

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

CÂMPUS CURITIBA

ENGENHARIA ELÉTRICA

LEONARDO BATISTA DE SANTANA

**ANÁLISE DE VIABILIDADE PARA IMPLANTAÇÃO DE LINHAS DE
TRANSMISSÃO HVDC**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2019

LEONARDO BATISTA DE SANTANA

**ANÁLISE DE VIABILIDADE PARA IMPLANTAÇÃO DE LINHAS DE
TRANSMISSÃO HVDC**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação, apresentada à disciplina de Trabalho de conclusão de curso, do Curso de Engenharia Elétrica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) como requisito do título de Engenheiro Eletricista

Orientadora: Prof^a Msc. Eng. Annemahlen Gehrke Castagna

Coorientadora: Prof^a Dra. Eng. Nastasha Salame Silva

CURITIBA

2019

Leonardo Batista de Santana

Análise de Viabilidade para Implantação de Linhas de Transmissão HVDC

Este Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação foi julgado e aprovado como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Eletricista, do curso de Engenharia Industrial Elétrica Eletrotécnica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Curitiba, 01 de julho de 2019.

Prof. Antônio Carlos Pinho, Dr.
Coordenador de Curso
Engenharia Elétrica

Profa. Annemarlen Gehrke Castagna, Mestre
Responsável pelos Trabalhos de Conclusão de Curso
de Engenharia Elétrica do DAELT

ORIENTAÇÃO	BANCA EXAMINADORA
<hr/> <p>Profa. Eng. Annemarlen Gehrke Castagna, Mestre Universidade Tecnológica Federal do Paraná Orientadora</p> <hr/> <p>Profa. Eng. Nastasha Salame Silva, Dra Universidade Tecnológica Federal do Paraná Coorientadora</p>	<hr/> <p>Prof. Álvaro Augusto W. de Almeida, Mestre. Universidade Tecnológica Federal do Paraná</p> <hr/> <p>Profa. Annemarlen Gehrke Castagna, Mestre Universidade Tecnológica Federal do Paraná</p> <hr/> <p>Prof. Joaquim Eloir Rocha, Dr. Universidade Tecnológica Federal do Paraná</p> <hr/> <p>Profa. Nastasha Salame Silva, Dra Universidade Tecnológica Federal do Paraná</p>

A folha de aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica

DEDICATÓRIAS

Dedico este trabalho à todas as pessoas que contribuíram para que este projeto se concluísse.

Dedico este trabalho em especial à minha família e aos meus pais, Tânia de Jesus Cabral e Gumercindo Batista de Santana.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me acompanhado e protegido por todo este caminho.

Agradeço a minha família, por ter aceitado a saudade no lugar da companhia.

Agradeço a pessoa amada e aos amigos, que de alguma forma me ajudaram a construir um caminho a seguir.

Agradeço as professoras Annemahlen Gehrke Castagna e Nastasha Salame Silva, por toda a paciência e atenção para que este trabalho se concluísse.

Agradeço em especial a todos os professores, que me presentearam com um pouco de seu conhecimento e amizade, e assim compartilharam com o muito de sua vida. A todos os mestres e doutores, que na mais simplicidade, abdicaram de seu tempo para contribuir para um possível futuro melhor.

Agradeço a Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, por todo o apoio educacional.

Obrigado!

"Há um tempo em que é preciso abandonar as roupas usadas, que já têm a forma do nosso corpo, e esquecer os nossos caminhos, que nos levam sempre aos mesmos lugares. É o tempo da travessia: e, se não ousarmos fazê-la, teremos ficado, para sempre, à margem de nós mesmos"

Fernando Pessoa.

RESUMO

De SANTANA, Leonardo Batista; Análise de Viabilidade Para Implantação de Linhas Transmissão em HVDC. 2019. 77 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso Superior de Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, 2019.

Com a evolução da indústria e da sociedade, o consumo energético aumentou. Em função disso, o sistema elétrico teve de passar por uma adaptação a fim de conseguir suprir as cargas solicitadas. Em paralelo, começa-se a analisar os benefícios que a utilização do padrão de transporte de carga em corrente contínua traria para todo o sistema. Contudo, esse tipo de discussão traz a reavaliação de todo nosso sistema elétrico moderno. Este trabalho visa tratar de maneira técnica as necessidades, viabilidades e benefícios que o sistema em corrente contínua pode trazer para o sistema elétrico moderno. Embora os sistemas HVDC tenham seu custo mais elevados do que sistemas HVAC, o estudo conclui que há vantagens suficientes para viabilização destes em função de reduções econômicas e técnicas. No tocante ao quesito econômico, os sistemas em corrente contínua, possui melhor eficiência na transmissão, e assim menor custo para linhas de longo percurso. Em relação aos quesitos técnicos, os sistemas HVDC possuem melhor controle de fluxo de potência, flexibilidade da operação, e controle de parâmetros sistêmicos. Assim, o principal resultado obtido, mostra que a tecnologia HVDC vem se tornando a cada dia, uma das principais técnicas de eficiência energética para sistemas de potência.

Palavras-chave: Sistema Elétrico de Potência, HVDC, Transmissão de Energia.

ABSTRACT

De SANTANA, Leonardo Batista; Feasibility Analysis for Line Implantation HVDC Transmission. 2019. 77 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso Superior de Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, 2019.

With the evolution of industry and society itself, energy consumption has risen to levels never before seen. As a result, the electrical system began to undergo an adaptation in order to overcome the requested loads. At the same time, the benefits that the use of the direct current load transport pattern would be brought to the whole system. However, this type of discussion brings the reassessment of our entire modern electrical system. This work aims to deal in a technical way, which are the needs, viabilities and benefits that the system in direct current can bring to the present day. Although HVDC systems cost more to HVAC systems, the study concludes that there are enough advantages to enable them to be made economic and technical reductions. With regard to the economic aspect, DC systems have better transmission efficiency, and thus less investment for long-distance lines. In relation to the technical questions, HVDC systems have better control of power flow, flexibility of operation, and control of systemic parameters. Thus, the main result obtained shows that HVDC technology has been becoming one of the main energy efficiency techniques for power systems.

Keywords: Electric Power System, HVDC, Electric Transmission.

LISTA DE FIGURAS.

Figura 1 – Panorama do Sistema Interligado Nacional	17
Figura 2 – Panorama do Sistema Interligado Nacional	18
Figura 3 – Thomas Edison (direita) e Nikola Tesla (esquerda).....	23
Figura 4 – Empresas precursoras do setor elétrico	23
Figura 5 – Tesla lendo próximo à um de seus geradores.....	24
Figura 6 – A elefante Topsy após a execução.....	25
Figura 7 – Uma das 2332 patentes de Edison.....	26
Figura 8 – Registro da primeira obra a utilizar a tecnologia HVDC.....	28
Figura 9 – Sistemas HVDC em operação no mundo até o ano de 2000.....	30
Figura 10 – Escoamento em HVDC da UHE Belo Monte	32
Figura 11 – Redimensionamentos na interligação Norte - Sudeste/Centro-Oeste	33
Figura 12 – Diagrama esquemático da transmissão entre RO e SP via HVDC	34
Figura 13 – Relação de custo para viabilidade da transmissão HVDC	35
Figura 14 – Definição da Área crítica para viabilidade econômica	36
Figura 15 – Modelo convencional de um sistema HVDC.....	37
Figura 16 – Esquema de um conversor do tipo CSC.....	41
Figura 17 – Esquema de um conversor do tipo VSC	42
Figura 18 – Diagrama da topologia das principais configurações HVDC	45
Figura 19 – Esquema de configuração Monopolar HVDC	46
Figura 20 – Esquema espacial de uma configuração de estação Monopolar HVDC.....	46
Figura 21 – Esquema de configuração Bipolar HVDC	47
Figura 22 – Esquema espacial de uma configuração de estação Bipolar HVDC.....	47
Figura 23 – Esquema de configuração Homopolar HVDC.....	48
Figura 24 – Esquema de configuração Back-to-Back HVDC.....	49
Figura 25 – Esquema espacial de uma configuração de estação Back-to-Back HVDC.....	49
Figura 26 – Classificação dos sistemas MTDC.....	50
Figura 27 – Exemplo de aplicação de um sistema MTDC.....	50
Figura 28 – Plataforma Valhall no Mar do Norte, alimentada por HVDC	51
Figura 29 – Panorama Eólico Europeu em 2010.....	52
Figura 30 – Perspectiva em 20 anos da rede offshore na Europa.....	52
Figura 31 – Diagrama de variação da impedância pela distância.....	54
Figura 32 – Esquema de acionamentos convencionais e ofertados.....	55

Figura 33 – Relação da redução de cobre pelo custo	55
Figura 34 – Modelo de Microrede em Corrente Contínua	57
Figura 35 – Relação entre custos para um sistema de transmissão	58
Figura 36 – Relação entre portes de torres de transmissão	59
Figura 37 – Relação custo por distância no sistema HVDC.....	60
Figura 38 – Relação entre custos linha e estações conversoras por classe de tensão.....	60
Figura 39 – Análise de composição para um sistema de transmissão.....	61
Figura 40 – Relação entre perdas por classe de tensão e distância percorrida	62
Figura 41 – Análise da composição de custo para unidades conversoras e retificadoras	63
Figura 42 – Relação entre investimento inicial para sistemas CC ou CA.....	63
Figura 43 – Análise da composição de custo em função da confiabilidade.....	64
Figura 44 – Custos da transmissão em HVDC	65
Figura 45 – Custos da transmissão em HVAC	65
Figura 46 – Comparativo dos custos da transmissão HVDC x HVAC	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparativos entre conversores CSC e VSC	43
Tabela 2 – Comparativos entre conversores por tipo e aplicação.....	44
Tabela 3 – Perdas percentuais no sistema de conversão.....	67

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1 – Lista de projetos HVDC existentes e em planejamentos	76
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica

IEEE - *Institute of Electrical and Electronics Engineers*

EPE - Empresa de Pesquisa Energética

SIN - Sistema Interligado Nacional

ONS – Operado Nacional do Sistema Elétrico

CC – Corrente contínua

DC – *Direct Current*

CA – Corrente alternada

AC – *Alternate Current*

HVDC – *High Voltage Direct Current*

HVAC – *High Voltage Alternate Current*

CCC - *Capacitor Commutend Converters* (Conversor de comutação por Capacitor).

VSC - *Voltage Source Converters* (Conversor por Fonte de Tensão);

CSC - *Current Source Converter* (Conversor por Fonte de Corrente);

LCC – *Line Commutated Converters* (Conversor de comutação pela linha ou Conversor de comutação Natural);

SCC – *Self Commutated Converters* (Conversores Auto-Comutados);

GTO - *Gate Turn-Off Thyristor*

IGCT - *Integrated Gate Commuted Thyristor*

IGBT - *Insulated Gate Bipolar Transistor*

PWM- *Pulse Width Modulation*

LISTA DE SÍMBOLOS

$\cos\varphi$	Fator de potência medido pelo deslocamento entre tensão e corrente senoidais
W	Watt - Unidade de potência ativa
Hz	Hertz - Unidade de Frequência
V	Volt - Unidade de Tensão
A	Àmpere – Unidade de Corrente
CC	Corrente Continua
CA	Corrente Alternada
\pm	Polaridade positiva e negativa

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
1.1 TEMA	16
1.1.2 Delimitação do Tema	19
1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS	19
1.3 OBJETIVOS	19
1.3.1 Objetivo Geral.....	19
1.3.2 Objetivos Específicos	20
1.4 JUSTIFICATIVA	20
1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	20
1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	21
2. HISTÓRICO DA TECNOLOGIA HVDC	22
2.1 HISTÓRICO	22
2.1.1 A Guerra das Correntes	22
2.1.2 O surgimento do HVDC	27
2.2 O HVDC NO BRASIL	31
3. APLICAÇÕES DO SISTEMA HVDC	35
3.1 CONCEITOS GERAIS SOBRE HVDC	35
3.2 VANTAGENS DO SISTEMA HVDC.....	36
3.3 DESVANTAGENS DO SISTEMA HVDC	38
3.4 TIPOS DE CONVERSORES UTILIZADOS EM SISTEMAS HVDC.....	39
3.4.1 Conversores CSC	40
3.4.2 Conversores VSC.....	41
3.5 CONFIGURAÇÕES DE CONVERSORES PARA HVDC	44
3.5.1 Sistemas HVDC Monopolares.....	45
3.5.2 Sistemas HVDC Bipolares.....	46

3.5.3	Sistemas HVDC Homopolares	47
3.5.4	Sistemas HVDC <i>Back-to-back</i>	48
3.5.5	Sistemas HVDC Multiterminais	49
4.	HORIZONTES PARA A TECNOLOGIA HVDC	53
4.1	SISTEMAS EM CORRENTE CONTÍNUA PRÓXIMOS A DISTRIBUIÇÃO	53
4.2	SISTEMAS EM CORRENTE CONTÍNUA PRÓXIMO A CARGA	54
4.3	SISTEMAS EM CORRENTE CONTÍNUA EM APLICAÇÕES ESPECÍFICAS	56
4.4	ANÁLISE TÉCNICA E ECONÔMICA PARA SISTEMAS HVDC	58
4.4.1	ANÁLISE ECONÔMICA	58
4.4.1.1	Comparativo entre custos de linhas de transmissão.....	59
4.4.2	ANÁLISE TÉCNICA	66
4.4.2.1	Perdas nas estações conversoras	66
4.4.2.2	Perdas nas linhas de transmissão	68
5.	CONCLUSÕES.....	69
	REFERÊNCIAS	72
	ANEXOS	76

1. INTRODUÇÃO

1.1 TEMA

O sistema brasileiro de transmissão de energia, enfrenta diversos desafios, conforme De Menezes (2015):

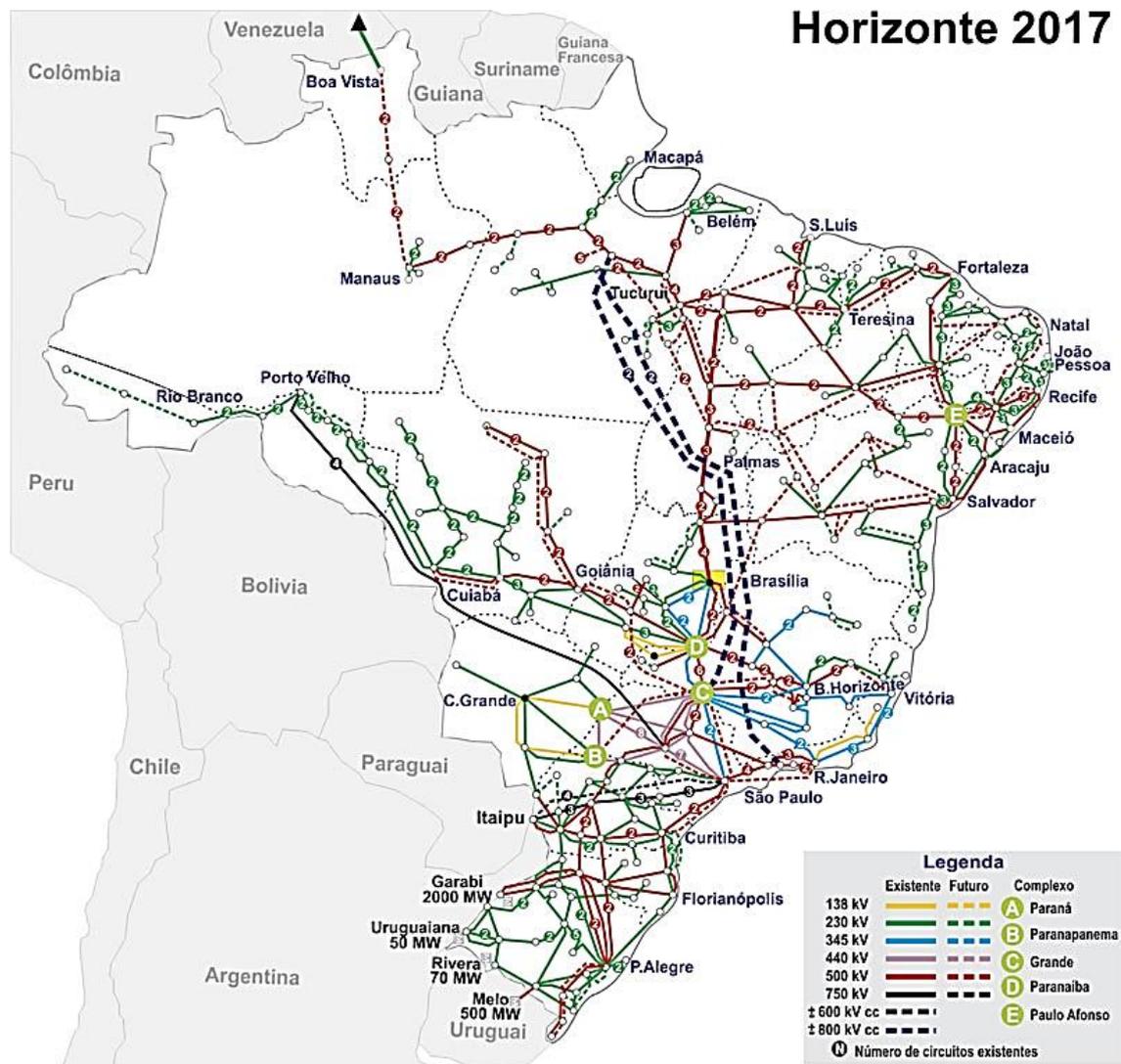
- Longas distâncias entre as unidades geradoras e os centros de carga;
- Problemas técnicos para interconexão entre linhas de transmissão;
- Controle de oscilações dos níveis normais de operação para o sistema de transmissão;
- Custo elevado de materiais e equipamentos para execução de projetos de linhas de transmissão.

Contudo, o Brasil possui um sistema de geração eficaz e diversificado, no qual se completa com um sistema de transmissão denominado SIN (Sistema Interligado Nacional), operado pelo ONS (Operador Nacional do Sistema), que tem como finalidade interligar todo o sistema energético, a fim de ter uma maior flexibilidade para despacho de carga e uma otimização do consumo energético do país como um todo (ONS, 2017).

O SIN tem como objetivo, minimizar os efeitos da verticalização da geração, interligando as unidades geradoras de energia elétrica aos centros de cargas espalhados pelo território nacional.

Na Figura 01 apresenta-se um panorama do SIN, fornecido pelo ONS:

Figura 1 – Panorama do Sistema Interligado Nacional.



FONTE: (ONS, 2017)

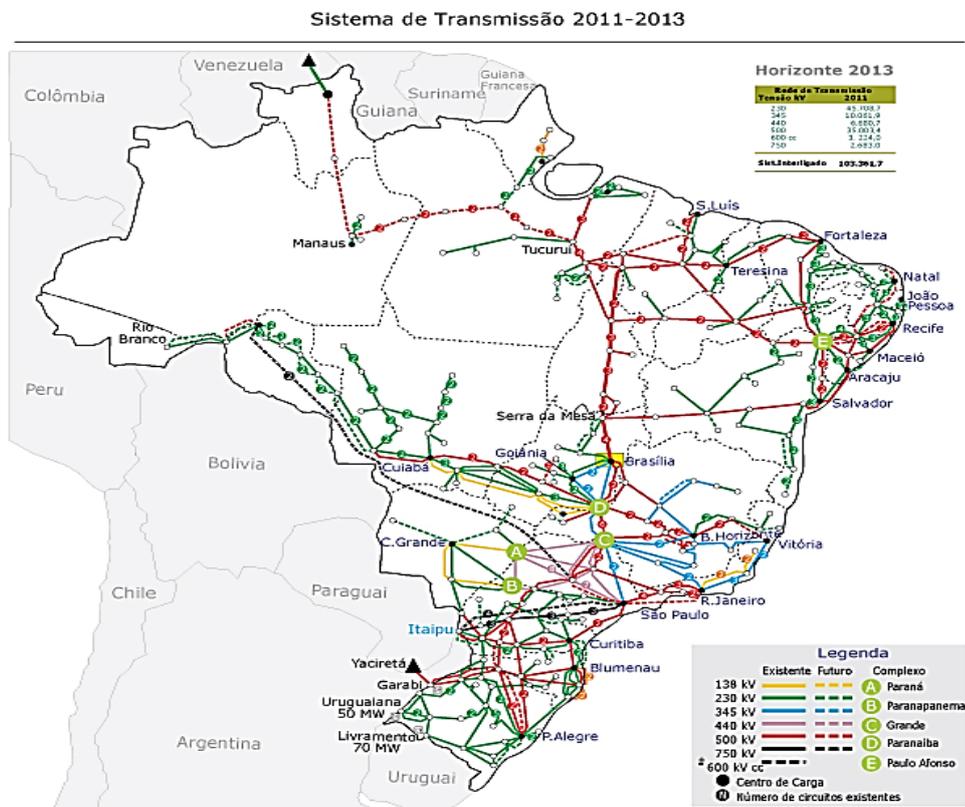
O Brasil é o quinto maior país do mundo em área territorial, e possui distâncias continentais. Com isto, projetos de linhas de transmissão tem se tornado um dos maiores desafios para a Engenharia Elétrica, dado que a condução de grandes fluxos de potências por longas distâncias gera diversos problemas, demandam grandes quantias de investimentos, podendo até inviabilizar a exploração de potenciais energéticos devido a sua distância (DE MENEZES, 2015).

Na engenharia moderna, utiliza-se de diversas técnicas de transmissão de energia elétrica, visando o transporte energético de unidades geradoras até os centros de carga. Em especial, para se transportar cargas energéticas por longas distância, define-se a utilização de linhas de transmissão em Extra Alta Tensão de Corrente Alternada (acima de 242 kVac) ou de

linhas de transmissão de Alta Tensão em Corrente Contínua (HVDC). Porém a definição de qual linha de transmissão aplicar, traz consigo diversas particularidades que podem gerar muitos prós e contras ao projeto em questão (DE MENEZES, 2015).

Na Figura 2, a representação datada de 2013 do SIN. Fazendo-se um comparativo à Figura 1, pode-se observar uma expansão considerável comparada a imagem apresentada anteriormente. No horizonte 2017, observa-se mais linhas de transmissão ligando novos núcleos de geração aos centros de cargas.

Figura 2 – Panorama do Sistema Interligado Nacional.



FONTE: (ONS, 2017)

Este trabalho visa, em especial, o estudo de linhas de transmissão em HVDC, o seu embasamento técnico para operação, e os casos de linhas de transmissão em corrente contínua que existem hoje no Brasil.

Além disso, apresenta resultados de estudos já publicados, que apontam o uso do HVDC como uma das principais técnicas de eficiência energética, mostra-se uma ferramenta versátil e flexível para redução de perdas, correção de reativos, reativos harmônicos entre outros pontos.

1.1.2 Delimitação do Tema

Elaborar um levantamento bibliográfico do histórico da tecnologia HVDC, suas principais técnicas e configurações de operação e; por fim, apresentar projetos onde se optou pelo uso do sistema HVDC e possíveis propostas a serem aplicadas tal tecnologia.

O Brasil apresenta, em diversos momentos, uma economia em crescimento e, desta forma um proporcional aumento do consumo do sistema elétrico. Tal situação traz a busca por grandes empreendimentos objetivando grandes aproveitamentos energéticos, a exemplo destes são as Usinas de Belo Monte e o complexo do Rio Madeira (Usina Jirau e Usina Santo Antônio), que são grandes aproveitamentos energéticos, porém afastados dos grandes centros de cargas. Por esse motivo necessitaram do uso de linhas de transmissão em HVDC, pois esta vem como uma solução para o elevado transporte de cargas dos grandes centros de geração até os grandes centros urbanos do país (SATO, 2013).

1.2 PROBLEMAS E PREMISAS

Este trabalho apresenta um estudo analítico baseado em pesquisa bibliográfica, revisando duas principais técnicas de transmissão de energia elétrica em alta tensão: transmissão em corrente alternada e transmissão em corrente contínua. Dentro das técnicas citadas, foi dado enfoque nas tecnologias empregadas nos sistemas HVDC.

A partir deste estudo, a utilização dos sistemas em corrente contínua como uma técnica de eficiência energética, a fim de reduzir perdas e gastos com operação, desta maneira a questão que este trabalho se firma é: “Em quais casos é aplicável a utilização de linhas de transmissão HVDC?”.

1.3 OBJETIVOS

Os objetivos deste trabalho são:

1.3.1 Objetivo Geral

Apresentar as características dos sistemas HVDC, suas vantagens e principais aplicações.

1.3.2 Objetivos Específicos

Analisar a viabilidade de sistemas de transmissão de energia em HVDC;

- Pesquisar técnicas modernas para linhas de transmissão HVDC;
- Apresentar as principais configurações utilizadas para com o HVDC;
- Analisar interações entre setores do sistema de potência brasileiro (energético, geração, transmissão, distribuição);
- Apresentar as vantagens e desvantagens das técnicas de transmissão presentes no estudo.

1.4 JUSTIFICATIVA

A transmissão de energia elétrica se mostra um dos maiores desafios presentes na vida dos profissionais de sistemas de potência; esse estudo tem como proposta de revisão bibliográfica aos estudos mais recentes de transmissão de energia e das aplicações encontradas em projetos para o mercado atual; buscando direcionar a melhor técnica a ser utilizada em uma linha de transmissão.

Oferecendo uma opção de referencial consultivo, como base para as tecnologias utilizadas nas linhas de transmissão: corrente alternada e corrente contínua. Vale apontar a validade deste estudo como revisão dos sistemas hoje em operação, a fim de proporcionar a compreensão das técnicas utilizadas e assim propor possíveis futuros para a tecnologia estudada.

1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Este Trabalho de Conclusão de Curso está dividido nas seguintes etapas:

- Etapa 1: Revisão bibliográfica sobre os principais fatos históricos relacionados ao desenvolvimento da tecnologia HVDC.
- Etapa 2: Revisão bibliográfica sobre os conceitos científicos relacionados à implantação de linhas de transmissão em alta tensão de corrente contínua.
- Etapa 3: Apresentação de comparativos entre configurações de HVDC.

- Etapa 4: Apresentação de comparativos entre transmissão em corrente alternada e corrente contínua.
- Etapa 5: Apresentação de propostas modernas para utilização do HVDC como opção de eficiência energética para sistemas diversos.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está dividido nos seguintes capítulos:

- Capítulo 1: Introdução; neste capítulo é apresentada a estrutura geral do trabalho, e assim, a delimitação e objetivo abordados;
- Capítulo 2: Histórico da tecnologia HVDC; este capítulo contextualiza todo o histórico da tecnologia HVDC, a fim de apresentar os principais motivos do atual estado que este sistema ocupa no panorama mundial atualmente;
- Capítulo 3: Aplicação do sistema HVDC; este capítulo expõe as principais características e particularidades dos sistemas CC para transmissão de energia empregados atualmente;
- Capítulo 4: Horizonte para a tecnologia HVDC; neste tópico, são apresentados alguns trabalhos que promovem o emprego da tecnologia CC como opção de melhoria para casos atualmente ocupados pelos sistemas CA.
- Capítulo 5: Conclusões; neste capítulo são apresentados os resultados e conclusões obtidos com o estudo, e assim, suas considerações finais.
- Referências.
- Anexos.

2. HISTÓRICO DA TECNOLOGIA HVDC

Este capítulo tem como objetivo trazer um olhar geral da história da tecnologia HVDC e seu desenvolvimento ao longo dos anos.

2.1 HISTÓRICO

Os estudos relacionados a eletricidade e suas aplicações práticas tiveram início com a corrente contínua (CC). A corrente alternada (CA) veio na sequência como uma opção a anterior descoberta, (SILVA (2011), KIMBARK (1971) E KUNDUR (1994)).

A primeira usina elétrica do mundo, teve o início de sua operação em 1882. Construída por Thomas A. Edison em New York, fornecia energia em corrente contínua em 110 V por 1,6 km para 59 clientes no distrito de Manhattan. Com o advento dos transformadores, dos circuitos polifásicos, e dos motores de indução no final século XIX, o sistema CA foi difundido na sociedade técnica da época, até os dias de hoje (MARCHIORO (2014)). Contudo, a principal vantagem do sistema CC, que é a alta eficiência no transporte de cargas, nunca foi esquecida em comparação ao sistema CA.

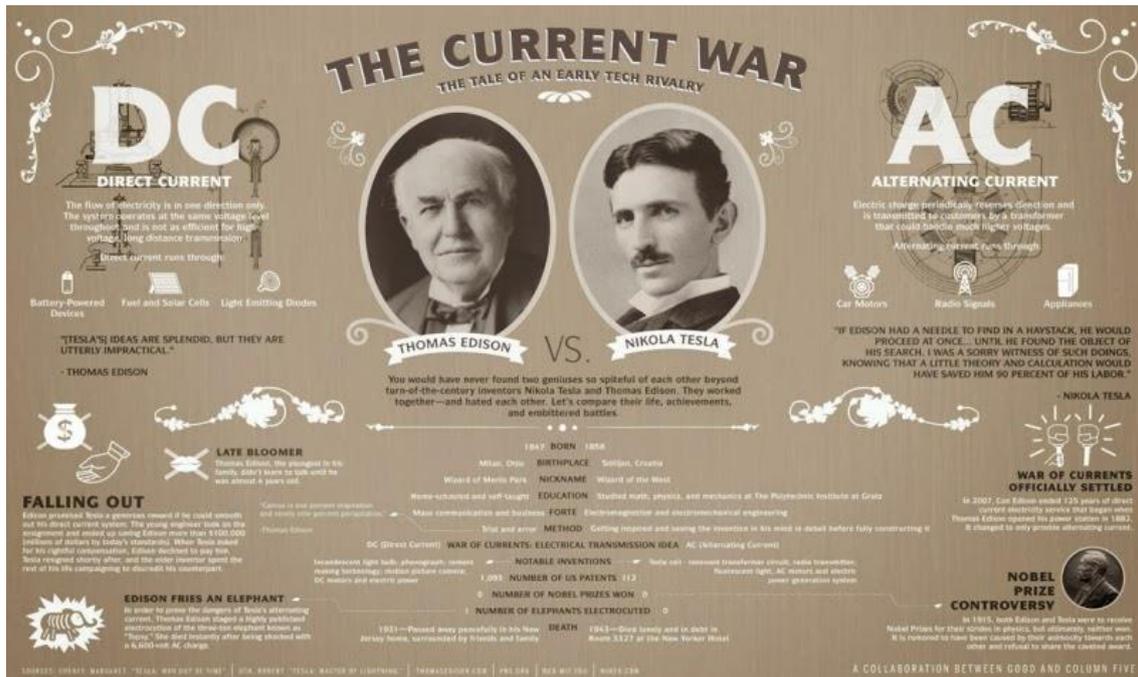
No entanto, a disputa em que a escolha entre qual a melhor forma de transporte elétrico, foi de certa maneira polêmico, e marcou a história com o nome de “A Guerra das Correntes”.

2.1.1 A Guerra das Correntes

Ao se observar mais de perto o sistema elétrico moderno, fica a questão: Por que não se optou pelo uso de corrente contínua no lugar da corrente alternada?

Para isso, retorna-se a New York em 1882, no momento conhecido como “A Guerra das Correntes”. De um lado se tinha o físico austro-húngaro Nikola Tesla apoiado por George Westinhouse, defendendo a utilização do sistema de corrente alternada. Do outro lado se tinha o grande inventor Thomas Edison apoiado por grandes empresários, como J.P Morgan, defendendo o sistema de corrente contínua.

Figura 3 – Thomas Edison (esquerda) e Nikola Tesla (direita).



FONTE: (La historia narrada através del arte)

Em meio a corrida das grandes invenções, era presenciada a luta entre dois grandes inventores, brilhantes por natureza, mas agressivos por opinião. Thomas A. Edison, como o grande inventor que era, defende a corrente contínua como o melhor meio de transporte elétrico, e principalmente, mais seguro. Em contrapartida, Tesla defende o sistema de corrente alternada como o meio mais viável, tendo em vista a capacidade de se permitir operar em níveis de tensão elevados, reduzindo assim suas perdas comparadas ao sistema CC.

Conforme relatos, a guerra das correntes foi um fato que mudou todo o rumo do que hoje é o chamado setor elétrico. Elas deram origem à duas das maiores empresas do setor, a *General Electric (GE)* e a *Westinhouse*, cada uma inicialmente apoiando um tipo de transporte energético diferente e representadas na figura 4.

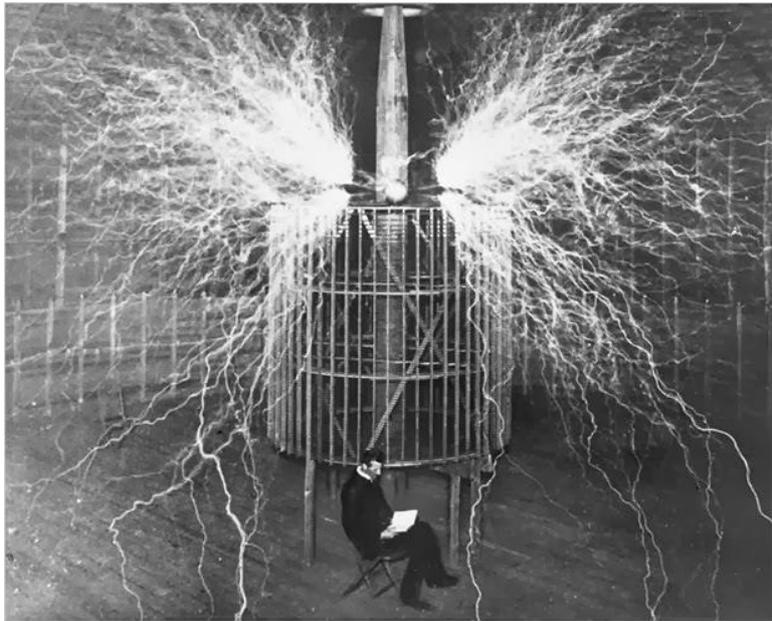
Figura 4 – Empresas precursoras do setor elétrico.



FONTE: (La historia narrada através del arte)

Visto que isto implicava em altos investimentos, seus defensores lançam mão de todas as táticas possíveis para defenderem seus ideais, principalmente demonstrar os riscos da tecnologia do concorrente. Edison afirmava que devido a frequência, a energia alternada era mais perigosa para o manuseio humano. Em defesa, pode-se ver Nikola Tesla na figura 5, sentado próximo à um de seus geradores, no intuito de provar que o risco da corrente alternada é controlável.

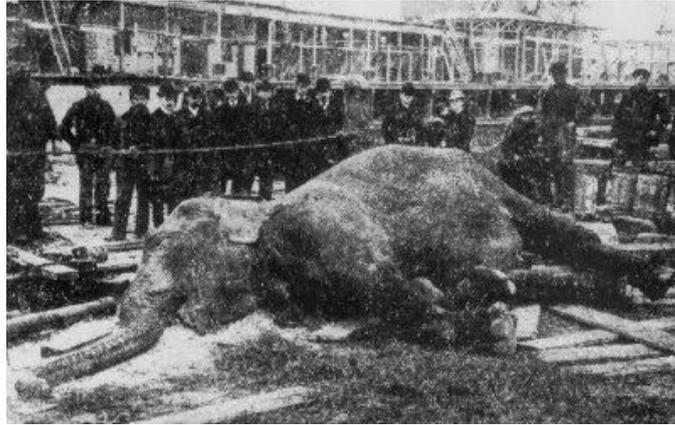
Figura 5 – Tesla lendo próximo à um de seus geradores.



FONTE: (La historia narrada através del arte)

Em contraproposta, Edison promove uma demonstração pública sobre os riscos da corrente alternada, nada mais era do que a aplicação de um alto potencial elétrico em um elefante fêmea, chamada *Topsy*, que a partir da passagem de uma corrente elevada, promoveria a morte do animal, conforme mostra a figura 6. Em outras palavras, Edison queria mostrar que se era possível causar este tipo de dano à um animal do tamanho de um elefante, o que poderia causar à um ser humano?

Figura 6 – A elefante *Topsy* após a execução



FONTE: (La historia narrada através del arte)

Após esse fato fica claro que estes dois inventores estavam dispostos a tudo para defenderem seus sistemas. Contudo, após implantações promissoras de sistemas de transmissão de energia na Europa, A corrente alternada é apontada como o sistema mais adequado na época, escolha esta fundada principalmente na questão da fácil variação de níveis de tensão, através da utilização dos transformadores eletromagnéticos.

“Apesar disso, a cidade de New York, sendo o campo de batalha desta guerra, tinha já feito investimentos numa série de instalações em CC, e estas, naturalmente, continuaram em operação durante muitos anos, em paralelo com a sempre crescente rede de sistemas em CA. Só em 1927 New York decidiu substituir o equipamento CC, e apenas em 2007 foi removido o último - ou seja, 125 anos após o final da Guerra das Correntes (ABB, 2017).”

Edison, vendo que perde a disputa, começa a promover estudos em cima da corrente alternada, e a GE se torna uma das principais empresas com soluções em corrente alternada, juntamente com a Westinghouse e Tesla. Uma curiosidade que vale apontar é que uma das patentes que Edson adquiriu no período da disputa, foi de um sistema de execução humana baseado nos efeitos da aplicação de diferença de potencial elétrico sobre o indivíduo, fornecendo assim a passagem de um alto nível de corrente, comumente chamado de “Cadeira Elétrica”, que pode ser vista na figura 7.

Figura 7 – Uma das 2332 patentes de Edison



FONTE: (La historia narrada através del arte)

No entanto, fica claro que a tecnologia de Tesla foi a escolha mais viável para a época. Porém deve-se considerar, que devido a avanços tecnológicos, principalmente os ocorridos na eletrônica de potência, hoje em dia é possível explorar todo o potencial da corrente contínua, e assim conseguiu-se alcançar novos limites.

Em um artigo escrito pela ABB em 2017, pode-se analisar os seguintes tópicos: a discussão em si, é sobre a forma de produção e utilização da energia, ao se analisar do ponto de vista da produção de energia, cada vez são mais utilizadas fontes de energias renováveis, seja em áreas remotas (centrais hidroelétricas ou parques eólicos *offshore*), seja em áreas locais (gerações fotovoltaicas). A tecnologia em CC é a que permite o transporte de cargas elétricas de maneira econômica em longas distâncias, principalmente para gerações nativas em corrente contínua, como o caso da geração fotovoltaica.

À medida que se aumenta a abrangência da aplicação do sistema de corrente contínua, este fica cada vez mais vantajoso e econômico:

“As perdas podem ser ainda mais reduzidas, convertendo a eletricidade em CC ao nível das subestações e distribuindo-a num distrito inteiro, ou mesmo através do transporte, distribuição e utilização da eletricidade em CC.” (ABB, 2017).”

O que pode se admitir é que o sistema em corrente contínua se mostra como uma tecnologia mais eficiente e econômica se comparada a corrente alternada. No entanto, seu uso nos obriga a lançar mão da eletrônica de potência, algo que só veio a ter evoluções concretas a partir da migração dos sistemas valvulados para os sistemas transistorizados, por volta da década de 80. Assim, pode-se ver que a corrente alternada foi amplamente utilizada por ser a opção mais viável para a época, pois processos como elevação e abaixamento de níveis de tensão, só eram possíveis para corrente alternada.

Deste modo, com o crescente e constante aumento das cargas no sistema elétrico brasileiro, necessita-se cada vez mais um sistema de transporte de carga que possa demandar tais solicitações de fluxo. Continuar utilizando unicamente os sistemas de corrente alternada, é optar por um sistema onde há muitas perdas e controles complexos.

Em paralelo, tem-se os sistemas de geração baseado em fontes alternativas que, em alguns casos, operam diretamente em corrente contínua, tornando cada vez mais vantajosos os sistemas de transporte em corrente contínua e possível o aumento de unidades geradoras, criando a descentralização da matriz energética, desta forma, aumentando cada vez mais a confiabilidade do sistema.

Contudo, pode-se analisar que os custos para o sistema CC são relativamente altos na maioria dos projetos, tornando seu uso aplicável em pouco cenários.

2.1.2 O surgimento do HVDC

A primeira aplicação comercial da transmissão HVDC ocorre em 1954, ilustrado na figura 8, interligando os sistemas elétricos da Ilha de Gotland ao continente através da costa da Suécia, segundo Sood (2004). O projeto era baseado através do chaveamento de válvulas de arco de mercúrio, com uma capacidade de transmissão de 20 MW, através de um elo HVDC submarino, com extensão de 96 km.

Figura 8 – Registro da primeira obra a utilizar a tecnologia HVDC



FONTE: (ABB, 2014)

A tecnologia HVDC só foi se tornar atrativa novamente após o desenvolvimento das válvulas tiristoras, no começo da década de 1970, (MARCHIORO ,2014). O primeiro projeto a utilizar tal tecnologia, foi o esquema de El River no Canadá em 1972, com uma capacidade de transmissão de 320 MW, efetuando a interconexão energética entre as províncias de New Brunswick e Quebec; projeto de fundamental importância para o uso das chaves tiristoras, que tornaram-se a técnica mais utilizada em estações conversoras (Szechtman, Maruvada e Nayak ,2007). Tal avanço possibilitou às estações conversoras poderem efetuar transmissões com níveis de tensão mais elevados, reduzindo perdas técnicas causadas por efeito Joule, e o transporte de cargas até 5.000 MW em uma linha monofásica bipolar.

A seguir, alguns fatos importantes que ocorreram na história da tecnologia HVDC, segundo Ferreira (2017), Rudervall, Charpentier e Sharma (2000):

- Descoberta do retificador de vapor de mercúrio de Hewitt, em 1901;
- Em meados de 1940, surgem os primeiros experimentos com *Thyratrons* na América e com válvula de mercúrio na Europa;

- Concluída a primeira transmissão comercial com HVDC, batizada de Gotland 1, na Suécia em 1954;
- São produzidas as primeiras válvulas semicondutoras de estado sólido, em 1970;
- Realizado primeiro sistema HVDC operado por microcontroladores, em 1979;
- Surgem o primeiro *link* de tensão CC de Itaipu, em ± 600 kV, sendo o maior nível de tensão em corrente contínua da época, entre Brasil e Paraguai, em 1984;
- Aplicado o primeiro filtro CC, com ótimos resultados, em 1994;
- Primeiro projeto com Conversor com Capacitor de Comutação (CCC), na interconexão entre Argentina e Brasil, a Subestação Conversora de Garabi, em 1998;
- Primeiro projeto com Conversor de Fonte de Tensão (VSC-HVDC) na ilha de Gotland na Suécia, em 1999;
- Primeiro projeto HVDC com nível de tensão em ± 800 kV, em uma transmissão entre Índia e China, em 2012;
- Entra em operação a transmissão HVDC do complexo Rio Madeira, entre Porto Velho – RO e Araraquara – SP, no Brasil, com nível de tensão de ± 600 kV, em 2012;
- Entra em operação a transmissão em HVDC da usina de Belo Monte, entre Anapu – PA e Ibiraci – MG, no Brasil, com nível de tensão de ± 800 kV, em 2017.

Na figura 9 estão apresentados alguns dos projetos em HVDC já implantados ou planejados para entrar em operação ao redor do mundo.

Desta maneira, a tecnologia HVDC tem se difundido e sendo muito presente na sociedade, desde o final do século XX. De acordo com o Comitê de Transmissão e Distribuição de Energia do IEEE (IEEE/PSS Transmission and Distribution Committee, 2012), foi constatado que existem cerca de 60 projetos para implantação da tecnologia HVDC pelos próximos anos por diversos países ao redor do mundo, e pelo menos 170 linhas de transmissão HVDC em operação desde o ano de 2012. No Anexo 1, apresentado por IEEE Transmission and Distribution Committee (2012), pode se analisar uma relação dos futuros projetos para a tecnologia HVDC.

2.2 O HVDC NO BRASIL

Segundo Vasconcelos (2014), o primeiro sistema HVDC instalado no Brasil, foi o elo CC para transporte de carga da Binacional UHE ITAIPU, em 1984. A capacidade das 20 máquinas geradoras instaladas, de acordo com o tratado de ITAIPU, é de 14.000 MW. A energia gerada em 60 Hz (frequência padrão no Brasil), é escoada através de circuitos de transmissão HVAC em 765 kV, entre as subestações de Foz do Iguaçu – PR e Tijuco Preto – SP, entregue assim ao SIN através do centro de carga e submercado Sudeste. Parte da energia gerada em 50 Hz (parte pertencente ao Paraguai), é exportado ao Brasil através de uma transmissão HVDC em ± 600 kV, entre as subestações de Foz do Iguaçu – PR (Subestação Retificadora) e Ibiúna – SP (Subestação Conversora). Após a conversão, a energia se conecta ao SIN com nível de tensão de 345 kV em corrente alternada.

Este projeto foi de grande importância para a tecnologia HVDC no Brasil, pois abre as portas para questões anteriormente impedidas, como a importação de energia de países vizinhos, pois estes na maioria operam em 50 Hz, e principalmente o escoamento para grandes centros de energéticos, localizados remotamente em relação ao centros de consumo principais do país, como São Paulo, Rio de Janeiro e Belo Horizonte.

O próximo projeto a utilizar a tecnologia HVDC no Brasil, foi o projeto Garabi. O projeto foi implementado em 1998, para transporte de carga elétrica entre Argentina e Brasil, e teve início da operação em 2000, representando um contrato de 20 anos de importação de 2.000 MW através de uma conexão CCC (*Capacitor Commutated Converter*) *Back-to-Back*¹. De acordo com Rudervall, Charpentier e Sharma (2000), o sistema tem como intenção converter a energia argentina, em 50 Hz, para ser consumida em um sistema 60 Hz. Formado por duas

¹ *Back-to-back*: sistema de transmissão, onde não se utiliza linha de comprimento considerável. Assim o ponto de emissão está ao lado do de recepção, efetuando apenas a conversão da frequência entre estes.

estações conversoras de 1.100 MW cada, a energia é transmitida por uma distância de quase 500 km em 500 kV, entre as subestações de Rincon Santa Maria – AR (no sistema 50 Hz) e Itá – SC (no sistema 60 Hz). Este sistema mantém o nível de tensão CC em 70 kV, a fim de reduzir o nível de isolamento e operar com uma instalação mais compacta por assim dizer, sendo o primeiro sistema CCC a operar no mundo até a data. Esta escolha foi dada em função de no ponto de entrega, era caracterizado por ter um baixo nível de curto circuito, e assim relativamente fraco (GRAHAM, BILEDTE JOHANSSON, 2004).

Conforme dados do Ministério de Minas e Energia, a Usina de Belo Monte, licitada em 2010, com capacidade de 11.233 MW, com uma casa de força de 18 unidades geradoras, que somadas totalizam 11.000 MW, com mais uma casa de máquinas complementar com 6 unidades geradoras, totalizando mais 233 MW. A transmissão até o submercado sudeste se dará por um elo CC em ± 800 kV, porém em uma etapa secundária. Inicialmente esta geração foi conectada ao SIN através da subestação Seccionadora Xingu, localizada no estado do Pará, abrange os circuitos Tucuruí-Macapá-Manaus, por meio de cinco linhas em HVAC 500 kV. Contudo, para escoamento total da geração, seria necessária uma expansão da transmissão, aplicando assim a transmissão HVDC até o centro de carga próximo à São Paulo, em Araraquara – SP. A Figura 10, apresentada a seguir, ilustra a linha de transmissão em corrente contínua comentada anteriormente.

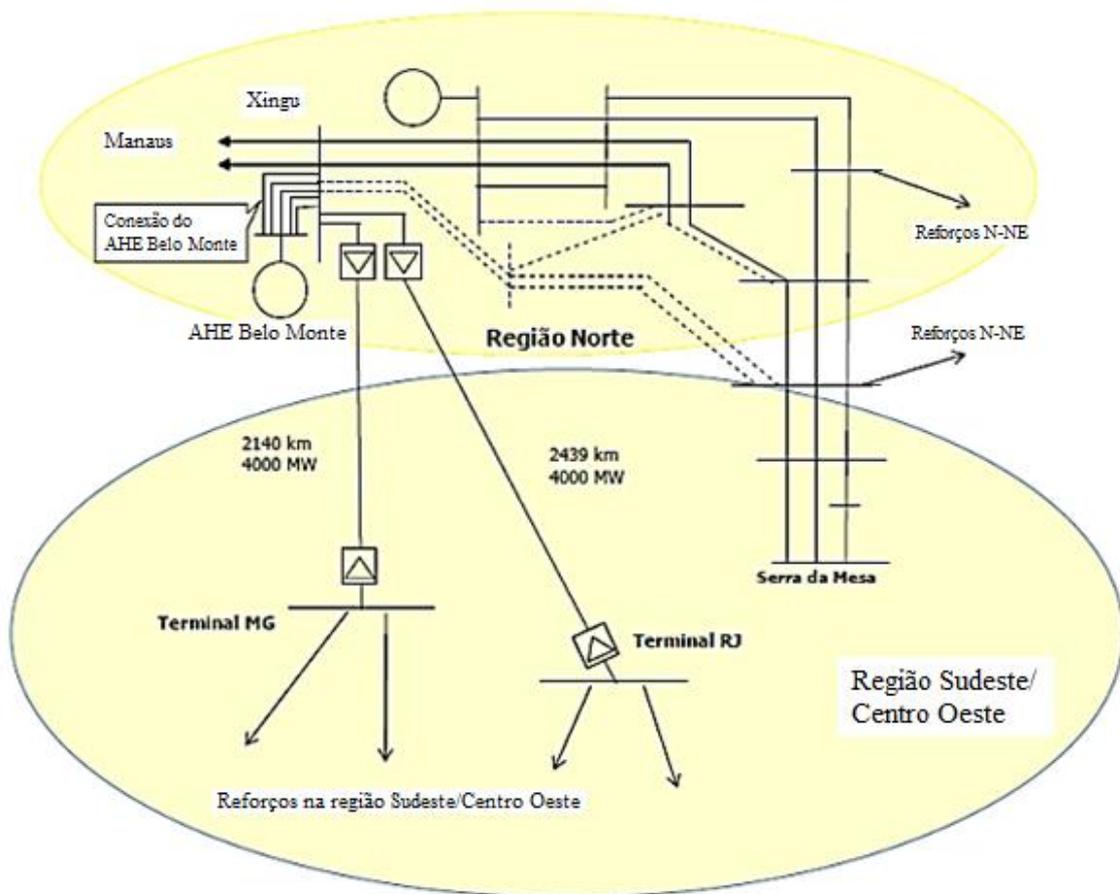
Figura 10 – Escoamento em HVDC da UHE Belo Monte



FONTE: (adaptado de ABB, 2010)

Porém para receber estes novos níveis de carga, entre os submercados Norte e Sudeste, a EPE (Empresa de Pesquisa Energética) estimou diversos reforços no sistema, a fim de garantir a confiabilidade na interconexão entre as regiões tão distantes do país. Na Figura 11, apresenta-se um breve esquemático, fornecido pela EPE, onde pode observar a dimensão do redimensionamento aplicado ao sistema de interconexão.

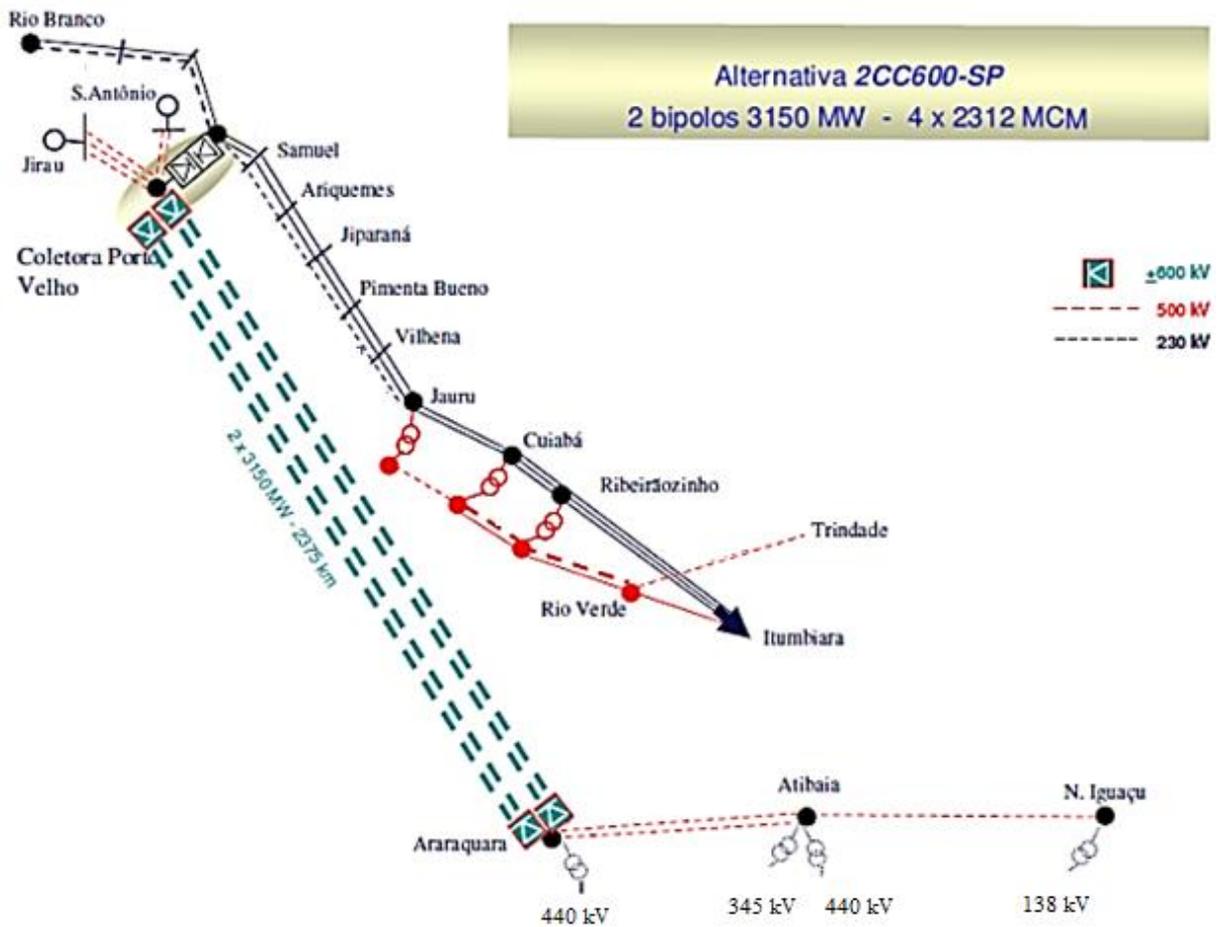
Figura 11 – Redimensionamentos na interligação Norte - Sudeste/Centro-Oeste



FONTE: (adaptado de EPE, 2013)

Segundo Vasconcelos (2014), a transmissão das Usinas do Rio Madeira, Usina Jirau e Usina Santo Antônio, no complexo do Rio Madeira em Rondônia, entrou em operação em 2012, escoando 3.150 MW dos 6.450 MW do total que o complexo corresponde, através de um bipolo ± 600 kV. Na Figura 12, pode-se ver um breve esquemático do sistema de transmissão planejado.

Figura 12 – Diagrama esquemático da transmissão entre Porto Velho – RO e Araraquara – SP via HVDC



FONTE: (adaptado de EPE, 2008)

Até o momento, estes são todos os projetos em HVDC previstos para o Brasil, onde todos estão em comissionamento total. No próximo tópico, serão abordados quais as principais configurações do HVDC e suas principais características.

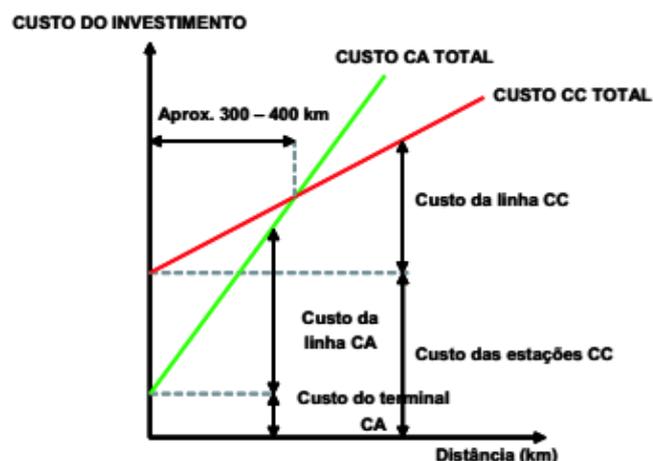
3. APLICAÇÕES DO SISTEMA HVDC

Neste capítulo, são abordados os principais fatores e motivos que viabilizam o uso da tecnologia HVDC, e quando seu emprego é recomendado.

3.1 CONCEITOS GERAIS SOBRE HVDC

Como ponto de partida, pode-se analisar a questão construtiva: em relação ao custo das subestações elevadoras e abaixadoras de nível de tensão do sistema CA, possuem um custo inúmeras vezes inferior as subestações retificadoras e conversoras do sistema CC. A comparação toma como referência o mesmo nível de tensão e potência escoada. Porém comparando-se as torres de transmissão e condutores utilizados, o sistema CC se mostra com um custo muito reduzido em relação ao sistema CA, além de menores custos com operação e manutenção (RUDERVALL, CHARPENTIER E SHARMA ,2000). Desta maneira, pode-se afirmar que a transmissão em corrente contínua se torna mais atrativa comparada a transmissão em corrente alternada, em função das longas distâncias que aumentam a economia feita com torres e cabos de transmissão, chegando até viabilizar o investimento necessário nas extremidades do sistema, com subestações. Esse critério, pode ser analisado na Figura 13, uma ilustração sobre relação de viabilidade para sistemas HVDC.

Figura 13 – Relação de custo para viabilidade da transmissão HVDC

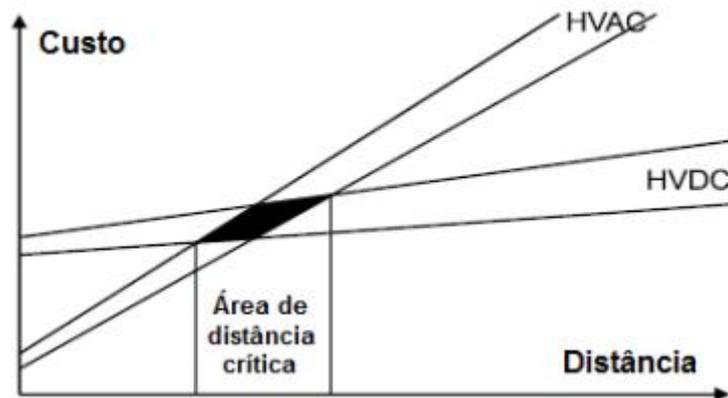


FONTE: (BORRÉ, 2006)

A partir do ponto crítico, definido pela relação entre comprimento da linha de transmissão, algo entre 300 à 400 km, o custo do sistema HVDC passa a ser mais vantajoso do que para um sistema HVAC, critério este definido principalmente, podendo dizer até que

puramente, em função da distância que esta transmissão deve percorrer da unidade geradora até o centro de carga. Segundo Ferreira (2017), este apresenta um comparativo, considerando uma variação para o coeficiente angular de cada reta representando um sistema, obtendo uma interessante “Área de distância crítica”, que representa um ponto onde os dois sistemas se mostram competitivos entre si; essa abordagem pode ser analisada na Figura 14.

Figura 14 – Definição da Área crítica para viabilidade econômica



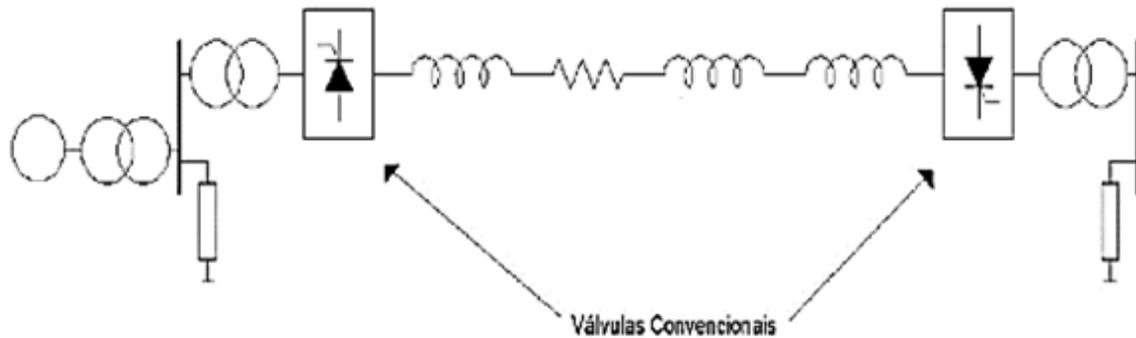
FONTE: (FERREIRA, 2017)

A inclinação de cada reta é a resposta ao custo da linha de transmissão em função do comprimento, levando em consideração equipamentos e acessórios.

3.2 VANTAGENS DO SISTEMA HVDC

No cenário atual, os sistemas HVDC têm sido integrados junto com sistemas de transmissão em corrente alternada de maneira promissora. O modelo mais tradicional que se aplica é composto pelas estações retificadoras e conversoras nas extremidades, auxiliadas por transformadores, para variação de tensão à níveis de transmissão ou da entrada efetiva dos conversores. Em específico, no caso do modelo *back-to-back*, não há a presença da linha de transmissão em corrente contínua, pelo fato dos conversores estarem próximos entre si. Na Figura 15, apresenta-se um esquema do modelo convencional do sistema HVDC aplicado comumente.

Figura 15 – Modelo convencional de um sistema HVDC



FONTE: (adaptado de FERREIRA, 2017)

Segundo Borré (2006), Graham, Biledt e Johansson (2004), Kundur (1994), Custódio (2009), Arrillaga, Liu e Watson (2007), e Ferreira (2017), pode-se resumir diversas vantagens que o sistema em corrente contínua possui em comparação aos sistemas em corrente alternada, são estas:

- Possibilidade da interconexão entre sistemas assíncronos ou de ordens diferentes, como é caso das estações HVDC *back-to-back* de Garabi, interligando o sistema em 50 Hz da Argentina ao sistema 60 Hz no Brasil;
- Redução do efeito corona;
- Vantagem econômica do ponto de vista da eliminação de compensação ao longo da linha e redução nos custos relacionados as linhas, como torres mais leves e menores faixa de servidão;
- Os sistemas HVDCs apresentam melhores regulações de tensão ao longo da transmissão;
- Limitação da corrente de curto-circuito, pois o sistema CC não contribui para a variação da corrente de curto-circuito em sistemas CA;
- Redução das perdas por efeito Joule, principalmente pela anulação do efeito pelicular;
- Devido às altas perdas por elevadas capacitâncias geradas na transmissão submarinas, os sistemas HVDC apresentam redução destas perdas, sendo assim mais viáveis;
- Viabilização de fazendas eólicas *offshore*, com transmissão superior a 50 km, onde o HVDC é a única praticável;
- Controle de intercâmbios de energia, assegurando que as margens de estabilidade do sistema sejam mantidas, desta maneira, ao se controlar o fluxo de potência, controla-se a propagação de distúrbios, evitando eventos como *blackouts*;

- Controle de fluxos não desejados em sistemas em corrente alternada paralelos entre si;
- Controle de fluxos de energia, evitando sobrecargas e assim atuações de proteções repetitivas;
- Opera como fornecedor de reativos para sistemas em corrente alternada, no caso de conversores CCC ou VSC;
- A transmissão CC é independente da abertura angular entre os terminais, já no sistema CA, é de extrema importância a relação de defasagem angular entre os terminais;
- Admite o uso do retorno por terra;
- Otimização da capacidade de geração.

Os pontos apresentam as vantagens em comparação ao sistema HVAC, por isso estão sendo cada vez mais utilizados os sistemas HVDC estarem cada vez mais sendo utilizados ao redor do mundo, conforme Mossadegh, e Aggarwal (2010), a interligação de fazendas eólicas de geração de energia em alto mar, são um dos carros chefes que a tecnologia tem, sendo utilizada nos projetos existentes.

3.3 DESVANTAGENS DO SISTEMA HVDC

Assim como as vantagens da tecnologia HVDC, deve se destacar as desvantagens que esta implica com seu uso. Segundo Vasconcelos (2014), são apontados os seguintes pontos:

- Dificuldade no seccionamento do elo em corrente contínua em múltiplos pontos, afim de permitir a expansão da rede ou interligação desta com outros sistemas adjacentes;
- O custo elevado das chaves tiristoras de comutação em alta frequência;
- Poucos dispositivos de proteção desenvolvidos especificamente para sistemas em corrente contínua.

Outros autores como Sood (2004), Arrillaga, Liu e Watson (2007), abordam juntamente o custo do emprego da tecnologia, devido à necessidade de conversores e filtros; mas apresentam também:

- O custo elevado em função da alta complexidade que envolve a operação do controle dos conversores;
- A geração de harmônicos no processo de retificação/conversão, que necessitam ser filtradas;

- As falhas por comutação ocasionadas nos tiristores, afetando assim a confiabilidade do sistema.

No geral, deve se considerar as desvantagens dos sistemas HVDC como:

- Alto custo de implantação que este apresenta atualmente;
- Alta complexidade para implantação e gerenciamento;
- A pouco evolução e disponibilidade de dispositivos de proteção para sistemas CC;
- A geração de harmônicos quando integrados a sistemas CA.

Contudo comparando às vantagens que este traz sobre um sistema HVAC por exemplo, fica claro a vasta viabilização que este possui:

- Redução de perdas existentes no sistema CA;
- Interligação entre sistemas assíncronos;
- Redução do custo de torres de transmissão;
- Permite a transmissão de energia em instalações *offshore*;
- Controle de fluxo de potência entre malhas;
- Otimização da geração.

3.4 TIPOS DE CONVERSORES UTILIZADOS EM SISTEMAS HVDC

São utilizados alguns tipos distintos de conversores para sistemas HVDC, onde sua diferença se dá em função da aplicação que se deve atuar; pode-se listar como opções de conversores para sistema HVDC os seguintes tipos:

- CSC – *Current Source Converter* (Conversor por Fonte de Corrente);
- VSC – *Voltage Source Converters* (Conversor por Fonte de Tensão);
- LCC – *Line Commutated Converters* (Conversor de comutação pela linha ou Conversor de comutação Natural);
- SCC – *Self Commutated Converters* (Conversores Auto-Comutados);
- CCC – *Capacitor Commutend Converters* (Conversor de comutação por Capacitor).

Conforme Sood (2004) e Niquini (2009), desde o primeiro projeto comercial em transmissão por alta tensão em corrente contínua, até o final da década de 90, os conversores mais utilizados era os por fonte de corrente, CSC. Contudo, a partir da evolução das chaves auto-comutadas, por exemplo o GTO (*Gate Turn-Off Thyristor*), ou o IGCT (*Integrated Gate*

Commutated Thyristor), ou ainda o IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*), passou-se a utilizar os conversores por fonte de tensão, VSC. Nas Figuras 16 e 17, pode se analisar um breve esquema dos conversores do tipo CSC e VSC.

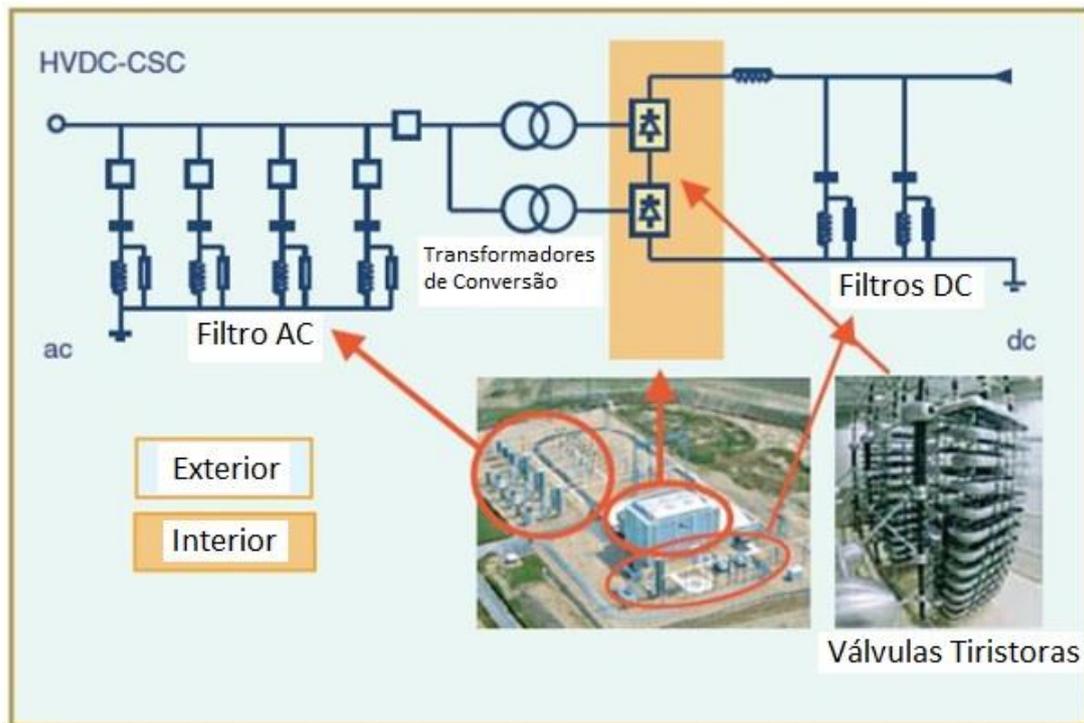
Sood (2004) aponta que os primeiros sistemas de comutação eram feitos por válvulas de mercúrio, com comutação pela linha, e persistiu até meados de 1970. Contudo com o advento das chaves à tiristores, a auto comutação ficou mais atrativa, iniciando assim com os comutadores à capacitor (CCC) e mais tarde com os Conversores Auto-Comutados (SCC).

3.4.1 Conversores CSC

A conversão CSC utiliza a comutação por linha com válvulas tiristorizadas. Necessita de uma fonte de tensão síncrona como condição inicial de operação. Este tipo de conversor tem como premissa o uso de transformadores para variação do nível de tensão retornando para a modelagem em corrente alternada, juntamente com a seletividade de *tap's* para ajuste do nível de tensão presente ao longo da linha. Como topologia do circuito, baseia se em um retificador controlado à seis pulsos, chamado também de ponte de *Graetz*² e apresentado na figura 16. Segundo Bahrman e Johnson (2007), cada válvula integrante do conjunto é formada por um número de chaves tiristoras em função da potência desejada a ser fornecida.

² Ponte de Graetz: esquema de ligação de semicondutores que visa obter o efeito de retificação em onda completa de uma onda senoidal, passando assim de um sistema alternado para um sistema contínuo.

Figura 16 – Esquema de um conversor do tipo CSC

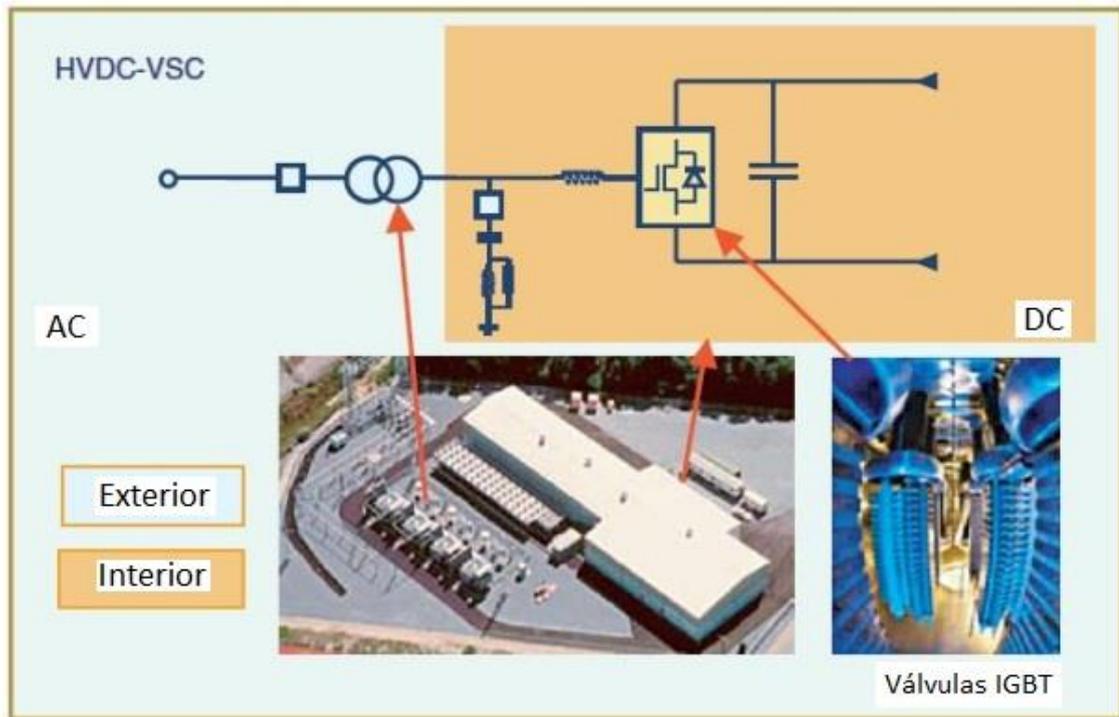


FONTE: (BAHRMAN E JOHNSON, 2007)

3.4.2 Conversores VSC

Os conversores VSC operam como fonte de tensão, controlados por um chaveamento PWM (*Pulse Width Modulation*). Segundo Bahrman, Edris e Harley (1999), este tipo de conversor permite a condução de fluxo bidirecional de potência, não necessita de transformadores elevadores para adequação do nível de tensão após a entrada da etapa de conversão da forma de onda, não necessita de dispositivos como defasadores para abertura angular entre carga e geração para a operação do conversor, como pode ser visto na figura 17.

Figura 17 – Esquema de um conversor do tipo VSC



FONTE: (BAHRMAN E JOHNSON, 2007)

Agelidis, Demitirdes e Flourentzou (2006), afirmam que os conversores do tipo VSC, são baseados em chaves auto-comutadas, como GBTs ou IGBTs, permitindo facilmente o momento do disparo quanto do corte, e assim obtendo as seguintes vantagens:

- Acionamento independente do estado dos fluxos de potência ativa e reativa;
- Qualidade na forma da onda gerada, com baixa distorção;
- Dispensa a utilização de transformadores especiais para variação do nível de tensão;
- Imune a distúrbios da rede para operação das válvulas;
- Aplicável a sistemas fracos, com baixo nível de curto-circuito.

Ainda, é analisado o controle de reativos que este tipo de conversor consegue operar de maneira independente do nível de tensão utilizado na transmissão em corrente contínua. Outro ponto é que devido à auto-comutação, possibilita o chamado *black start*, a fim de garantir o nível de tensão no barramento CA operando como um gerador síncrono para o sistema nessas condições.

Sood (2004) aponta na Tabela 1 um comparativo entre os conversores VSC e conversores CSC:

Tabela 1 – Comparativos entre conversores CSC e VSC

CSC	VSC
Corrente unidirecional	Tensão unidirecional
O Fluxo de Potência muda com a polaridade da tensão	O Fluxo de Potência muda com a polaridade da corrente
Corrente constante – Característica Indutiva (L)	Tensão constante – Característica Capacitiva (C)
Filtro Indutivo (lado CC)	Filtro Capacitivo (lado CC)
Contribuições do HVDC para as correntes de falta podem ser controladas (Controle central) e amortecidas (Reatores)	Contribuições do HVDC para as correntes de falta não podem ser controladas pelo controle (podendo, inclusive, aumentá-las pela descarga dos capacitores)
Requer reativos do sistema C.A.	Pode fornecer ou absorver reativos do sistema C.A.
Requer grandes filtros para a eliminação harmônica do lado C.A.	Requer pequenos filtros para a eliminação harmônica do lado C.A.
Comutação Natural	Auto-comutados
Chaveamento na frequência da rede	Permite a utilização de chaveamentos em alta frequência
Pequenas perdas de chaveamento	Grandes perdas de chaveamento (utiliza-se a alta frequência)
550 MW por conversor (até 600 kV)	200 MW por conversor (até 150 kV)
Requer que o sistema a ser conectado ao inversor não seja “fraco”	Pode ser conectado em qualquer sistema, inclusive nos que não possuem geradores

FONTE: (SOOD, 2004)

Rudervall, Charpentier e Sharma (2000), elaboraram uma análise onde fica exposto uma relação entre o tipo de conversor utilizar, em função da aplicação do comprimento que esta linha tem a percorrer, apresentado na Tabela 2:

Tabela 2 – Comparativos entre conversores por tipo e aplicação

Visão geral de conversores HVDC					
	Longa distância de transmissão terrestre	Longa distância de transmissão marítima	Interconexão de redes assíncronas	Conexão à rede de Fazendas Eólicas	Alimentação de pequenas cargas isoladas
HVDC por Comutação Natural com Linhas OH	X		X		
HVDC por Comutação Natural com cabos marítimos		X	X		
Conversores por Comutação à Capacitores (CCC) em Back-to-Back			X		
Conversores por Comutação à Capacitores (CCC) com Linhas OH	X		X		
Conversores por Comutação à Capacitores (CCC) com cabos marítimos		X	X		
Conversores VSC em Back-to-Back			X	X	
Conversores VSC com cabos terrestres ou marítimos	X	X	X	X	X

FONTE: (RUDERVALL, CHARPENTIER E SHARMA, 2000)

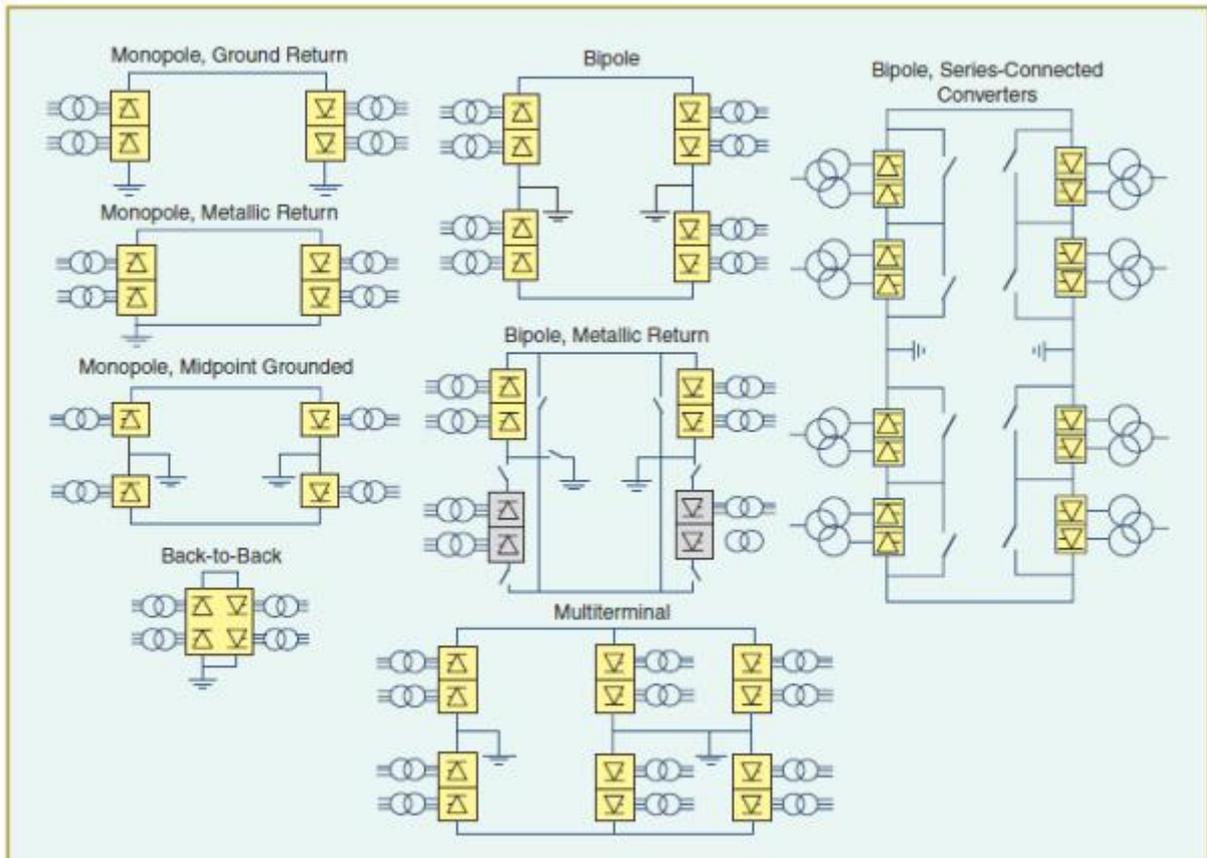
3.5 CONFIGURAÇÕES DE CONVERSORES PARA HVDC

De acordo com Kundur (1994), Bahrman e Johnson (2007), os links HVDC podem ser classificados da seguinte maneira:

- Sistemas Monopolares;
- Sistemas Bipolares;
- Sistemas Homopolares;
- Sistemas *Back-to-back*;
- Sistemas Multiterminais.

Cada configuração é aplicada à uma necessidade específica e diferente entre si, onde aproveite assim da vantagem própria que cada uma forneça. A Figura 18, é apresentado um breve esquemático de cada tipo de configuração citada.

Figura 18 – Diagrama da topologia das principais configurações HVDC



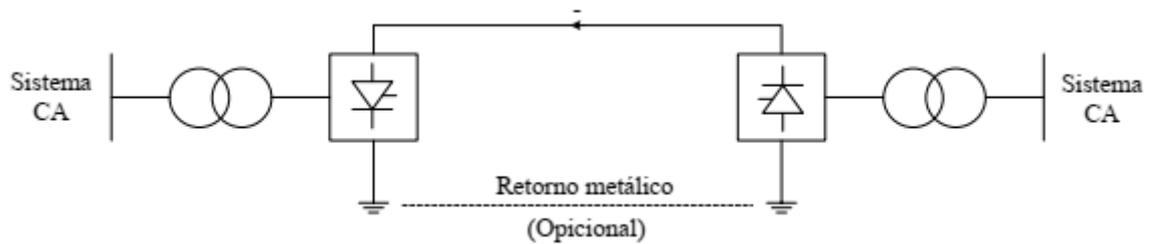
FONTE: (BAHRMAN E JOHNSON, 2007)

Nos próximos tópicos, é apresentado um pouco mais sobre cada configuração anteriormente citada.

3.5.1 Sistemas HVDC Monopolares

Esta configuração contempla apenas um condutor CC, contando com o retorno do circuito via terra ou água na maioria dos casos, caso contrário, conta um condutor dedicado. Kundur (1994), descreve que para esta configuração, na presença de uma falta junto a carga, o retificador fica automaticamente isolado do sistema devido ao posicionamento das válvulas, que ficam inversamente polarizadas, bloqueando então a passagem de corrente, e assim, apenas o circuito conversor é capaz de alimentar a falta. Na Figura 19, apresenta-se um esquemático da configuração monopolar.

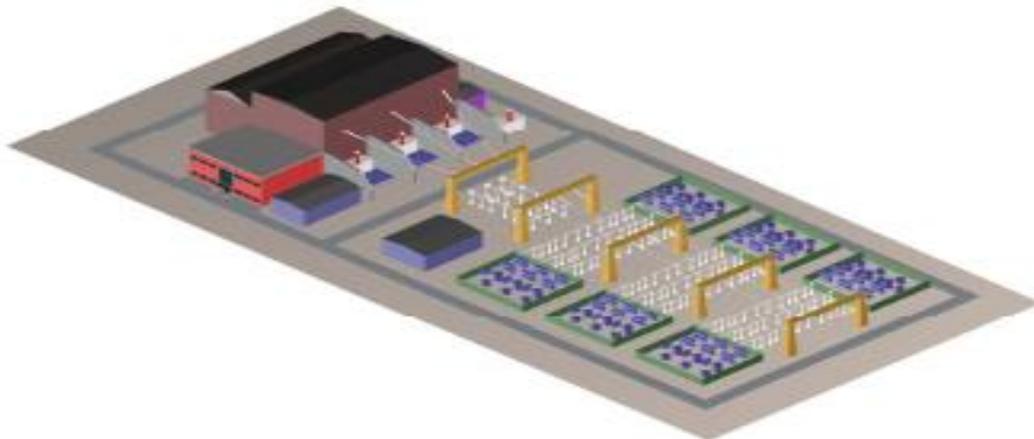
Figura 19 – Esquema de configuração Monopolar HVDC



FONTE: (VASCONCELOS, 2014)

Kirby (2012), reforça que este tipo de configuração, pode tanto operar utilizando uma transmissão entre duas estações, através de cabos marítimos ou linhas aéreas. Na Figura 20, pode-se analisar um esquema de uma estação HVDC Monopolar.

Figura 20 – Esquema espacial de uma configuração de estação Monopolar HVDC

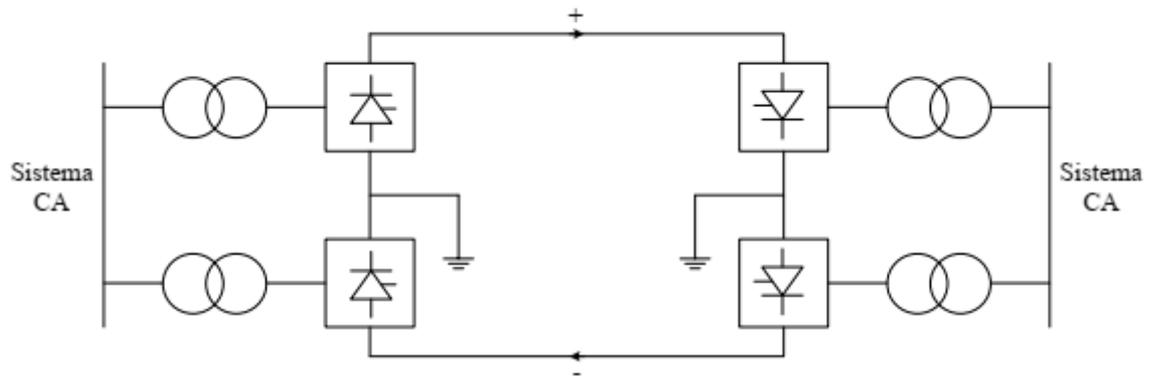


FONTE: (KIRBY, 2012)

3.5.2 Sistemas HVDC Bipolares

Esta configuração é elaborada por dois condutores, um de polaridade positiva e outro de polaridade negativa. O conversor desta configuração é feito pela associação em série de dois conversores, similar a uma fonte simétrica. Segundo Vasconcelos (2014), este tipo de configuração permite que o sistema opere de maneira isolada, com apenas um dos condutores, e então com um circuito de conversores, algo muito vantajoso no caso de uma falta no elo CC. Na Figura 21, apresenta-se um esquema simplificado da configuração bipolar.

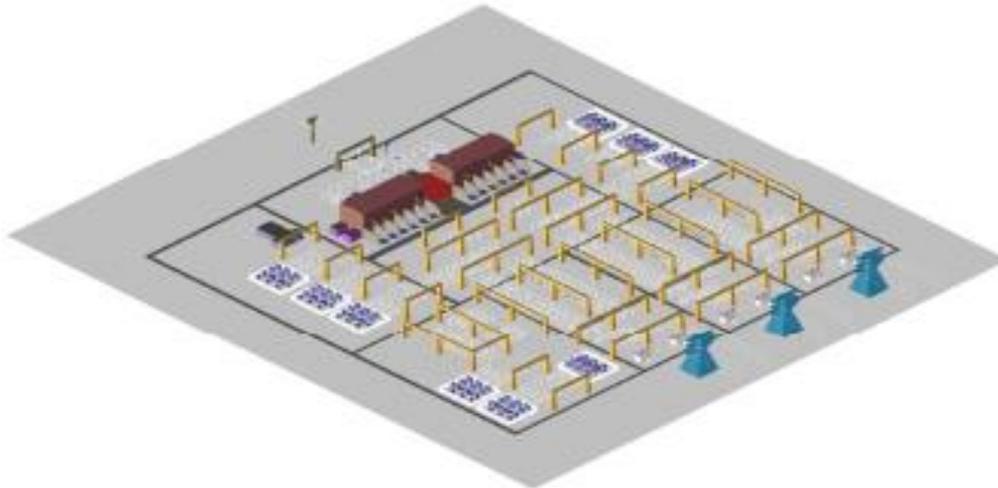
Figura 21 – Esquema de configuração Bipolar HVDC



FONTE: (VASCONCELOS, 2014)

A configuração bipolar é a mais utilizada por minimizar as perdas técnicas do sistema, conforme analisado nos projetos de UHE Itaipu, UHE Belo Monte, e UHE Giral e Santo Antônio; na Figura 22, Kirby (2012), apresenta um breve esquema de uma estação conversora HVDC Bipolar.

Figura 22 – Esquema espacial de uma configuração de estação Bipolar HVDC



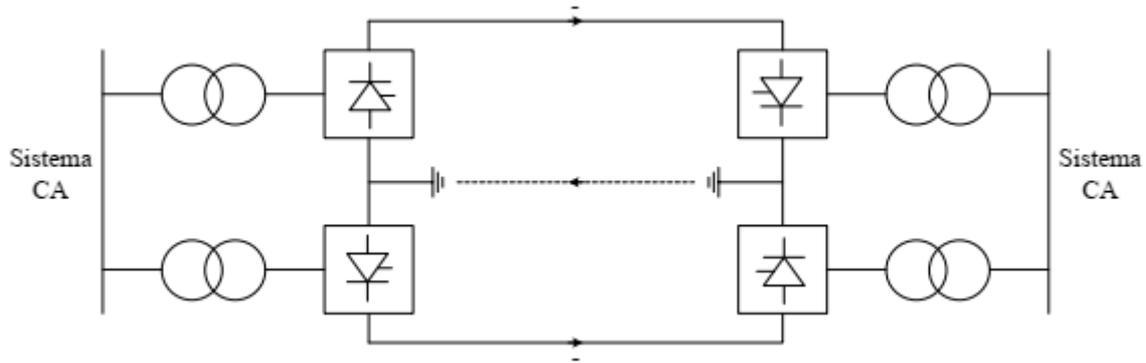
FONTE: (KIRBY, 2012)

3.5.3 Sistemas HVDC Homopolares

Kundur (1994) mostra que a configuração homopolar consiste na utilização de vários condutores da mesma polaridade como meio de transporte do fluxo de carga, e preferencialmente o retorno é feito por terra. Este tipo de configuração permite que na presença de uma falha, o conversor assuma normalmente o fluxo oriundo dos condutores restantes. Vale apontar que o retorno por terra pode ser viável apenas em alguns casos, quando estes não estejam próximos a tubulações metálicas por exemplo, onde a prática desencadearia um efeito

de junta catódica, levando à corrosão do material, em cenários como estes é recomendado o uso de condutores isolados. Na Figura 23, pode se analisar um breve esquema da configuração homopolar.

Figura 23 – Esquema de configuração Homopolar HVDC

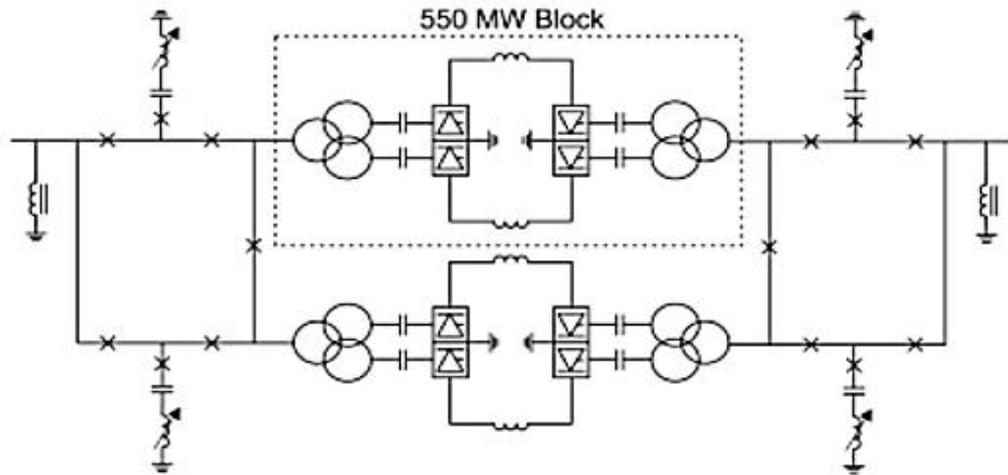


FONTE: (adaptado de KUNDUR, 1994)

3.5.4 Sistemas HVDC *Back-to-back*

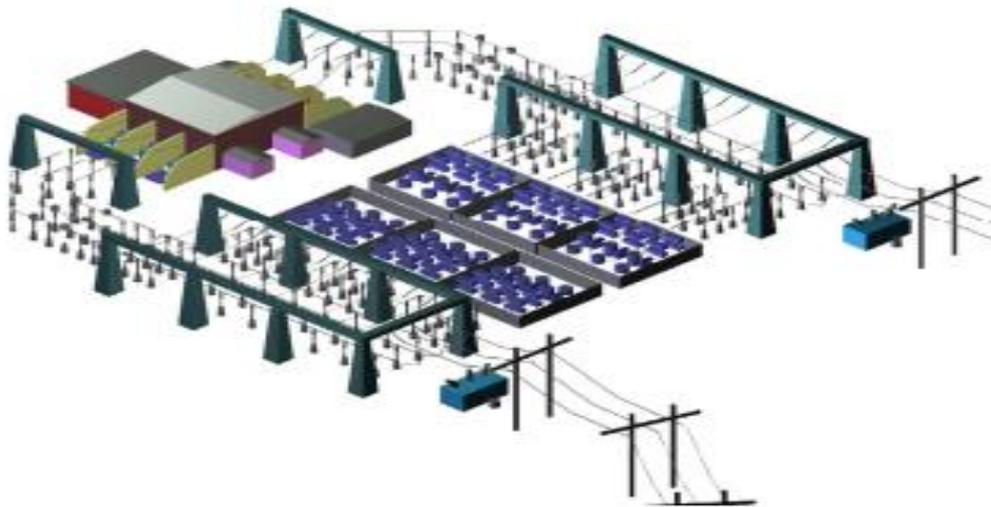
Ainda segundo Kundur (1994), juntamente com Ottoson e Kjellin (2001), os sistemas em configuração *back-to-back*, são sistemas onde o módulo retificador fica próximo do módulo conversor, dispensando assim o elo CC de transmissão. Um ponto interessante é que na conexão entre os módulos, geralmente são aplicados reatores de alta potência, a fim de reduzir o *ripple* de corrente gerado naquele pequeno elo CC. Desta maneira, o sistema pode operar em nível de tensão reduzido, e com corrente elevada, sendo o oposto de configurações utilizadas na transmissão. São comumente aplicados em sistemas de conversão assíncrona, a fim de efetuar a interligação entre estes. Na Figura 24, apresenta-se um breve esquemático do conversor *back-to-back* existente da estação da Garabi, e na Figura 25, pode-se analisar um esquemático espacial de uma estação *back-to-back*.

Figura 24 – Esquema de configuração *Back-to-Back* HVDC



FONTE: (FERREIRA, 2017)

Figura 25 – Esquema espacial de uma configuração de estação *Back-to-Back* HVDC

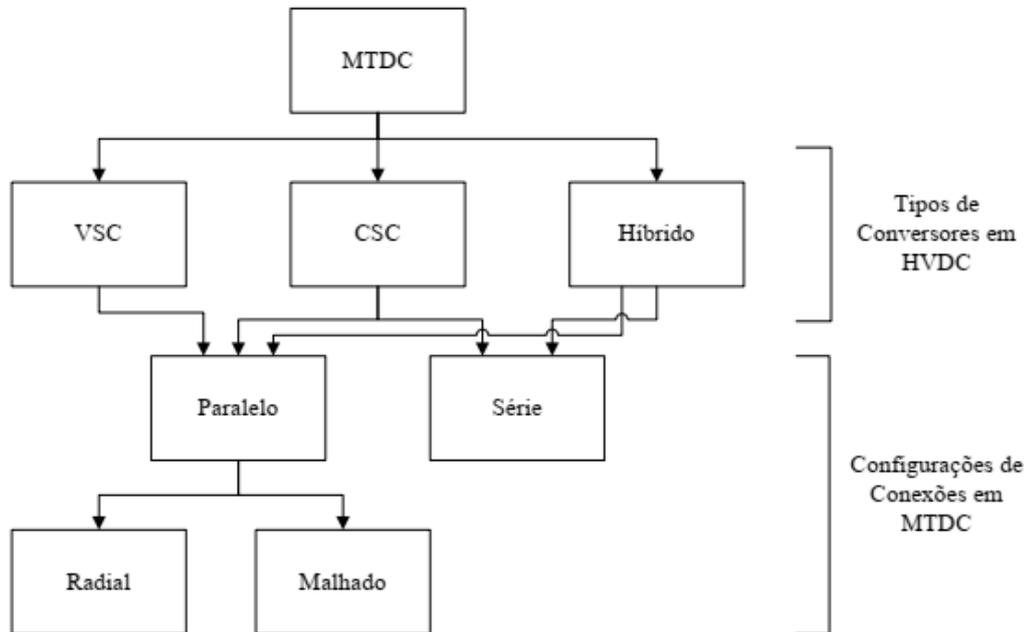


FONTE: (KIRBY, 2012)

3.5.5 Sistemas HVDC Multiterminais

De acordo com Kundur (1994), a configuração HVDC com multiterminais, iniciou-se com o objetivo de permitir operar com mais de dois terminais, dando surgimento aos sistemas Multiterminais (*Multi-Terminal Direct Current - MTDC*). O primeiro sistema a utilizar esta configuração e ainda em operação é o de Sardenha-Córsega-Itália, advindo de uma expansão do sistema de transmissão em corrente contínua Sardenha-Itália, de 1967, que recebeu um terceiro terminal em 1991. Os sistemas multiterminais devem ser viabilizados em função do tipo de conversor existente para tal, conforme pode se analisar na Figura 26.

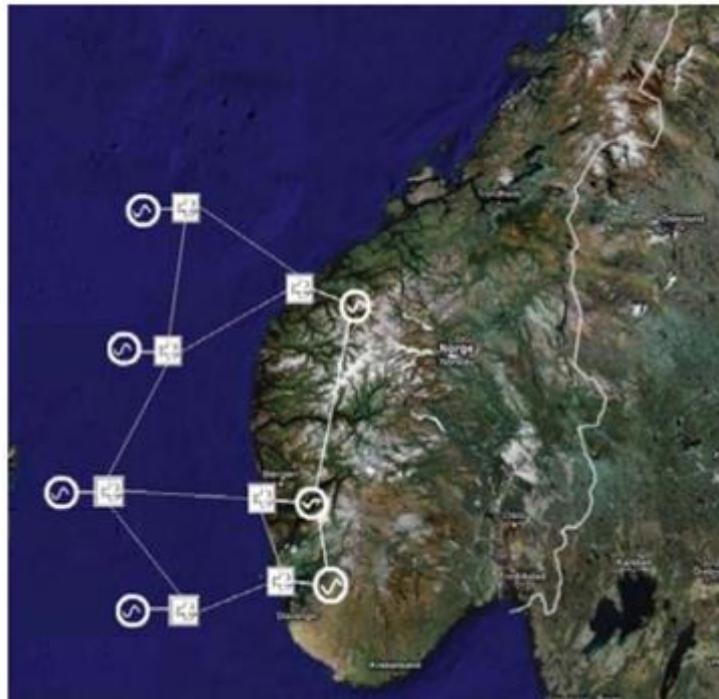
Figura 26 – Classificação dos sistemas MTDC



FONTE: (SOUSA, 2012)

Sousa (2012), ainda apresenta para fins de conhecimento, um cenário exemplar da utilização da configuração MTDC, que seriam fazendas eólicas *offshore*, conforme na Figura 27.

Figura 27 – Exemplo de aplicação de um sistema MTDC



FONTE: (adaptado de SOUSA, 2012)

Conforme Kundur (1994), os tipos de configurações multiterminais HVDC são:

- Configuração Paralela à tensão constante;
- Configuração em Série à Corrente Constante.

Dentre todas as configurações, a multiterminais é a mais promissora. Um dos principais incentivos para este arranjo, é a aplicação em Fazendas Eólicas *Offshore* e a interligação destas com plataformas petrolíferas ou de gás. Devido ao maior potencial estar afastado da costa, a utilização dos sistemas HVDC representa uma das melhores soluções para este caso. É comum plataformas petrolíferas ou de gás, terem sua geração de energia *on shore*, com o transporte energético através de linhas de transmissão CC, como o caso da plataforma Valhall no mar do Norte, que pode ser visto na Figura 28.

Figura 28 – Plataforma Valhall no Mar do Norte, alimentada por HVDC



FONTE: (SOUSA, 2012)

Com o elevado crescimento da busca por fontes renováveis de energia, a geração eólica é uma das mais maduras e assim, uma das que mais evoluem Segundo Sousa (2012), as fontes eólicas terão um grande aumento de sua participação na matriz energética ao redor de todo mundo, principalmente na Europa. Nas Figuras 29 e 30, pode-se analisar uma perspectiva da presença das fontes eólicas no cenário europeu pelos próximos anos.

tecnologia para transmissão em corrente contínua é capaz de ser aplicadas em diversos cenários, permitindo transportes de cargas onde antes não era viável. No próximo tópico, serão abordados quais são os possíveis próximos passos para a tecnologia HVDC e assim, como esta tem ganhado mais espaço no mercado moderno.

4. HORIZONTES PARA A TECNOLOGIA HVDC

Conforme apresentado nas seções anteriores, a tecnologia HVDC vêm crescendo desde a sua criação em meados de 1950, com mais de cinquenta anos em uso comercial, a transmissão em corrente contínua, tem mostrado ser uma das melhores técnicas para eficiência energética de sistemas de potência.

A melhor solução provida dos sistemas HVDC foi permitir o transporte de blocos de energia de grande porte por longas distâncias, ou ainda a interligação entre sistemas anteriormente incompatíveis entre si, algo que nunca havia sido feito antes pela engenharia moderna. Com a evolução na eletrônica de potência, ou novas configurações, os sistemas HVDC têm apresentando sua capacidade de atuar em etapas do setor elétrico anteriormente dominadas pelos sistemas em corrente alternada.

Esta seção apresenta alguns possíveis usos para os sistemas em corrente contínua de transmissão HVDC.

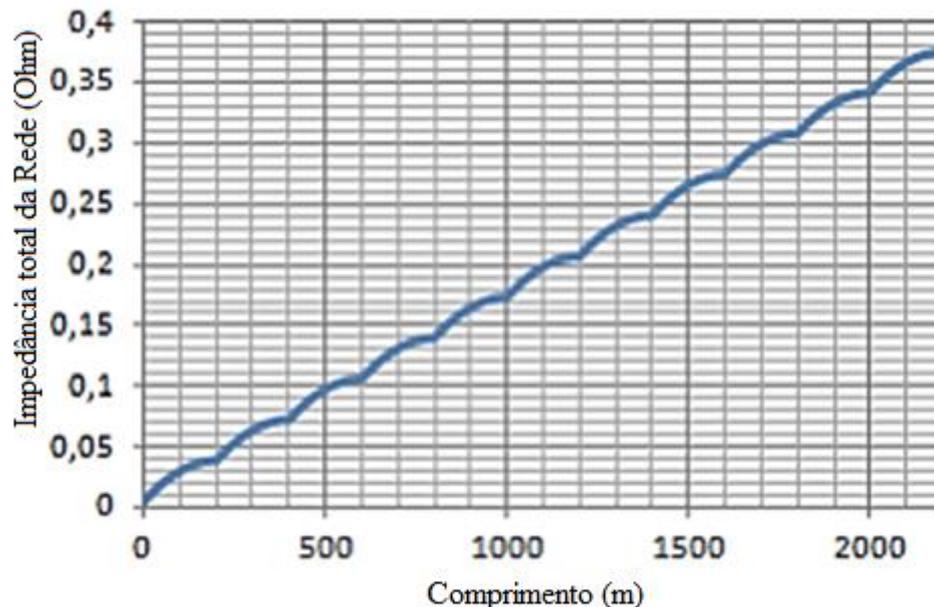
4.1 SISTEMAS EM CORRENTE CONTÍNUA PRÓXIMOS A DISTRIBUIÇÃO

Desde a chamada “Guerra das Correntes”, têm-se como principal vantagem dos sistemas em corrente alternada a fácil variação do nível de tensão a partir do uso dos transformadores eletromagnéticos, (MARCHIORO, 2014). Assim, os sistemas de distribuição foram dominados pelos sistemas em corrente alternada, devido à eficiência e custo de um transformador de potência ainda ser consideravelmente mais atrativo à um conversor estático, análogo para mesma atividade em um sistema em corrente contínua.

Contudo, pode-se afirmar que os sistemas CC vêm sendo utilizados dentro dos sistemas de distribuição como uma opção de redução de perdas e efeitos não desejados causados pela corrente alternada. O trabalho de Stana e Brazis (2017) apresenta um estudo sobre a redução de perdas e caracterização em um sistema de alimentação CC em média tensão para um sistema de transporte público elétrico, os chamados Trólebus. Neste trabalho, intitulado “*Trolleybus Motion Simulation by Dealing with Overhead DC Network Energy Transmission Losses*”, pode-

se analisar diversas simulações e ensaios. Os resultados mostram uma perda variável, em função da variação de distância entre carga e subestação, conectadas através de um elo CC. Na Figura 31, pode-se analisar um diagrama que aponta a variação da impedância do sistema em função da distância.

Figura 31 – Diagrama de variação da impedância pela distância



FONTE: (adaptado de SOUSA, 2012)

A figura confirma a questão da variação da impedância de um ramal, onde se alimentado em corrente contínua, essa impedância tende a diminuir, pela redução das perdas por componentes reativas e harmônicas, e assim redução de perdas técnicas.

Outro trabalho, desenvolvido por Melo et al. (2010) propõem um sistema aplicado para Trólebus, que traz a possibilidade de operar tanto dentro de sistemas CC quanto em sistemas CA. A abordagem de flexibilidade traz consigo a opção de operar em cenários híbridos com os sistemas de condução comumente utilizados.

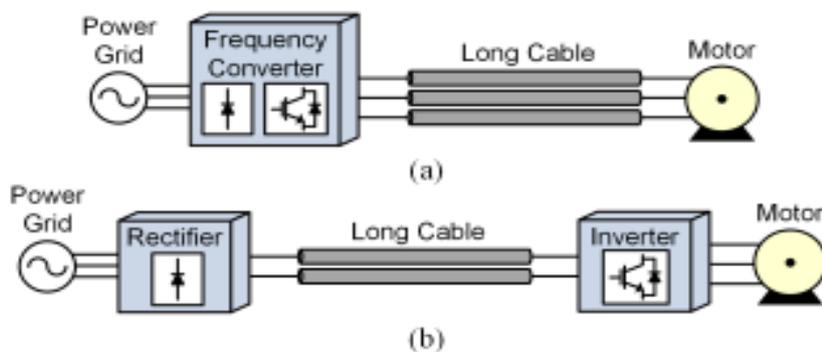
4.2 SISTEMAS EM CORRENTE CONTÍNUA PRÓXIMO A CARGA

Um dos grandes equipamentos que ainda dependiam do sistema em corrente alternada, era o motor de indução, devido ao seu alto rendimento, baixa manutenção, fácil acionamento (MARCHIORO, 2014). Contudo, após a evolução da eletrônica de potência, e a utilização dos conversores de frequência, torna-se possível que a fonte original de alimentação de uma

máquina deste tipo não necessitaria mais ser em corrente alternada.

De Paula e de Paula (2015), apresentam uma proposta de promover a alimentação de um motor de indução a partir de um conversor de frequência, contudo, com os módulos conversor e retificador distantes entre si, conectado via condutores. Tal técnica reduz as perdas geradas na instalação, além de efeitos como surtos de tensão gerados por efeitos de reflexão oriundos do chaveamento PWM. Na Figura 32, pode-se analisar um breve esquema comparando o acionamento convencional, e assim o acionamento proposto.

Figura 32 – Esquema de acionamentos convencionais e ofertados

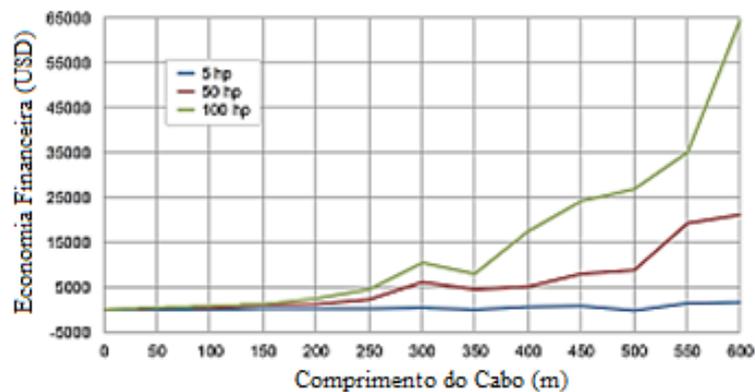


FONTE: (DE PAULA E DE PAULA, 2010)

Este tipo de estudo demonstra os benefícios que a tecnologia HVDC pode ofertar como solução próxima à carga, reduzindo perdas nos sistemas, otimizando o transporte de potência, elevando o nível de gestão de perdas dentro de uma instalação, entre outras vantagens.

Na Figura 33, de Paula e de Paula (2017) exibem ainda um breve comparativo apontando a variação do custo de cobre utilizado em função da redução estipulado para este (ex. Atenuação das perdas).

Figura 33 – Relação da redução de cobre pelo custo



FONTE: (adaptado de DE PAULA E DE PAULA, 2010)

Assim, elaborar sistemas em corrente contínua que operem próximos a carga, se mostram algo viável, devido ao ganho gerado tanto para a questão financeira, quanto técnica. Com os avanços de equipamentos domésticos e comerciais, cada vez mais os sistemas de alimentação são circuitos chaveados, onde operar totalmente em modelo nativo CC, minimizaria as perdas existentes em um modelo CA.

4.3 SISTEMAS EM CORRENTE CONTÍNUA EM APLICAÇÕES ESPECÍFICAS

Outra aplicação dos sistemas HVDC é a transmissão submarina, tendo em vista a redução das perdas geradas por efeito capacitivo em sistemas CA (FERREIRA,2017).

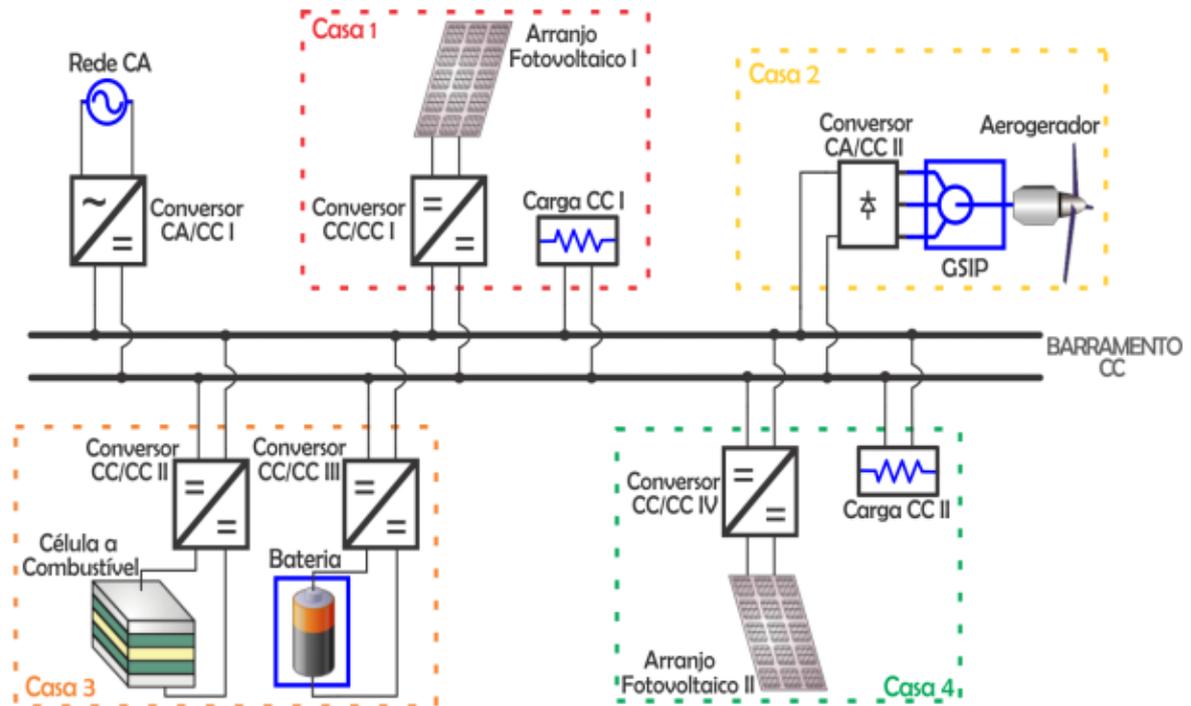
Como já citado, as Fazendas de Geração Eólica *Offshore*, são uma das principais aplicações dos sistemas HVDC, se beneficiando das baixas perdas, do alto controle de fluxo energético e de reativos, e ainda da flexibilidade do sistema, como uso da água como retorno do sistema, de maneira permanente ou na presença de faltas. Esta técnica é baseada no fato de que uma transmissão em corrente contínua, seja bipolo simétrico ou não, é possível que em caso de falha com um dos ramais da linha, o condutor de aterramento seja utilizado como condutor de carga, seja um cabo, ou a água no caso de linhas marítimas.

No trabalho desenvolvido por Deng e Chen (2013) é abordada a utilização de sistemas HVDC como forma de escoamento de toda a produção das Unidades de Geração Eólica, nesse cenário o mais comum é o emprego da tecnologia HVAC já no ponto de entrega *onshore*.

Este tipo de estudo aponta como o uso dos sistemas HVDC em especial com uso de fontes de energia renováveis, tais como eólicas ou até solares, gerações já em corrente contínua.

Outra praticável aplicação para os sistemas HVDC é sistema de microrrede em corrente contínua para fontes renováveis de energia, devido a maior parte destas terem em seu processo de geração feito em corrente contínua, seria de válido interesse que não fosse necessário retornar a energia para forma CA, onde teria-se um barramento CC, comum entre todas as fontes. E assim a conversão seria feita de maneira dedicada à um equipamento que trabalhe em corrente alternada, ou de maneira geral e única para conexão com o sistema de distribuição. Conforme Kassar (2018), que propõe um modelo de microrrede em corrente contínua para viabilização de fontes renováveis de baixo custo, uma solução de grande utilidade para os sistemas de geração distribuída, que têm como principal obstáculo no projeto, o custo dos elementos inversores de frequência. Na Figura 34, é apresentado um possível esquema para o modelo de microrrede proposto.

Figura 34 – Modelo de Microrrede em corrente contínua



FONTE: (KASSAR, 2018)

As principais fontes renováveis de energia, em especial solares ou eólicas, são geradas em corrente contínua.

Devido ao modelo de transmissão e distribuição elétrica brasileiro, sistemas como os de GD, que visam um baixo investimento para sua viabilidade, sofrem com custos elevados para equipamentos conversores CC-CA. De acordo com Faria, Silva e Silva (2017), o Governo Federal apresenta alguns incentivos para proporcionar um cenário atrativo para então alavancar os sistemas de geração distribuída ou de geração isolada com fontes renováveis de energia. Após PRODEEM (Programa de Desenvolvimento Energético de Estados e Municípios), têm-se os primeiros avanços significativos da entrada de geração solar no sistema brasileiro, onde de 1996 a 2002 foram instalados cerca de 5 MWp em aproximadamente 7000 comunidades. Em 2004, o PRODEEM é incorporado ao programa “Luz para Todos”, onde o objetivo era proporcionar fornecimento de energia elétrica onde ainda não houvesse. De 2004 a 2009, foram instalados cerca de 2046 sistemas fotovoltaicos através do programa (FARIA, SILVA e SILVA, 2017).

4.4 ANÁLISE TÉCNICA E ECONÔMICA PARA SISTEMAS HVDC

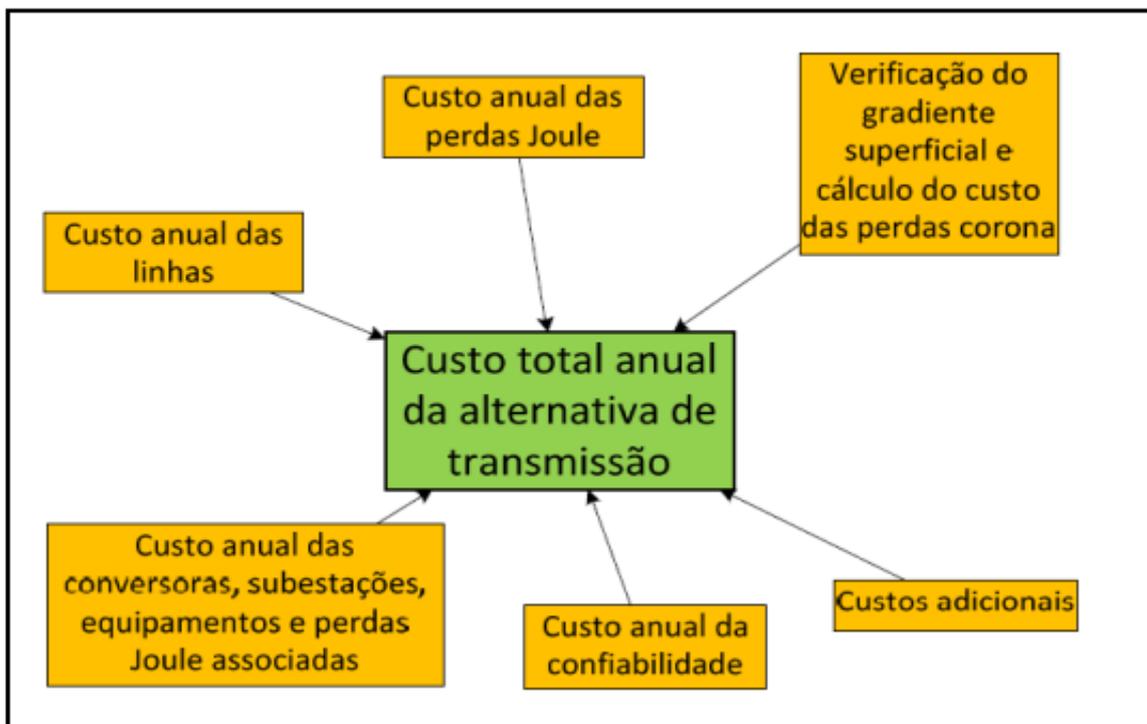
Em uma análise de viabilidade, leva-se em consideração tanto condições técnicas como econômicas, não havendo forma de analisar de maneira separadas. Por isso existem inúmeras diferenças entre os sistemas, onde estas definem quão viável cada sistema pode ser em função da necessidade.

4.4.1 ANÁLISE ECONÔMICA

Para Machioro (2014), a principal diferença entre sistemas HVDC e HVAC se dá pela análise econômica, deixando a se considerar os argumentos técnicos como condições, e assim formando uma opinião meramente econômica, capaz de discernir uma seleção entre CA ou CC.

Segundo Santos (2012), os custos de linhas são definidos por diversos fatores, como: custos com equipamentos, projetos, serviços especializados de alto valor agregado, indenizações para faixa de servidão, dentre outros. Sendo assim, fica claro que a análise econômica é uma variante de projeto a projeto. Há a necessidade de uma pré-análise, para que se defina valores, e a partir desses, tome-se as decisões. Na Figura 35, está ilustrada a relação para a composição destes custos.

Figura 35 – Relação entre custos para um sistema de transmissão

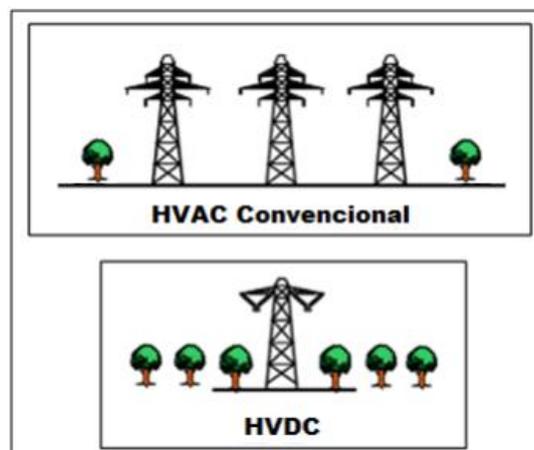


FONTE: (SANTOS, 2012)

4.4.1.1 Comparativo entre custos de linhas de transmissão

Para Machioro (2014), e Sood (2004), desconsiderando as estações conversoras e retificadoras, os custos das linhas HVDC são inferiores aos de linhas HVAC, em função do projeto estrutural ser de menor esforço, e em função da redução de condutores dimensionado em uma transmissão CC; algo que também reduz o porte da torre, e assim sua ocupação e sua faixa de servidão necessária. Na Figura 36, é ilustrado a relação de porte entre as torres HVDC com as torres de uma transmissão HVAC.

Figura 36 – Relação entre portes de torres de transmissão



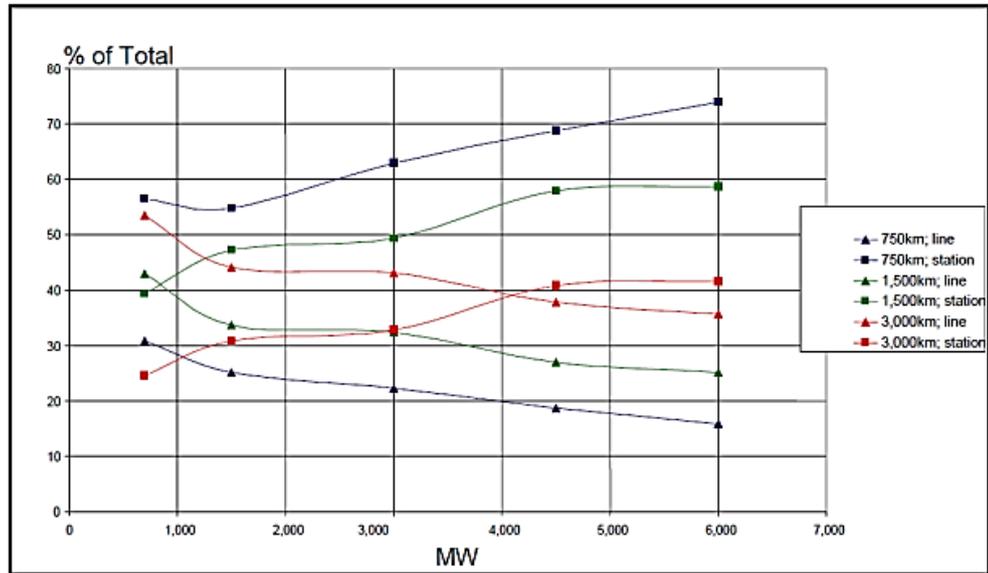
FONTE: (adaptado de MACHIORO, 2014)

Esta comparação é feita considerando mesma potência transferida e mesmo nível de tensão. Assim, é evidente a redução no impacto ambiental que esta causa e redução nos custos construtivos

Desta maneira, deixa claro que o custo está diretamente atrelado a eficiência dos sistemas, às perdas técnicas³ desenvolvidas por esse sistema. Conforme os autores Jardini e Nolasco (2008), existe uma relação entre os custos da transmissão e a extensão desta que está representado na Figura 37.

³ Perdas técnicas: são consideradas as perdas causadas por efeitos físicos elétricos, já considerados em seu projeto e planejamento.

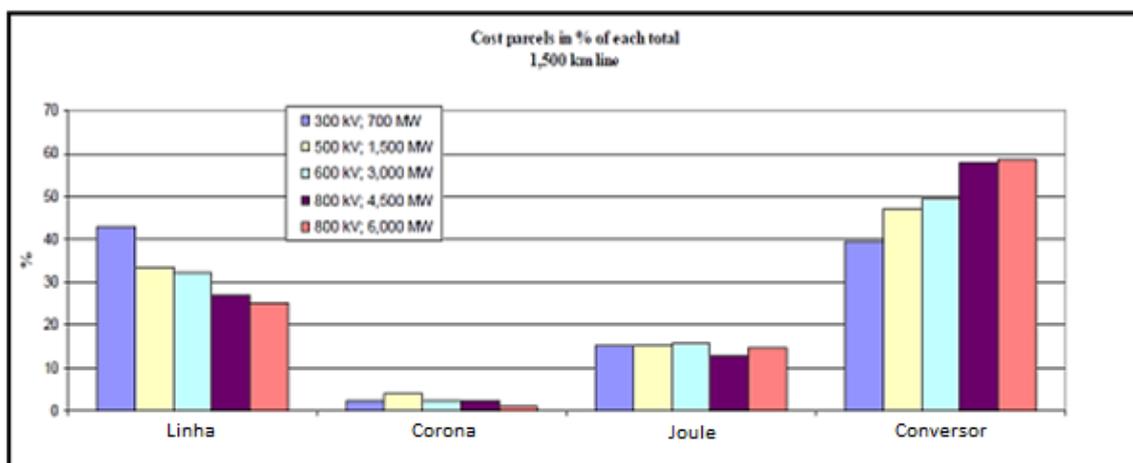
Figura 37 – Relação custo por distância no sistema HVDC



FONTE: (JARDINI E NOLASCO, 2008)

Pode-se observar que o custo da linha e do conversor sempre foram a maior parcela do projeto, e que apenas na classe de tensão de 300 kV com 700 MW, a linha custaria mais que o conversor, a partir desta, o custo da linha permanece com pouca variação perante o custo das estações conversoras. Jardim e Nolasco (2008), ainda apresentam um comparativo somente entre os custos da linha com os das unidades conversoras em função da variação da classe de tensão utilizada. Desta maneira, pode-se concluir que o custo da linha é constante enquanto as estações conversoras variam de acordo com a alteração do nível de tensão desejado, e da potência demandada. Tal comparação pode ser analisada na Figura 38.

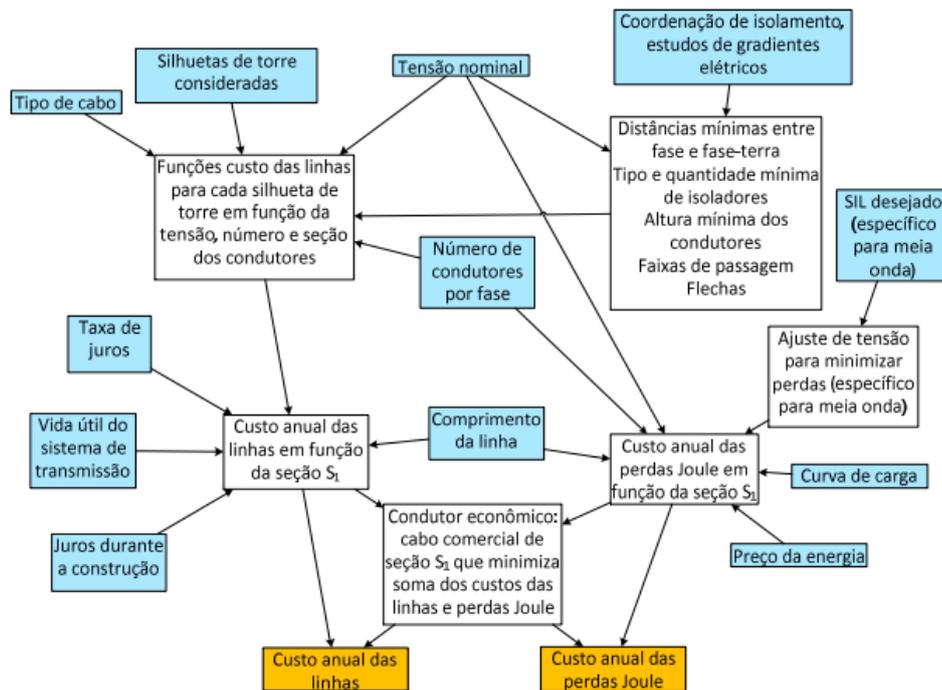
Figura 38 – Relação entre custos linha e estações conversoras por classe de tensão



FONTE: (JARDINI E NOLASCO, 2008)

Para Santos (2012), os custos de linhas de transmissão devem ser projeções anuais, os quais, definidos com base em suas perdas (eficiência do sistema) e seus custos operacionais, apresentam um panorama com os fatores econômicos de um projeto de transmissão energética. Tal afirmação, está apresentada na Figura 39.

Figura 39 – Análise de composição para um sistema de transmissão

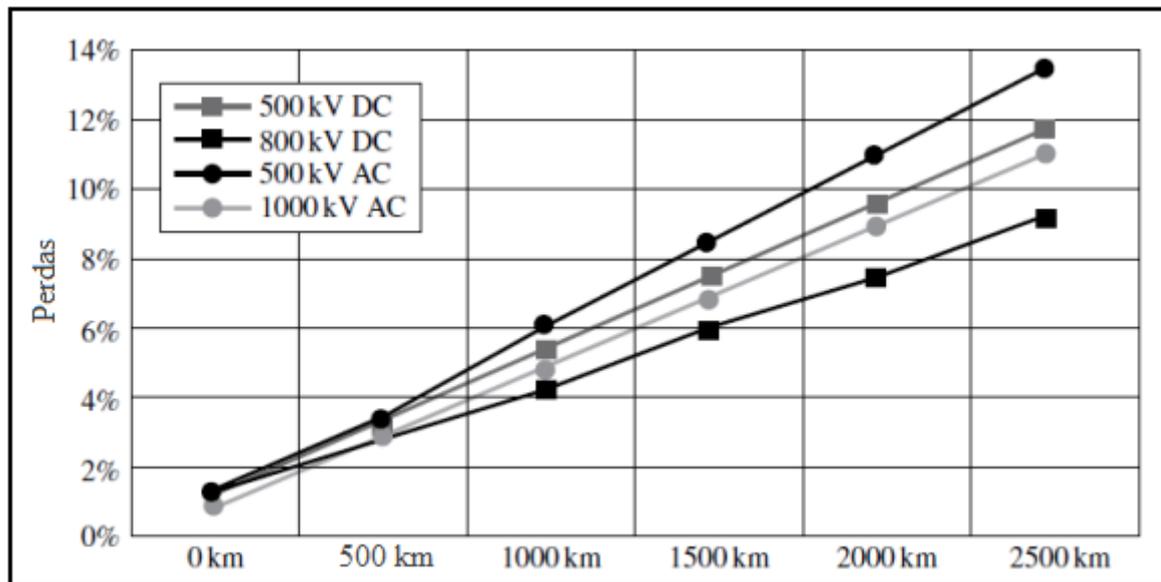


FONTE: (SANTOS, 2012)

Pode se observar que os principais fatores determinantes para toda a composição são: Tensão Nominal, Número de condutores por fase, e Comprimento da Linha. A partir desses pontos, todos os outros integrantes do cálculo, giram em função destes. Uma análise como esta definem questões como: *payback*, aporte financeiro inicial, e nível de complexidade do projeto.

Arrillaga, Liu e Watson (2007), afirmam que os custos das linhas HVDC são consideravelmente inferiores comparados ao sistema HVAC, sendo ampliados em uma relação de classe de tensão por distância percorrida pela transmissão, algo que completa o ponto de vista de Machioro (2014) e Sood (2004), onde conforme citado no início da sessão 4.4.1.1, os custos de uma linha HVDC são reduzidos em função das redução de estruturas e condutores. Essa análise pode ser observada na Figura 40.

Figura 40 – Relação entre perdas por classe de tensão e distância percorrida

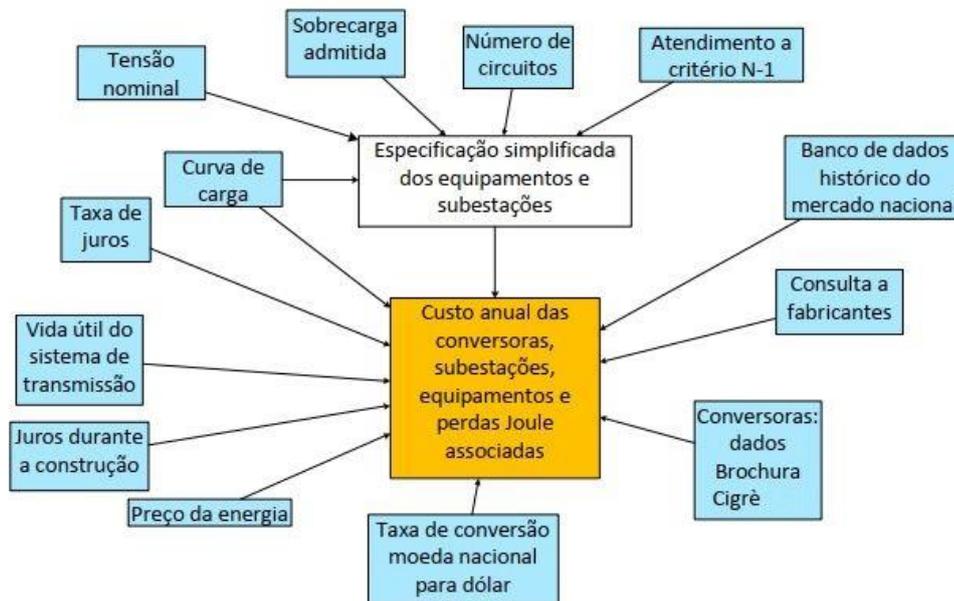


FONTE: (adaptado de ARRILLAGA, LIU E WATSON, 2007)

Nota-se na figura que para os níveis de tensão de 500 kV e 800 kV a partir de 500 km, as perdas geradas pelo sistema CC são inferiores ao do sistema CA, ficando mais acentuado com a elevação da tensão de operação, chegando a atingir uma diferença em torno de 2% para uma mesma classe de tensão. Porém, tem que se analisar a condição de um sistema HVDC, que demanda um alto investimento em estações conversoras e em mão de obra especializada para o operar todo um sistema de controle e proteção complexo necessário em transmissões HVDC. Assim, os sistemas CC possuem um custo elevado nos terminais da transmissão, enquanto esse custo é reduzido na linha se comparada ao sistema CA.

De acordo com Santos (2012), também é possível efetuar uma análise de custo focando apenas na eficiência das unidades retificadoras e conversoras do sistema, onde estão localizadas as maiores perdas do sistema, tanto quanto onde estão os maiores investimentos do mesmo. Na Figura 41, está a representação um diagrama desta análise relacionada apenas às subestações conversoras e retificadoras.

Figura 41 – Análise da composição de custo para unidades conversoras e retificadoras

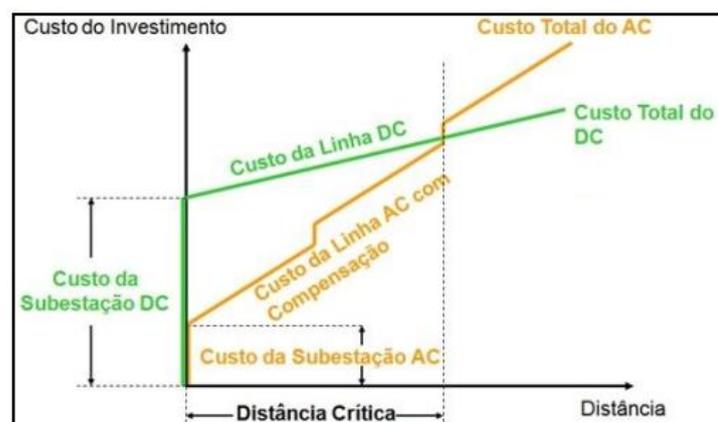


FONTE: (SANTOS, 2012).

Os custos de uma subestação são parcialmente em função da especificação técnica dos equipamentos, levantados na etapa de análise do projeto e de seus parâmetros, e do custo operacional que esta possui; onde este se torna fixo, e deve ser considerado perpetuamente dentro da contabilização do empreendimento.

Na Figura 42, Machioro (2014), ilustra a relação de investimento inicial demandado para implantação de um sistema CA em comparação à um sistema CC.

Figura 42 – Relação entre investimento inicial para sistemas CC ou CA



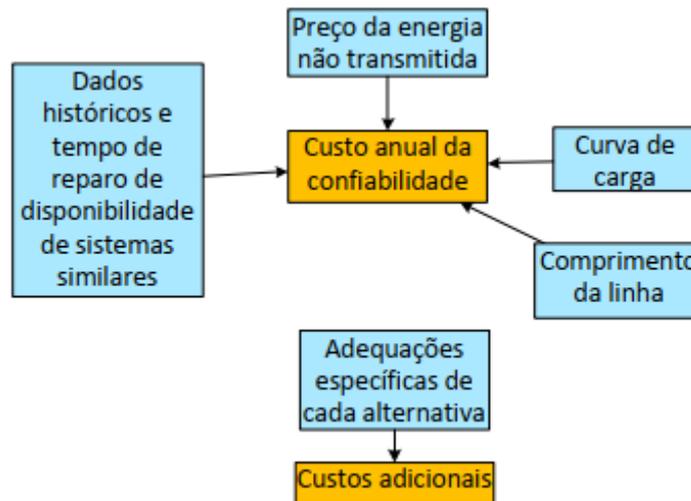
FONTE: (MACHIORO, 2014)

Essa ilustração apresenta o ponto onde os sistemas HVDC de fato se tornam vantajosos de maneira econômica, em função da redução de custo que as linhas eficientes proporcionam para o custo global do projeto, não mais analisando componente por componente, e sim, o

projeto como uma solução inteira. Um ponto interessante desta ilustração, são as variações abruptas no sistema CA em alguns pontos com a variação da distância, essas variações se devem a implementação de compensadores de reativos necessários com o aumento da linha em sistemas em corrente alternada.

Para Santos (2012), há também uma análise de custo relacionada à confiabilidade desejada no sistema, pois tal critério ao ser variado, varia-se componentes e filosofia de projetos, acarretando possíveis redundâncias e assim a elevação do custo do sistema. Na Figura 43, pode-se verificar um esquema desta análise.

Figura 43 – Análise da composição de custo em função da confiabilidade



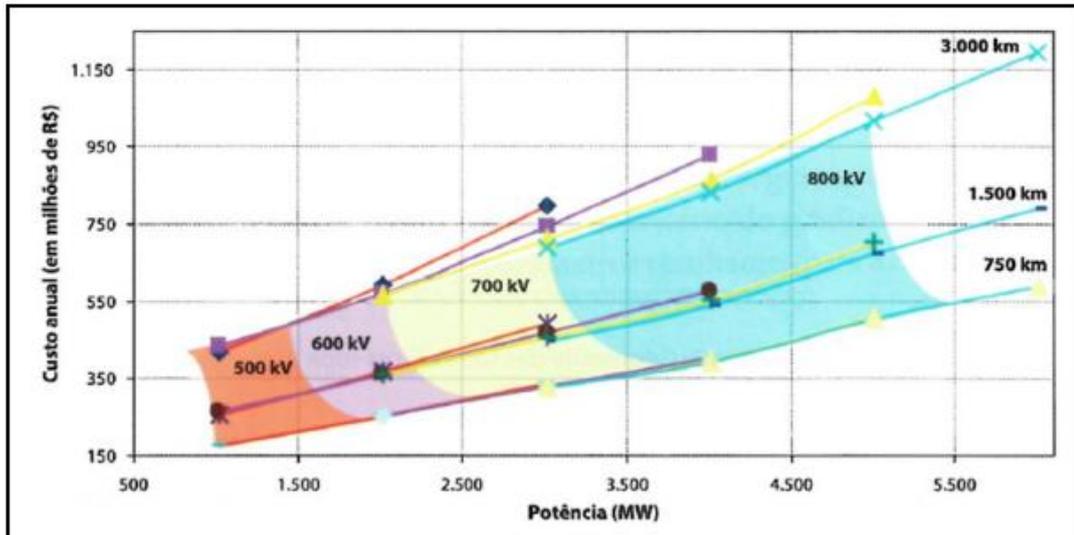
FONTE: (SANTOS, 2012)

Ainda segundo Santos (2012), é relatado que em 2010, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), publicou a chamada de propostas para o projeto denominado “Alternativas não convencionais para transmissão de energia elétrica em longas distâncias”, com o intuito de analisar e incentivar novos estudos destinados a métodos mais eficientes para transmissão de energia de grandes unidades geradoras, como as localizadas na região amazônica, e assim afastadas dos grandes centros de carga. Esse estudo foi concluído em 2012, resultando em um relatório com diversos estudos e comparativos entre métodos de transmissão, tais como: Transmissão em Corrente Contínua, Transmissão em Meia-Onda, Transmissão em Corrente Alternada Hexafásica ou duplo trifásico.

Desta maneira, a última etapa do projeto de um sistema de transmissão é a contabilização dos custos anuais, estimados com base em valores estipulados para manutenção

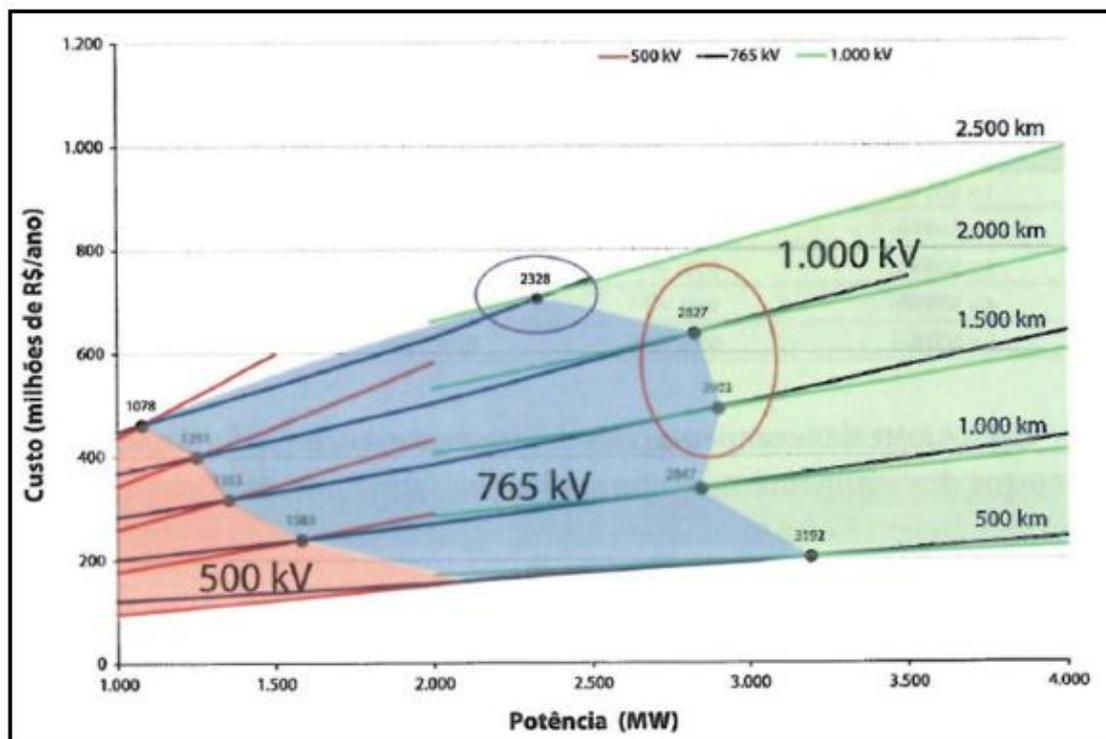
e operação do sistema. Um estudo feito pela Fundação de Desenvolvimento Tecnológica da Engenharia (FDTE, 2012), apontam esses custos, conforme apresentado nas Figuras 44 e 45.

Figura 44 – Custos da transmissão em HVDC



FONTE: (FDTE, 2012)

Figura 45 – Custos da transmissão em HVAC

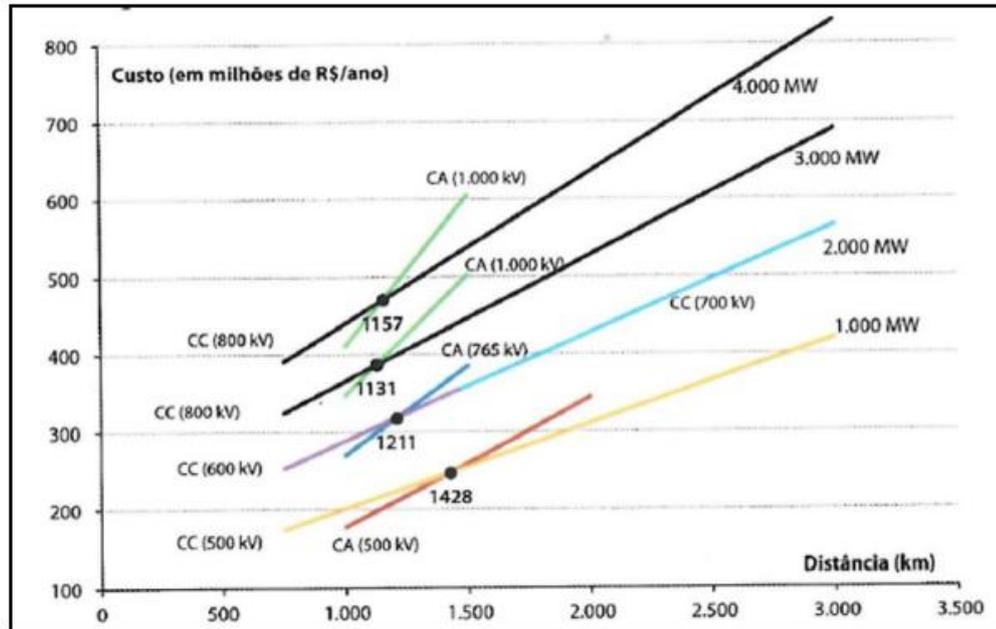


FONTE: (FDTE, 2012)

As imagens deixam evidente pontos onde o custo dos sistemas abordados converge entre

si, a partir dessa análise, FDTE (2012), elabora um comparativo onde possibilita a opção de qual sistema é mais viável em função do custo pela distância pertencente a esta transmissão, analisado na Figura 46.

Figura 46 – Comparativo dos custos da transmissão HVDC x HVAC



FONTE: (FDTE, 2012)

Desta maneira, nota-se que há um ponto onde os sistemas CC se tornam mais atraente em relação aos sistemas CA, também para os custos anuais que este tipo de transmissão necessita para operar.

4.4.2 ANÁLISE TÉCNICA

A análise técnica de um sistema de transmissão fica a critério da complexidade e da eficiência que este possui. Quando falado em sistemas HVDC, o principal ganho que estes proporcionam são as suas baixas perdas nos condutores, contudo deve se levantar as perdas do conjunto HVDC como um todo.

4.4.2.1 Perdas nas estações conversoras

A maiores perdas de um sistema HVDC se devem às estações conversoras, perdas estas que devem ser especificadas em ambiente controlado pelo fabricante, e informadas em consulta prévia ao projeto. Para Jardini e Nolasco (2008), as medições diretas nas estações conversoras não são possíveis, devido aos métodos utilizados e precisão dos instrumentos. Desta maneira, a técnica atual utilizada é a partir da soma das perdas individuais de cada componente do

sistema. Deve-se somar às perdas dos seguintes itens, conforme Machioro (2014):

- Válvulas conversoras;
- Transformadores conversores;
- Reatores de alisamento;
- Banco de capacitores;
- Filtros CA;
- Filtros CC;
- E sistemas auxiliares, como refrigeração, controle, entre outros.

Arrillaga, Liu e Watson (2007), estimam percentualmente as perdas do sistema, conforme na Tabela 3.

Tabela 3 – Perdas percentuais no sistema de conversão

Componentes	Em Standby	Com Transmissão (Potência Nominal)
Filtros de Harmônicas:		
Filtros AC	4%	4%
Filtros DC	0%	0,1%
Transformadores Conversores	53%	47%
Válvulas Tiristoras	10%	36%
Consumo do Sistema Auxiliar:		
Sistema de Resfriamento de Válvulas	4%	3%
Sistema de Resfriamento de Transformadores	4%	1%
Sistema de Condicionadores de Ar	15%	4%
Outros	10%	1%
Referência para um Bipolo de 2000MW	2.2 MW	14 MW

FONTE: (adaptado de ARRILLAGA, LIU E WATSON, 2007)

As perdas em estações conversoras são na maioria dos casos mais elevadas em unidades conversoras para corrente alternada, contudo segundo Machioro (2014), essas perdas não são tão significativas, sendo na ordem 0,7% para os sistemas conversores, e de 0,3% para transformadores de potencial Comparando às perdas admitidas em um transformador de transmissão, que podem chegar à 6%, pode-se concluir que o sistema HVDC se mostra mais eficiente.

4.4.2.2 Perdas nas linhas de transmissão

As perdas na transmissão basicamente se resumem às perdas ocasionadas por efeito corona e por efeito Joule, contudo, diversos autores como Machioro (2014), Sood (2004) e Jardini e Nolasco (2006), afirmam que estas perdas chegam a ser inferiores comparadas as geradas no sistema em corrente alternada, algo em torno de 2,5%, proveniente dos mesmos efeitos.

Tendo em vista a anulação de efeitos como: efeito pelicular, anulação das reatâncias capacitivas e indutivas, as perdas por efeito Joule são consideravelmente atenuadas em sistemas CC devido a inexistência de frequência. Tal ocorrido é analisado também no efeito corona, pois os autores citados, também afirmam este ser menos acentuado em sistema CC para mesma referência de nível de tensão.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho tem como objetivo analisar a viabilidade e eficiência dos sistemas HVDC. Verificou-se que estes sistemas estão em constante evolução ao redor do mundo, e que ainda há um imenso potencial de desenvolvimento.

Segundo Marchioro (2014), o conceito de Eficiência Energética se baseia ‘*na diminuição de perdas em uma determinada atividade*’, ou seja, o sistema torna-se eficiente quando passa a melhor utilizar a energia fornecida ou consumida. Deste modo, os sistemas HVDC podem ser considerados como uma técnica de eficiência energética para sistemas de potência no mundo moderno. Valores em torno de 23% já são os resultados obtidos em relação a redução de perdas presentes em sistemas HVAC, quando comparadas à um sistema equivalente HVDC, e 12% para reduções nos custos operacionais entre os dois sistemas.

Outro ponto a ser considerado como forte propulsor dos sistemas HVDC, é o aumento da geração via fontes renováveis de energia, como eólica ou solar, que tem parte de seu processo de geração em corrente contínua. Estes iriam se beneficiar de modelos de rede CC ou até uma microrrede CC, principalmente nos casos de sistemas como Geração Distribuída, em que a viabilidade necessita de um baixo investimento inicial na maioria dos casos.

Em suma, pode-se citar inúmeras aplicações em que os sistemas de transmissão em corrente contínua seriam vantajosos:

- Transmissão de longas distâncias, como de grandes usinas geradoras para grandes centros urbanos;
- Transmissão de gerações ou consumidores *offshore*, a exemplo têm-se as fazendas eólicas, usinas de maré ou undielétrica, ou ainda plataformas petrolíferas;
- Transmissão de energia em situações que apresentam grandes perdas por tráfego ou geração de reativos;
- Transmissão de energia em situações que apresentam grandes perdas por presença de conteúdo harmônico;
- Na transmissão entre sistemas assíncronos entre si, muito comum em casos de intercâmbio de energia, onde geralmente se aplica os sistemas *back-to-back*.

Porém, a grande utilização dos sistemas HVDC se dá na transmissão de energia para centros urbanos, pois conforme abordado, a opção pela transmissão HVDC é função do comprimento da linha, que precisa ser longa ao ponto de compensar o alto custo inicial que a subestação retificadora impõe. Ainda, outros dois segmentos que vêm crescendo são as transmissões entre sistemas assíncronos e as transmissões marítimas de energia elétrica.

O Brasil, é um dos poucos países do mundo que possuem transmissão em corrente contínua. O Governo Federal vem promovendo diversas políticas a fim de incentivar o aumento do consumo energético, e da geração de energia, seja de grandes unidades geradoras, ou via geração distribuída. Ações como estas reúnem todos os argumentos que viabilizam o HVDC como um sistema mais viável de transmissão de energia elétrica: fontes renováveis de geração, alto consumo de energia e diversificação da matriz energética. Mais incentivos são necessários para que o país evolua no uso da tecnologia, como:

- Pesquisa de desenvolvimento de semicondutores;
- Pesquisa de desenvolvimento de mais modelos aplicáveis para o sistema de transmissão brasileiro, como transmissão em meia onda, ou em corrente contínua por exemplo;
- Desenvolvimento da indústria e do setor elétrico, a fim de obter-se autossuficiência técnica neste tipo de tecnologia;
- Ou ainda, incentivo ou apoio por parte do governo para novos empreendimentos ligados a tecnologia HVDC diretamente.

Desta maneira, como possíveis continuidades para este estudo têm-se:

- Estudo sobre a interação entre sistemas HVAC e HVDC, abordando uma análise da relação que ocorre nos elos CA-CC ou CC-CA, e assim o comportamento de fluxos harmônicos e reativos;
- Estudo sobre proteção e flexibilidade em sistemas HVDC abordando as técnicas de controle de fluxo de potência, de contorno na causa de faltas, ou ainda o comportamento de uma proteção dedicada à sistemas em corrente contínua;
- Estudo sobre um modelo prático de sistema em corrente contínua, analisando o comportamento da rede desde a transmissão até o ponto de consumo, inteiramente em corrente contínua;

- Ou ainda, o impacto das Gerações Distribuídas no sistema elétrico, verificando-se as necessidades para compensar as gerações de conteúdo harmônico e reativo causada por esse modelo de geração.

Os sistemas HVDC são uma tecnologia que têm muito a ser explorada, possivelmente serão umas das opções a ser mais utilizada no futuro, como solução para o alto crescimento do consumo energético e pela busca de novas fontes de energia. Pode-se dizer que a transmissão em corrente contínua é viável tanto do ponto de vista técnico e econômico, devendo-se apenas analisar se a aplicação em questão necessita do alto desempenho e capacidade ofertada em um sistema em corrente contínua.

Este trabalho contribui para objetivos propostos ao início, elaborando um estudo e uma metodologia sobre os diversos detalhes contidos na tecnologia HVDC.

REFERÊNCIAS

ABB, *Asea Brown Boveri*. **ABB and Vattenfall recognized for pioneering HVDC technology**, 2017. Disponível em: <http://new.abb.com/news/detail/1564/abb-and-vattenfall-recognized-for-pioneering-hvdc-technology> Acesso em: 07 de Julho de 2019.

ABB, *Asea Brown Boveri*. **ABB e Belo Monte fecham contrato de US\$ 75 milhões para prover energia limpa do norte ao sudeste do País**. Disponível em: <http://www.abb.com.br/cawp/seitp202/4db02e273795a0ff832580a6006ac7ed.aspx> Acesso em: 07 de Julho de 2019.

ABB, *Asea Brown Boveri*. **HVDC - Cases**. Disponível em: http://www07.abb.com/images/default-source/p-s-hvdc/maps/south-america/1_rio-madeira.jpg?sfvrsn=2 Acesso em: 07 de Julho de 2019.

ABB, *Asea Brown Boveri*. **Tesla vs Edison: a guerra das correntes**, 2012. Disponível em: <http://www.abb.com/cawp/seitp202/31b6f1d9686553b1c12579880036eaaa.aspx> Acesso em: 07 de Julho de 2019.

ABB, *Asea Brown Boveri*. **The Gotland HVDC link**. Disponível em: <http://new.abb.com/systems/hvdc/references/the-gotland-hvdc-link> Acesso em: 07 de Julho de 2019.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica, **Alternativas não convencionais para Transmissão de Energia Elétrica – Estudos Técnicos e Econômicos**, 2012. Disponível em: http://www.eln.gov.br/opencms/export/sites/eletronorte/pilares/tecnologia/pepd/Downloads/Produtos_de_Projetos/estudostecnicosseeconomicos.pdf Acesso em: 07 de Julho de 2019.

ARRILLAGA, J., LIU, Y. H. E WATSON, N. R. **Flexible Power Transmission – The HVDC Options**. England, 2007.

BAHRMAN, M. P.; JOHNSON, B. K. The ABCs of HVDC transmission technologies. **Power and Energy Magazine, IEEE**, v. 5, n. 2, p. 32-44, 2007.

BAHRMAN, M.; EDRIS, A. A.; HARLEY, R. Asynchronous Back-to-Back HVDC Link with Voltage Source Converters. **Minnesota Power Systems Conference, USA**, Novembro 1999.

BORRÉ, A. C. **Biderionamento de Potência no TAP HVDC**. Rio de Janeiro, RJ: Dissertação de Mestrado. COPPE/UFRJ, 2006.

CUSTÓDIO, D. T. **Utilização do Elo de Corrente Contínua para o Amortecimento de Oscilações Eletromecânicas em Sistemas Elétricos de Potência**. Dissertação de Mestrado UNICAMP. Campinas, Março de 2009.

DE MENEZES, Victor Prangiel. **Linhas de Transmissão de Energia Elétrica: Aspectos Técnicos, Orçamentários e Contrutivos**, 2015. TCC (Diplomação em Engenharia Elétrica) – Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015. Disponível em: <http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10015383.pdf> . Acesso em: 07 de Julho de 2019.

DE PAULA, V.C; DE PAULA, H., **Employing DC Transmission in Long Distance AC Motor Drives: Analysis of the Copper Economy and Power Losses Reduction in Mining Facilities**, Universidade Federal de Uberlândia – MG, Brasil, Agosto de 2017.

DENG, F., CHEN, Z., **Operation and Control of a DC-Grid Offshore Wind Farm Under DC Transmission System Faults**, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 28, no. 3, Julho de 2013.

EPE. **Estudos para a Licitação da Expansão da Transmissão de Energia Elétrica. Estudos para definição das características básicas do Sistema de Transmissão de Intreligação das Usinas do Madeira - Alternativa CC**. EPE. Rio de Janeiro, p. 90. 2008.

EPE. **Estudos para a Licitação da Expansão da Transmissão. Expansão da interligação entre as regiões Norte/Nordeste e Sudeste/Centro-Oeste. Elo de Corrente Contínua ± 800 kV Xingu-T. Minas**. EPE. Rio de Janeiro, RJ. 2013.

EPE. **Plano Nacional de Expansão de Energia**. EPE. Rio de Janeiro, RJ. 2013.

FARIA, M.C.R., SILVA, R., SILVA, R., **Estudo de viabilidade econômica para implementação de sistemas fotovoltaicos em habitações populares.**, Trabalho de Conclusão de Curso – Departamento Acadêmico de Eletrotécnica - Universidade Tecnológica Federal do Paraná -Curitiba/PR, Brasil, 2017.

FDTE – Fundação para o Desenvolvimento Tecnológico da Engenharia. **Alternativas Não Convencionais Para a Transmissão de Energia Elétrica em Longas Distâncias**. Brasília, 2012.

FERREIRA, M.J.R, **Estudo do Conversor Comutado a Capacitor de Doze Pulsos Aplicado a um Sistema HVDC**, Universidade Federal de Itajubá – MG, Brasil, 2017.

IEEE, **HVDC-FACTS Subcommittee Meeting**. Las Vegas, NV, USA. 2006.

IEEE/PES TRANSMISSION AND DISTRIBUTION COMMITTEE. **HVDC Projects List, s.1.:** IEEE HVDC and FACTS Subcommittee. [S.l.]: [s.n.]. 2012.

JARDINI J. A. e NOLASCO J. F. **Impacts of HVDC Lines on the Economics of HVDC Projects**. CIGRE JWG-B2.17/B4/C1.17, June 2008.

JARDINI, J. A. **Sistemas de Transmissão em Corrente Contínua**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 30. 2007.

KASSAR, L.P., **Concepção de Modelo de Microrrede em Corrente Contínua com Fontes Renováveis Alternativas.**, Trabalho de Conclusão de Curso – Departamento Acadêmico de Eletrotécnica - Universidade Tecnológica Federal do Paraná - PR, Brasil, 2018.

KIMBARK, E.W., **Direct current transmission, Vol I, Wiley Interscience**, New York, 1971.

KIMBARK, E. W. **General aspects of DC transmission and comparison of it with AC transmission. In: Direct Current Transmission**. Wiley-Interscience, 1971.

KUNDUR, P. **Power System Stability and Control**. McGraw-Hill, 1994.

GIRARDI, J. L. A. - La historia narrada através del arte. **La Silla Eléctrica**, 2013. Disponível em: <http://lahistorianarradaatravesdelarte.blogspot.com.br/2013/11/la-silla-electrica.html> Acesso em: 07 de Julho de 2019.

LIU, C.; BOSE, A.; HOU, Y. **Discussion of the solvability of HVDC systems power flow with a sequential method**. Electric Power Systems Research, v. 92, p. 155-161, 2012.

MACHIORO, A., **A eficiência energética na transmissão em alta tensão em corrente contínua**, Dissertação de Especialização, Programa de Pós-Graduação em Eficiência Energética Aplicada aos Processos Produtivos, Universidade Federal de Santa Maria - RS, Brasil, 2014.

MELO, Gonçalves G. A., F. A. S., Oliveira R. N., Muno J. M., Santos M., e Canesin C. A., **Trolleybus Power System for Operation with AC or DC Distribution Networks**, UNESP – Ilha Solteira – SP, Brasil, 2010.

NIQUINI, F. M. M. **Modelagem do Elo de Corrente Contínua para Análise Harmônica Utilizando o Método de Injeção de Correntes Trifásico Harmônico com Solução Iterativa**. Juiz de Fora, MG: Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, UFJF., 2009.

MME. Ministério de Minas e Energia. **Belo Monte**. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/web/guest/destaques-do-setor-de-energia/belo-monte> Acesso em: 07 de Julho de 2019.

ONS. Operador Nacional do Sistema. **Sistema de transmissão 2009 – 2012**, 2012. Disponível em: http://www.ons.org.br/sites/multimidia/Documentos%20Compartilhados/dados/dados_relevantes_2009/02-Sistema-de-Transmissao-2009-2012.html. Acesso em: 07 de Julho de 2019.

ONS. Operador Nacional do Sistema. **Sistema de transmissão 2011 – 2013**, 2012. Disponível em: http://www.ons.org.br/sites/multimidia/Documentos%20Compartilhados/dados/dados_relevantes_2011/02-Sistema-de-Transmissao-2011-2013.html?expanddiv=02. Acesso em: 07 de Julho de 2019.

ONS – Operador Nacional do Sistema. **Requisitos Mínimos para Transformadores e para Subestações e seus Equipamentos**. Submódulo 2.3, revisão 1.0, 2009. Disponível em: http://www.ons.org.br/%2FProcedimentosDeRede%2FM%C3%B3dulo%20%2FSubm%C3%B3dulo%202.3%2FSubm%C3%B3dulo%202.3_Rev_2.0.pdf. Acesso em: 07 de Julho de 2019.

RUDERVALL, R.; CHARPENTIER, J.; SHARMA, R. **High voltage direct current (HVDC) transmission systems technology review paper**. Energy week, v. 2000, 2000.

SANTOS, M. L. **Transmissão de Energia Elétrica em Meia-Onda e em Corrente Contínua – Análise Técnico-Econômica**. Tese de Doutorado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2012.

SATO, André Kiyoshi Coutinho. **Transmissão de Potências em Corrente Contínua e Corrente Alternada: Estudo Comparativo**, 2013. TCC (Diplomação em Engenharia

Elétrica) – Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2013. Disponível em:
<https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/121076/000734882.pdf?sequence=1>
Acesso em: 07 de Julho de 2019.

SHEBLE, G. B.; HEYDT, G. T. **Power flow studies for systems with HVDC transmission**. Proc. IEEE, PICA Conference, New Orleans, USA, p. 225-228, 1975.

SILVA, M. T. F. D. **Projeto & Desenvolvimento de um padrão para Alta Tensão em Corrente Contínua na Faixa de 1 kV a 50 kV**. Rio de Janeiro, RJ: Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2011.

SOOD, K.V. **HVDC and Facts Controllers**. Boston, 2004.

SOUSA, J. E. G. M. D. **Análise em Regime Estacionário e Transitório de Ligações Multi-Terminais HVDC**. Dissertação de Mestrado. Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa, Portugal, p. 206. 2012.

SZECHTMAN, M., MARUVADA P. S., e NAYAK, R. N. **800-KV HVDC on the horizon**. IEEE Power and Energy Magazine, April 2007.

STANA, G.; Brazis, V., **Trolleybus Motion Simulation by Dealing with Overhead DC Network Energy Transmission Losses**, Riga Technical University, Riga, Latvia, 2015.

VASCONCELOS, L.A, **Metodologia para representação de sistemas de transmissão em corrente contínua multiterminais no problema de fluxo de potência**, Universidade Federal e Juiz de Fora - MG, Brasil, 2014.

ANEXOS

Anexo 1 – Lista de projetos HVDC existentes e em planejamentos

Sistema/Projeto	Ano de autorização	Potência (MW)	Tensão C.C. (kV)	Distância da linha (km)	Localização
<i>IB Valley-Jaipur</i>	2002	3000			Índia
<i>Eurocable</i>	2002	600	500	600	Noruega-Alemanha
<i>Leyte-Mindanao</i>	2015	500	250	478	Filipinas
<i>East-West Energy Bridge</i>	2005	500	600	1800	Alemanha-Polônia Rússia
<i>East-West Energy Bridge</i>	2010	1000			Alemanha-Polônia Rússia
<i>Iceland-Scotland Link</i>	2005	550	400	950	Islândia-Escócia
<i>Iceland-Scotland Link</i>	Futuro	1100	±400	950	Islândia-Escócia
<i>Mepanda Uncua</i>	2006	500			Moçambique
<i>China-Russia (Heihe)</i>	2008	750		B-B	China-Rússia
<i>Northeast-North (Goaling)</i>	2008	1500		B-B	China
<i>Hugo Intertie</i>	2010	375		B-B	EUA
<i>Trans-Amur</i>	2012	3000			China-Rússia
<i>Ningxia-Tianjing</i>	2010	3000			China
<i>NW-Sichuan (Baoji Deyang)</i>	2011	3000			China
<i>North Shaanxi-Shandong</i>	2011	3000			China
<i>Shandong-East</i>	2011	1200		B-B	China
<i>Gezhouba-Shanghai Expansion</i>	2011	3000			China
<i>Benmore-Haywards Pole 1 Replacement</i>	2012	700	350	40	Nova Zelândia
<i>Borwin 1</i>	2012	400	±150	400	Alemanha
<i>India-Sri Lanka Electricity Grid Interconnection</i>	2013	1000	400		Índia-Sri Lanka
<i>Aysen-Sic</i>	2012	2500	±500 ou ±600	2000	Chile
<i>North-Central</i>	2012	1000		B-B	China
<i>Wescor South W (3 Terminais)</i>	2012				África
<i>Bakun</i>	2013	2400	±500	1715	Malásia
<i>Wecor South E (3 Terminais)</i>	2013				África
<i>Dolwin 1</i>	2013	800	±320	330	Alemanha
<i>Plains and Easterns Clean Line</i>	2013-2020	7000	±500	1288	EUA
<i>Sydvastlanken</i>	2013-2015	1200	400		Suécia-Noruega
<i>Inga-Kolwezi</i>	2013	560	±500	1 700	República Democrática do Congo
<i>Southwest Link</i>	2014	1420	300	200	Suécia
<i>Alberta East HVDC Transmission Project</i>	2013	2000	±500	500	Canadá

Continuação da página 76:

<i>Irkutsk (Russia) - Beijing</i>	2015	6400	800		Rússia-China
<i>Troll A 3&4</i>	2015	100	±60	280	Noruega
<i>Dolwin 2</i>	2015	900	±320	270	Alemanha
<i>Nordbalt</i>	2015	700	±300	450	Suécia-Lituânia
<i>Jinsha River II - East</i>	2016	6400	800		China
<i>China</i>					
<i>Humeng-Tianjing</i>	2016	6400	800		China
<i>Goupitan-Guangdong</i>	2016	3000			China
<i>Nelson River Bipole III</i>	2017	2000	500		Canadá
<i>Maritime Link</i>	2017	500	±200 até		Canadá
			±250		
<i>Humeng-Liaoning</i>	2018	6400	800		China
<i>Jinsha River II - Fujian</i>	2018	6400	800		China
<i>Hami-C.China</i>	2018	6400	800		China
<i>Wescor North (4</i>	2018				África
<i>Terminais)</i>					
<i>Jinsha River II - East</i>	2019	6400	800		China
<i>China</i>					
<i>New Zealand Hybrid Inter</i>	Futuro				Nova Zelândia
<i>Island Link</i>					
<i>Hawaii Inter-Island Cable</i>	Futuro	400	48		EUA
<i>Project</i>					
<i>Chinook</i>	Futuro	3000	±500	1600	EUA
<i>Lower Churchill Project</i>	Futuro	3074	±450	1100	Canadá
<i>Barsoor Lower Sileru</i>	Futuro	400			Índia
<i>Talcher-Bangalore</i>	Futuro	2000	±500	1400	Índia
<i>Cepa (Raspier-Rajasthan)</i>	Futuro	2000	500		Índia
<i>Isaccea</i>	Futuro	600		B-B	Romênia
<i>Poland-Lithuania</i>	2015-2020	1000	154		Polónia-Lituânia
<i>Northern Lights</i>	Futuro	3000	±500	1550	Canadá-EUA
<i>Tres Amigas Superstation</i>	2014	750	±345	B-B	EUA
<i>Eleclink</i>	Futuro				Reino Unido
					França
<i>Egypt-Saudi Arabia</i>	Futuro	3000	±500	1500	Egito-Arábia
<i>Interconnection Link</i>					Saudita
<i>France-Italy</i>	Futuro				França-Itália
<i>Interconnection Link</i>					
<i>Western HVDC Link</i>	2015	2000	400		Reino Unido
<i>Western HVDC Link</i>	2018				Reino Unido
<i>India - Bangladesh Link</i>	2012	1000		B-B	Índia-Bangladesh
<i>Italy-Montenegro</i>	Futuro	1000	±500		Itália-Montenegro
<i>Interconnection Link</i>					
<i>Italy-Lybia</i>	Futuro	1000	±500	1030	Itália-Líbia
<i>Interconnection Link</i>					

FONTE: (IEEE/PSS TRANSMISSION AND DISTRIBUTION COMMITTEE, 2012)