

Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA
Curso de Engenharia de Energia

**Análise das Topologias dos Sistemas de
Transmissão em Corrente Contínua**

Autor: Caio Costa Neiva
Orientador: Flávio Henrique Justiniano da Silva

Brasília, DF

2016



Caio Costa Neiva

Análise das Topologias dos Sistemas de Transmissão em Corrente Contínua

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia de Energia da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia.

Orientador: Flávio Henrique Justiniano
Ribeiro da Silva.

Brasília, DF

2016

CIP – Catalogação Internacional da Publicação

Neiva, Caio Costa.

Análise das Topologias dos Sistemas de Transmissão em Corrente Contínua. Brasília: UnB, 2016. p.35: il: 29,5 cm.

Monografia (Graduação) – Universidade de Brasília
Faculdade do Gama, Brasília, 2016. Orientação: Flávio Henrique Justiniano da Silva.

1. HVDC. 2. Transmissão de Energia. 3. Corrente Contínua.
Silva, Flávio Henrique Justiniano Ribeiro da. II. Análise das Topologias dos Sistemas de Transmissão em Corrente Contínua

CDU Classificação



**REGULAMENTO E NORMA PARA REDAÇÃO DE RELATÓRIOS DE PROJETOS
DE GRADUAÇÃO FACULDADE DO GAMA - FGA**

Caio Costa Neiva

Monografia submetida como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia da Faculdade UnB Gama - FGA, da Universidade de Brasília, em **28/06/2016** apresentada e aprovada pela banca examinadora abaixo assinada:

Prof.: Flávio Henrique Justiniano Ribeiro da Silva, UnB/ FGA

Orientador

Prof. (Titulação): Nome do Professor, UnB/ FGA

Membro Convidado

Prof. (Titulação): Nome do Professor, UnB/ FGA

Membro Convidado

Brasília, DF

2016

Resumo

O crescimento do sistema elétrico brasileiro exige a incorporação de novas tecnologias como alternativa de custo e solução para alguns problemas estruturais. Elos de Corrente Contínua é uma alternativa atraente pois tem se mostrado como tendência mundial e pode se tornar uma ótima solução técnica para o mercado nacional. Este trabalho apresenta a fundamentação teórica de sistemas *HVDC (High-Voltage Direct Current)*, os conceitos básicos, as características e as diferenças entre sistemas de potência em corrente alternada. Apesar de pouco estudado nos cursos de graduação das universidades brasileiras, há motivos concretos para se aprofundar no assunto visto que esta tecnologia encontra vasta aplicabilidade.

Palavras-chave: Transmissão de Energia. *High-Voltage Direct Current*. HVDC. Corrente Contínua. Sistema Elétrico Brasileiro.

Abstract

The growth of the Brazilian electrical system requires the incorporation of new technologies as a cost alternative and to solve some structural problems. Direct Current is an attractive alternative not just, because it has been a global trend but also because it is a great technical solution for the domestic market. This paper presents the theoretical foundation of HVDC systems (High-Voltage Direct Current), the basic concepts, characteristics and differences between power systems into alternating current. Despite the few studies at the undergraduate courses in Brazilian universities, there are concrete reasons to go deeper into this issue because the technology has vast applicability.

Keywords: Power Transmission. High-Voltage Direct Current. HVDC. Direct current. Brazilian Electrical System.

Lista de Figuras

Figura 1: Diagrama unifilar genérico de um sistema <i>HVDC</i>	5
Figura 2: Diagrama unifilar de um sistema <i>HVDC</i> bipolar	5
Figura 3: Representa uma esquemática de uma ligação monopolar.	7
Figura 4: Representa uma esquemática de uma ligação bipolar.....	8
Figura 5: Representa uma esquemática de uma ligação Homopolar.....	8
Figura 6: Representa uma esquemática de uma ligação Back-to-back.....	9
Figura 7: Opções comuns de transmissão em CC e AC, modificado.....	11
Figura 8: Comparativo entre linhas de transmissão CA-CC	12
Figura 9: Comparação de custos pela distância em CC e CA, modificado	12
Figura 10: Diagrama Esquemático de Ligação de um Conversor do tipo CSC	16
Figura 11: Diagrama Esquemático de Ligação de um Conversor do tipo VSC	16
Figura 12: Diagrama Esquemático de Ligação de um Conversor do tipo CCC.....	18
Figura 13 – Simulação de um Sistema <i>HVDC</i> com conversor do tipo VSC	20
Figura 14 – Módulos para leitura dos resultados da simulação.....	21
Figura 15 – Resultados encontrados a partir da simulação.....	22

Sumário

Resumo	6
Abstract.....	7
Lista de Figuras	8
Lista de Abreviaturas	1
Capítulo 1 – Introdução a Transmissão de Energia.	2
1.1 - Objetivos do Trabalho:	3
1.2 – Metodologia de Trabalho:.....	3
Capítulo 2 – Aspectos Gerais da Transmissão de Energia em Corrente Contínua .4	
2.1 – Histórico da Tecnologia	4
2.2 – Constituição dos Sistemas Corrente Contínua/Corrente Alternada.....	4
2.2.1 – Tipos de Sistema em <i>HVDC</i> :.....	7
2.3 – Aplicações de Sistemas em Corrente Contínua:	9
2.4 – Vantagens e Desvantagens da Transmissão em Corrente Contínua/Corrente Alternada:	10
2.5 – Panorama Nacional e Mundial de sua Utilização:	13
Capítulo 3 – Tipos de Conversores:.....	15
3.1 – <i>CSC/HVDC</i> :.....	15
3.2 – <i>VSC/HVDC</i> :.....	16
3.1 – <i>CCC/HVDC</i> :	17
Conclusões Parciais:	19
Atividades Futuras:	19
Referências Bibliográficas:	24

Lista de Abreviaturas

CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CCC	<i>Capacitor Commutated Converter</i> (Conversor Comutado a Capacitor)
CSC	<i>Current Source Converters</i> (Conversor Fonte de Corrente)
FACTS	<i>Flexible Alternate Current Transmission System</i>
H	<i>Henry</i>
HVDC	<i>High-Voltage Direct Current</i> (Elo de Corrente Contínua)
VSC	<i>Voltage Source Converters</i> (Conversor Fonte de Tensão)
V	<i>Volts</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i> (Modulação por Largura de Pulso)
W	<i>Watts</i>

Capítulo 1 – Introdução a Transmissão de Energia.

Aproximadamente nos anos de 1870 surgem as primeiras aplicações de energia elétrica em caráter econômico. As máquinas elétricas, como exemplo dínamos e motores de corrente contínua, atingiram um patamar que permitiu seu uso como força motriz em indústrias e nos transportes, e na geração de energia (Fuchs, 2015).

Em 1882, é constituída a primeira empresa destinada a gerar e vender energia elétrica aos interessados, em virtude da invenção da lâmpada incandescente de Thomas A. Edison, no ano de 1879. Este, é o responsável pela instalação da Usina da Rua Pearl, em Nova York, cujos dínamos eram acionados por máquinas a vapor. Esse sistema, era composto por uma rede de transmissão subterrânea, com abrangência de aproximadamente 1600 metros de raio em torno da usina e fornecia energia em 110V em corrente contínua. Foi construído para uso geral e utilizado para iluminação pública e residencial, além de poucas aplicações para uso de força motriz, como motores de corrente contínua. Teve grande aceitação que exigiram novas adições ao sistema. Estas, só foram possíveis com a criação de novas centrais geração, uma vez que existiam limitações econômicas e técnicas impostas ao transporte de energia elétrica a grandes distâncias (Fuchs, 2015).

A transmissão de energia em corrente alternada foi desenvolvida na França, em meados dos anos de 1880, com a invenção dos transformadores. Permitiu-se então, um transporte econômico de energia em grandes potências e sob tensões mais elevadas, sem que houvesse significativo prejuízo de eficiência para fins de iluminação. Nicola Tesla, em 1888 na Europa, apresentou um artigo que descreve motores de indução e motores síncronos bifásicos o que permitiu o surgimento de sistemas trifásicos e o desenvolvimento de motores de indução e geradores síncronos (Fuchs, 2015).

As vantagens dos sistemas de corrente alternada sobre os sistemas de corrente contínua trouxeram um desenvolvimento muito rápido de sistemas em corrente alternada (CA), entretanto, os sistemas de corrente contínua (CC) não foram completamente abandonados, em virtude de possuírem algumas vantagens para certas aplicações sobre sistemas de CA (Fuchs, 2015).

1.1 - Objetivos do Trabalho:

Este trabalho tem como objetivo principal apresentar a fundamentação teórica de sistemas de transmissão de energia elétrica em alta tensão e corrente contínua, apresentando um histórico sobre o assunto, suas aplicações, vantagens e desvantagens entre sistemas de corrente contínua e corrente alternada.

Elo de corrente contínua é um tema pouco estudado no Brasil apesar de ter significativo número de aplicações. Considerando as dimensões continentais do país a aplicabilidade da tecnologia hoje disponível pode viabilizar a solução de diversos problemas, principalmente na transmissão de energia elétrica em longas distâncias.

1.2 – Metodologia de Trabalho:

Para este trabalho, foram feitas pesquisas bibliográficas quanto ao tema em questão, apesar do reduzido número de referências sobre o tema.

No primeiro capítulo é feita uma breve introdução da história da transmissão de energia e descrição do objetivo de estudo deste trabalho.

No segundo capítulo, trata da história da tecnologia de transmissão em corrente contínua, a constituição dos sistemas, descrição dos tipos de ligações de sistemas *HVDC*, suas aplicações, vantagens e desvantagens, bem como do panorama nacional e mundial de sua utilização.

No terceiro capítulo, são descritos os tipos de conversores usados, suas diferenças e suas aplicações.

Capítulo 2 – Aspectos Gerais da Transmissão de Energia em Corrente Contínua

2.1 – Histórico da Tecnologia

A transmissão de energia elétrica foi originalmente desenvolvida em corrente contínua, entretanto, com o desenvolvimento de motores de indução e a praticidade dos transformadores, em meados do século XX, forçaram a mudança dos sistemas de energia para a corrente alternada (Woodford, 1998). Por muito tempo a corrente alternada foi utilizada para suprir a demanda necessária, e com a evolução tecnológica os sistemas elétricos de potência começaram a trabalhar com interfaces em corrente contínua, alcançando diversos benefícios operativos (Niquini, 2009).

Com o aumento da demanda de energia elétrica após a Segunda Guerra Mundial houve também a necessidade de pesquisas, particularmente na Rússia e na Suécia. Em 1950, foi encomendado uma linha de transmissão experimental de 116 km entre Moscou e Kasira em 200 kV (Woodford, 1998).

A primeira linha comercial em *HVDC* (do inglês *High-Voltage, Direct Current*) foi construída em 1954, entre a ilha de Gotland e a Suécia, com 96 km de extensão e de 200 MW. Tiristores foram aplicados na transmissão em corrente contínua no final dos anos 1960 e as válvulas de estado sólido se tornaram realidade. No Canadá, foi construída a primeira linha de transmissão utilizando tiristores como chaves, Eel River, composto por uma interconexão assíncrona do sistema canadense entre as províncias de New Brunswick e Quebec. A linha de transmissão que liga Itaipu-binacional à São Paulo, tem aproximadamente 786 km de extensão, opera em 600 kV e é reconhecida mundialmente como modelo de transmissão de energia (Woodford, 1998 e Niquini, 2009).

2.2 – Constituição dos Sistemas Corrente Contínua/Corrente Alternada

Um sistema genérico de transmissão em *HVDC* (Figura 1) ilustra um diagrama unifilar composto por estações conversoras, um retificador, um inversor e dois transformadores de conversão, responsáveis pelo ajuste nas tensões de entrada e saída e pela linha de transmissão em corrente contínua.

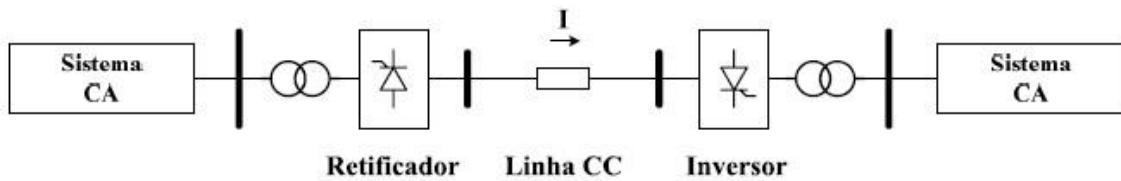


Figura 1: Diagrama unifilar genérico de um sistema HVDC (Niquini, 2009).

Os sistemas CA, dispostos no diagrama acima, não precisam necessariamente representar um sistema completo. Podem ser compostos apenas por um grupo gerador, como ocorre em Itaipu, onde metade do grupo gerador opera em 50 Hz e parte de sua energia gerada é transmitida para o Brasil em HVDC (Niquini, 2009).

Outros componentes associados a sistemas HVDC dispostos na Figura 2 utiliza um sistema HVDC bipolar como exemplo. Os componentes usados para outras configurações são os mesmos (Kundur, 1994).

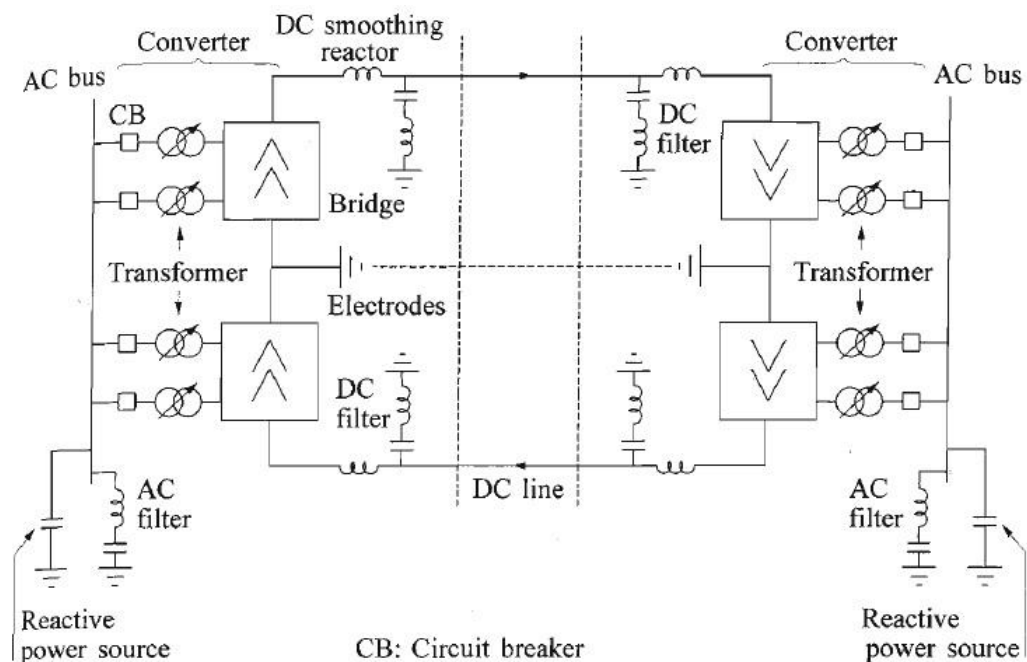


Figura 2: Diagrama unifilar de um sistema HVDC bipolar (Kundur, 1994).

2.2.1 – Componentes:

Os componentes utilizados para sistemas HVDC são: Conversores, Reatores de Suavização, Filtros Harmônicos, Filtros Sincronizáveis, Eletrodos, Cabos de Corrente

Contínua e Disjuntores de Corrente Alternada. Segue uma breve descrição de cada componente (Kundur, 1994):

- Conversores: são os equipamentos capazes de fazer a conversão de CC (Corrente Contínua) para CA (Corrente Alternada) ou vice-versa, dependendo apenas do lado em que foram instaladas. Os conversores utilizam válvulas comutadoras de 6 ou 12 pulsos, sendo as de 12 pulsos as mais utilizadas atualmente tendo em vista a maior precisão no processo de conversão.

- Reatores de Suavização: são reatores com alta impedância (1,0 [H], ou Henry) e têm por função: impedir a falha de comutação nos conversores, diminuir as tensões e correntes harmônicas na linha em CC, impedir a descontinuidade de corrente para cargas leves, bem como evitar que a corrente atinja um valor de crista em um curto-circuito.

- Filtros Harmônicos: são utilizados para evitar a formação de harmônicos nos lados CA e CC, uma vez que a formação de harmônicos pode causar interferência em sistemas de telecomunicação e o aquecimento de capacitores e geradores.

- Filtros Sincronizáveis (ou *Reactive Power Supplies*): têm a função de proteger contra sobretensão nas unidades capacitivas, sobrecargas térmicas e dielétricas nos elementos individuais dos filtros, perda de sintonia dos filtros, além de proteção contra falhas à terra, sobrecorrente, trecho morto e elemento aberto (Abboud *et alli*, 2010)

- Eletrodos: sistemas em CC, em alguns casos, são projetados para usar a terra como retorno da corrente, mesmo que temporariamente. Desta forma, utiliza-se o eletrodo como condutor para evitar alta densidade de corrente e voltagem em seu retorno.

- Cabos de Corrente Contínua: podem ser utilizados como linhas aéreas ou cabos subterrâneos e são similares aos cabos utilizados em sistemas de CA, entretanto, o número de cabos usados pode ser menor em alguns casos, conforme exemplifica no item 2.4.

- Disjuntores de Corrente Alternada: são usados para eliminar falhas para religar um sistema em CC que estava fora de serviço.

2.2.2 – Tipos de Sistema em HVDC:

Segundi SOOD (2004) existem três tipos de sistema em HVDC que devem ser considerados para sua aplicação:

- Ligação Monopolar:

A ligação monopolar (Figura 3) tem apenas um condutor, geralmente com polaridade negativa e utiliza o solo ou o mar como retorno. Pode-se também utilizar um cabo metálico para o retorno em locais onde não se pode usar o solo ou o mar, geralmente em baixa tensão, não necessitando de grandes níveis de isolamento (Nikini, 2009 e Sood, 2004).

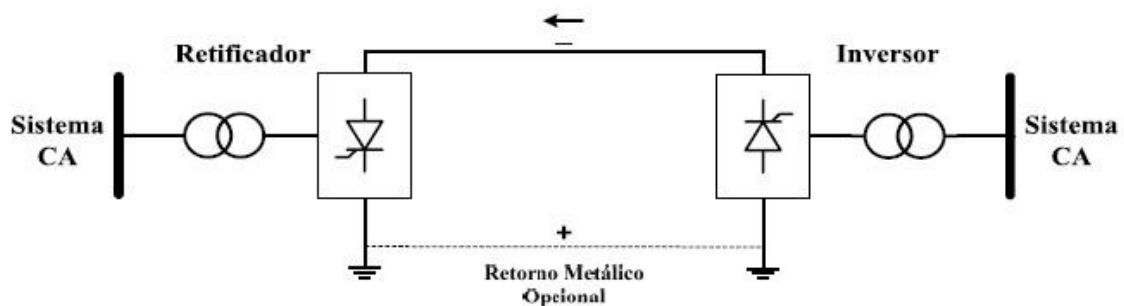


Figura 3: Representa uma esquemática de uma ligação monopolar (Nikini, 2009).

- Ligação Bipolar:

A ligação bipolar consiste na ligação por meio de dois condutores, um positivo e outro negativo, onde a junção entre os conversores deve ser aterrada (Figura 4). Em situações normais, a corrente dos polos é igual podendo operar de forma separada e trabalhar com metade da carga instalada ou mais, dependendo da capacidade de sobrecarga da linha e dos conversores. Do ponto de vista de desempenho, a ligação bipolar tem sua eficácia comparada a um circuito duplo em corrente alternada. Em operação normal, causa menos interferência harmônica em suas proximidades em comparação a ligação monopolar. A inversão do fluxo de energia é conseguida alternando a polaridade dos dois polos por meio de controles, sem a necessidade de comutação mecânica (Kundur, 1994).

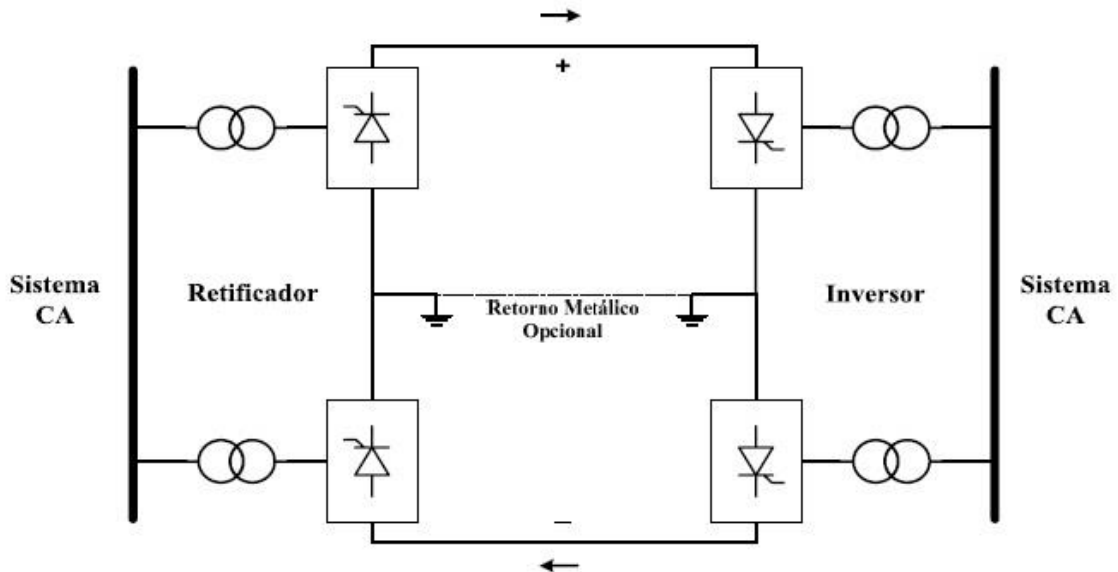


Figura 4: Representa uma esquemática de uma ligação bipolar (Niquini, 2009).

- Ligação Homopolar:

A ligação homopolar (Figura 5) consiste numa conexão com dois ou mais condutores, todos com a mesma polaridade, normalmente negativa pelo fato do efeito corona ser menos intenso e por ter o solo como caminho de retorno para o sistema. Quando ocorre uma falha em um ou mais condutores, a transmissão pode ser feita nos condutores restantes, dentro da capacidade de sobrecarga pré-instalada da linha e dos conversores. O retorno pode ser feito por terra, entretanto, a presença de dutos de gás e água, nas proximidades dos eletrodos pode impossibilitar seu uso, uma vez que a corrente pode utilizá-los como caminho de retorno, causando corrosão nos mesmos. Nesses casos é necessária a utilização de cabos isolados (Kundur, 1998).

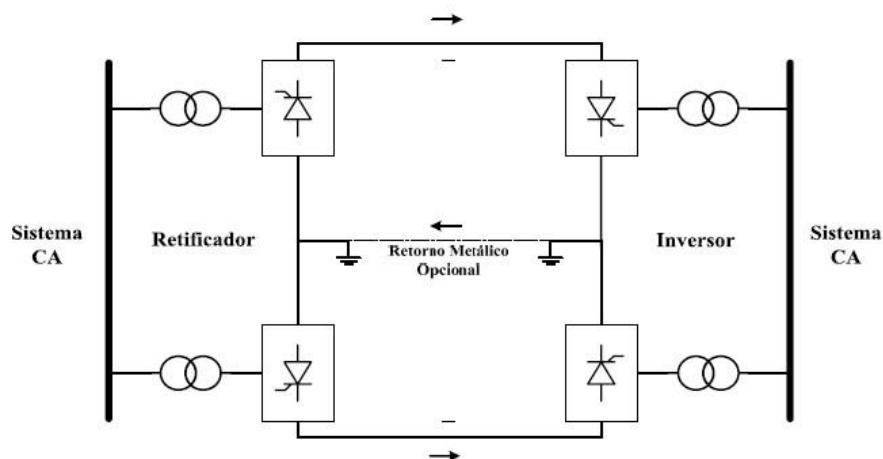


Figura 5: Representa uma esquemática de uma ligação Homopolar (Niquini, 2009).

- Ligação *Back-to-back*:

Um arranjo do tipo *Back-to-back* (Figura 6) é utilizado quando a ligação de dois sistemas de corrente alternada trabalha sobre frequências diferentes, assíncronos e sob alta transferência de potência. Neste arranjo, utiliza-se a ligação direta do retificador e do inversor possibilitando, desta forma, desprezar as perdas elétricas no lado CC. Mantidos os requisitos de segurança, pode-se otimizar os custos das válvulas de tiristores mantendo alta a corrente e baixa a tensão do lado CC. Além de ser utilizado para a conexão assíncrona de redes em corrente alternada, a conexão *back-to-back*, também pode ser usada para controle de frequência de sistemas de corrente alternada e redução da corrente de curto-circuito forte de sistemas em CA (Ottonsson e Kjenllin, 2001).

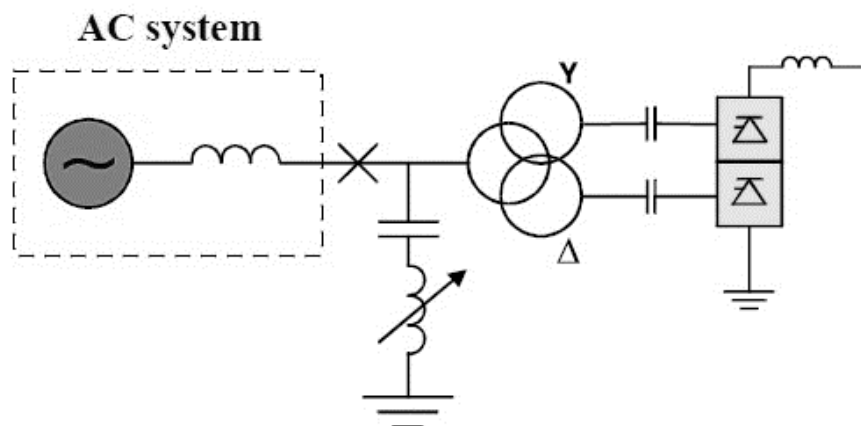


Figura 6: Representa uma esquemática de uma ligação *Back-to-back* (Ottonsson e Kjenllin, 2001).

2.3 – Aplicações de Sistemas em Corrente Contínua:

Segundo SOOD (2004), devido os custos para implementação de um sistema em corrente contínua, sua aplicação está ligada a um dos quatro tipos abaixo:

- Cabos subterrâneos ou submarinos:

Conexões longas entre sistemas subterrâneos ou submarinos têm vantagens significativas na utilização de sistemas em CC em relação a CA. O desenvolvimento de Fontes de Tensão Conversoras (*Voltage Source Converters, VSC*) e de

condutores feitos de polímeros resistentes têm permitido novos usos como o sistema “*HVDC Light*”, apesar das limitações quanto a transmissão de 1,80 GW e 500 kV.

- Transmissão de alta potência em grandes distâncias:

Os Elos de Corrente Contínua para grandes distâncias são os exemplos de melhor aplicação dessa tecnologia, onde, a distância de equilíbrio é ultrapassada e o sistema em *HVDC* se torna mais viável, conforme descrito no item 2.4.

- Interconexão assíncrona de sistemas em corrente alternada:

A conexão de sistemas que trabalham em frequências diferentes tem muitas vantagens se utilizado a CC, pois a transmissão pode ser feita na mesma frequência da fonte e retificada em seu destino. Exemplo disso é a usina de Itaipu-binacional, onde foi construída uma linha de transmissão que opera em 50Hz, frequência utilizada no Paraguai e, no destino final, São Paulo – Brasil, têm sua frequência retificada para 60Hz.

- Estabilização do fluxo de potência integrado ao sistema de potência:

Em grandes sistemas interligados, o fluxo de potência para laços em corrente alternada sob condições de perturbação pode sofrer sobrecargas e problemas de estabilidade, pondo em risco a segurança da rede. Colocando elos de corrente contínua estrategicamente posicionados, pode-se obter melhorias devido ao rápido controle do sistema em CC, ao amortizar as sobrecargas em tempo hábil. Um exemplo desta aplicação é o IPP Link nos Estados Unidos, que compreende uma linha de transmissão entre os estados de Utah e Califórnia. O planejamento para essa aplicação requer um estudo aprofundado para avaliar seus benefícios.

2.4 – Vantagens e Desvantagens da Transmissão em Corrente Contínua/Corrente Alternada:

Segundo NIQUINI (2009), a utilização de sistemas em corrente contínua, inicialmente, se deparava com inúmeros empecilhos que por vezes inviabilizavam sua implementação, dentre eles:

- Alto custo dos conversores;
- Impossibilidade de utilizar transformadores para alterar a tensão em CC;
- Geração de harmônicos;
- Necessidade de reativos por parte do sistema em CC;
- Controles complexos.

Grande parte desses problemas foram solucionados recentemente, diante dos avanços tecnológicos (Sood, 2004):

- Aumento da capacidade dos tiristores;
- Construção modular dos conversores, facilitando a montagem e operação;
- Utilização de conversores de 12 pulsos (ou mais);
- Uso de comutação forçada;
- Aplicações de eletrônica digital e fibras óticas no controle dos conversores.

Desta forma, tornou-se viável sua utilização, apesar dos custos serem relativamente altos. Os custos de uma linha de transmissão compreendem os custos de infraestrutura real (construção da linha) e os custos incorridos de requisitos operacionais (perdas). A Figura 7 demonstra uma comparação entre uma linha genérica em AC e CC (Silva, 2011).

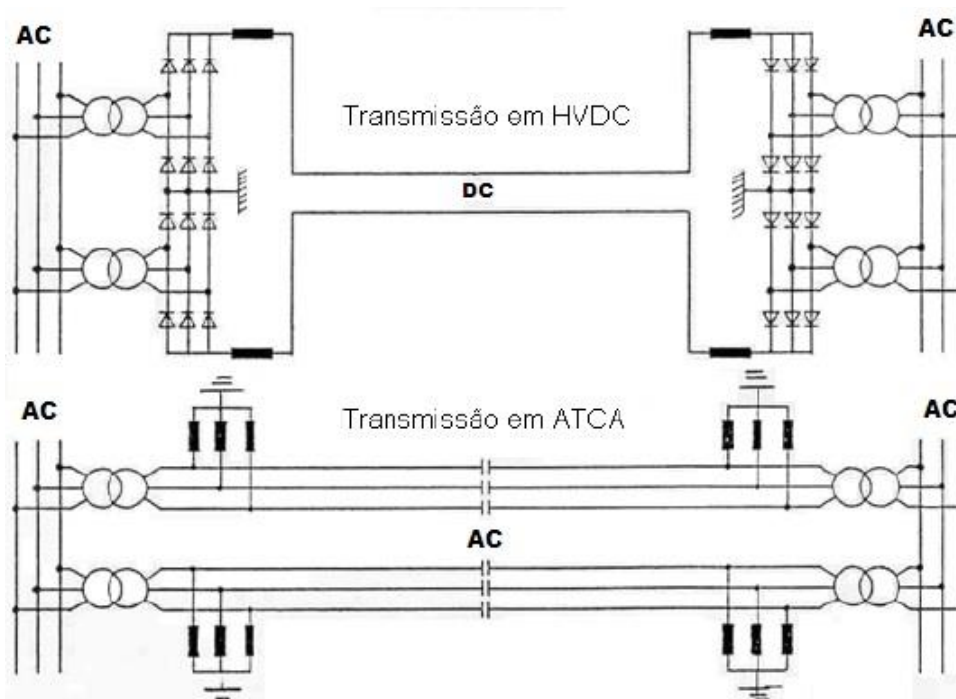


Figura 7: Opções comuns de transmissão em CC e AC, modificado (Silva, 2011).

Considerando os requisitos de isolamento para tensões pico de linhas de transmissão em AC e CC, tem-se que a utilização de três condutores com defasagem de tensão de 120° , em AC pode ser suprida por dois condutores, um positivo e outro negativo utilizando CC. Portanto, para uma determinada potência, uma linha de transmissão (LT) em CC requer torres menores e mais simples. A Figura 8 mostra a comparação entre uma LT em CC e AC para o nível de tensão de 2000MW.

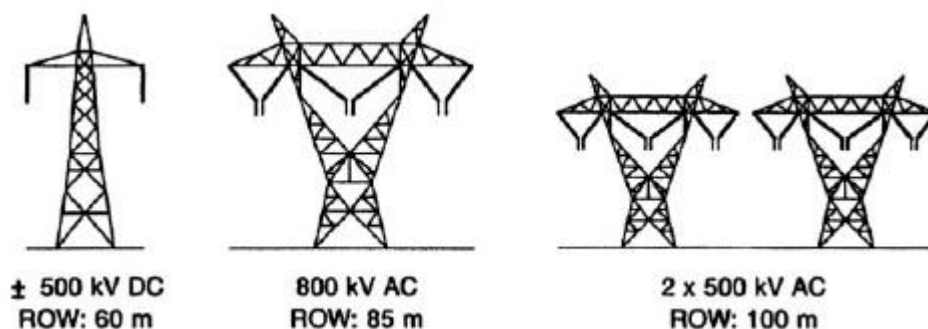


Figura 8: Comparativo entre linhas de transmissão CA-CC (Sood, 2004).

Com apenas dois condutores, a transmissão em CC, têm menores perdas em transmissão de potência, menores perdas dielétricas nos condutores e ausência do efeito de pele. A soma dessa redução de perdas pode chegar a dois terços das perdas em CA. O efeito Corona também é menos significativo para CC.

Outros fatores que influenciam o custo de uma linha de transmissão são os custos de compensação e de equipamentos terminais. Considerando uma linha em corrente contínua não são necessários a compensação de reativos, mas os custos de equipamentos terminais são mais caros devido a necessidade de filtros e conversores (Sood, 2004).

A Figura 9, faz um comparativo entre os custos para linhas em CC e linhas em CA, onde o ponto de encontro entre as duas linhas é chamada distância de equilíbrio. Essa distância de equilíbrio pode variar de 400 a 600 km para linhas de transmissão via cabos aéreos e de 25 a 50 km via cabos subterrâneos (Sood, 2004).

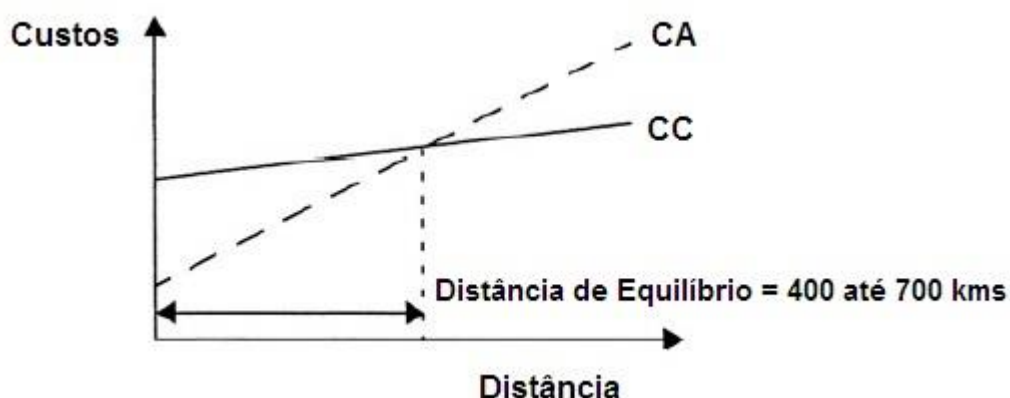


Figura 9: Comparação de custos pela distância em CC e CA, modificado (Sood, 2004).

Atualmente, o número de sistemas em corrente alternada é muito maior que o número de sistemas em corrente contínua, visto que sistemas em corrente contínua só devem ser utilizados para aplicações específicas. Apesar de suas vantagens, não necessariamente os sistemas em CA vão ser substituídos por sistemas em CC, uma vez que o custo dessa substituição é muito alto e não apresenta vantagens para todas as aplicações. Segundo SOOD (2004) as maiores razões para a não substituição são:

- Primeiro, a proteção de sistemas em CC é complexa e a incapacidade de transformação da tensão nessas redes impossibilitam certas aplicações.

- Segundo, o desenvolvimento da eletrônica de potência resultou no melhor desempenho das transmissões em CA.. Hoje utilizam-se dispositivos FACTS (ou do inglês, *Flexible Alternate Current Transmission System*), capazes de controlar as restrições de transmissão e de potência relacionados a estabilidade.

2.5 – Panorama Nacional e Mundial de sua Utilização:

Mundialmente, sistemas *HVDC* são usados comercialmente desde 1954, porém, a partir dos anos de 1970, observa-se um aumento em suas aplicações (Sood, 2004 e Nikini, 2009). Existem várias razões para a escolha de sistemas em *HVDC*, visto que diversas aplicações foram usadas no mundo todo (Rudervall, 2010):

- Nas Filipinas, o projeto Leyte-Luzon (1997), utilizou o sistema em *HVDC* para o fornecimento, a partir de um gerador geotérmico em massa, que fez a interligação de ilhas ao melhorar a estabilidade da rede de CA Manila.

- Na Índia, o sistema em *HVDC* foi escolhido para a transmissão de grandes quantidades de energia (1500 MW), entre Rihand e Delhi (1991), ao garantir perdas mínimas e melhorar a qualidade do sistema e do controle.

- Em 1991, a Austrália utilizou o *HVDC* para interligar duas redes independentes (Queensland e New South Wales) e permitir a negociação e o fluxo de energia elétrica entre as duas redes. Dessa forma, diminuiu o tempo de construção da linha e garantiu baixo impacto ambiental.

No Brasil, a utilização de sistemas em *HVDC* começou a partir da entrada em operação da usina de Itaipu-binacional, em 1984, onde metade da usina opera em 60 Hz e é transmitida em corrente alternada e a outra metade opera em 50 Hz,

frequência utilizada no Paraguai. A transmissão para a estação de Ibiúna, São Paulo se dá por meio de dois elos de ± 600 kV em CC, onde a tensão é transformada para CA e com frequência de 60 Hz.

Em 1998, o projeto Garabi conectou o Brasil e Argentina por meio de uma conexão CCC (*Capacitor Commutated Converter*) Back-to-Back para conectar o sistema argentino, que trabalha sob a frequência de 50 Hz, com o sistema brasileiro. É a primeira conexão CCC feita no mundo e foi utilizado para conectar dois grandes sistemas, onde os pontos de conexão de ambos os sistemas são relativamente fracos (Graham, Biledt e Johansson, 2004)

Apesar de pouco explorado, o tema voltou à tona em 2008, a partir da licitação do Complexo do Rio Madeira, composto pelas Usinas de Jirau e Santo Antônio, ligando Porto Velho (RO) a Araraquara (SP). Composto por duas linhas de transmissão em corrente contínua, LT Coletora Porto Velho – Araraquara Nº 01 e Nº 02, com tensões de ± 600 kV e com extensão aproximada de 2.375 km (Aneel, 2008).

No caso de Belo Monte, a parceria entre Furnas Centrais Elétricas, Eletronorte e a chinesa State Grid ganhou a licitação para a linha de transmissão que vai ligar Belo Monte no Pará a cidade de Estreito (MG). A Xingu Rio Transmissora de Energia, que pertence a chinesa State Grid, ganhou a licitação para a linha de transmissão que vai ligar Belo Monte a cidade de Nova Iguaçu (RJ). Serão duas linhas de transmissão em corrente contínua, ligando a usina aos estados e têm o prazo para entrada em operação de 50 meses a partir da data de assinatura do contrato (Aneel, 2015) e (MME, 2015).

Capítulo 3 – Tipos de Conversores:

Sistemas em *HVDC* requerem conversores capazes de converter energia elétrica, de acordo com sua capacidade, de corrente alternada para corrente contínua ou vice-versa. Basicamente, existem dois tipos para o processo de conversão trifásica: Conversor de Fonte de Tensão (ou do inglês, Voltage Source Converter - VSC) e Conversor de Fonte de Corrente (ou do inglês, Current Source Converter - CSC) (Sood, 2004).

Até meados dos anos de 1990, sistemas *HVDC* usavam, quase que exclusivamente, conversores do tipo CSC. Esses conversores utilizavam válvulas a arco de mercúrio e depois passaram a utilizar válvulas de tiristor de alta potência. Com o advento de novas tecnologias foram criados os Comutadores de Alta Tensão, capazes de gerar padrões de disparos mais rápidos. Essa tecnologia tornou os conversores do tipo VSC viáveis de serem produzidos (Sood, 2004).

A escolha, para um projeto, entre os dois conversores é fundamentalmente econômica, uma vez que eles têm as mesmas funções de conversão básica. No entanto, conversores do tipo VSC ainda estão limitados a capacidade de 250 MW devido as limitações comerciais e práticas. (Sood, 2004).

3.1 – CSC/*HVDC*:

Conversores de Fonte de Corrente, utilizam nos dias de hoje, tiristores com elemento de comutação e são operados de acordo com o sistema de corrente alternada e, desta forma, estão bastante propensos às condições de operação da rede (Rudervall *et alli*, 2010). Sua característica de comutação inviabiliza adiantar os ângulos de disparo em relação à tensão, possibilitando apenas atrasá-los, fazendo-o operar com o fator de potência atrasado, onde o fluxo de reativos sempre ocorre do sistema CA para o sistema CC (Sood, 2004).

Conversores do tipo CSC de 6 ou 12 pulsos têm como características a Corrente Contínua constante, suas válvulas funcionam como disjuntores ideais e o sistema CA têm três fases equilibradas e perfeitamente senoidais (Sood, 2004). A Figura 10 representa o diagrama esquemático de ligação para conversores do tipo CSC.

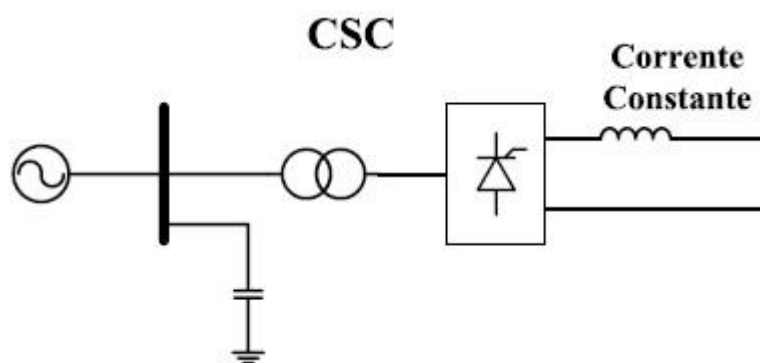


Figura 10: Diagrama Esquemático de Ligação de um Conversor do tipo CSC (Niquini, 2009).

3.2 – VSC/HVDC:

Conversores de fonte de tensão são caracterizados por uma corrente predominantemente capacitiva no lado CC e indutiva no lado CA. Nessas condições, a tensão no lado CC é bem definida e a corrente no lado AC é controlada pelo processo de modulação. Em contrapartida, com os conversores do tipo CSC permitem o fluxo de potência bidirecional. Com o avanço da tecnologia, a comutação adotada para VSC são do tipo PWM (*Pulse Width Modulation*), capazes de gerar baixas distorções harmônicas (Niquini, 2009). As vantagens da utilização de VSC são: rápido controle de potência reativa, alto nível de qualidade no fornecimento de energia, mínimos impactos ambientais e a capacidade de se conectar com redes de CA fracas ou inativas (Sood, 2004). A Figura 11 representa o diagrama esquemático de ligação de um conversor VSC.

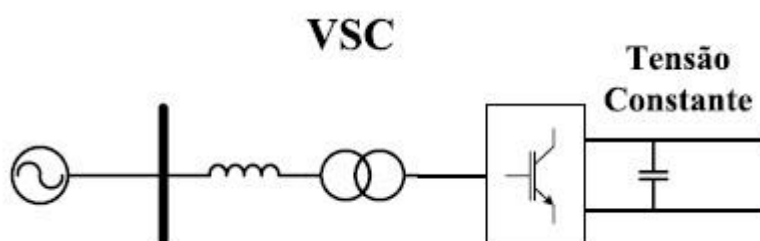


Figura 11: Diagrama Esquemático de Ligação de um Conversor do tipo VSC (Niquini, 2009).

A Tabela 1 faz o comparativo entre as principais características de conversores do tipo 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 <i>HVDC</i> para as Correntes de Falta podem ser controladas (Controle Central) e amortecidas (Reatores)	As Contribuições do <i>HVDC</i> para as Correntes de Falta não podem ser limitadas pelo Controle (pode inclusive aumentá-las pela descarga dos Capacitores)
Requer reativos do sistema CA	Pode fornecer ou absorver reativos do sistema CA
Requer grande filtros para eliminação harmônica do lado CA.	Requer pequenos filtros para grande eliminação harmônica do lado CA
Comutação Natural	Autocomutados
Chaveamento na frequência da rede	Permite a utilização de chaveamentos em alta frequência
Pequenas perdas de chaveamento	Grandes perdas de chaveamento (se utilizada 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 naqueles sem geradores

Tabela 1: Diferença entre os conversores do tipo CSC e VSC (Niquini, 2009).

3.1 – CCC/*HVDC*:

Conversor comutado a capacitor é uma evolução, relativamente simples, de conversores fonte de corrente (CSC), onde são ligados capacitores em série entre os transformadores e as válvulas conversoras. São utilizados em sistemas fracos e com baixos níveis de curto-circuito, onde elimina-se a necessidade de utilizar compensadores síncronos (Niquini, 2009). Para esses conversores não há a necessidade de bancos de capacitores em derivação para a compensação de reativos. Entretanto, sua inclusão aumenta consideravelmente a estabilidade dinâmica dos inversores e contribui para a redução dos ângulos de comutação do sistema (Ottosson e Kjenllin, 2001). A Figura 12 representa o diagrama esquemático de ligação de um conversor do tipo CCC.

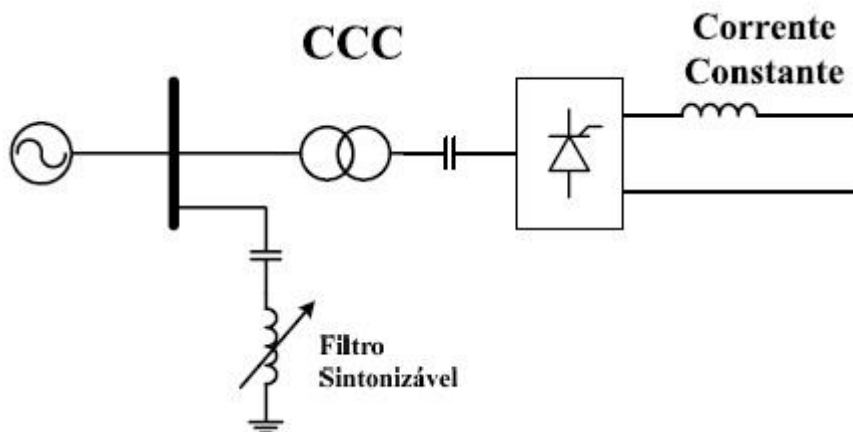


Figura 12: Diagrama Esquemático de Ligação de um Conversor do tipo CCC (Niquini, 2009).

Esses conversores são usados para compensar quedas de tensão ocorridas no sistema de CA, onde o aumento da corrente é compensado pelo aumento da tensão nos capacitores, reduzindo assim, os impactos das variações de potências reativas (Graham *et alii*, 2002).

Conclusões Parciais:

Apesar de o assunto possuir poucas referências nacionais, observa-se que o Brasil possui linhas de transmissão que são modelos reconhecidos mundialmente. Grande parte dos dados utilizados no trabalho, foram retirados de referências que estudam projetos nacionais e tem relativa importância no contexto mundial.

Observa-se, também, que diversas aplicações de sistemas *HVDC* podem ser utilizadas para solucionar problemas no sistema energético brasileiro como, por exemplo a obtenção de energia de países que fazem fronteiras e que trabalham com frequências diferentes. Possibilita a implantação de longas linhas de transmissão com menores perdas, bem como a implementação de linhas estrategicamente posicionadas que podem melhorar o controle e o equilíbrio da rede.

Vale ressaltar também, que mesmo sem grandes pesquisas na área, o Brasil é referência mundial graças aos projetos como Santo Antônio – Jirau, Itaipu Binacional, Garabi e, futuramente Belo Monte.

Portanto, deve-se fortalecer as pesquisas relacionadas ao tema dada a importância de garantir um sistema de transmissão eficaz, uma vez que o país possui um território muito vasto e necessita de um sistema energético eficiente para o pleno funcionamento da economia.

Atividades Futuras:

Propõem-se para o próximo trabalho a simulação de sistemas *HVDC* no software Matlab utilizando a ferramenta Simulink, onde pode-se simular diversas condições de funcionamento do sistema e analisar suas características de funcionamento e controle. As Figuras 13, 14 e 15 foram extraídas do software e mostram como devem ser feitas as simulações e a retirada das informações necessárias para análise. Pretende-se também realizar o estudo de análise de estabilidade transitória com a inserção de sistemas *HVDC* em um sistema elétrico de potência, suas características, causa e efeitos.

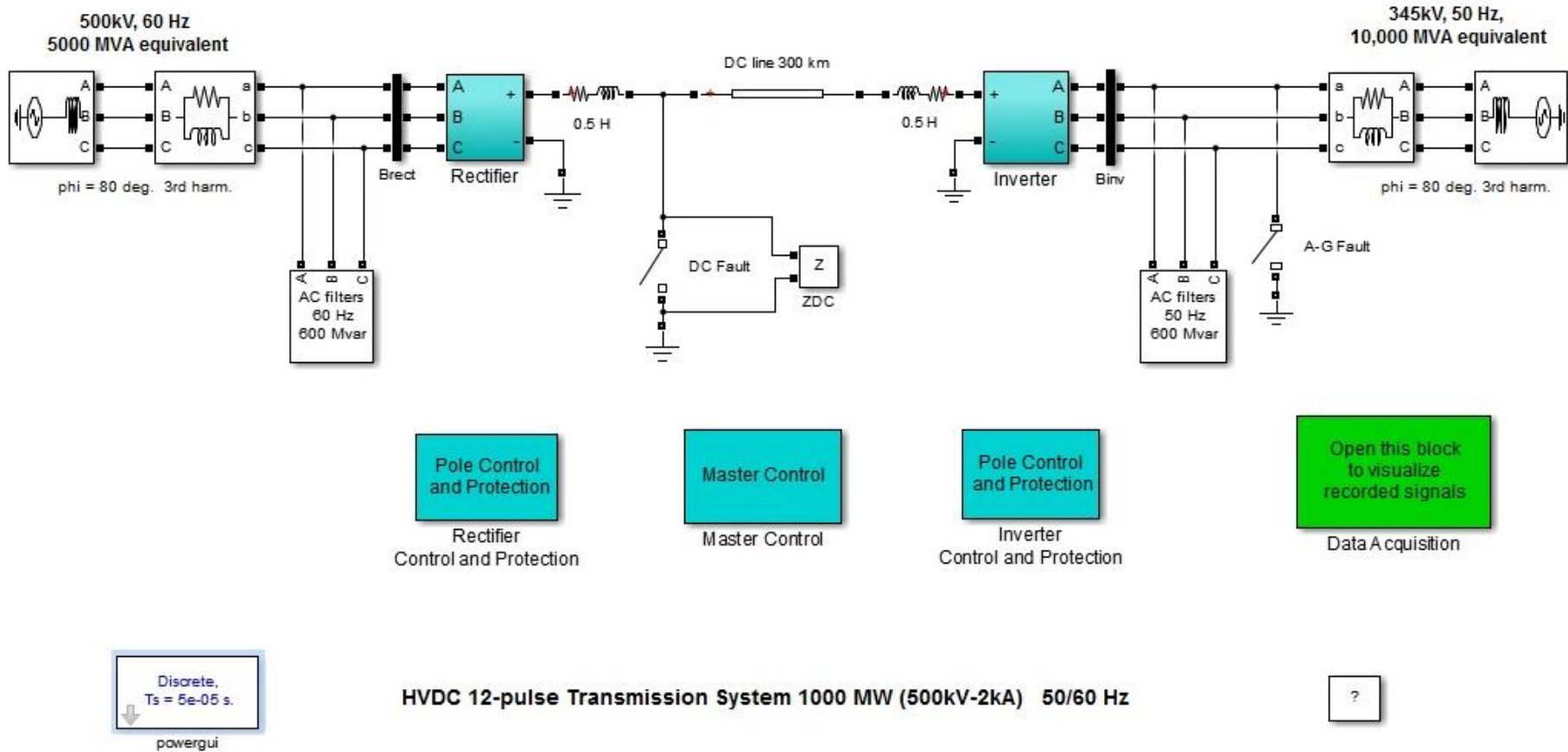


Figura 13 – Simulação de um Sistema HVDC com conversor do tipo VSC do Simulink.

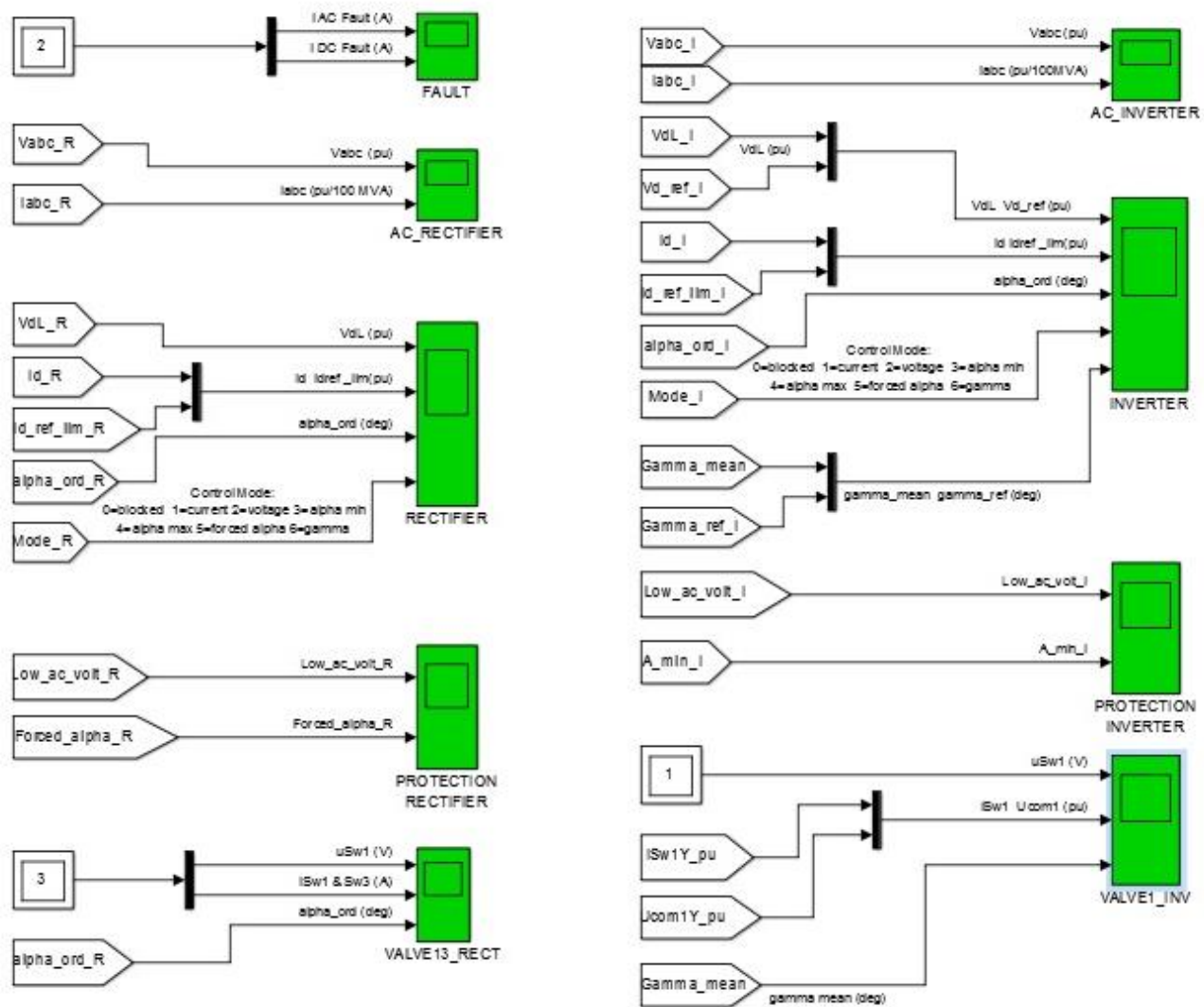


Figura 14 – Módulos para leitura dos resultados da simulação.

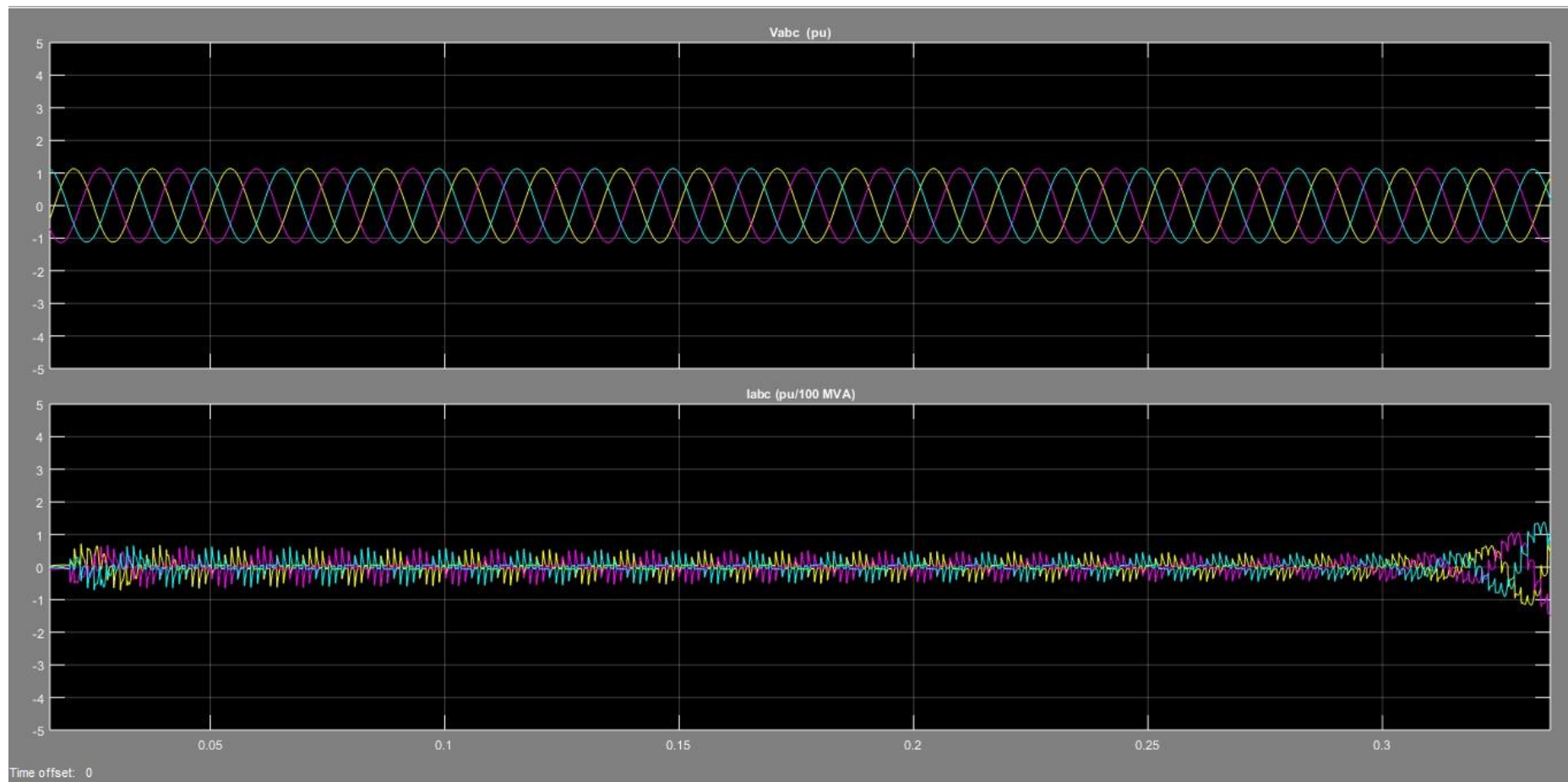


Figura 15 – Resultados encontrados da simulação.

Referências Bibliográficas:

Abboud, Ricardo; Brandi, Eduardo; lasbeck, Sérgio; Borges, Denise, FILOSOFIA DE PROTEÇÃO DE FILTROS DE HARMÔNICOS. X STPC SEMINÁRIO TÉCNICO, Brasil, Pernambuco, 2010.

GRAHAM, J.; BILEDT, G.; JOHANSSON, J. Interligações de Sistemas Elétricos através de Elos HVDC. Brasil, ABB; Suécia, ABB, 2004.

GRAHAM, J.; JONSSON, B.; MONI, R. S. (2002). **“The Garabi 2000 MW Interconnection Back-To-Back HVDC to Connect Weak AC Systems”**. *Transmission Systems and Telecommunications – Present & Future*, Nova Délhi, Índia, 2002.

Informativo Aneel, publicado no dia 11/09/2008, disponível em: http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/noticias_area/arquivo.cfm?tipo=PDF&idNoticia=2749&idAreaNoticia=1

Informativo MME, Publicado no dia 30/10/2015, disponível em: http://www.mme.gov.br/web/guest/pagina-inicial/outras-noticias/-/asset_publisher/32hLrOzMKwWb/content/aneel-assina-contrato-do-segundo-bipolo-da-transmissao-de-belo-monte-com-2-5-mil-km;jsessionId=F0B45393AE8C0C7F6C3AA8A6DEF64B8A.srv155.

Informativo Aneel, publicado no dia 18/06/2015, disponível em: http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/noticias_area/arquivo.cfm?tipo=PDF&idNoticia=7951&idAreaNoticia=1

KUNDUR, Prabha. **Power system Stability and Control**. British Columbia: Mcgraw-hill, 1994.

NIQUINI, Filipe Magno Mayrink. MODELAGEM DO ELO DE CORRENTE CONTÍNUA PARA ANÁLISE HARMÔNICA UTILIZANDO O MÉTODO DE INJEÇÃO DE CORRENTES TRIFÁSICAS HARMÔNICO COM SOLUÇÃO ITERATIVA. Dissertação de Mestrado no Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2009.

OTTOSON, N.; KJELLIN, L. (2001). “**Modular Back-to-Back HVDC, with Capacitor Commutated Converters (CCC)**”. *IEE AC-DC Power Transmission*, No. 485, 28 a 30 novembro de 2001.

RUDERVALL, R.; CHARPENTIER, J. P.; SHARMA, R. (2000). “High Voltage Direct Current (HVDC) Transmission Systems Technology”, Review Paper, Energy Week, Washington, D.C., USA, March 7-8, 2000.

SOOD, Vijay K.. **HVDC AND FACTS CONTROLLERS**: Applications of static converters in power systems. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2004. 295 p.

VASCONCELOS, Leandro Almeida. METODOLOGIA PARA A REPRESENTAÇÃO DE SISTEMAS DE TRANSMISSÃO EM CORRENTE CONTÍNUA MULTITERMINAIS NO PROBLEMA DE FLUXO DE POTÊNCIA. Dissertação de Mestrado no Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2014.

WOODFORD, D. A. (1998). **HVDC Transmission**, Manitoba HVDC Research Centre, R3T 3Y6, Canadá, March 18, 1998.