capacitores a ser conectado em série com a linha de transmissão.

$X_C$ : Reatância capacitiva do banco de capacitores a ser conectado em série com a linha de transmissão.

$f$ : Frequência do sistema.

Sendo assim, é possível calcular o valor da capacitância do banco de capacitores que a ser conectado em série com a linha de transmissão para haver uma compensação da reatância indutiva da linha de transmissão conforme o grau de compensação escolhido.

O sistema elétrico de potência é uma das ferramentas para converter diversos tipos de energia (térmica, nuclear, hidráulica etc.) em energia elétrica e transmiti-la até as cargas consumidoras. Costuma ser dividido em três frentes principais: As centrais geradoras, as linhas de transmissão e os sistemas de distribuição. Como informado anteriormente, as linhas de transmissão constituem o elo entre as centrais geradoras e os sistemas de distribuição, conduzindo também a outros sistemas de potência através de diversas interconexões. Já os sistemas de distribuição têm a função de ligar todas as cargas individuais as linhas de transmissão, através das subestações transformadoras e de chaveamento.

Para uma análise do comportamento e expansão de um sistema de potência, costuma-se realizar o estudo de carga, que consiste em determinar a tensão, corrente, potência e fator de potência, ou potência reativa, nos diversos pontos de uma rede elétrica em condições reais ou ideais em uma operação normal. Realizar esse estudo

é fundamental para planejar a expansão do sistema, uma vez que, com os resultados do estudo de carga, é possível compreender os efeitos da interligação do sistema em questão com outros sistemas, com novas cargas, novas centrais geradoras e novas linhas de transmissão antes mesmo que elas sejam instaladas, possibilitando assim que o sistema elétrico de potência seja expandido de maneira eficaz.

Antes do surgimento de computadores de grande porte, realizar um estudo de carga de um sistema de potência era uma tarefa muito cansativa e complexa, pois se utilizavam analisadores de rede de corrente alternada, que representavam uma réplica monofásica e em escala reduzida do sistema real. Atualmente, é possível obter as soluções através de computadores, até mesmo para grandes sistemas de potência com mais de 1500 barras, 2500 linhas de transmissão, entre outros. Essas soluções são dadas de forma rápida, permitindo assim a análise de diversos cenários em um curto período.

Além do estudo de carga (fluxo de potência), torna-se importante a análise da estabilidade do sistema de potência. A corrente que circula em um gerador CA depende do módulo de sua tensão interna gerada, da fase dessa mesma tensão em relação à fase de cada uma das outras máquinas do sistema e ainda das características da rede e da carga. A posição relativa dos rotores das máquinas é o que dita como serão as fases das tensões internas. Se o sincronismo entre os geradores de um sistema não for mantido, as fases de suas tensões internas variarão constantemente em relação as outras, sendo impossível uma operação satisfatória do sistema.

As fases das tensões das máquinas síncronas permanecem constantes apenas quando as velocidades das várias máquinas do sistema de potência forem constantes e iguais à velocidade correspondente a frequência do fasor de referência (velocidade síncrona). Quando há uma variação da carga de um gerador, conseqüentemente ocorrem variações momentâneas na velocidade das máquinas, obtendo assim o ajuste das fases das tensões. Após o ajuste aos novos valores de fase, ou o desaparecimento da perturbação causadora da variação momentânea da velocidade, as máquinas deverão funcionar novamente na velocidade síncrona.

Se qualquer máquina do sistema de potência ficar fora do sincronismo das demais, ocorrerá a circulação de correntes elevadas. Isso certamente causará a atuação de relés e disjuntores, isolando a máquina em questão do sistema. Sendo

assim, o problema de estabilidade consiste em manter os geradores do sistema funcionando em modo síncrono.

Existe um limite definido para a potência que um gerador CA consegue fornecer ao sistema de potência. A instabilidade surge quando se procura aumentar a energia mecânica fornecida ao gerador acima desse limite definido, conhecido como *limite de estabilidade*.

O objetivo de todo estudo de estabilidade é determinar se os rotores das máquinas, ao serem perturbados, retornarão ou não à operação com velocidade constante (STEVENSON, Vol.2, 1986).

A realização desses estudos possibilita verificar se os objetivos da inserção dos FSCs em série com linhas de transmissão serão atendidos, antes mesmo da realização do projeto.

## 2. Características, peculiaridades e funcionamento de um FSC

Banco de capacitores série são dispositivos FACTS utilizados em linhas de transmissão com diversos objetivos. A modificação elétrica dos parâmetros das linhas de transmissão proporciona um incremento na capacidade da transmissão de potência, assim como uma maior estabilidade dinâmica do sistema elétrico. A metodologia utilizada é o cancelamento matemático de parte da indutância presente na linha de transmissão, causada pelos longos caminhos percorridos pelos cabos condutores. Esse “encurtamento de linha de transmissão” é basicamente um artifício matemático com o intuito de diminuir a distância (não fisicamente, mas eletricamente) entre geração e carga.

Como equipamento elétrico, o banco de capacitores série apresenta a peculiaridade de ser, na realidade, um sistema composto por diversos outros equipamentos, com a função exclusiva de proteger as unidades capacitivas contra sobretensões.

A necessidade dessa proteção é ditada por razões de economia no projeto das unidades capacitivas e nos equipamentos do sistema elétrico em geral, uma vez que a reatância negativa do capacitor pode causar o aparecimento de correntes de curto-circuito muitíssimo elevadas, superiores aos padrões encontrados no sistema elétrico brasileiro, e em consequência, sobretensões através dos capacitores que levariam a necessidades de isolamento inviáveis (FRONTIN, 2013).

Simplificando uma linha de transmissão em um circuito simples com elementos passivos (capacitância, indutância e resistência) e aplicando a 1.<sup>a</sup> Lei de Ohm, equação (5), visando analisar o impacto da compensação obtida através da conexão dos capacitores em série com a linha de transmissão, tem-se:

$$v(t) = i(t) \times [R + j(X_L - X_C)] \quad (5)$$

onde:

$v(t)$ : Tensão do sistema.

$i(t)$ : Corrente do sistema.

$R$ : Resistência da linha de transmissão.

$X_L$ : Reatância indutiva da linha de transmissão.

$X_C$ : Reatância capacitiva do banco de capacitores.

Portando, ao inserir um banco de capacitores em série com uma linha de transmissão, diminui-se a parcela imaginária da impedância de transferência entre as duas barras, representada na equação (5) por  $j(X_L - X_C)$ . Em caso de falta, a corrente de curto-circuito será muito mais elevada do que a observada antes da compensação série, já que a impedância do sistema linha de transmissão e banco de capacitores é inferior a impedância antes da compensação série, visto que inseriu-se no sistema uma parcela de reatância capacitiva.

Sendo assim, o aumento da corrente do sistema causará uma sobretensão nos capacitores, pois a tensão em um capacitor é calculada através da integral da corrente que passa pelo capacitor no tempo, conforme mostra a equação (6):

$$v_C(t) = \frac{1}{C} \int i_C(t) dt \quad (6)$$

onde:

$v_C(t)$ : Tensão no banco de capacitores.

$C$ : Capacitância do banco de capacitores.

$i_C(t)$ : Corrente que passa pelo banco de capacitores.

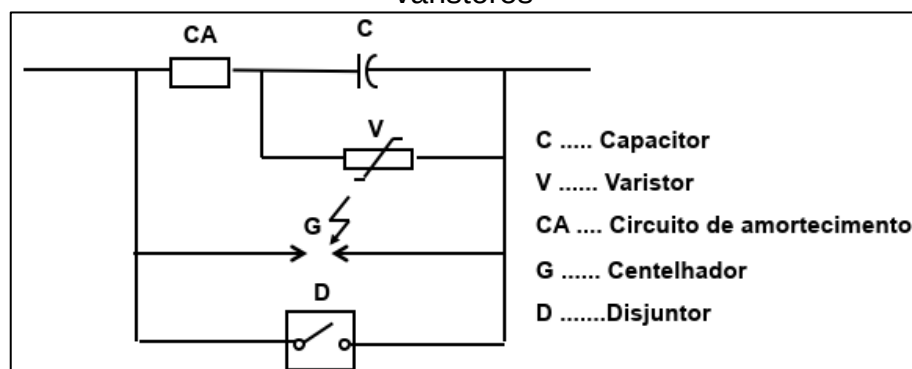
O sistema de proteção dos capacitores pode ser projetado diferentemente em função das necessidades do sistema elétrico. Trata-se de equipamentos de aplicação restrita, isto é, não obrigatórios no sistema, como disjuntores, chaves, transformadores de corrente etc.

## 2.1. Esquema elétrico e funcionamento de um FSC

Os capacitores série são produzidos por um número pequeno de fabricantes e apresentam significativas diferenças em concepção de projeto. Em decorrência, não há um consenso quanto à padronização de bancos de capacitores, sendo as normas existentes não abrangentes quanto à instalação completa dos capacitores e equipamentos associados à sua proteção (FROTIN, 2013).

Para ilustrar o princípio de funcionamento de um banco de capacitores conectados em série com uma linha de transmissão (FSC), assim como os equipamentos de proteção das unidades capacitivas, apresenta-se na Figura 5 um esquema muito utilizado na implementação desse dispositivo FACTS.

Figura 5 - Esquema de banco de Capacitores série, protegidos por meio de varistores



Fonte: Frontin, 2013.

Os MOVs (*Metal Oxide Varistor*), representados na Figura 5 pela letra “V”, são resistores não lineares, funcionando praticamente como um circuito aberto até atingir a tensão de condução, por causa da alta não linearidade.

O varistor deve ser dimensionado para dissipar toda a energia durante uma falta externa (faltas que ocorrem externamente à parcela de linha onde se encontra o banco de capacitores série, sem perda de vida útil, pois o *by-pass* (fechamento do disjuntor representado na Figura 5 pela letra “D”) não é permitido nessa situação. Após a ocorrência de uma falta externa, o sistema de proteção atuará da seguinte maneira:

- Com a sobretensão através do capacitor igual ou superior ao nível de disparo, os varistores passam a conduzir, desviando a maioria da corrente do banco de capacitores.
- Após a eliminação do defeito, o varistor para de conduzir e restabelece o capacitor para operação.

Já durante uma falta interna (falta aplicada no interior da parcela da linha onde se encontra o banco de capacitores série), o *by-pass* do equipamento é permitido. Nesse caso, o funcionamento do esquema, para faltas internas, será:

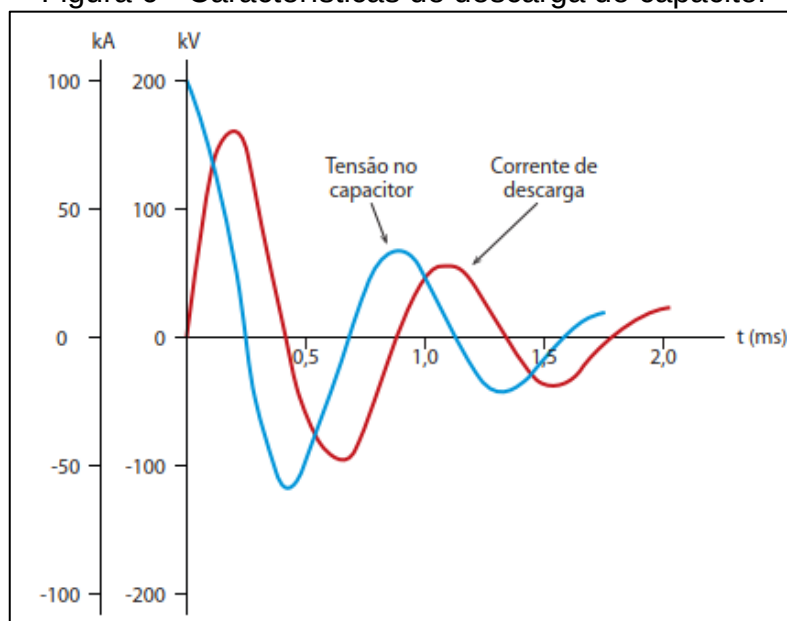
- O centelhador, representado na Figura 5 pela letra “G” é disparado quando a proteção dos varistores detecta sobrecarga (após a condução dos varistores, o transformador de corrente presente no barramento deles detecta a sobretensão, disparando assim o centelhador). O disparo do centelhador ocorre em até um 1ms depois que a proteção do MOV detecta uma sobrecarga.

- O disjuntor é fechado (o fechamento do disjuntor leva entre 30 e 40ms) para proteger o centelhador, desviando a corrente que passa pelo banco de capacitores (*bypass*), protegendo assim o centelhador de possíveis danos devido ao aquecimento dos eletrodos por conta de uma condução prolongada. Após a eliminação da falta e religamento com sucesso dos disjuntores da linha de transmissão, o disjuntor de *bypass* é aberto, concretizando assim a reinserção do banco de capacitores série no sistema elétrico.

O circuito de amortecimento, representado na Figura 5 pelas letras “CA” é conectado em série com os capacitores e através dele circula a corrente da linha de transmissão. O amortecimento desejado é obtido através de um resistor conectado em paralelo com um reator. Para evitar que a corrente de regime permanente circule através do reator, o que elevaria as perdas do conjunto, um centelhador auxiliar é conectado em série com o resistor, cujo disparo ocorre quando tensões associadas aos requisitos de sobrecarga dos capacitores surgem nos seus terminais. Dessa forma, o resistor é inserido apenas durante a operação de descarga.

O circuito de amortecimento visa limitar e amortecer o decaimento da corrente de descarga do capacitor, evitando assim a queima dos fusíveis das unidades capacitivas. Em outras palavras, o amortecimento ocorre em um tempo entre 1 e 2 ms. Usualmente, exige-se que o amortecimento seja, tal que, a corrente do segundo meio ciclo seja inferior a 50% do pico do primeiro ciclo. Na Figura 6 pode-se observar o comportamento da tensão no capacitor e da corrente de descarga, representando assim o propósito da utilização do circuito de amortecimento em FSCs.

Figura 6 - Características de descarga do capacitor



Fonte: Frontin, 2013.

Quase todos os equipamentos de um banco de capacitores ligados em série com linhas de transmissão são montados sobre plataformas isoladas, geralmente uma única plataforma para cada fase, conforme mostrado pela Figura 7.

Figura 7 - Plataforma para suporte dos equipamentos de uma fase de um FSC

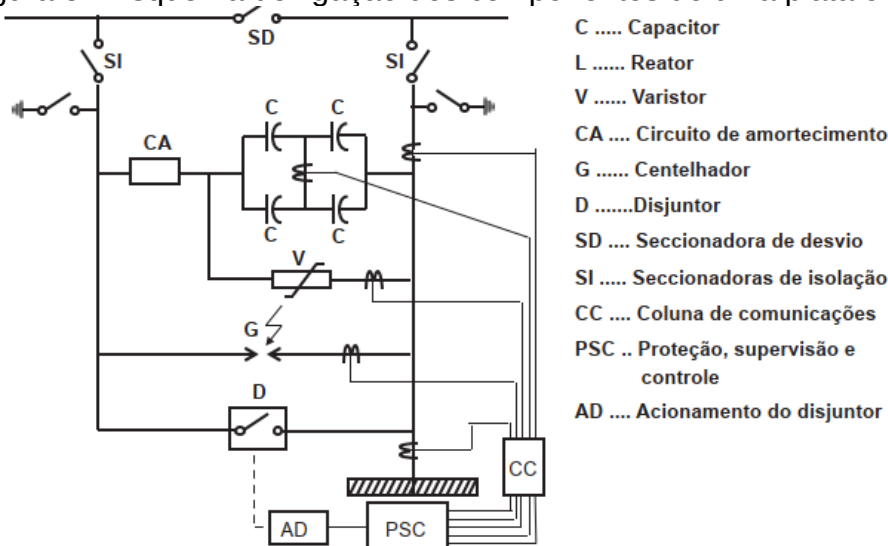


Fonte: Siemens Energy, 2020.

Um esquema equivalente seria o da Figura 8, onde são mostrados os componentes básicos de um FSC. Dos equipamentos representados na Figura 8, somente o disjuntor, os seccionadores, a coluna de comunicações e os sistemas de proteção não são sustentados pela plataforma. O restante dos equipamentos está por volta de 4 a 5 metros de altura, isolados do solo.

Visto que o banco de capacitores é instalado em série com a linha de transmissão, o FSC possui uma plataforma totalmente isolada do solo, porém tal plataforma está no mesmo potencial da linha de transmissão. Isso reduz os requisitos dielétricos dos equipamentos, já que o nível de isolamento entre os equipamentos e a plataforma é consideravelmente inferior ao nível de isolamento entre a plataforma e o solo, diminuindo consideravelmente os custos de projeto.

Figura 8 - Esquema de ligação dos componentes de uma plataforma



Fonte: Frontin, 2013.

### 2.1.1. Unidades capacitivas

O banco de capacitores, representados na Figura 8 pela letra “C” é constituído por um conjunto de unidades capacitivas, popularmente conhecidas como latas de capacitores. Por meio da associação série e paralelo, é possível obter a potência reativa e reatância desejadas. Esses valores, assim como a tensão de cada unidade, são definidos pelo fabricante, em função das características do sistema onde o banco de capacitores será instalado.

As latas são autoprotegidas para falhas internas. Pode-se utilizar fusíveis internos, onde cada elemento capacitivo possui seu próprio fusível, instalado internamente, ou fusíveis externos. A Figura 9 mostra as latas de capacitores comumente utilizadas em bancos de capacitores série.

Figura 9 - Unidades capacitivas de um banco de capacitores



Fonte: Siemens, 2020.

No centro do arranjo das latas de capacitores, são realizadas ligações para medições de correntes de desbalanço entre os ramos, decorrentes de falha em alguma unidade. Essas correntes são verificadas por transformadores de corrente e monitoradas pelo sistema de proteção e controle do FSC.

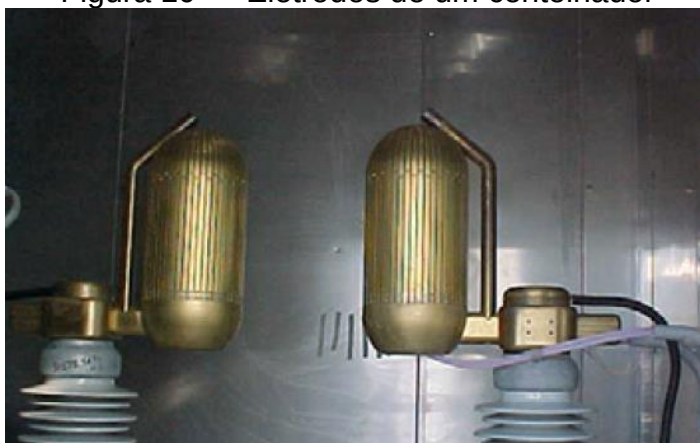
### **2.1.2. Centelhadores**

Antes da evolução tecnológica do banco de varistores, o principal equipamento de proteção dos capacitores eram os centelhadores. Hoje em dia, o principal equipamento utilizado para a proteção do banco de capacitores contra sobretensão é o banco de varistores. Porém, o centelhador, representado na Figura 8 pela letra “G”, possui uma função importantíssima, sendo a de proteger os varistores contra sobrecargas.

O disparo desse equipamento é controlado pela proteção de sobrecargas nos varistores. Após o arco elétrico ser estabelecido no centelhador, o disjuntor é acionado para desviar a corrente e extinguir esse arco. Os centelhadores são, em geral, cubículos espaçosos ventilados a ar, conforme observado na Figura 7, ao lado do reator de amortecimento (cubículo à esquerda do reator de amortecimento).

A Figura 10 mostra os eletrodos de um centelhador, onde ocorre a formação do arco elétrico. O disparo desse equipamento é feito por injeção de plasma, comandado pela proteção contra sobrecarga do banco de varistores.

Figura 10 — Eletrodos de um centelhador



Fonte: Frontin, 2013.

### 2.1.3. Varistores

Os varistores, representados na Figura 8 pela letra “V”, possuem a mesma característica dos para-raios das subestações. São resistores não lineares feitos de óxido metálico. Como a capacidade de dissipação de energia do banco de varistores é muito elevada (alcançando algumas dezenas de mega joules), o arranjo do banco de varistores possui vários módulos em série, conforme mostrado na Figura 11.

Figura 11 — Banco de varistores de um FSC



Fonte: INMR, 2021.

#### 2.1.4. Disjuntor

O disjuntor de um FSC, representado na Figura 8 pela letra “D”, possui funções diferentes dos disjuntores de subestações. Enquanto o disjuntor de linha necessita de uma alta capacidade de abertura, o disjuntor de um banco de capacitores solicita uma alta capacidade de fechamento.

O disjuntor é acionado à operação de fechamento sob duas condições:

- a) Extinguir o arco elétrico do centelhador, curto-circuitando o mesmo.
- b) Retirar o banco de capacitores de operação, em condições normais, para algum tipo de manutenção programada.

Como a tensão do banco de capacitores é normalmente bem inferior à tensão do sistema, pode-se utilizar, por exemplo, um disjuntor de 145kV em um FSC instalado em um sistema de 500kV.

Geralmente o disjuntor não fica sobre a plataforma, como os demais equipamentos de um banco série. Na Figura 12, pode-se observar o disjuntor de um FSC.

Figura 12 — Banco de capacitores com disjuntores à frente



Fonte: IndiaMART, 2021.

### 2.1.5. Circuito de amortecimento

Os efeitos de descarga de um banco de capacitores, após a condução dos varistores, disparo do centelhador e fechamento do disjuntor, devem ser rapidamente reduzidos, de modo a garantir que os equipamentos não sejam danificados.

Para tal função, utiliza-se um reator de núcleo de ar, conforme mostra a Figura 13 em paralelo com um resistor. Esse conjunto é comumente chamado de circuito de amortecimento, representado na Figura 8 pelas letras “CA”. Pode-se utilizar um centelhador em série com o resistor, fazendo com que o resistor esteja presente somente durante o período de descarga do banco de capacitores, eliminando assim perdas em caso de operação com o capacitor curto-circuitado.

Figura 13 — Reator de núcleo de ar similar ao de um FSC



Fonte: Siemens Energy, 2021.

#### **2.1.6. Plataforma**

As plataformas são feitas de aço galvanizado, em sua maioria. Sua função é suportar os equipamentos de um FSC, permitindo que haja espaço para trânsito de pessoas para manutenção. Como a plataforma está isolada do solo, seu acesso é feito por meio de uma escada metálica móvel, com articulação no solo. Além disso, a plataforma possui pontos de aterramento, proporcionando a segurança dos operadores durante a manutenção dos equipamentos.

Na Figura 7 é possível ver toda a estrutura da plataforma, assim como os equipamentos suportados pela mesma e a escada para acesso durante manutenções programadas.

### 2.1.7. Comunicação plataforma-solo

A comunicação dos equipamentos instalados na plataforma com o sistema de proteção e controle do FSC, presente na casa de comando (solo), é feito por meio de sinais óticos. Os sinais elétricos dos secundários dos transformadores de corrente são convertidos para sinais óticos e transmitidos por fibras óticas, que passam no interior de colunas de sinais, representadas na Figura 8 pelas letras “CC”, até chegar ao solo.

Na Figura 14, é possível observar dois tipos de transformadores de correntes (TCs) instalados no equipamento. A Figura 14 (a) mostra o equipamento para medição da corrente de desbalanço do banco de capacitores. Já a Figura 14 (b) mostra dois TCs utilizados para medições de correntes em um dos barramentos do FSC.

Figura 14 — Transformadores de corrente utilizados na plataforma de um FSC



(a) **Medição da corrente de desbalanço**



(b) **Medição da corrente nos barramentos**

Fonte: Frontin, 2013.

Na Figura 15, pode-se observar as colunas de sinais. As fibras óticas passam no interior das colunas, realizando a comunicação dos equipamentos com o sistema de proteção e controle do FSC.

Figura 15 — Colunas de sinais de um FSC



Fonte: Frontin, 2013.

#### **2.1.8. Proteção dos componentes**

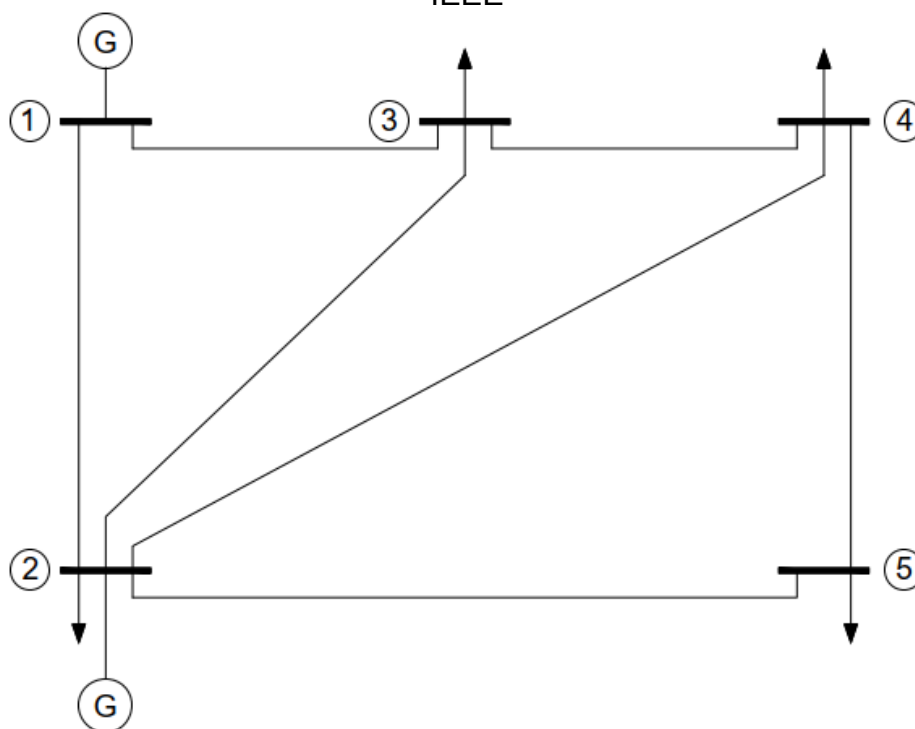
Os requisitos do sistema e do banco de capacitores são fundamentais para definir quais proteções serão necessárias para o equipamento. Porém, algumas proteções sempre são necessárias. São elas: proteção dos varistores, do centelhador, desbalanço entre capacitores e descarga para plataforma.

A atuação da proteção pode provocar o fechamento do disjuntor, desviado a corrente do FSC, temporária ou permanentemente, ou apenas alarmar, ou até mesmo desligar a linha de transmissão. O acionamento desse sistema depende da gravidade do defeito e da filosofia de proteção do sistema.

### 3. Sistema de potência IEEE-5-bus e os efeitos da compensação série de FSCs

Conforme mencionado anteriormente, para cumprir o objetivo de estudar o comportamento das cargas e da estabilidade de um sistema de potência, utiliza-se o sistema de potência fornecido pelo Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE). O sistema, no caso, é o IEEE-5-*bus system*, que consiste em um arranjo com 5 barras e uma série de linhas de transmissão que realizam as conexões entre elas. A Figura 16 mostra o diagrama unifilar simplificado do sistema de potência em questão.

Figura 16 — Diagrama unifilar simplificado do sistema de potência com 5 barras IEEE



Fonte: Adaptado de IOP Conference Series.

Nesse sistema, observam-se às cinco barras, numeradas de 1 a 5. Além disso, o sistema possui dois geradores, conectados as barras 1 e 2 e quatro cargas, conectadas as barras 2, 3, 4 e 5. Para realizar o transporte da energia entre as barras do sistema, utilizam-se sete linhas de transmissão.

Na Tabela 1 observam-se os dados das barras do sistema de potência IEEE-5-bus System, onde estão descritas as tensões, em p.u., que devem ser obedecidas em cada barra, assim como as potências ativas, em MW, e reativas, em Mvar, de geração e carga conectadas nas respectivas barras.

Tabela 1 - Dados das barras do sistema de potência IEEE-5-bus System

| N° da Barra | Tensão (p.u.) | Geração |      | Carga |      |
|-------------|---------------|---------|------|-------|------|
|             |               | MW      | Mvar | MW    | Mvar |
| 1           | 1,06 + j 0,00 | 0       | 0    | 0     | 0    |
| 2           | 1,00 + j 0,00 | 40      | 30   | 20    | 10   |
| 3           | 1,00 + j 0,00 | 0       | 0    | 45    | 15   |
| 4           | 1,00 + j 0,00 | 0       | 0    | 40    | 5    |
| 5           | 1,00 + j 0,00 | 0       | 0    | 60    | 10   |

Fonte: Adaptado de IOP Conference Series.

Já na Tabela 2 notam-se os dados das linhas de transmissão que compõe o sistema de potência IEEE-5-bus System. São fornecidos os valores, em p.u. (por unidade) de impedância (resistência e reatância indutiva, respectivamente), assim como a susceptância capacitiva das linhas de transmissão.

Tabela 2 - Dados das linhas de transmissão do sistema de potência IEEE-5-bus System

| LT entre as barras | Impedância da LT |          | Susceptância capacitiva da LT<br>B (p.u.) |
|--------------------|------------------|----------|-------------------------------------------|
|                    | R (p.u.)         | X (p.u.) |                                           |
| 1 - 2              | 0,02             | 0,06     | 0,03                                      |
| 1 - 3              | 0,08             | 0,24     | 0,025                                     |
| 2 - 3              | 0,06             | 0,18     | 0,02                                      |
| 2 - 4              | 0,06             | 0,18     | 0,02                                      |
| 2 - 5              | 0,04             | 0,12     | 0,015                                     |
| 3 - 4              | 0,01             | 0,03     | 0,01                                      |
| 4 - 5              | 0,08             | 0,24     | 0,025                                     |

Fonte: Adaptado de IOP Conference Series.

Costuma-se representar o efeito capacitivo das linhas de transmissão como susceptância capacitiva, conforme mostrado acima. A susceptância capacitiva é

fornecida pela equação (7) e sua unidade de medida é o siemens (S). Como se observa abaixo, a susceptância capacitiva é o inverso da reatância capacitiva.

$$B = \frac{1}{X_c} = \omega \cdot C \quad (7)$$

A compensação série de linhas de transmissão através de capacitores é recomendada, e viável economicamente, em linhas de transmissão longas, acima de 250 km de extensão.

Sabe-se que o sistema de potência IEEE-5-bus System apresenta linhas de transmissão classificadas como curtas e médias, onde não se recomenda a instalação de FSCs, uma vez que o problema da elevada indutância devido à longa extensão das linhas não ocorre. Porém, após uma busca em variadas literaturas, não foi encontrado nenhum sistema de potência onde se recomenda a utilização de FSCs.

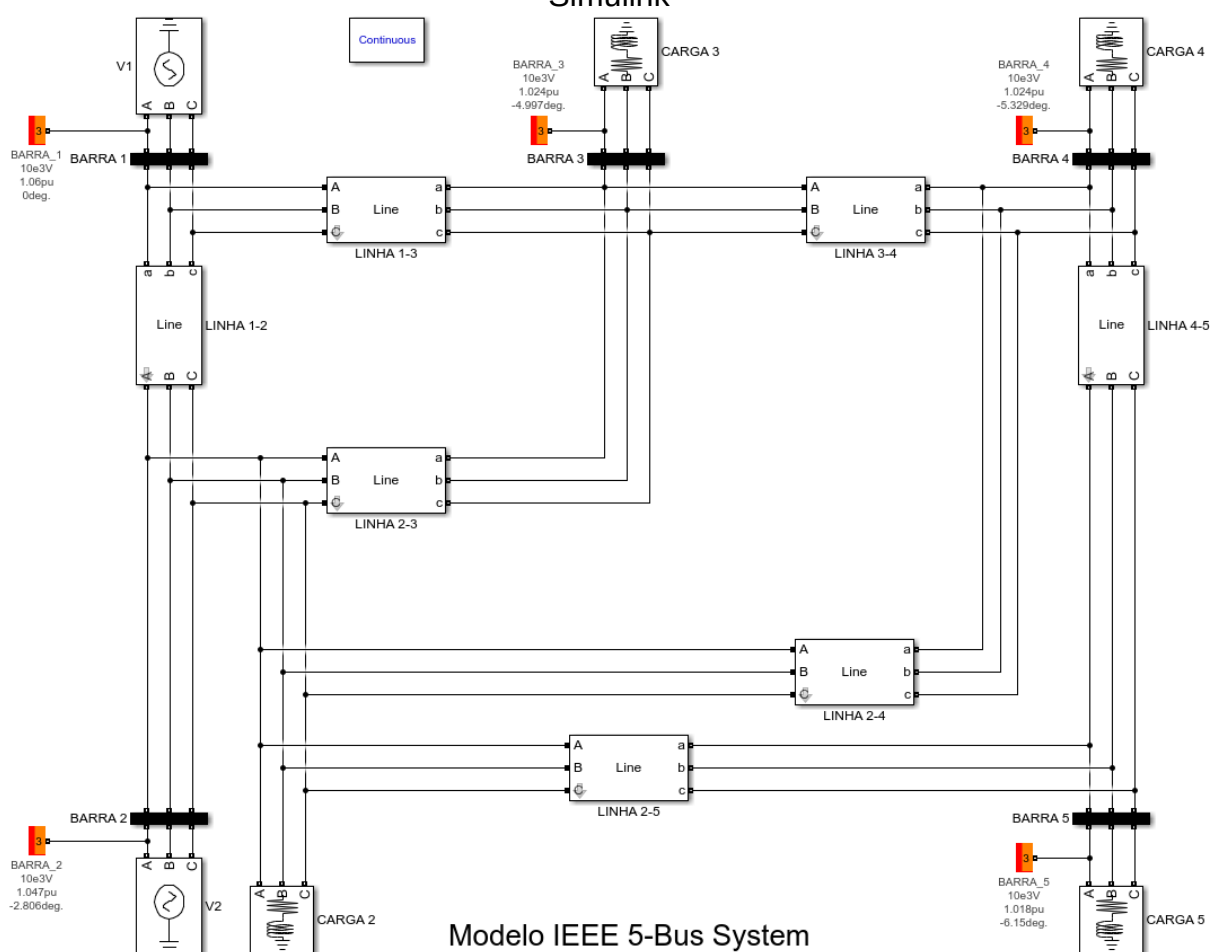
Contudo, para fins de estudo, entende-se que é possível a utilização desse sistema com o intuito de verificar se os objetivos pelos quais se realiza a conexão de um FSC em uma linha de transmissão são atingidos. Sendo assim, utilizou-se o IEEE-5-bus System como modelo para realizar simulações na ferramenta Simulink do software MatLab, uma vez que esse trabalho tem o objetivo de validar se as características da compensação de linhas de transmissão através de bancos de capacitores conectados em série foram atingidas. Portanto, entende-se que para cumprir o objetivo do trabalho, o sistema de potência em questão pode ser utilizado, mesmo não sendo recomendada a instalação FSCs em série com as linhas de transmissão.

### **3.1. Modelo IEEE-5-bus System na ferramenta Simulink**

A Figura 17 mostra o modelo utilizado para realizar a simulação através da ferramenta Simulink, do software MatLab. Esse modelo foi obtido diretamente da comunidade oficial do software MatLab, a MathWorks. Ele foi desenvolvido e gentilmente disponibilizado para download e estudos pelo pesquisador Rodney Tan.

Nesse modelo, observam-se os geradores, barras, linhas de transmissão e as cargas do IEEE-5-bus System, representando fielmente o diagrama unifilar apresentado pela Figura 16.

Figura 17 — Modelo do sistema de potência IEEE-5-bus System na ferramenta Simulink



Fonte: MathWorks

As simulações realizadas têm a função de estudar como será o regime permanente do sistema, mostrando as tensões e ângulos das cinco barras do sistema de potência. Os valores encontrados foram obtidos conforme as condições iniciais do sistema, conforme apresentado na Tabela 1.

### 3.2. Simulação sem a presença dos FSCs

Após inserir os parâmetros de geração e carga, apresentados na Tabela 1, e das linhas de transmissão, mostrados na Tabela 2, realizou-se a simulação desse sistema, inicialmente sem os FSCs, obtendo assim os valores de tensão e ângulo das barras, conforme mostra a Tabela 3. Para mais detalhes sobre os resultados da simulação, conferir o APÊNDICE A.

Tabela 3 - Valores de tensão e ângulo das barras no estudo sem o FSC conectado as linhas de transmissão

| Barra N° | Geração |       | Carga |       | Tensão da Barra |            |
|----------|---------|-------|-------|-------|-----------------|------------|
|          | MW      | Mvar  | MW    | Mvar  | Tensão (p.u.)   | Ângulo (°) |
| 1        | 129,59  | -7,42 | 0,00  | 0,00  | 1,0600          | 0,00       |
| 2        | 40,00   | 30,00 | 20,00 | 10,00 | 1,0474          | -2,81      |
| 3        | 0,00    | 0,00  | 45,00 | 15,00 | 1,0242          | -5,00      |
| 4        | 0,00    | 0,00  | 40,00 | 5,00  | 1,0236          | -5,33      |
| 5        | 0,00    | 0,00  | 60,00 | 10,00 | 1,0179          | -6,15      |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Fazendo uma análise da linha de transmissão entre as barras 1 e 3, pode-se concluir que o circuito é similar ao mostrado pela Figura 4, onde o Sistema 1 representa tudo que está conectado à barra 1, assim como o Sistema 2 em relação à barra 2. Portanto, pode-se verificar qual a capacidade de transmissão de potência da linha de transmissão entre as barras 1 e 3 através da equação (1):

$$P_{13} = \frac{V_1 \times V_3}{X_{13}} \text{sen}(\alpha_{13}) = \frac{1,0600 \times 1,0242}{0,24} \text{sen}(0 + 5,00^\circ) \quad (8)$$

$$P_{13} = 0,3942 \text{ p.u.} \quad (9)$$

Conforme realizado para a linha de transmissão entre as barras 1 e 3, faz-se o mesmo para a linha entre as barras 1 e 2:

$$P_{12} = \frac{V_1 \times V_2}{X_{12}} \text{sen}(\alpha_{12}) = \frac{1,0600 \times 1,0474}{0,06} \text{sen}(0 + 2,81^\circ) \quad (10)$$

$$P_{13} = 0,9071 \text{ p.u.} \quad (11)$$

### 3.3. Escolha das linhas de transmissão para compensação série e dimensionamento dos bancos de capacitores.

Como o objetivo da compensação série por meio de bancos de capacitores é a diminuição da distância elétrica percorrida pelas linhas de transmissão, optou-se por compensar as linhas de transmissão entre as barras 1-3 e barras 4-5, uma vez que, conforme apresentado na Tabela 2, são as linhas que possuem o maior valor de reatância indutiva ( $X_L$ ), indicando assim que são as linhas de maior comprimento presentes no IEEE-5-bus System.

Após a escolha de onde serão realizadas as compensações, é necessário saber o grau de compensação das linhas de transmissão. Escolheu-se um grau de compensação ( $GC$ ) de 50% para as linhas em questão. Com isso, é possível encontrar o valor das reatâncias capacitivas ( $X_C$ ) dos bancos de capacitores a serem instalados em série com as linhas de transmissão por meio da equação (2):

$$X_C = GC \cdot X_L = 0,5 \cdot 0,24 \quad (12)$$

$$X_C = 0,12 \text{ p.u.} \quad (13)$$

Para representar os FSCs conectados em série com as linhas de transmissão entre as barras 1-3 e as barras 4-5, basta simplesmente subtrair o valor apresentado pela equação (13) do valor das reatâncias indutivas das linhas de transmissão apresentadas pela Tabela 2 ( $X_{L(1-3)} = X_{L(4-5)} = 0,24 \text{ p.u.}$ ) obtendo assim o valor da reatância indutiva das linhas de transmissão após a compensação série de 50%, assumindo agora o valor de  $X_{L(1-3)} = X_{L(4-5)} = 0,12 \text{ p.u.}$

### 3.4. Simulação com a presença dos FSCs

Após substituir às reatâncias indutivas das linhas de transmissão entre as barras 1-3 e as barras 4-5 pela encontrada após a inserção dos FSCs ( $X_L = 0,12 \text{ p.u.}$ ), considerando um grau de compensação de 50%, realizou-se novamente a simulação. Na Tabela 4 observam-se os dados encontrados após a conexão dos bancos de capacitores em série com as linhas de transmissão. Para mais detalhes do resultado da simulação, conferir o APÊNDICE A.

Tabela 4 - Valores de tensão e ângulo das barras no estudo com os FSCs conectados as linhas de transmissão

| Barra<br>Nº | Geração |       | Carga |       | Tensão da Barra |            |
|-------------|---------|-------|-------|-------|-----------------|------------|
|             | MW      | Mvar  | MW    | Mvar  | Tensão (p.u.)   | Ângulo (°) |
| 1           | 129,98  | -9,90 | 0,00  | 0,00  | 1,0600          | 0,00       |
| 2           | 40,00   | 30,00 | 20,00 | 10,00 | 1,0472          | -2,25      |
| 3           | 0,00    | 0,00  | 45,00 | 15,00 | 1,0229          | -3,79      |
| 4           | 0,00    | 0,00  | 40,00 | 5,00  | 1,0227          | -4,31      |
| 5           | 0,00    | 0,00  | 60,00 | 10,00 | 1,0167          | -5,19      |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme analisado anteriormente, onde se verificou que há similaridade entre o sistema mostrado pela Figura 4 e o representado pelas barras 1 e 3, faz-se a mesma análise após a compensação das linhas de transmissão, onde a reatância indutiva das linhas entre as barras 1-3 e 4-5 ( $X_L$ ) foi reduzida pela metade. Sendo assim, é possível verificar qual a capacidade de transmissão de potência da linha entre as barras 1 e 3 através da equação (1):

$$P_{13} = \frac{V_1 \times V_3}{X_{13}} \text{sen}(\alpha_{13}) = \frac{1,0600 \times 1,0229}{0,12} \text{sen}(0 + 3,79^\circ) \quad (14)$$

$$P_{13} = 0,5972 \text{ p.u.} \quad (15)$$

Conforme realizado para a linha de transmissão entre as barras 1 e 3, faz-se o mesmo para a linha entre as barras 1 e 2:

$$P_{12} = \frac{V_1 \times V_2}{X_{12}} \text{sen}(\alpha_{12}) = \frac{1,0600 \times 1,0472}{0,06} \text{sen}(0 + 2,25^\circ) \quad (16)$$

$$P_{12} = 0,7263 \text{ p.u.} \quad (17)$$

### 3.5. Análise do comportamento do sistema por meio das simulações antes e após a conexão dos FSCs

Analisando de maneira simples os resultados encontrados, é possível verificar qual foi o aumento da capacidade de transmissão de potência entre as barras 1-3 e 1-2 após a conexão do banco de capacitores em série com a linha de transmissão que conecta essas barras.

Inicialmente, a capacidade de transmissão de potência entre as barras 1 e 3, apresentada pela equação (9), foi  $P_{13} = 0,3942 \text{ p.u.}$  Após inserir os FSCs em série com as linhas de transmissão entre as barras 1-3 e as barras 4-5, observou-se um acréscimo na capacidade de transmissão de potência da linha de transmissão, mostrada pela equação (15), onde  $P_{13} = 0,5972 \text{ p.u.}$  Através de uma simples regra de três, observa-se que houve um acréscimo de aproximadamente 51% na capacidade de transmissão de potência entre as barras 1 e 3.

Em relação as barras 1 e 2, a capacidade de transmissão de potência antes da compensação série, apresentada pela equação (11), foi  $P_{12} = 0,9071 \text{ p.u.}$  Após inserir os FSCs em série com as linhas de transmissão entre as barras 1-3 e as barras 4-5, observou-se um decréscimo na capacidade de transmissão de potência da linha

de transmissão, mostrada pela equação (17), onde  $P_{12} = 0,7263 \text{ p.u.}$  Com isso, observa-se que houve um decréscimo de aproximadamente 25% na capacidade de transmissão de potência entre as barras 1 e 2.

Além disso, houve uma diminuição no ângulo ( $\alpha_{13}$ ) entre as barras 1 e 3. Inicialmente, encontrou-se um ângulo  $\alpha_{13} = -5,00^\circ$  Após inserir o banco de capacitores em série com as linhas de transmissão entre as barras 1-3 e 4-5, observou-se que o ângulo encontrado foi  $\alpha_{13} = -3,79^\circ$  Essa diferença representa uma diminuição no ângulo entre as barras 1 e 3 de aproximadamente 24%.

Tratando-se da linha de transmissão entre as barras 1 e 2, observou-se uma singela diminuição no ângulo ( $\alpha_{12}$ ) entre as barras 1 e 2. Inicialmente, encontrou-se um ângulo  $\alpha_{12} = -2,81^\circ$  Após inserir o banco de capacitores em série com as linhas de transmissão entre as barras 1-3 e 4-5, observou-se que o ângulo encontrado foi  $\alpha_{12} = -2,25^\circ$  Essa diferença representa uma diminuição no ângulo entre as barras 1 e 2 de aproximadamente 20%.

Tabela 5 - Comparação dos resultados obtidos nas simulações antes e após a conexão dos FSCs em série com as Linhas de Transmissão

| LTs entre<br>as barras | Capabilidade de transmissão de potência |                  |               |
|------------------------|-----------------------------------------|------------------|---------------|
|                        | Antes FSCs (p.u.)                       | Após FSCs (p.u.) | Diferença (%) |
| <b>1 - 2</b>           | 0,9071 p.u.                             | 0,7263 p.u.      | - 25%         |
| <b>1 - 3</b>           | 0,3942 p.u.                             | 0,5972 p.u.      | + 51%         |
| LTs entre<br>as barras | Ângulo entre barras                     |                  |               |
|                        | Antes FSCs ( ° )                        | Após FSCs ( ° )  | Diferença (%) |
| <b>1 - 2</b>           | -2,81°                                  | -2,25°           | - 20%         |
| <b>1 - 3</b>           | -5,00°                                  | -3,79°           | - 24%         |

Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 4. Conclusão

Espera-se que o Sistema Interligado Nacional (SIN) brasileiro se expanda coma retomada da economia no país. Aliado a isso, uma parcela do sistema de potência está passando ou passará por uma modernização. A expansão e a modernização do sistema de potência do Brasil incluem diversos quilômetros de linhas de transmissão, onde algumas delas conectam pontos geograficamente distantes uns dos outros, o que classifica essas linhas de transmissão como longas.

Atualmente, costuma-se utilizar linhas em corrente contínua para interligar dois pontos distantes, como as linhas de transmissão de 800kV que saem da usina hidrelétrica de Belo Monte. Porém, existem no Brasil linhas de transmissão em corrente alternada em operação, nas quais enfrentam problemas com a elevada indutância devido a sua extensão. Para amenizar as perdas causadas por esse fenômeno, é comum a utilização de dispositivos FACTS. Um desses dispositivos utilizados são FSCs, que consistem em bancos de capacitores conectados em série com as linhas de transmissão.

Em virtude dos resultados encontrados, observa-se que a conexão de bancos de capacitores em série com linhas de transmissão proporciona uma melhora na qualidade da energia transmitida em um sistema de potência, uma vez que há um acréscimo na capacidade de transmissão de potência de certas linhas de transmissão do sistema, além de uma possível melhora na estabilidade dinâmica, visto que se observou uma diminuição nos ângulos de barras do sistema estudado, afastando-o do limite de estabilidade dinâmica.

Dependendo dos requisitos de projeto, o grau de compensação desejado da linha pode variar. Para a compensação das linhas de transmissão no IEEE-5-bus System, optou-se por escolher um grau de compensação de 50%. Isso significa que houve uma diminuição da reatância indutiva da linha de transmissão, porém essa redução é somente algébrica, e não física. Sendo assim, o comprimento físico da linha permanece o mesmo, porém o seu “comprimento matemático” é reduzido pela metade, fazendo com que o sistema de potência “enxergue” as linhas de transmissão com metade do seu comprimento físico.

Ao realizar a compensação série das linhas de transmissão entre as barras 1-3 e 4-5 do sistema de potência IEEE-5-bus System, observou-se um acréscimo de aproximadamente 51% na capacidade de transmissão de potência da linha entre as barras 1 e 3, além de uma redução de 24% no ângulo entre essas barras.

Já a capacidade de transmissão de potência entre as barras 1 e 2 teve uma diminuição de 25%. Isso deve-se pelo fato de que, ao realizar a compensação série de uma linha de transmissão, há uma diminuição da impedância de transferência entre barras, tornando essa linha mais “atrativa” para o escoamento de potência do sistema. Porém, esse fato não indica que houve uma diminuição na capacidade de transmissão de potência do sistema, e sim mostra que ocorreu um rearranjo do fluxo de potência no sistema em questão.

Apesar do sistema de potência IEEE-5-bus System não possuir linhas de transmissão longas, onde comumente se recomenda a aplicação da compensação série através de bancos de capacitores, entende-se como satisfatório o resultado observado, uma vez que mesmo não havendo um valor de indutância elevada, já que as linhas de transmissão são classificadas como curtas e médias, observaram-se os efeitos da conexão de FSCs em série com as linhas, como o aumento da capacidade de transmissão de potência de algumas linhas de transmissão.

Relacionado a estabilidade, a discreta diminuição do ângulo entre as barras desse sistema de potência indica que possivelmente houve uma melhora da estabilidade dinâmica, uma vez que o intervalo do ângulo entre as barras com o ângulo crítico para eliminação da falta tornou-se um pouco maior, o que possivelmente garante um pequeno acréscimo no intervalo de tempo até que o defeito seja eliminado do sistema de potência.

O Software MatLab, através de sua ferramenta Simulink, possibilitou uma análise satisfatória do comportamento de um sistema de potência devido à inserção de dois FSC sem série com duas linhas de transmissão.

## 5. Bibliografia

FRONTIN, Sergio de Oliveira. **Equipamentos de alta tensão — prospecção e hierarquização de inovações tecnológicas**. 934p. Teixeira, Brasília, 2013.

MILLER, T. J. E. **Reactive Power Control in Electric Systems**. 1.<sup>a</sup> edição. 381p. Wiley-Interscience, Estados Unidos da América, 1982.

STEVENSON, William D. **Elementos de análise de sistemas de potência**. 2.<sup>a</sup> edição. 280p. McGraw-Hill, São Paulo, 1986.

PASCHOARELI JÚNIOR, Dionízio. **Controladores Eletrônicos em Sistemas Elétricos de Potência**. 30p. UNESP Ilha Solteira, 2007.

ELEKTRO, P&D ANEEL, UNESP. **D-TCSC: Compensador Série Eletronicamente Controlado para o Sistema de Distribuição da Elektro**. 277p. Elektro. 2016.

Siemens AG, **High Voltage Power Capacitors & Capacitors Bank**. 6p. Siemens Energy. Erlangen, Alemanha, 2009.

SONG, Y. H., Johnson, A., **Flexible AC Transmission Systems (FACTS)**, IEEE, 1999.

GAMA, Carlos, **BRAZILIAN NORTH-SOUTH INTERCONNECTION – CONTROL APPLICATION AND OPERATING EXPERIENCE WITH A TCSC**, IEEE, 1999.

ELGERD, O.I., **Introdução à Teoria de Sistemas de Energia Elétrica**, McGraw-Hill, 2003.

HINGORANI, NARAIN G., GYUGYI, LASZLO. **Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems**. 1.<sup>a</sup> edição. Wiley-IEEE Press, 1999.

Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2029**. 393p. MME/EPE, Brasília, 2020.

BHANDAKKAR, Anjali Atul; MATHEW Lini. **Real-Time-Simulation of IEEE-5-Bus Network on OPAL-RT-OP4510 Simulator**. IOP Conference Series: Materials, Science and Engineering, 2018.

**NEOENERGIA**, Belo Monte. **NEOENERGIA**, 2019. Disponível em: <https://www.neoenergia.com/pt-br/sobre-nos/linhas-de-negocios/renovaveis/renovaveis-hidrica/Paginas/belo-monte.aspx>. Acesso em: 29 out 2020.

**NORTE ENERGIA**. A História de Belo Monte — Cronologia. **NORTE ENERGIA**, 2019. Disponível em: <https://www.norteenergiasa.com.br/pt-br/uhe-belo-monte/historico>. Acesso em: 29 out 2020.

**ONS**. Sobre o SIN — Mapas. **ONS**, 2020. Disponível em: <http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/mapas>. Acesso em: 29 out 2020.

**Siemens Energy**. How to increase transmission system capacity and stability. **Siemens Energy**, 2020. Disponível em: <https://www.siemens-energy.com/global/en/offerings/power-transmission/system-capacity-andstability.html>. Acesso em: 12 abr. 2021.

**Siemens Energy**. Coils — Air-core dry-type reactors for system voltages up to 800 kV. **Siemens Energy**, 2020. Disponível em: <https://www.siemens-energy.com/global/en/offerings/power-transmission/portfolio/coils.html>. Acesso em: 19 abr. 2021.

**INMR**. Overvoltage Protection of Series Capacitor Banks. **INMR**, 2021. Disponível em: <https://www.inmr.com/overvoltage-protection-of-series-capacitor-banks/>. Acesso em: 19 abr. 2021.

**IndiaMART.** Fixed Series Compensation. **IndiaMART**, 2019. Disponível em: <https://www.indiamart.com/proddetail/fixed-series-compensation-1785398648.html>. Acesso em 19 abr. 2021.

**Webmap Empresa de Pesquisa Energética.** Sistema de Informações Geográficas do Setor Energético Brasileiro. **EPE**, 2022. Disponível em: <https://gisepeprd2.epe.gov.br/WebMapEPE/>. Acesso em 18 jul. 2022.

**MathWorks.** IEEE 5-bus System Simulink Model Developed by Rodney Tan. **MATLAB Central File Exchange**, 2018. Disponível em: <https://la.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/66555-ieee-5-bus-system-model>. Acesso em 25 mai. 2021.

## 6. APÊNDICE A

### 6.1. Resultados das simulações antes e após a compensação série de linhas de transmissão

#### 6.1.1. Simulação sem a compensação série das linhas de transmissão entre as barras 1-3 e as barras 4-5

| Bus ID  | Vbase (kV) | Vref (pu) | Vangle (deg) | P (MW) | Q (Mv... | Qmin (Mvar) | Qmax (Mvar) | V_LF (pu) | Vangle_LF (deg) | P_LF (MW) | Q_LF (Mvar) |
|---------|------------|-----------|--------------|--------|----------|-------------|-------------|-----------|-----------------|-----------|-------------|
| BARRA_1 | 10.00      | 1.0600    | 0.00         | 0.01   | 0.00     | 0.00        | 0.00        | 1.0600    | 0.00            | 129.59    | -7.42       |
| BARRA_2 | 10.00      | 1         | 0.00         | 20.00  | 10.00    | -Inf        | Inf         | 1.0474    | -2.81           | 20.00     | 10.00       |
| BARRA_2 | 10.00      | 1         | 0.00         | 40.00  | 30.00    | 30.00       | 30.00       | 1.0474    | -2.81           | 40.00     | 30.00       |
| BARRA_5 | 10.00      | 1         | 0.00         | 60.00  | 10.00    | -Inf        | Inf         | 1.0179    | -6.15           | 60.00     | 10.00       |
| BARRA_3 | 10.00      | 1         | 0.00         | 45.00  | 15.00    | -Inf        | Inf         | 1.0242    | -5.00           | 45.00     | 15.00       |
| BARRA_4 | 10.00      | 1         | 0.00         | 40.00  | 5.00     | -Inf        | Inf         | 1.0236    | -5.33           | 40.00     | 5.00        |

#### 6.1.2. Simulação com a compensação série das linhas de transmissão entre as barras 1-3 e as barras 4-5

| Bus ID  | Vbase (kV) | Vref (pu) | Vangle (deg) | P (MW) | Q (Mv... | Qmin (Mvar) | Qmax (Mvar) | V_LF (pu) | Vangle_LF (deg) | P_LF (MW) | Q_LF (Mvar) |
|---------|------------|-----------|--------------|--------|----------|-------------|-------------|-----------|-----------------|-----------|-------------|
| BARRA_1 | 10.00      | 1.0600    | 0.00         | 0.01   | 0.00     | 0.00        | 0.00        | 1.0600    | 0.00            | 129.98    | -9.90       |
| BARRA_2 | 10.00      | 1         | 0.00         | 20.00  | 10.00    | -Inf        | Inf         | 1.0472    | -2.25           | 20.00     | 10.00       |
| BARRA_2 | 10.00      | 1         | 0.00         | 40.00  | 30.00    | 30.00       | 30.00       | 1.0472    | -2.25           | 40.00     | 30.00       |
| BARRA_5 | 10.00      | 1         | 0.00         | 60.00  | 10.00    | -Inf        | Inf         | 1.0167    | -5.19           | 60.00     | 10.00       |
| BARRA_3 | 10.00      | 1         | 0.00         | 45.00  | 15.00    | -Inf        | Inf         | 1.0229    | -3.79           | 45.00     | 15.00       |
| BARRA_4 | 10.00      | 1         | 0.00         | 40.00  | 5.00     | -Inf        | Inf         | 1.0227    | -4.31           | 40.00     | 5.00        |