# Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

# Relatório I: Sistemas HVDC

Disciplina: Qualidade de Energia Elétrica

**Discente: Rafael Pavan** 

Docente: Prof. Dr. Helmo K. Morales Paredes

# SUMÁRIO

1.	RES	SUMO	. 3
2.	ОВ	JETIVO	. 4
3.	INT	RODUÇÃO	. 5
4.	PRI	INCIPAIS COMPONENTES DE UM SISTEMA HVDC GENÉRICO	. 7
4	l.1	Unidade Conversora	. 7
4	.2	Transformadores Conversores	. 8
4	1.3	Filtros	. 8
4	l.4	Fonte de Potência Reativa	. 9
4	l.5	Reator de Suavização CC	. 9
4	l.6	Comutador CC	. 9
5.	PRI	INCIPAIS COMPONENTES DOS SISTEMAS HVDC (BRASIL – URUGUAI E BRASII	L -
AR	GEN	TINA)	10
5	5.1	Estação HVDC Back-To-Back Garabi (Brasil – Argentina)	10
5	5.2	Estação HVDC Back-to-Back Melo (Brasil – Uruguai)	16
5	5.3	Estação HVDC Back-to-Back Rivera (Brasil – Uruguai)	18
6.	PRI	INCIPAIS COMPONENTES DOS SISTEMAS HVDC (ITAIPU, MADEIRA, BELO	
MC	NTE	BP1 E BP2)	20
6	<b>5.1</b>	Estação HVDC Itaipu	20
6	5.2	Estação HVDC Madeira	21
6	6.3	Estação HVDC Belo Monte	24
7.	AN	ÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS SISTEMAS HVDC DO BRASIL	26
8.	AN	ÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS 15 MAIORES SISTEMAS HVDC DO MUNDO	28
9.	СО	NCLUSÕES	31
10	RF	FERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS Error! Bookmark not define	h

# LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ilustração de Como o Custo Total de Soluções CA e HVDC Dependem
das Distâncias das Linhas de Transmissão6
Figura 2 – Principais Componentes de um Sistema HVDC Convencional7
Figura 3 – Principais Componentes da Estação Back-To-Back Garabi10
Figura 4 – Filtros PLC da Estação Back-To-Back Garabi11
Figura 5 – Reatores de Linha da Estação Back-To-Back Garabi11
Figura 6 – Compacto HPL da Estação Back-To-Back Garabi12
Figura 7 – Filtros AC e Reator <i>Contour</i> da Estação Back-To-Back Garabi13
Figura 8 – Transformadores Conversores da Estação Back-To-Back Garabi 13
Figura 9 – Unidades Conversoras da Estação Back-To-Back Garabi14
Figura 10 – Capacitores Comutadores da Estação Back-To-Back Garabi14
Figura 11 – Reatores Suavizadores da Estação Back-To-Back Garabi15
Figura 12 – Diagrama Unifilar da Estação Back-To-Back Garabi (Fase 1 e 2) 16
Figura 13 – Diagrama Unifilar da Estação Back-To-Back Melo16
Figura 14 – Diagrama Unifilar da Estação Back-To-Back Rivera18
Figura 15 – Diagrama Unifilar de um Bipolo da Estação HVDC de Itaipu20
Figura 16 – Diagrama Unifilar de um Bipolo da Estação HVDC Madeira -
Araraquara22
Figura 17 – Bipolos 1 e 2 de Belo Monte24
Figura 18 – 15 Maiores Sistemas HVDC do Mundo em Ordem Decrescente de
Potência
Figura 19 – 15 Maiores Sistemas HVDC do Mundo em Ordem Decrescente de Extensão30
=^tv:.vavvv

#### 1. RESUMO

O sistema HVDC é uma modalidade de transmissão de energia que utiliza alta tensão e corrente contínua. Devido a crescente industrialização das nações, a demanda por energia e maior eficiência em sua transmissão ocasionou a necessidade de inovar em relação aos sistemas de corrente alternada. Os sistemas HVDC, no geral, permitem a compatibilização entre redes de diferentes frequências, além de serem mais vantajosos em transmissões de longa distância e conferirem maior estabilidade e controle aos sistemas de energia elétrica. Sua construção usualmente envolve a utilização de filtros CA e CC para harmônicas, transformadores conversores, retificadores com válvulas constituídas de tiristores, inversores e fontes de potência reativa. Brasil, China, Índia e Estados Unidos são países destaques na utilização deste tipo de tecnologia, tendo em vista as grandes dimensões territorias que possuem.

#### 2. OBJETIVO

Este relatório tem por objetivo apresentar os principais Sistemas de Transmissão de Energia Elétrica em Alta Tensão e Corrente Contínua (HVDC) do Brasil, compreender suas funcionalidades, características e os principais componentes que os constituem. Realizar uma análise comparativa entre suas características, bem como situar um panorama geral da utilização desta tecnologia ao redor do mundo.

### 3. INTRODUÇÃO

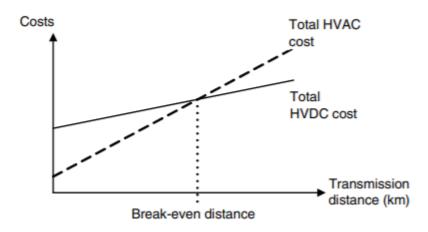
A crescente demanda energética impulsionada pelo desenvolvimento industrial das nações, aliada à localização remota das fontes de geração de energia e à interconexão destas, ocasionaram o desenvolvimento de longas redes elétricas. A necessidade de fornecer a energia a um custo viável acarretou na busca de uma maior eficiência na sua transmissão em níveis cada vez maiores de potência. Embora a energia ainda seja majoritariamente consumida e gerada em sua forma de corrente alternada, os problemas relacionados a sua transmissão em longas distâncias levaram ao desenvolvimento da transmissão por corrente contínua.

Um sistema HVDC, do inglês High Voltage Direct Current, é um tipo de subestação utilizada para a transmissão de energia elétrica em alta tensão com corrente contínua. Este tipo de transmissão é mais utilizada em aplicações subterrâneas e submarinas, interconexões entre sistemas de corrente alternada com diferentes frequências de operação, transmissões em longas distâncias, e aplicações de controle e estabilização de fluxo de potência. Suas vantagens estão relacionadas ao controle total sobre a potência transmitida, rápido controle na limitação de correntes de faltas em linhas de corrente contínua e maior capacidade de melhorar a estabilidade dos sistemas pelo desacoplamento destes e pelo controle de potência, além de permitir um chaveamento suave evitando transitórios indesejáveis. Além disso, a capacidade de transmissão de potência em linhas de corrente contínua, independe da distância de transmissão. Dentre suas desvantagens, pode-se citar: o alto custo dos equipamentos de conversão, a geração de harmônicos que exigem a utilização de filtros, a complexidade de controle, a incapacidade de utilização de transformadores para alterar os níveis de tensão e a maior dificuldade de interromper correntes contínuas, o que exige melhores e mais caros equipamentos para o seccionamento dos circuitos [1].

Analisando economicamente, a viabilidade da implementação de um sistema HVDC para transmissão de energia é uma função da distância e do custo dos elementos (Figura 1). Uma linha de corrente contínua pode carregar a mesma energia com dois condutores (com polaridades negativas e positivas em relação à referência) que uma

linha de corrente alternada de três condutores de mesmo tamanho. Isso implica na diminuição dos custos com condutores, isoladores e torres. As perdas de potência também são diminuídas para cerca de 67% em comparação com um sistema de corrente alternada, com a mesma capacidade de corrente dos condutores, além de as perdas dielétricas, por efeito pelicular e por efeito corona serem também inferiores. Segundo Padiya [1], o ponto de *break even* tende a ser entre as distâncias de 500 a 800 km, dependendo dos custos por unidade da linha.

Figura 1 – Ilustração de Como o Custo Total de Soluções CA e HVDC Dependem das Distâncias das Linhas de Transmissão



Fonte: J. Setreus e L. Bertling [2]

# 4. PRINCIPAIS COMPONENTES DE UM SISTEMA HVDC GENÉRICO

A Figura 2 ilustra o arranjo dos principais componentes de um sistema HVDC. Dentre estes, destacam-se os transformadores conversores, as unidades conversoras retificadoras, os filtros, as fontes de potência reativa, os reatores de suavização e também os comutadores CC. A seguir, será feita uma breve descrição das características e funções de cada componente.

AC Breaker

AC filters

Converter

Transformer

Transformer

DC Filter

Smoothing Reactor

DC Filter

Smoothing Reactor

Figura 2 - Principais Componentes de um Sistema HVDC Convencional

Fonte: R. B. Rajib and Md. R. Amin [3]

#### 4.1 Unidade Conversora

Este componente consiste de dois retificadores em ponte, trifásicos, conectados em série para formar um conversor de 12 pulsos. Geralmente são constituídos por dispositivos de estado sólido, como os tiristores no interior das válvulas. Cada válvula é chaveada em um segmento específico da forma de onda em corrente alternada. Elas são refrigeradas a ar, óleo, água ou freon (gás ou fluído refrigerante), podendo ser agrupadas em grupos de uma, duas ou quatro válvulas. Recebem a tensão em corrente alternada do transformador conversor e a transformam em corrente contínua. As válvulas

são operadas através do controlador do conversor, a partir de sinais gerados em potencial de terra (ground potential) e são transmitidos para cada um dos tiristores das válvulas por um sistema de fibra óptica guiado por luz, sendo o sinal de luz convertido para sinal elétrico ao chegar nos tiristores. São protegidas por circuitos *snubbers*, proteções contra disparos indevidos e supressores de surtos de tensão devido a chaveamentos da rede ou raios [1].

#### 4.2 Transformadores Conversores

Os transformadores podem ter diferentes configurações em quesitos de números de fases e enrolamentos. No lado da linha em corrente alternada, os transformadores são conectados em paralelo na forma estrela com neutro aterrado. No lado das válvulas da unidade conversora, são conectados em estrela e delta com o ponto neutro isolado. A impedância de fuga dos transformadores apresenta valores de 15 a 18%, sendo escolhida para limitar a corrente de curto-circuito nas válvulas. Estes transformadores devem ser projetados para suportar correntes parasitas devido a presença de harmônicas, além de estresses de tensão em corrente contínua [3].

#### 4.3 Filtros

Devido a geração de harmônicos pelo conversor, torna-se necessária a utilização de filtros nos lados de corrente contínua e alternada dos sistemas HVDC, com a finalidade de melhorar a qualidade da energia e atender aos requisitos normativos. Estes filtros podem ser categorizados em:

 Filtros de Corrente Alternada (CA): filtros passivos que propiciam um caminho shunt de baixa impedância para as harmônicas em formato CA. São utilizados filtros sintonizados para mitigar as 11<sup>a</sup> e 13<sup>a</sup> harmônicas, e amortecidos para harmônicas de ordem superior, como a 23<sup>a</sup> [3].

- Filtros de Corrente Contínua (CC): são filtros para filtrar as harmônicas de formato CC, sendo usual na mitigação da 24ª harmônica. As práticas atuais sugerem a utilização de filtros ativos [3]. Harmônicas de tensão que surgem no lado CC criam correntes de caráter alternado que se sobrepõem às correntes contínuas nas linhas de transmissão, podendo causar interferências nos sistemas telefônicos nas proximidades [4].
- Filtros de Alta Frequência: são utilizados entre os transformadores conversores e o barramento de corrente alternada, para mitigar quaisquer correntes de alta frequência. Também podem ser instalados entre os filtros e linhas de corrente contínua [1].

#### 4.4 Fonte de Potência Reativa

As estações conversoras consomem, geralmente, potência reativa na ordem de 50% a 60% da potência ativa gerada. Esta potência é providenciada pelos próprios filtros CA, por capacitores chaveados *shunt*, sistemas SVC (*static VAR compensator*) e condensadores síncronos [1].

#### 4.5 Reator de Suavização CC

É um reator série conectado no lado CC antes da linha. Sua principal função é suavizar a corrente do conversor e proteger o mesmo de surtos provindos da rede [3].

#### 4.6 Comutador CC

Segunda Padiyar [1], o comutador CC é utilizado para interromper pequenas correntes CC. Caso seja necessário a interrupção de correntes de plena carga, são utilizados equipamentos próprios para tal tarefa, como disjuntores CC ou MRTB (Metallic Return Transfer Breakers).

# 5. PRINCIPAIS COMPONENTES DOS SISTEMAS HVDC (BRASIL – URUGUAI E BRASIL - ARGENTINA)

#### 5.1 Estação HVDC Back-To-Back Garabi (Brasil – Argentina)

A Estação HVDC Back-To-Back Garabi, está localizada no Brasil próximo a divisa com a Argentina. Esta estação realiza a interconexão entre os sistemas de Brasil (525 kV, 60 Hz) e Argentina (500 kV, 50 Hz). Foi implementada em duas fases, a primeira com capacidade total de 1100 MW, e a segunda expandindo a capacidade para 2200 MW. As linhas de transmissão possuem comprimento aproximado de 500 km [5]. A Estação HVDC de Garabi é composta pelos componentes destacados na Figura 3.

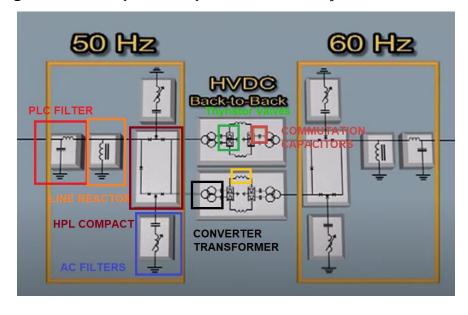


Figura 3 – Principais Componentes da Estação Back-To-Back Garabi

Fonte: Hitachi ABB Power Grids [6]

• Filtros PLC (Alta Frequência): responsáveis por mitigar as correntes de alta frequência, atuando entre 30 a 50 kHz.

Figura 4 – Filtros PLC da Estação Back-To-Back Garabi



 Reatores de Linha: responsáveis por manter o nível da tensão baixo quando a carga for pouca. Capacidade de 92.5 MVAR no lado de 50 Hz e 250 MVAR no lado de 60 Hz. Também pode funcionar como transformador de potência auxiliar.

Figura 5 – Reatores de Linha da Estação Back-To-Back Garabi



Fonte: Hitachi ABB Power Grids [6]

Compacto HPL: Disjuntor HPL, duas chaves e um transdutor digital óptico. São
 5 destes equipamentos instalados no total, com função de proteção no lado CA.

Figura 6 – Compacto HPL da Estação Back-To-Back Garabi



• **Filtros AC:** responsáveis por eliminarem harmônicas criadas pelo conversor e ajudar na compensação reativa até um determinado grau. Há 4 bancos de filtros, sendo 2 no lado de 50 Hz e 2 no lado de 60 Hz. Cada banco possui quatro ramos, sendo um sintonizado na 13ª harmônica, outro na 11ª harmônica e dois filtros do tipo passa-alta sintonizados nas frequências de 24ª e 36ª harmônicas. Os filtros de 11ª e 13ª harmônica possuem um reator que ajusta sua indutância continuamente para manter o filtro sintonizado quando há variações na frequência da rede [6]. Os filtros CA por conversor produzem 85 MVAR em cada lado (50 Hz e 60 Hz)[7].

Figura 7 – Filtros AC e Reator Contour da Estação Back-To-Back Garabi



• Transformadores Conversores: os transformadores conversores são do tipo fase única, com 3 enrolamentos e potência nominal de 192 MVA [6].

Figura 8 – Transformadores Conversores da Estação Back-To-Back Garabi



Fonte: Hitachi ABB Power Grids [6]

• Válvulas a Tiristores: é responsável pelo processo de retificação da tensão alternada. Cada unidade é constituída de 4 capsulas com função de válvula, sendo

feitas com 36 tiristores conectados em série [6]. A capacidade por bloco conversor é de 550 MW, tensão contínua de 70 kV e corrente contínua de 4 kA [7].

Figura 9 – Unidades Conversoras da Estação Back-To-Back Garabi



Fonte: Hitachi ABB Power Grids [6]

 Capacitores Comutadores: são conectados entre os transformadores e as válvulas a tiristores, ajudando na compensação reativa consumida pelo conversor.
 Ao todo, são 190 MVAR no lado de 50 Hz e 322 MVAR no lado de 60 Hz [7].

Figura 10 – Capacitores Comutadores da Estação Back-To-Back Garabi



Reatores de Suavização: Há dois reatores por polo, dimensionados em 50 mH
 [6]. Responsáveis por suavizar a corrente do conversor e proteger de surtos provindos da rede.



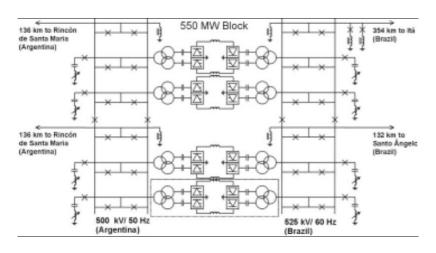
Figura 11 – Reatores Suavizadores da Estação Back-To-Back Garabi

Fonte: Hitachi ABB Power Grids [6]

• **Sistema de Controle:** O sistema de controle é distribuído por toda a planta, e ele também pode ser feito remotamente [6].

No geral, os conversores HVDC da Estação de Garabi são notáveis por dois motivos: a utilização de capacitores comutadores com filtros automáticos e pelo seu design modular. A operação com o capacitor comutador permite uma maior segurança em níveis de curto-circuito e um maior controle da potência reativa [5].

Figura 12 – Diagrama Unifilar da Estação Back-To-Back Garabi (Fase 1 e 2)

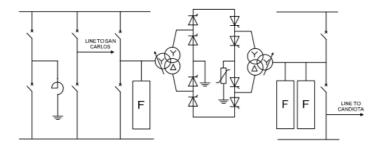


Fonte: Cigre Brasil [7]

## 5.2 Estação HVDC Back-to-Back Melo (Brasil – Uruguai)

A Estação HVDC Back-To-Back Melo realiza a interconexão entre os sistemas de Brasil (525 kV, 60 Hz) e Uruguai (500 kV, 50 Hz). Está localizada na borda entre ambos os países, na cidade de Melo.

Figura 13 - Diagrama Unifilar da Estação Back-To-Back Melo



Fonte: C. Horwill et al. [8]

Seus principais componentes são:

- Transformadores Conversores: do tipo fase única com três enrolamentos, com primário conectado em Y e secundário em Y e Delta, respectivamente. Os transformadores de ambos os lados são de características elétricas e construtivas parecidas, o que possibilita a necessidade de apenas um transformador reserva [8].
- Unidade Conversora: potência nominal de 500 MW com capacidade de sobrecarga de 550 MW em uma temperatura de 20°C. O esquema é bidirecional, sendo o conversor do tipo monopólio. No lado de 50 Hz, o ponto central da válvula de tiristor é aterrado, enquanto que no lado de 60 Hz, é conectado ao terra por meio de um supressor de surto. As válvulas são conectadas na configuração de 12 pulsos. A tensão de operação nominal é de 79.3 kV [8].
- Reator Shunt Chaveado: a subestação do lado de 50 Hz possuí um reator shunt chaveado utilizado no controle da tensão.
- Filtros: há vários filtros harmônicos em cada lado do sistema HVDC Melo. São instalados na seguinte configuração:
  - Lado 50 Hz Melo: 4 Filtros de 110 MVAR sintonizados nas frequências das 11<sup>a</sup>, 14<sup>a</sup> e 24<sup>a</sup> harmônicas
  - Lado 60 Hz Melo: 2 Filtros de 96 MVAR amortecidos nas frequências das 13ª, 24ª e 36ª harmônicas. 2 Filtros de 96 MVAR amortecidos nas frequências das 3ª, 13ª e 47ª harmônicas.
  - Lado 60 Hz Candiota: 2 Filtros de 65 MVAR amortecidos nas frequências das 3ª, 11ª harmônicas. Este filtro de 3ª harmônica foi utilizado devido a um estudo prévio onde detectaram a possibilidade de ressonância de baixa ordem harmônica entre os filtros e o sistema CA, no lado de 60 Hz [8].

#### 5.3 Estação HVDC Back-to-Back Rivera (Brasil – Uruguai)

A Estação HVDC Back-To-Back RIvera realiza a interconexão entre os sistemas de Brasil (230 kV, 60 Hz) e Uruguai (150 kV, 50 Hz), com capacidade de transferir 70 MW [9]. Seu diagrama unifilar pode ser visto na Figura 14.

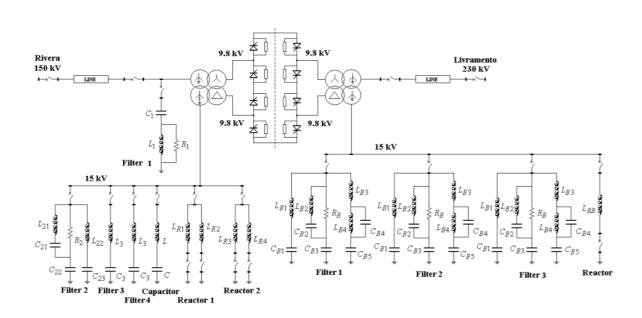


Figura 14 – Diagrama Unifilar da Estação Back-To-Back Rivera

Fonte: Saldaña e G. Calzolari [9]

Seus principais components levantados, são:

- Transformadores Conversores: do tipo quatro enrolamentos com tensões nominais de: 150/15/9.8/9.8 kV e potências nominais de 75/70/46/46 MVA respectivamente, no lado de 50 Hz (Rivera). No lado de 60 Hz, 230/15/9.8/9.8 kV e potências nominais de 75/70/46/46 MVA [9].
- Unidade Conversora: é composta por válvulas que possuem sete tiristores conectados em série. Sua tensão de operação nominal é de 22 kV [9].

- **Filtros:** o enrolamento de 15 kV alimenta um conjunto de filtros e reatores utilizados para controlar a tensão que sobe nos barramentos de 150 kV e 230 kV conforme os filtros são chaveados, ocorrendo compensação reativa. Neste enrolamento, há 3 filtros: um de 15.5 MVAR para 3ª harmônica, e outros dois de 15.5 MVAR para a 11ª harmônica. Um filtro adicional é conectado no barramento de 150 kV do lado de 50 Hz em CA, do tipo passa-alta com frequência de corte na 11ª harmônica. Sua potência é de 15.5 MVAR. No lado brasileiro há três filtros idênticos de 20.7 MVAR, sendo para as 11ª, 3ª, 13ª e 25ª (duplo) harmônicas.
- Capacitor: Além dos filtros, há também um capacitor de 10 MVAR conectado no enrolamento de 15 kV.

# 6. PRINCIPAIS COMPONENTES DOS SISTEMAS HVDC (ITAIPU, MADEIRA, BELO MONTE BP1 E BP2)

#### 6.1 Estação HVDC Itaipu

O Sistema HDVC de Itaipu consiste de dois bipolos, cada um projetado para potência de 3150 MW em tensão contínua de 600 kV, com corrente de 2625 A. Estes bipolos transmitem a energia gerada do Paraguai (50 Hz) ao Brasil (60Hz). A tensão no barramento de alta CA é de 500 kV. Na saída, a tensão é de 345 kV e 500 kV. As linhas norte e sul possuem comprimento de 818 e 807 km, respectivamente. Ao todo nove geradores abastecem o sistema HVDC em 50 Hz, com capacidade de 823 MVA, fator de potência de 0,85 [10].

overhead lines: 807 km; bipole 2:818 km 1600kV D.C.; 2625A 345kV lines Δ Δ Δ (0) $\nabla$ Δ D.C. filter O.C. filter  $\nabla$ Δ  $\nabla$ D.C. reacto Itaipu HVDC scheme 500kV-50Hz (one of two pipoles; each of 3150MW: 600kV d.c.) Sao Roque simplified single line diagram Itaiou

Figura 15 – Diagrama Unifilar de um Bipolo da Estação HVDC de Itaipu

Fonte: A. J. Direne [11]

- Transformadores Conversores: do tipo três enrolamentos e uma fase. Ao todo são 24 transformadores em cada terminal, sendo três para cada conversor de 12 pulsos. Primário conectado em Y enquanto que o secundário em Y e Delta, respectivamente. Potência nominal de 314 MVA cada [10].
- Unidade Conversora: são utilizadas válvulas a tiristor, refrigeradas à água e isoladas por ar. O conversor é construído em válvulas quadruplas, sendo que uma válvula é composta de 8 módulos com 12 tiristores conectados em série. Ao todo são 4 conversores por bipolo [11].
- Condensadores Síncronos: Na subestação de São Roque (Brasil) há 4 condensadores síncronos de 330 MVAR cada [10].
- **Filtros:** os filtros de harmônicas encontram-se em ambos os lados. No lado de 50 Hz, existem cinco filtros CA que totalizam uma compensação de 1538 MVAR. Já no lado de 60 Hz, há dez filtros CA que totalizam 2482 MVAR. São filtros focados nas 3ª, 5ª, 11ª e 13ª harmônicas. Também há filtros CC, projetados para as harmônicas 2ª, 6ª e 12ª. No lado de São Roque há a presença de capacitores shunt, sendo dois de 294 MVAR e 6,45 uF. Além disso, também há a presença de filtros passa alta em ambos os lados [10].
- Reatores CC de Linha: pelo diagrama unifilar, nota-se também a presença de reatores CC na linha, para suavização da corrente e proteção dos conversores de eventuais surtos da linha.

#### 6.2 Estação HVDC Madeira

O sistema HVDC do Madeira, consiste de duas estações de conversão sendo uma em Porto Velho e outra em Araraquara. Estas estações são interligadas por linhas de transmissão de corrente contínua de 600 kV, com capacidade de 3150 MW cada e extensão de 2350 km. Além disso, também possui um conversor to tipo Back-to-Back de capacidade de 400 MW, que fornece energia à rede local de 230 kV.

SE Inversora SE Retificadora de Porto Velho de Araraquara 500 kV Retificador +600 kVdc Inverso 500 kV **UHF Santo** Antonio 3150 MW Bipolo 2 2375 km -600 kVdc Filtros A +600 kVdc **UHE Jirau** 3300 MW Bipolo 1 2375 km Rede de -600 kVdc 500 kV 500 kV

Figura 16 – Diagrama Unifilar de um Bipolo da Estação HVDC Madeira - Araraquara

Fonte: E. Brandi, R. Abboud e F. Calero [12]

- Transformadores Conversores: foram utilizados transformadores de uma fase e três enrolamentos de capacidade de 630 MVA por unidade. No polo de Araraquara, os transformadores possuem apenas dois enrolamentos, sendo a potência de 292 MVA por unidade [13].
- Unidade Conversora: devido aos diferentes enrolamentos dos transformadores, as válvulas a tiristores são quadruplas do lado do Madeira e duplas no lado de Araraquara. São conversores de 12 pulsos por polo [13].
- Reatores Suavizadores: são utilizados em 3 unidades, um de 15 mH no lado de alta tensão do conversor e os outros dois localizados no neutro com indutância de 150 mH [13].
- Filtros CA BIPOLO 1:

 Araraquara: utilização de filtro HP 12/24, de 305 MVAR cada e 3 bancos shunt de capacitores de tamanhos similares para compensação reativa [13].

#### Madeira:

- 2 bancos de 263 MVAR cada, HP 5/36 e HP 12.
- 1 banco de 183 MVAR, HP 12.
- 3 bancos 263 MVAR cada, HP 2/3 e HP 12/24 [13].
- Porto Velho 500 kV (Back-To-Back): 3 sub-bancos de 142 MVAR cada, configurados como HP 3/5 mais um HP sintonizado em três frequências 12/24/36 [13].
- Porto Velho 230 kV (Back-To-Back): 4 bancos de 59 MVAR cada, subdivididos em 8 sub-bancos [13]:
  - 4 sub-bancos para mitigação de 11/13 harmônicas.
  - 2 sub-bancos HP para 24/36 harmônicas.
  - 1 sub-banco HP 3ª harmônica.
  - 1 sub-banco que pode ser comutado para formar um filtro HP 24/36 ou HP 3.
  - Reatores shunt de 64 MVAR cada.
- Filtros CC: são iguais em ambas as estações conversoras, e são feitos por dois ramos de filtros harmônicos comutáveis por polo. O primeiro, amortecido, é responsável por mitigar a 12ª harmônica e outras altas frequências, e também restringe a 6ª harmônica. Está conectado entre polo e neutro. O segundo, conectado entre polo e terra, é sintonizado na 50ª harmônica. Cada um possui 0,7 uF.
- Capacitores de Comutação (CCC): A conexão back-to-back entre Porto Velho e
  o sistema Acre-Rondônia, utiliza capacitores comutadores que melhoram a
  performance do sistema além de diminuírem a necessidade de compensação
  reativa shunt.

#### 6.3 Estação HVDC Belo Monte

O sistema HVDC da usina Belo Monte pode ser dividio em dois bipolos. O primeiro, denominado Xingu-Estreito, interliga Xingu (Pará) a Estreito (Minas Gerais), com capacidade de 4000 MW e extensão de 2092 km. O segundo, denominado Xingu-Rio, interliga Xingu (Pará) ao Rio de Janeiro (RJ), com capacidade de 4000 MW e extensão de 2439 km [14].



Figura 17 – Bipolos 1 e 2 de Belo Monte

Fonte: D. S. Carvalho, et al. [14]

#### 6.3.1 Bipolo 1: Xingu - Estreito

O Bipolo 1, é formado por uma estação conversora CA/CC de capacidade de 4000 MW, com tensões de ±800 kVcc / 500 kVca , localizada em Xingu, e outra estação conversora de ±800 kVcc / 500 kVca de capacidade de 3850 MW localizada em Estreito. Cada uma das subestações possuem uma ponte conversora de 12 pulsos por polo, com reatores de suavização e filtros CC. A tecnologia adotada é a de LCC, (*Line-commutated converters*), sem capacitores comutáveis. Cada subestação conta com 4 bancos de transformadores monofásicos de dois enrolamentos [15]. O sistema também conta com 5 unidades de filtros CA de 420 MVAR localizados em Xingu e 5 unidades de 400 MVAR em Estreito [14]. Também possui eletrodos de aterramento que, segundo a ANEEL [15], devem estar espaçados de uma distância mínima de 15 km da subestação onde está conectado, e deverá poder ser compartilhado pelo Bipolo 2, devendo escoar ambas as correntes.

#### 6.3.2 Bipolo 2: Xingu - Rio

O Bipolo 2, é formado por uma estação conversora CA/CC de capacidade de 4000 MW, com tensões de ±800 kVcc / 500 kVca , localizada em Xingu, e outra estação conversora de ±800 kVcc / 500 kVca de capacidade de 3788 MW localizada no Rio. Cada uma das subestações possuem uma ponte conversora de 12 pulsos por polo, com reatores de suavização e filtros CC. A tecnologia adotada é a de LCC, (*Line-commutated converters*), sem capacitores comutáveis. Cada subestação conta com 4 bancos de transformadores monofásicos de dois enrolamentos. Também possui eletrodos de aterramento que, segundo a ANEEL [16], devem estar espaçados de uma distância mínima de 15 km da subestação onde está conectado. Além disso, também possuem 2 compensadores síncronos de 500 kVca e 150/-75 MVAR localizados na subestação do Rio de Janeiro.

# 7. ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS SISTEMAS HVDC DO BRASIL

A análise comparativa entre os sistemas HVDC será feita na Tabela 1, onde estão resumidos os locais, as extensões das linhas, os níveis de tensão CC, as potências nominais, as topologias dos conversores e a tecnologia de chaveamento das válvulas.

Tabela 1 – Analise Comparativa Entre Sistemas HVDC no Brasil e Países
Vizinhos

Nome	Tensão CC (kV)	Potência (MW)	Local	Extensão de Linha (km)	Tipo	Válvula
Belo Monte BP1	800	4000	Pará - Minas Gerais	2092	Bipolar - LCC	Tiristores
Belo Monte BP2	800	4000	Pará - Rio de Janeiro	2439	Bipolar - LCC	Tiristores
Itaipu 1	600	3150	Paraná - São Paulo	807	Bipolar - LCC	Tiristores
Itaipu 2	600	3150	Paraná - São Paulo	818	Bipolar - LCC	Tiristores
Madeira	200	400	Rondônia para Rede Local	-	Back-to- Back – CCC	Tiristores
Madeira	600	6300	Rondônia - São Paulo	2350	Bipolar - LCC	Tiristores
Garabi	70	2200	Argentina - Brasil	-	Back-to- Back – CCC	Tiristores
Melo	79.3	500	Uruguai - Brasil	-	Back-to-Back – LCC	Tiristores
Rivera	22	70	Uruguai - Brasil	-	Back-to-Back – LCC	Tiristores

Fonte: Autor.

Em termos de potência e extensão de linha, destacam-se os sistemas HVDC de Belo Monte, Itaipu e Madeira. A maioria dos sistemas são do tipo Bipolar LCC, sendo algumas configurações do tipo Back to Back, utilizadas principalmente em ocasiões onde há a necessidade de compatibilizar as frequências dos sistemas locais. Em casos de redes consideradas 'fracas', há a utilização de sistemas com capacitores comutáveis (CCC), que permitem um melhor controle da potência reativa e conferem maior estabilidade aos sistemas.

# 8. ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS 15 MAIORES SISTEMAS HVDC DO MUNDO

Nesta seção, serão apresentados os 15 maiores sistemas HVDC do mundo em quesitos de extensão. A análise será dada de forma gráfica e tabular, comparando as extensões, potências e tensões CC de transmissão. A Tabela 2 a seguir, reúne os dados dos 15 maiores sistemas de transmissão HVDC do mundo.

Tabela 2 – Analise Comparativa Dos 15 Sistemas HVDC Mais Extensos do Mundo

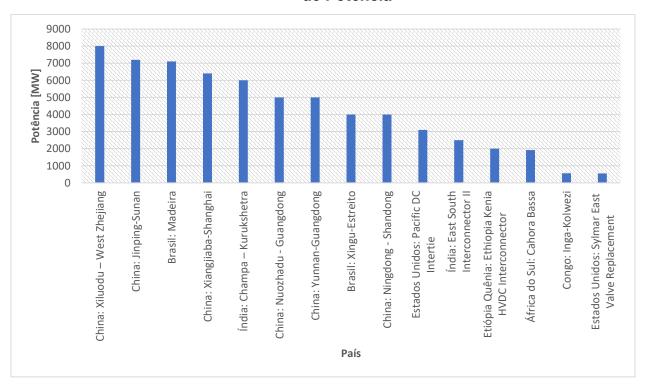
País	Local	Extensão	Potência (MW)	Tensão CC ± (kV)
Brasil	Madeira	2350	7100	200
Brasil	Xingu-Estreito	2092	4000	800
China	Xiangjiaba- Shanghai	2070	6400	800
China	Jinping-Sunan	2059	7200	800
Congo	Inga-Kolwezi	1700	560	500
China	Xiluodu – West Zhejiang	1680	8000	800
África do Sul	Cahora Bassa	1460	1920	533
China	Nuozhadu - Guangdong	1451	5000	800
Índia	East South Interconnector II	1450	2500	500
China	Yunnan- Guangdong	1418	5000	800
Índia	Champa - Kurukshetra	1365	6000	800
Estados Unidos	Pacific DC Intertie	1362	3100	500
China	Ningdong - Shandong	1335	4000	660

Estados Unidos	Sylmar East	1200	550	500
Etiópia Quênia	Ethiopia Kenia HVDC	1045	2000	500

Fonte: Siemens [17].

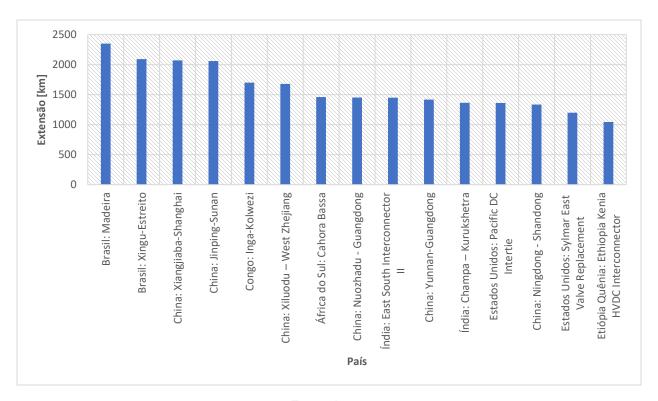
Através da tabela pode-se notar que, China, Estados Unidos, Brasil, África e Índia são os lugares onde a tecnologia HVDC é mais utilizada. As grandes extensões podem ser explicadas pelas dimensões continentais destes países, pois como visto anteriormente, em distâncias entre 500 e 800 km o *break even* econômico dos sistemas HVDC tende a ocorrer, tornando-os mais vantajoso que os sistemas CA. Através da Figura 18, pode-se ver a tabela anterior em formato gráfico organizado por ordem decrescente de potência.

Figura 18 – 15 Maiores Sistemas HVDC do Mundo em Ordem Decrescente de Potência



Fonte: Autor

Figura 19 – 15 Maiores Sistemas HVDC do Mundo em Ordem Decrescente de Extensão



Fonte: Autor.

Através da Figura 19, pode-se visualizar a Tabela 2 de forma gráfica, organizada em ordem decrescente de extensão dos sistemas HVDC. Nota-se que o maior protagonismo pertence à China em ambos os quesitos de potência gerada e extensão de transmissão.

#### 9. CONCLUSÕES

Através deste relatório, pode-se compreender o funcionamento de um sistema HVDC além de conhecer suas principais aplicações no Brasil e no mundo. Foram apresentados seus principais componentes construtivos, bem como suas respectivas funcionalidades. Foi demonstrado que os sistemas HVDC apresentam grande vantagem em relação aos sistemas de transmissão CA, devido a sua grande capacidade de controle de energia reativa, além de sua capacidade de transmissão ser independente da extensão da linha. Proporcionam maior estabilidade à rede elétrica, chaveamento suave que minimiza os transitórios e maior controle na limitação de correntes de falta. Além disso, também é um sistema que reduz as perdas de transmissão, tornando-a mais eficiente. No entanto, os sistemas HVDC tendem a ser caros devido aos equipamentos utilizados na sua construção, como retificadores, inversores, tiristores, filtros, dentre outros. A compensação econômica decorrente dos investimentos deve ocorrer quando as linhas de transmissão possuem grandes distâncias, em torno de 500 a 800 km, o que torna o HVDC mais viável que um sistema CA tradicional. Estes sistemas também são muito utilizados para compatibilizar as diferentes frequências de transmissão que podem existir entre países.

China, Brasil, Índia e Estados Unidos são alguns dos países que possuem tal tecnologia em seu portfólio energético. Os sistemas brasileiros se destacam pela sua grande extensão e elevada capacidade de transmissão. O Brasil possui sistemas do tipo bipolar LCC e back-to-back, sendo que alguns destes possuem os capacitores comutáveis em série com as válvulas e transformadores, que tornam o conversor mais robusto, menos dependente da rede CA e mais resistente a distúrbios, pelo fato de permitirem operar o retificador com ângulos de disparo menores.

Desta forma, os sistemas HVDC constituem uma alternativa extremamente viável para uma geração de energia com maior qualidade, eficiência, confiabilidade, redução de custos e menor impacto ambiental.

## 10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] K. R. Padiyar, *HVDC Power Transmission Systems Technology and System Interactions.* New Delhi, India: New Age International (P) Ltd., 2005.
- [2] J. Setreus e L. Bertling, "Introduction to HVDC Technology for Reliable Electrical Power Systems", *Proceedings of the 10th International Conference on Probablistic Methods Applied to Power Systems*, Rincon, 2008, pp. 1-8.
- [3] R. B. Rajib e Md. R. Amin, "A Paper on Determination of Controlling Characteristics of the Monopolar HVDC System", International Journal of Hybrid Information and Technology. [Online]. Disponível em: <a href="https://www.researchgate.net/figure/Main-components-of-a-conventional-HVDC-system\_fig1\_272828087">https://www.researchgate.net/figure/Main-components-of-a-conventional-HVDC-system\_fig1\_272828087</a>. Acessado em: Ago., 18, 2020.
- [4] SIEMENS. High Voltage Direct Current Transmission Proven Technology for Power Exchange. Siemens AG, Erlangen Alemanha, 2011. Disponível em: <a href="https://www.siemens.com/energy/hvdc">https://www.siemens.com/energy/hvdc</a>. Acessado em: Ago., 18, 2020.
- [5] J. G. Birger e J. R. S. Moni. **The Garabi 2000 MW interconnection back-to-back HVDC to connect weak AC systems**. [Online]. Disponível em: <a href="https://pdfs.semanticscholar.org/5c0a/a6a4a058ae01082146810bbee549506d0db4.pd">https://pdfs.semanticscholar.org/5c0a/a6a4a058ae01082146810bbee549506d0db4.pd</a> f>. Acessado em: Ago., 19, 2020.
- [6] Hitachi ABB Power Grids. **Brazil-Argentina HVDC Interconnection**. [Online]. Disponível em: <a href="https://www.youtube.com/watch?v=ZOTGuWCfS-A&t">https://www.youtube.com/watch?v=ZOTGuWCfS-A&t</a> . Acessado em: Ago., 19, 2020.
- [7] Cigré Brasil. Interligações HVDC por Conversores com Capacitores de Comutação (CCC). Brasil. [Online]. Disponível em: < http://www.cigre.org.br/archives/files/Cigre\_Brasil\_001.pdf>. Acessado em: Ago., 19, 2020.
- [8] C. Horwill, N. M. Macleod, R. E. Bonchang, D. Castagna, M. Artenstein and M. Croce, "A new 500MW frequency converter station to exchange power between Uruguay

- and Brazil," 2011 IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition, Phoenix, AZ, 2011, pp. 1-6, doi: 10.1109/PSCE.2011.5772566.
- [9] C. Saldaña and G. Calzolari, "Modelling of the 500 MW Back-to-Back Converter Station between Uruguay and Brazil in ATP," 2019 AEIT HVDC International Conference (AEIT HVDC), Florence, Italy, 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/AEIT-HVDC.2019.8740369.
- [10] A. J. Direne, **THE ITAIPU HVDC SCHEME**. Superintendencia de Transmissão Furnas Centrais Elétricas, Rio de Janeiro Brasil. Disponível em: <a href="https://web.archive.org/web/20051115122539/http://www.transmission.bpa.gov/cigresc14/Compendium/ITAIPU.htm">https://web.archive.org/web/20051115122539/http://www.transmission.bpa.gov/cigresc14/Compendium/ITAIPU.htm</a> Acessado em: Ago., 19, 2020.
- [11] A. J. Direne, **THE ITAIPU HVDC SCHEME**. Superintendencia de Transmissão Furnas Centrais Elétricas, Rio de Janeiro Brasil. Disponível em: <a href="https://web.archive.org/web/20051115135445/http://www.transmission.bpa.gov/cigresc14/Compendium/Itaipu%20Pictures.pdf">https://web.archive.org/web/20051115135445/http://www.transmission.bpa.gov/cigresc14/Compendium/Itaipu%20Pictures.pdf</a>. Acessado em: Ago., 19, 2020.
- [12] E. Brandi, R. Abboud e F. Calero, **Proteção de Filtros de Harmônicos em uma Instalação HVDC ±600 kV**, *42nd Annual Western Protective Relay Conference*. [Online]. Disponívelem:<a href="https://cmscdn.selinc.com/assets/Literature/Publications/Technical%20Papers/6714\_ProtectingHarmonic\_FC\_20150914\_Web\_pt-BR.pdf?v=20190903-231026">https://cmscdn.selinc.com/assets/Literature/Publications/Technical%20Papers/6714\_ProtectingHarmonic\_FC\_20150914\_Web\_pt-BR.pdf?v=20190903-231026</a>. Acessado em: Ago., 19, 2020.
- [13] J.F. Graham., T. Holmgren, P. Fischer, N.L. Shore., **The Rio Madeira HVDC System Design aspects of Bipole 1 and the connector to Acre-Rondônia**, *CIGRÉ session, Paris, 2012, Paper B4-111.* [Online]. Disponível em: <a href="https://pdfs.semanticscholar.org/f3ae/7f40c4d77b8693568ca4b30e59780640e488.pdf">https://pdfs.semanticscholar.org/f3ae/7f40c4d77b8693568ca4b30e59780640e488.pdf</a> ?\_ga=2.159757821.1954945835.1597794507-1603707250.1597794507>. Acessado em: Ago., 19, 2020.
- [14] D. S. Carvalho, T. C. Rizzoto, J. A. Cardoso, G. S. Luz, A. Bianco, R. M. Azevedo, O. J. Rothstein, R. Ristow, R. B. Broetto, Final project planning conception for the first 800 kV HVDC link of Belo Monte, *CIGRE 2014*. [Online]. Disponível em:

<a href="https://docplayer.net/64083922-Final-project-planning-conception-for-the-first-800-kv-hvdc-link-of-belo-monte.html">https://docplayer.net/64083922-Final-project-planning-conception-for-the-first-800-kv-hvdc-link-of-belo-monte.html</a> Acessado em: Ago., 20, 2020.

- [15] ANEEL, CARACTERÍSTICAS E REQUISITOS TÉCNICOS BÁSICOS DAS INSTALAÇÕES DE TRANSMISSÃO (Leilao Xingu Estreito) Anexo 6AB. Brasil. [Online]. Disponível em: <a href="http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/editais\_transmissao/documentos/Anexo%20T%C">http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/editais\_transmissao/documentos/Anexo%20T%C</a> 3%A9cnico%206AB%20HVDC\_Leil%C3%A3o%20011\_2013.pdf>. Acessado em: Ago., 20, 2020.
- [16] ANEEL, CARACTERÍSTICAS E REQUISITOS TÉCNICOS BÁSICOS DAS INSTALAÇÕES DE TRANSMISSÃO (Leilao Xingu Terminal Rio) Anexo 06. Brasil. [Online]. Disponível em: <a href="http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/editais\_transmissao/documentos/Anexo\_Tecnico\_Lote\_Unico\_Leilao\_07\_2015.pdf">http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/editais\_transmissao/documentos/Anexo\_Tecnico\_Lote\_Unico\_Leilao\_07\_2015.pdf</a>>. Acessado em: Ago., 20, 2020.
- [17] SIEMENS, **Transmitindo Grandes Quantidades de Energia por Longa Distância**. Brasil. [Online]. Disponível em:
  <a href="http://patrocinados.estadao.com.br/siemens/infraestrutura/transmitindo-grandes-quantidades-de-energia-por-longas-distancias/">http://patrocinados.estadao.com.br/siemens/infraestrutura/transmitindo-grandes-quantidades-de-energia-por-longas-distancias/</a>>. Acessado em: Ago., 22, 2020.