

Projeto de Graduação



Junho 2023

Estudo de viabilidade da integração de usinas solares na rede elétrica em corrente contínua de alta tensão

Christian Schlegel Costa



www.ele.puc-rio.br

***Estudo de viabilidade da integração de usinas
solares na rede elétrica em corrente contínua de
alta tensão***

Aluno: Christian Schlegel Costa

Orientador: Guilherme Monteiro Torelly

Trabalho apresentado com requisito parcial à conclusão do curso de Engenharia Elétrica na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.

Agradecimentos

Devo agradecer ao meu orientador Guilherme Torelly por toda ajuda e paciência que teve comigo e ao meu chefe, Alexandre Ramis pelo material disponibilizado.

Resumo

Este projeto tem como finalidade o estudo da viabilidade da integração de usinas solares na rede elétrica em corrente contínua de alta tensão em seus aspectos técnicos e econômicos. Podendo assim encontrar uma possível forma de redução do custo das novas instalações, principalmente aquelas que se encontram mais distantes do sistema de transmissão.

Este trabalho contempla os princípios básicos e o funcionamento dos painéis solares e dos conversores de corrente contínua.

Palavras-chave: usinas solares, corrente contínua de alta tensão, viabilidade

Sumário

1.	Introdução.....	1
2.	Energia Solar	3
a.	Semicondutores	3
b.	Diodo	4
c.	Painel Solar.....	6
	Características elétricas de células solares	8
3.	Sistema de transmissão de corrente contínua em alta-tensão - HVDC	10
a.	Introdução	10
	Vantagens.....	10
	Desvantagens.....	11
b.	Harmônicos	12
c.	Tipos de conversores.....	13
	Tipos de válvulas conversoras	14
	Retificador	19
	Inversor LCC	21
	Inversor VSC.....	29
	Inversor MMC-VSC.....	34
	Conversores CC-CC.....	37
d.	Controle do sistema HVDC	37
	Bipolo VS Monopolo.....	37
	Controle de um sistema Biterminal HVDC LCC	38
	Controle de um sistema Biterminal HVDC VSC.....	40
	Controle de um sistema Multiterminal.....	41
4.	Desenvolvimento do estudo de viabilidade.....	43
a.	Inversão na Subestação.....	43
b.	Conexão em barra CC.....	45
	Conexão direta	45
	Conexão com conversor CC-CC na instalação	46
	Conexão com conversor CC-CC na subestação.....	46
5.	Conclusão.....	47
6.	Referências.....	48

1. Introdução

Nos últimos anos se vê cada vez mais urgente a mudança para uma matriz energética mais sustentável. Nesta transição energética, fontes como a energia solar e a eólica devem ter sua participação aumentada no sistema elétrico.

Recentemente, foi observada uma redução mundial no custo de produção de energia pelas fontes renováveis, como pode ser visto na Figura 1.

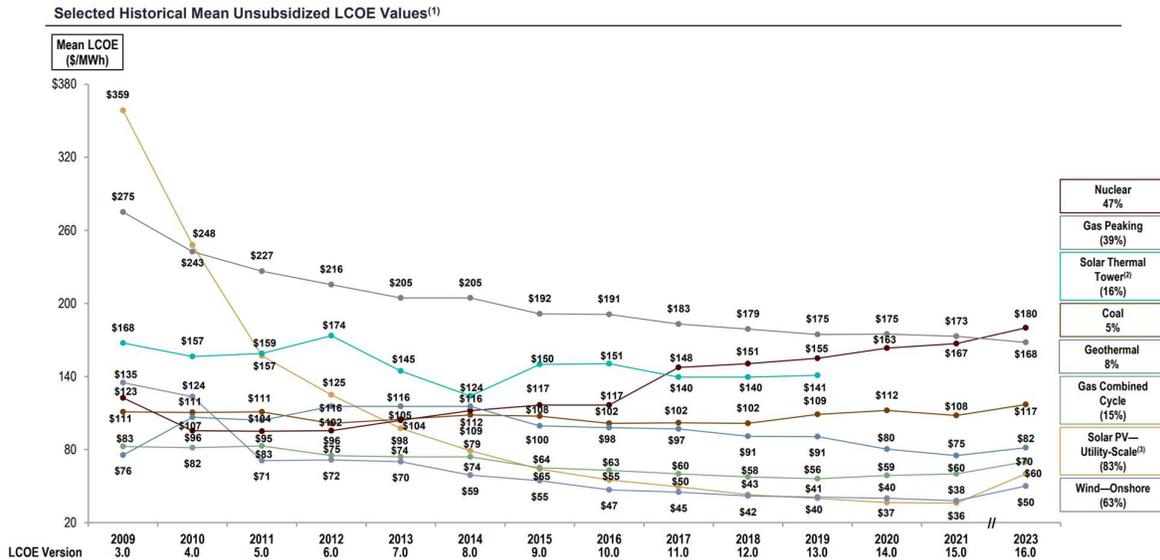


Figura 1 – Preço das diversas fontes energéticas ao longo dos anos [19]

Esta redução de custo acelerou a adoção de fontes renováveis, como pode ser visto na Figura 2.

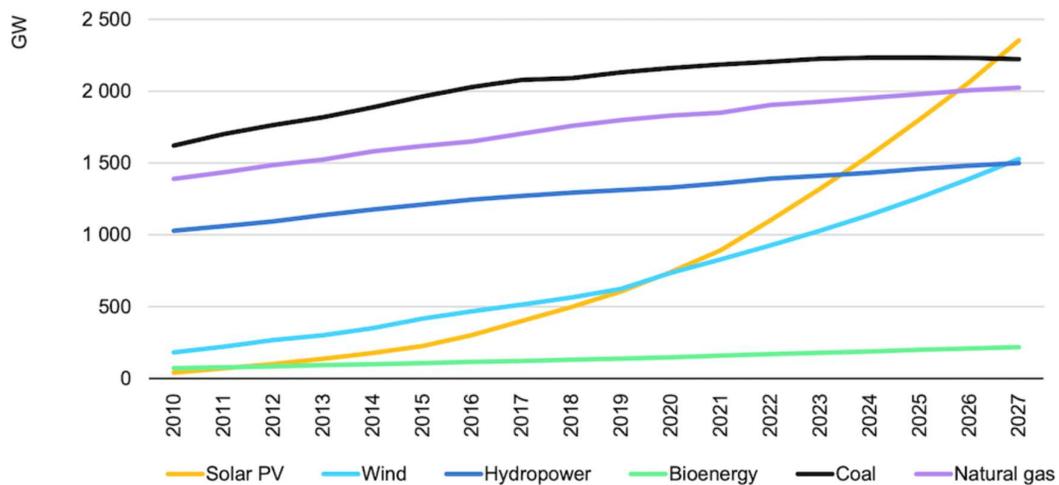


Figura 2 – Geração das diversas fontes energéticas ao longo dos anos. [20]

Como pode ser visto na Figura 3, a produção de energia solar é majoritariamente feita de forma centralizada em grandes usinas solares, seguida pelas aplicações comerciais, onde indústrias instalam painéis para sustentar seu consumo interno. Depois vem a geração distribuída onde residências instalam painéis para o consumo interno e venda para a rede. As instalações fora da rede elétrica apresentam a menor parcela de contribuição para a energia total produzida.

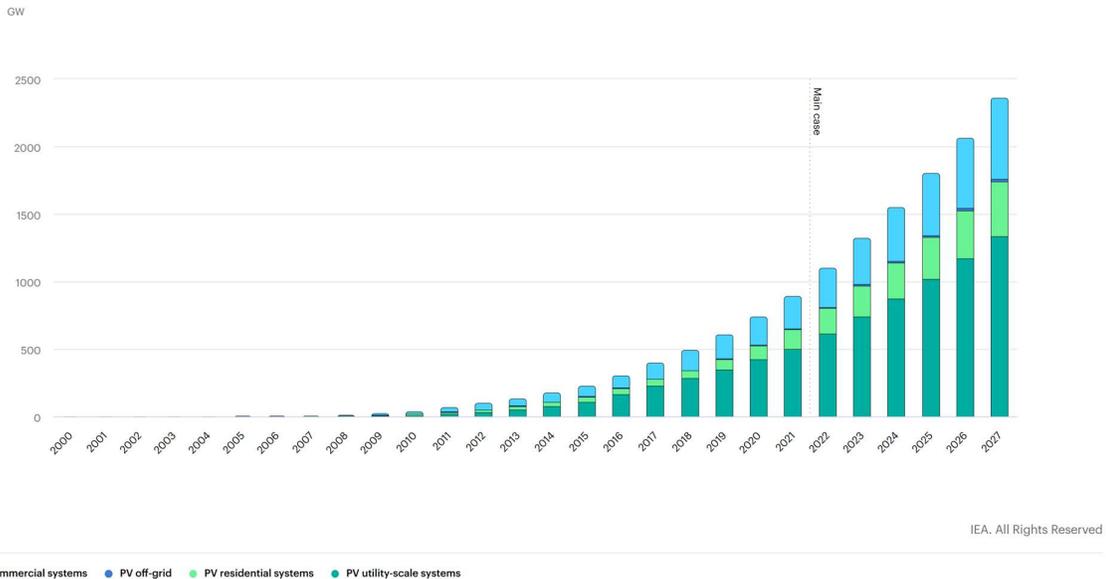


Figura 3 – Geração solar em suas diferentes formas ao longo dos anos. [20]

A transição energética acelerada requer um aumento significativo da malha de distribuição de energia. Este fator é preponderante quando se leva em conta que as fontes solares e eólicas são intermitentes, portanto, o sistema deve ser capaz de se adequar às rápidas mudanças no fluxo de energia.

Uma forma de suportar a introdução de novas fontes intermitentes de energia no sistema é aumentando a sua capacidade de transmitir energia por longas distâncias e com baixas perdas. Para este tipo de transmissão é recomendada a transmissão em HVDC (do inglês, *High Voltage Direct Current*).

A geração de energia solar ocorre em corrente contínua, possibilitando que, em vez de transformá-la em alternada antes de transmitir, a transmissão ocorra diretamente em HVDC. Isto aumenta a capacidade de resposta do sistema a mudanças repentinas, pois as fontes intermitentes são conectadas em linha apropriadas.

2. Energia Solar

A energia solar é comumente utilizada de duas maneiras: através da sua conversão em eletricidade ou calor. A conversão direta em eletricidade ocorre através do efeito fotovoltaico, que é o princípio fundamental de operação dos painéis fotovoltaicos utilizados para a geração de energia elétrica em corrente contínua. A energia térmica pode ser utilizada diretamente, para o aquecimento de um objeto ou sistema, ou indiretamente, por exemplo em usinas solares térmicas. Neste trabalho focaremos somente na energia gerada por painéis fotovoltaicos. A tecnologia atual de painéis fotovoltaicos é baseada, quase em sua totalidade, em células solares fabricadas de materiais semicondutores.

a. Semicondutores

Os semicondutores se diferenciam dos metais por seus elétrons precisarem de alguma energia para poderem passar da banda de valência (elétrons presos ao núcleo do átomo) para a banda de condução (elétrons caminhando livremente pela estrutura cristalina do material). O diagrama de bandas de um material semicondutor é mostrado na Figura 4. Esta energia é denominada de energia do gap, caso o gap seja muito alto o material é classificado como isolante.

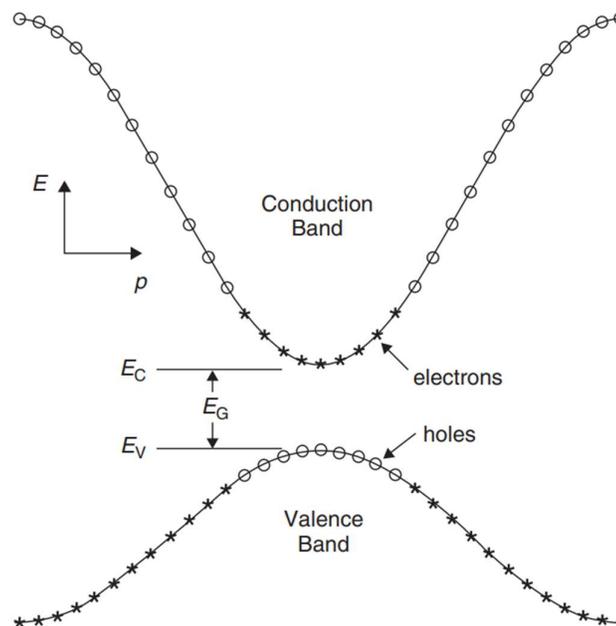


Figura 4 – Diagrama de bandas simplificado de um semicondutor.[13]

O elétron que sai da banda de valência para a de condução é, geralmente, o elétron de mais alta energia que está sendo compartilhado por dois núcleos atômicos em uma ligação atômica. Quando um elétron faz esta transição, ele deixa uma lacuna, que pode ser ocupada pelo elétron adjacente. Esta falta de elétron na banda de valência é denominada de buraco, e um elétron de um átomo adjacente, assumindo esta nova posição, equivale ao buraco podendo caminhar pela rede cristalina.

Cada elétron excitado para a banda de condução gera dois portadores de carga que podem se mover livremente pela rede cristalina e contribuir positivamente para a condutância do material. Como elétrons são férmions, sua distribuição energética é dada pela distribuição de Fermi-Dirac, mostrada na Figura 5. Ao multiplicar a distribuição energética pela quantidade de estados que o elétron pode ocupar (Figura 4), é obtido o total de portadores de carga do material.

Para fazer a multiplicação descrita acima é preciso saber o nível de Fermi do material, ou seja, a energia para a qual, na ausência de excitação térmica (0 K), ocorre a descontinuidade na distribuição de Fermi-Dirac (Figura 5). Para semicondutores não dopados, este nível se encontra exatamente no meio do gap.

É possível modificar a energia do nível de Fermi através da introdução de átomos com um número diferente de elétrons na sua camada de valência, no material semiconductor. Este processo é intitulado dopagem [18]. O nível pode se aproximar da banda de valência, se a dopagem for do tipo P ou para a banda de condução, se a dopagem for do tipo N.

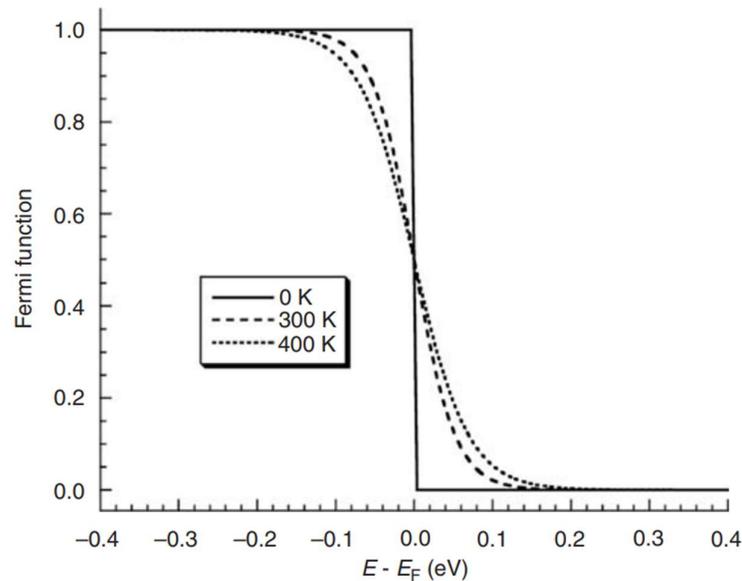


Figura 5 – Distribuição de Fermi-Dirac.[13]

A forma clássica de compreender a dopagem é utilizando a quantidade de ligações químicas que um átomo na estrutura cristalina pode fazer. Por exemplo, em uma estrutura cristalina onde cada átomo faz um total de 4 ligações químicas (como o silício), um dos átomos pode ser substituído por outro que faz 3 ligações (como o gálio). Este átomo substituído terá de fazer 4 ligações com seus vizinhos, no entanto uma delas terá um elétron a menos. Este átomo que faz uma ligação a menos seria um exemplo de um dopante tipo P.

Para o dopante tipo N, se utiliza um átomo substituído que faz 5 ligações (como o arsênio). Este átomo ficará com um elétron sobrando, livre. Uma energia mínima fará com que ele consiga se deslocar livremente pela estrutura cristalina do material.

b. Diodo

O diodo é feito a partir de uma junção PN, ou seja, um lado do semiconductor possui dopagem tipo P e o outro lado tipo N, conforme apresentado na Figura 6.

Os buracos e elétrons livres podem se deslocar por toda a estrutura cristalina que forma o diodo. Elétrons livres, presentes no lado N, irão para o lado P, deixando átomos positivamente carregados da região que saíram. O mesmo acontece com os buracos do lado P. Este fenômeno ocorre até ser formado um campo elétrico intrínseco que consiga inibir a movimentação dos elétrons livres e dos buracos. Este campo elétrico atua sobre os portadores e os remove da região, criando assim uma região desprovida de portadores, denominada de região de depleção.

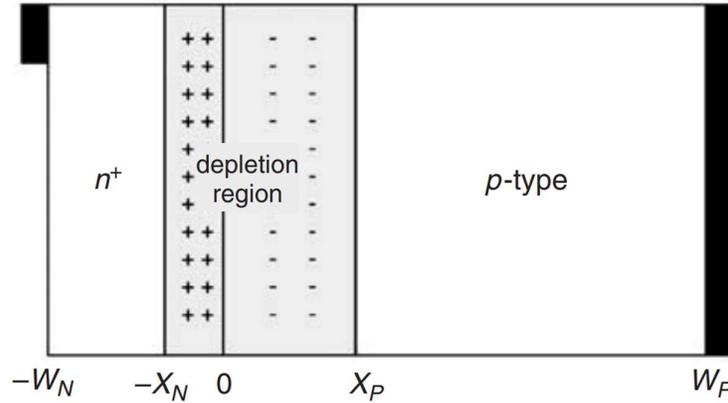


Figura 6 – Estrutura interna do diodo [13]

Outra forma de visualizar o comportamento interno dos portadores no diodo é observando as bandas de energia na condição de equilíbrio Figura 7. Na Figura 7A é possível ver que o campo elétrico criado se traduz em uma barreira que impede a passagem dos elétrons e buracos, ou seja, para um elétron ir do lado N para o lado P ele deve ganhar energia.

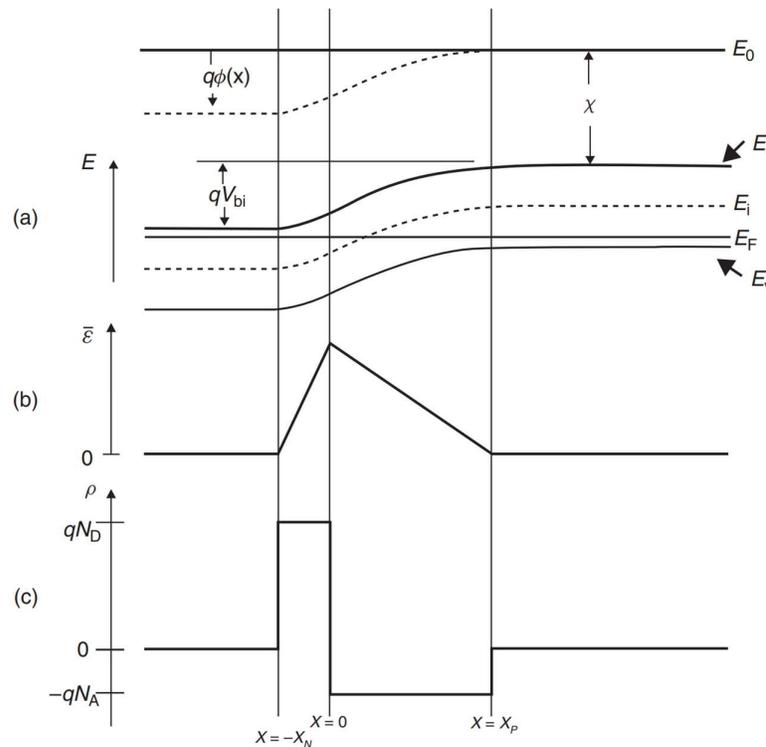


Figura 7 – Condição de equilíbrio em um diodo. (a) – bandas de energia. (b) – Campo elétrico. (c) – densidade de carga. [13]

O gráfico que representa o comportamento elétrico do diodo se encontra Figura 8, nele é possível ver 3 regiões de comportamento diferentes. Da direita para esquerda a primeira região é chamada de região de polarização direta. Nela o campo elétrico externo aplicado é na direção oposta ao campo intrínseco. Isto diminui o campo na região de depleção fazendo com que os elétrons e buracos voltem a mover de um lado para o outro. Este processo precisa de uma tensão mínima para ser iniciado, entre 0,15 e 4,0 V, dependendo do material.

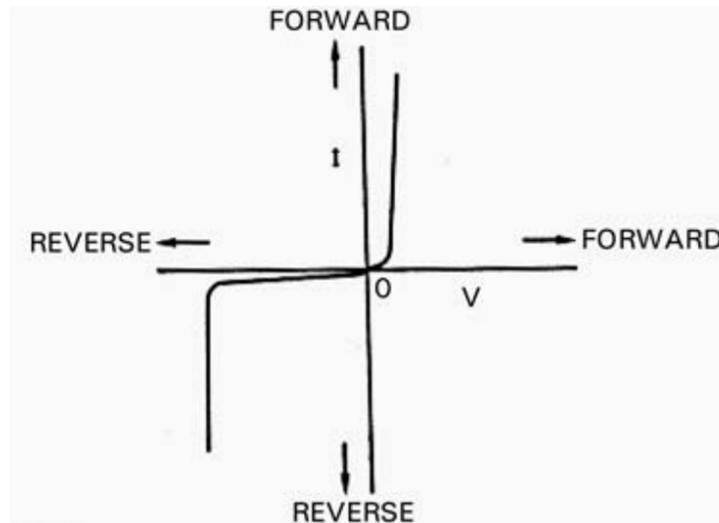


Figura 8 – Caracterização IxV do diodo. [2]

A segunda região ocorre na polarização reversa, onde o campo elétrico aplicado é na mesma direção do campo intrínseco o que acaba fortalecendo-o e impedindo a passagem de elétrons ou buracos de um lado para o outro do substrato.

Caso a tensão reversa aplicada seja superior a tensão de bloqueio reversa, entramos na última região aonde a corrente volta a fluir livremente. Dois efeitos diferentes explicam este fenômeno, o efeito avalanche e o efeito túnel.

Um elétron que exista no lado P pode acidentalmente entrar na região de depleção, sendo acelerado para o lado N. O efeito avalanche diz que caso o campo elétrico sendo aplicado seja o suficiente para dar energia ionizante ao elétron sendo acelerado, este elétron irá se chocar com os átomos da rede liberando outros elétrons no processo, criando uma avalanche.

O outro efeito é o de tunelamento, ele ocorre quando a energia da banda de condução do lado N se torna inferior a energia da banda de valência do lado P. Neste caso os eletros podem tunelar de uma banda para a outra cruzando assim a região de depleção.

O valor da tensão de bloqueio reversa deve ser conhecido, para evitar falhas críticas onde o dispositivo comece a conduzir corrente no sentido reverso. Ela também pode ser utilizada para reguladores de tensão, nos quais o dispositivo impedirá que a tensão ultrapasse sua tensão de bloqueio reversa, dissipando potência.

O efeito túnel pode ser obtido em uma tensão em polarização direta, isto ocorre quando o material é excessivamente dopado, tendo nas condições de equilíbrio a energia da banda de valência do lado P superior a energia da banda de condução do lado N. Este dispositivo recebe o nome de diodo túnel e é utilizado para a elaboração de dispositivos semicondutores complexos como painéis solares de múltiplas junções.

c. Painel Solar

Quando um semicondutor é exposto a luz, os fótons podem excitar um elétron da banda de valência para a banda de condução criando um par elétron buraco Figura 9. De forma semelhante se um elétron encontrar com um buraco eles podem se recombinar emitindo um fóton neste processo.

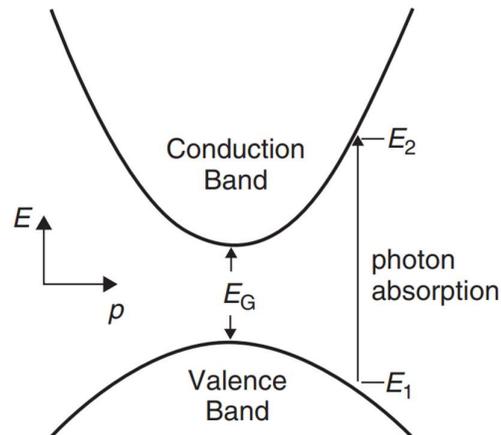


Figura 9 – Absorção de fóton em gap direto. [13]

A estrutura de banda é um gráfico de energia em função do momento, onde as linhas são as regiões nas quais os portadores podem existir. Sendo assim os materiais semicondutores podem ser classificados em materiais de gap direto ou indireto. O gap direto é quando o máximo da banda de valência possui o mesmo momento que o mínimo da banda de condução, como mostrado na Figura 9, no gap indireto é quando o máximo e o mínimo não estão alinhados, como mostrado na Figura 10.

Nos materiais de gap direto o elétron só precisa de um fóton para fazer a transição, como mostrado na Figura 9. Já nos materiais de gap indireto o elétron precisa da energia de um fóton e de um fônon (no mínimo). O fóton fornece a energia e o fônon muda seu momento. Isto diminui a probabilidade de absorção de fótons pelo material.

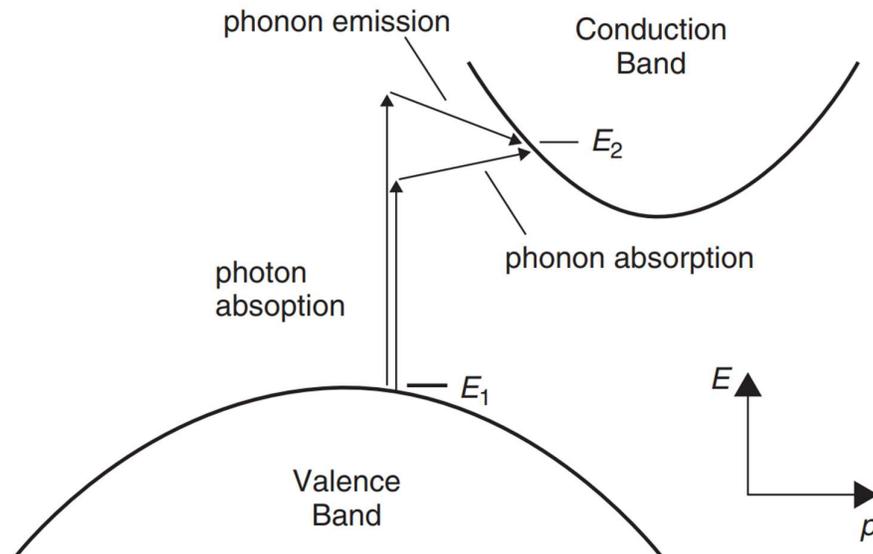


Figura 10 – Absorção de fóton em um material de gap indireto. [13]

Para as aplicações em produção de energia fotovoltaica é preferível que o material seja de gap direto, pois este tipo de material terá uma maior probabilidade de converter o fóton em energia

elétrica. Apesar de uma menor eficiência, a maior parte dos painéis solares é feita de silício, um material de gap indireto, devido ao baixo custo do material.

Características elétricas de células solares

O painel solar é formado por dezenas de diodos em série. Estes diodos são fabricados objetivando que a maior parte dos fótons consigam atingir sua região de depleção, onde serão absorvidos, gerando corrente elétrica. Cada diodo que compõe o painel solar é denominado de célula solar.

Um fóton pode criar um par elétron buraco e um par elétron buraco pode se recombinar, emitindo um fóton. Para a geração de corrente, é preciso separar da forma mais eficiente possível os elétrons dos buracos. A região de depleção naturalmente separa os elétrons dos buracos, contribuindo positivamente para geração de corrente e tensão da célula solar.

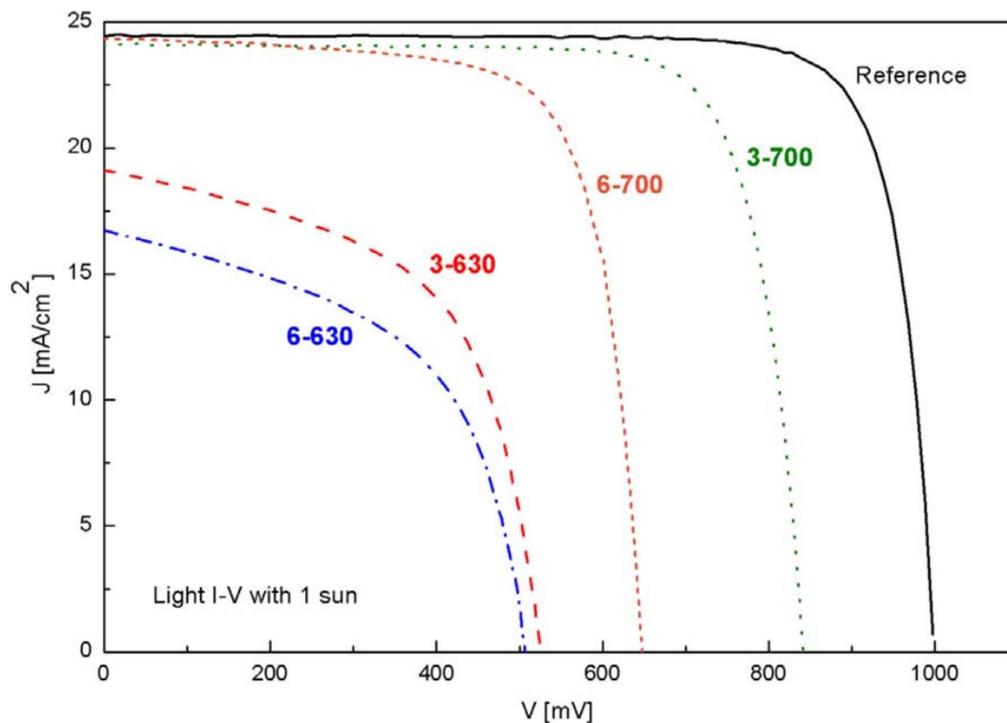


Figura 11 – Curva I-V de diferentes células solares. [23]

Quando o diodo é iluminado, sua curva I-V (Figura 8) é deslocada no sentido de aumento da corrente e tensão geradas. A Figura 11 representa o terceiro quadrante da curva I-V do diodo ao ser iluminado, com a corrente no sentido oposto. Esta convenção é utilizada para facilitar a visualização.

São definidos quatro parâmetros para a célula solar: a corrente de curto-circuito I_{SC} , a tensão de circuito aberto V_{oc} , e a corrente e a tensão de máxima potência I_{MP} e V_{MP} . Na operação em circuito aberto os pares produzidos e extraídos pela região de depleção se acumulam nas extremidades da célula, criando assim um efeito capacitivo e um campo na direção oposta ao campo intrínseco. No equilíbrio, o campo gerado pela célula será o suficiente para inibir o efeito do campo intrínseco, onde o último depende diretamente do gap do material e sua dopagem.

A tensão V_{oc} depende da intensidade luminosa sendo aplicada. Quanto maior a intensidade da luz incidente, mais alto será o valor da tensão de circuito aberto. Ela é limitada pela magnitude do campo intrínseco.

A corrente I_{SC} equivale à quantidade de portadores sendo criados por uma determinada intensidade luminosa. Diferentemente da V_{oc} , ela não apresenta um máximo. No entanto, estimando

a máxima intensidade luminosa à qual a célula será submetida, é possível calcular a corrente máxima que célula produz.

A tensão e corrente de máxima potência, também mudam com a intensidade luminosa à qual a célula é submetida. Por esta razão, é preciso rastrear a potência máxima produzida pela célula, conforme a intensidade luminosa varia ao longo do dia. O rastreamento e a variação da intensidade serão pontos de extrema importância para análises futuras.

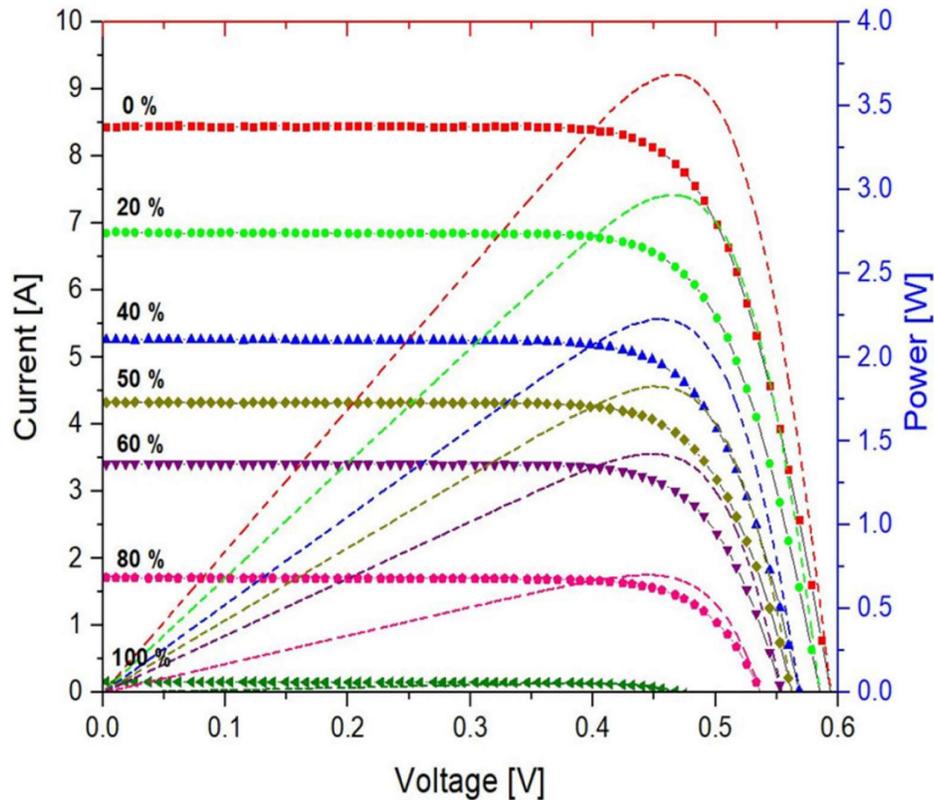


Figura 12 – Curva I-V de uma célula solar em diferentes condições de luminosidade. Em pontilhado se encontra a relação de potência da célula. [15]

Outro ponto importante é que, como as células e os painéis são ligados em série, a corrente que passa por uma célula deve ser a mesma que passa em todas as outras ligadas em série. Caso as células estejam sujeitas a intensidades luminosas diferentes, a corrente que passa em todas as células será a I_{SC} da célula sujeita à menos intensa iluminação. Esta célula, além de limitar o sistema, contribuirá para a redução da tensão do sistema como um todo.

Além do problema de iluminação, caso uma célula seja danificada a eficiência dela também cairá, levando às mesmas consequências. Felizmente, é fácil identificar um painel solar danificado, pois este apresentará uma temperatura mais elevada o que é fácil de visualizar em imagens térmicas.

Diversos arranjos são feitos com os painéis solares para minimizar o problema de defeitos e iluminação, estes arranjos levam em consideração o terreno no qual os painéis estão sendo instalados, assim como a máxima tensão que os inversores conseguem suportar.

3. Sistema de transmissão de corrente contínua em alta-tensão - HVDC

a. Introdução

Sistemas de transmissão em corrente contínua (CC) são sistemas onde tanto a corrente quanto a tensão se propagam de forma contínua. Historicamente, estes sistemas precedem a transmissão em corrente alternada, dominante no cenário atual, e caíram em desuso depois da derrota no evento histórico que ficou conhecido como a guerra das correntes[22]. O HVDC (do inglês, *High Voltage Direct Current*), é um sistema de transmissão em corrente contínua que opera em tensões acima de 200 KV.

Vantagens

A primeira vantagem da transmissão CC está relacionada ao custo da linha de transmissão, devido às propriedades do efeito pelicular. O efeito pelicular é a distribuição radial não uniforme da corrente alternada em um cabo condutor, onde a corrente será mais intensa na superfície do condutor [1]. A equação que descreve o comportamento da corrente é:

$$J_{(d)} = J_s e^{-(1+j)\frac{d}{\delta}}$$

Equação 1

Onde J_s é a corrente que passa na superfície, d é a distância que a corrente em questão está da superfície e δ é a espessura da película, que pode ser calculada pela seguinte fórmula:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}}$$

Equação 2

Para o cobre, material comumente utilizados para a condução de energia elétrica:

$$\delta_{Cu} = \frac{0.0661}{\sqrt{f}}$$

Equação 3

Para uma frequência de 60 Hz, em um fio de cobre, o valor de δ_{Cu} é 8,53 mm. Ou seja, apenas a casca de 8,53 mm contribui de fato para a condução de corrente. Se a frequência fosse nula (corrente contínua), δ seria infinito, o que faria com que toda a corrente se distribuisse de forma uniforme pelo condutor, aproveitando assim sua totalidade e não somente a casca. Esta diferença é crítica para situações nas quais a corrente é da ordem de KA.

A linha de transmissão em corrente alternada precisa de três cabos para funcionar, a de corrente contínua precisa de somente 2. Se fossem utilizados os mesmos cabos para transmitir a energia pela mesma distância isto representaria uma redução de 33% no valor do custo por km de linha. No entanto as linhas podem ser mais finas, o que contribui para a redução do custo por km de linha.

A última vantagem relevante é não ter transmissão de potência reativa, o que ocorre na transmissão em CA. A potência reativa ocorre quando a tensão e a corrente CA estão fora de fase. Esta potência não realiza trabalho, ou seja, sua integral temporal é nula.

A potência reativa causa um aumento de fluxo de corrente, que acaba aquecendo os cabos e transformadores, podendo danificá-los e aumentando as perdas de transmissão. Por conta disto a potência reativa deve ser controlada.

Uma das maiores fontes de reativos é a própria linha de transmissão, que possui um caráter indutivo e capacitivo. O caráter indutivo é proporcional a corrente que trafega pela linha e o capacitivo é proporcional a tensão de operação da linha de transmissão. Em linhas projetadas para um alto fluxo de potência, é necessária a utilização de alta tensão, para diminuir as perdas resistivas na transmissão. Sendo assim, quando este fluxo for baixo, a linha terá um comportamento capacitivo e quando o fluxo de potência for alto a linha será indutiva.

Além disto, a indutância da linha é proporcional ao seu comprimento, fazendo com que as linhas longas tenham este problema exacerbado. Para resolver o problema capacitivo, são utilizados reatores de linha. Os problemas indutivos podem ser amenizados com o emprego de bancos de capacitores. Ambas as soluções são de custo elevado e proporcionais à potência e a dos bancos de capacitores também é proporcional ao comprimento da linha.

Desvantagens

A primeira desvantagem é o alto custo das subestações com terminais HVDC, consideravelmente mais altos que o das subestações de corrente alternada. Isto ocorre por conta do alto custo dos conversores, e dos filtros. Esta desvantagem é mais relevante em linhas de transmissão curtas (distâncias menores que 450 Km, conforme a Figura 13), nas quais o custo dos terminais CC e da linha de transmissão supera àquele do sistema equivalente em CA.

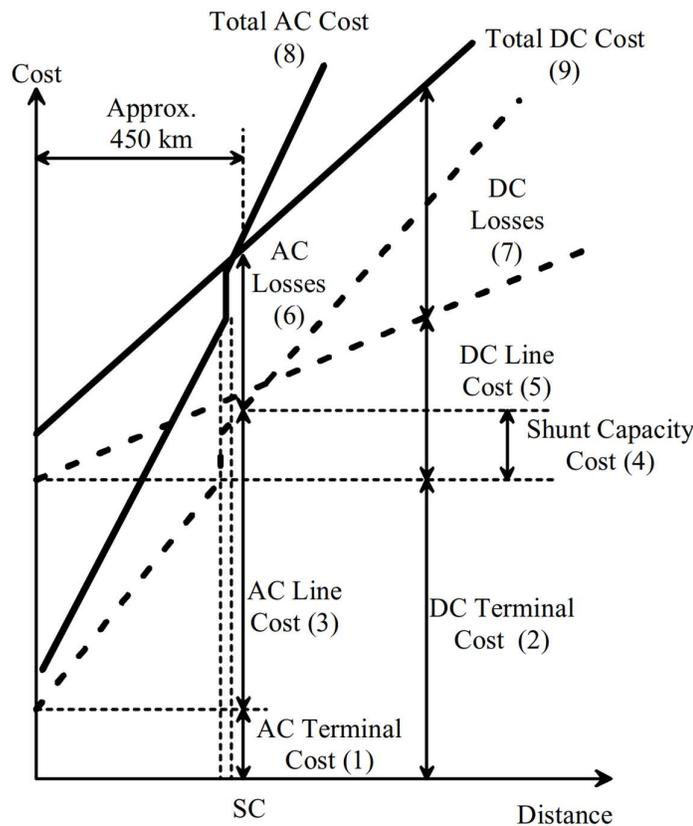


Figura 13–Comparação entre transmissão em HVDC e CA na terra. Linha contínua -Custo, Linha tracejada - Perda de transmissão[10]

A outra desvantagem do sistema HVDC é a sua capacidade de interrupção de curtos-circuitos. Quando o sistema é composto por somente dois terminais é possível retirar os dois terminais da rede e, posteriormente, resolver o problema que gerou o curto-circuito. Caso o sistema seja multiterminal, não é possível desligar todos os terminais que compõem o sistema, somente a linha afetada.

Para desligar uma linha, é preciso de um disjuntor capaz de interromper a corrente de curto-circuito. No sistema CA se utiliza um disjuntor mecânico, no qual existe uma parte móvel envolta em líquido ou gás isolante. Quando o disjuntor abre, um arco elétrico pode ser formado entre seus contatos, no entanto, como o sistema CA, a corrente necessariamente será zero em um tempo correspondente à meio ciclo, no máximo, e o arco será naturalmente extinto.

Há outras complicações no disjuntor mecânico, como ele precisa esperar o transiente do curto ter terminado para não abrir com uma corrente que o faça explodir e não pode demorar muito para

abrir pois a corrente de curto-circuito o esquenta, podendo levar a explosão. Para se aprofundar nos detalhes do disjuntor mecânico sugiro a leitura de [8].

Em um sistema CC a corrente não é nula em nenhum instante, pois não alterna entre positiva e negativa, como na CA. Sendo assim, o disjuntor precisa bloquear toda a corrente de curto-circuito ou criar uma perturbação no sistema que gere uma corrente nula em um instante de tempo. Além disto, ele precisa atuar antes da proteção dos conversores, ou seja, em um período de 2 a 10 ns. Pesquisas promissoras estão surgindo nesta área, onde circuitos disjuntores foram desenvolvidos, no entanto, ainda não consegue atuar no tempo necessário GARZO, R. D. (2002). *High Voltage Circuit Breakers - Design and Applications*. New York: Marcel Dekker, Inc.

[9].

Para contornar o problema dos disjuntores, é impedido o arranjo de diversas linhas no mesmo terminal. Se for necessária a entrada de múltiplas linhas HVDC no mesmo nó, ela será feita usando múltiplos terminais conectados pela rede AC.

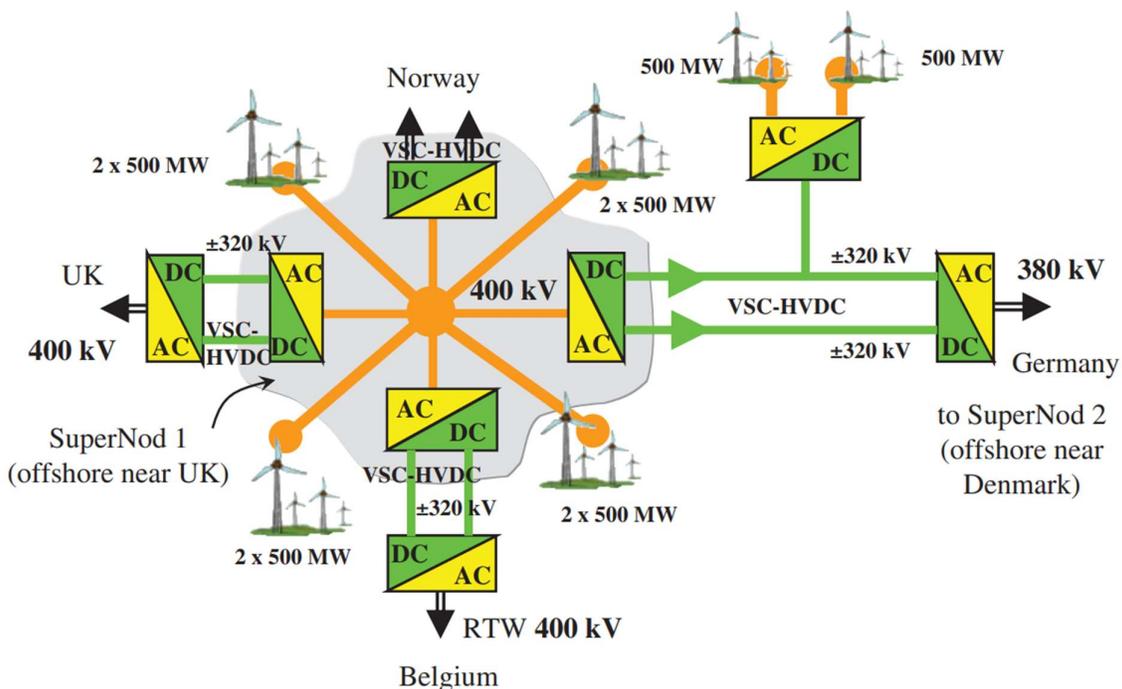


Figura 14–Super nó HVDC na costa perto do Reino Unido[5]

Em alguns casos são conectadas múltiplas linhas, casos estes nos quais é aceitável que uma falha desligue todos os terminais, como normalmente acontece em conexões de turbinas eólicas no mar com a terra. Isto reduz o custo de construção, porém aumenta a criticidade dos problemas operacionais.

b. Harmônicos

Harmônicos são distorções que se propagam com uma frequência nf , onde n é a ordem do harmônico e f é a frequência da rede. Eles alteram a forma de onda, idealmente puramente senoidal, da energia na rede, como mostrado na Figura 15, e acabam produzindo problemas em diversas áreas, mostradas na Tabela 1.

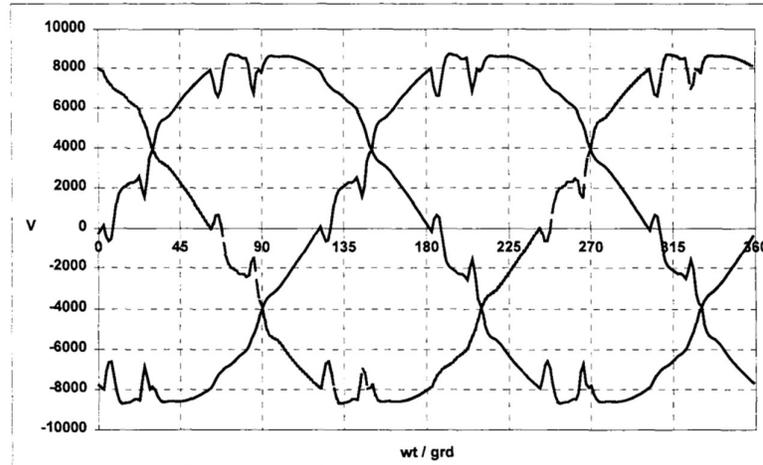


Figura 15–Tensão trifásica com 8% de distorção.[12]

Equipamento ou sistema afetado	Não-idealidades causadas pela introdução de harmônicos
Linhas de Transmissão Transformadores Reatores	Sobreaquecimento Aumento de perdas
Bancos de capacitores	Sobreaquecimento Quebra do isolamento interno
Sistema de Proteção Disjuntores Fusíveis	Acionamento Indevido Não acionamento
Telefones Equipamentos de som	Introdução de ruído de mesma frequência do harmônico.
Motores	Sobreaquecimento Perda de eficiência Aumento do ruído Vibração Adicional
Equipamentos eletrônicos	Erro na transmissão de dados Operação em tensões acima ou abaixo do nominal

Tabela 1 – Problemas ocasionadas pelos harmônicos. [12]

Por conta dos problemas introduzidos, eles devem ser filtrados do sistema.

c. Tipos de conversores

Existem quatro tipos de conversores no sistema elétrico, eles são os transformadores, os retificadores, os inversores e os conversores CC-CC. Os transformadores convertem um sistema CA em outro sistema CA, que geralmente se encontra em uma tensão diferente. Existem diversas aplicações e modos de se conectar transformadores para cada um dos objetivos, assim como diferentes tipos de transformadores, no entanto as particularidades dos transformadores fogem ao escopo deste trabalho, sendo aprofundadas em [17].

Os retificadores são conversores que transformam uma corrente alternada em corrente contínua, podendo, em algumas configurações, controlar a tensão da corrente contínua resultante da transformação. No entanto, na maior parte das vezes, este controle é feito por um transformador que antecede o retificador. Os principais retificadores a serem estudados são o de meia ponte, o de ponte completa e sua generalização para o sistema trifásico, o retificador de 6 pontes.

Os inversores fazem exatamente o oposto dos retificadores, transformando a corrente contínua em corrente alternada. De fato, todos os inversores são retificadores operando de forma inversa, e sendo assim podem atuar como um retificador. Os inversores se dividem em três tipos: LCC (do inglês *Line-Commutated Converter*), VSC (do inglês *Voltage Source Converter*) e MMC-VSC (do inglês *Multi-Modular Converter - Voltage Source Converter*).

Os inversores que serão estudados são os LCC de 6 e 12 pontes, os VSC de meia ponte, ponte completa e 6 pontes, e o inversor MMC-VSC com conversores modulares de meia ponte na configuração de 6 pontes.

Os conversores CC-CC convertem a uma corrente contínua em corrente contínua alterando a tensão.

Tipos de válvulas conversoras

Os sistemas conversores, com a exceção dos transformadores, precisam de componentes para controlar o fluxo de corrente. Estes componentes são referidos como válvulas ou chaves, as válvulas são assim denominadas por motivos históricos, quando todos os componentes eram válvulas. Chaves são usadas para se referir a componentes ativos que, ao serem acionados, permitem ou inibem o fluxo de corrente em uma direção. Componentes passivos, como o diodo, não podem ser denominados de chaves.

As válvulas que serão usadas são o diodo, o tiristor e o IGBT. O diodo foi apresentado no capítulo 2, os outros são apresentados a seguir. Todas as válvulas eletrônicas modernas são feitas a partir de materiais semicondutores dopados.

Tiristor

O tiristor é um semicondutor feito por uma junção PNPN, como demonstra a Figura 16. Este sistema pode ter duas portas de ativação, seja ela a dopagem P ou N do meio do dispositivo. Na prática, apenas uma porta é criada, pois não há sentido em haver redundância no dispositivo final.

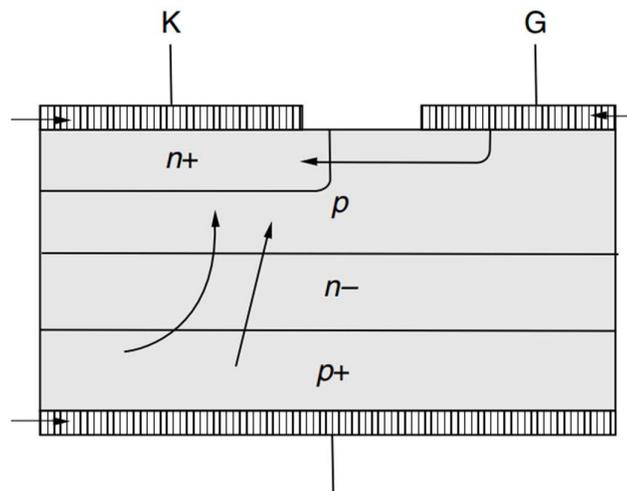


Figura 16 – Esquema do tiristor. [2]

O tiristor funciona como um diodo que precisa de um sinal para começar a conduzir. Sua curva corrente-tensão (I-V) pode ser vista na Figura 17, que está fora de escala. Quando o dispositivo opera no ponto 1 da Figura 17, deve passar uma corrente da ordem de mA, quando submetido a uma tensão de KV. Na operação correspondente ao ponto 2, existe uma corrente de KA e uma tensão na ordem de V.

A Figura 17 possui três pontos de importante análise: a tensão de bloqueio reverso, a tensão de bloqueio direto e a corrente de travamento I_L . As tensões de bloqueio são as máximas tensões que o dispositivo pode ser submetido antes de começar a conduzir de forma espontânea, ambas devem ser calculadas com uma margem, para evitando a condução de forma descontrolada.

A corrente de travamento é a mínima corrente que o dispositivo conduz quando está em operação. Esta corrente dita a mínima potência para a qual os conversores a tiristor podem operar. Ela existe por causa da região de resistência negativa, presente no tiristor, região na qual o dispositivo não pode operar.

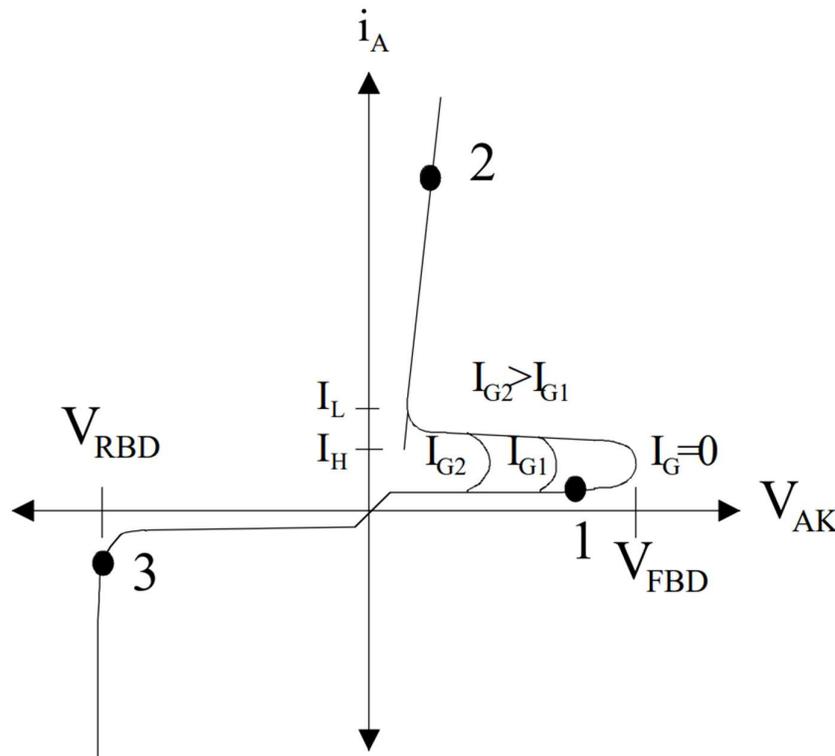


Figura 17 – Caracterização $I \times V$ do tiristor. [2]

O tiristor possui duas características relevantes que devem ser consideradas. A primeira é que a corrente que passa por ele não varia de forma instantânea, existe um atraso para que alterações em sua tensão de operação reflitam em uma alteração em sua corrente. Esta diferença depende da corrente que está passando e da temperatura do dispositivo, como mostra a Figura 18.

A segunda característica corresponde à permanência do dispositivo em estado ativo, mesmo após a interrupção da corrente. Correntes internas continuam fluindo pelo dispositivo, o que equivale a um sinal de acionamento em uma das portas. Sendo assim, neste período, caso a tensão volte a aumentar, o dispositivo voltará a conduzir.

Na aplicação prática, é calculado um tempo para o dispositivo entrar e sair de operação, chamado de tempo de comutação. Apesar do tempo de entrada e saída diferirem, os dispositivos trabalham em pares, com um entrando e o outro saindo de operação ao mesmo tempo, de forma que o tempo mais longo será o preponderante.

Como a frequência de operação do dispositivo é conhecida, é possível calcular a fase correspondente às operações, através da conversão do tempo de comutação e do tempo de desligamento em um ângulo de comutação e um ângulo de desligamento. Esta conversão será utilizada para determinar o ângulo máximo de disparo do tiristor, correspondente ao tempo máximo que o tiristor pode ser acionado depois do ponto 0 de uma senoide, em sistemas AC.

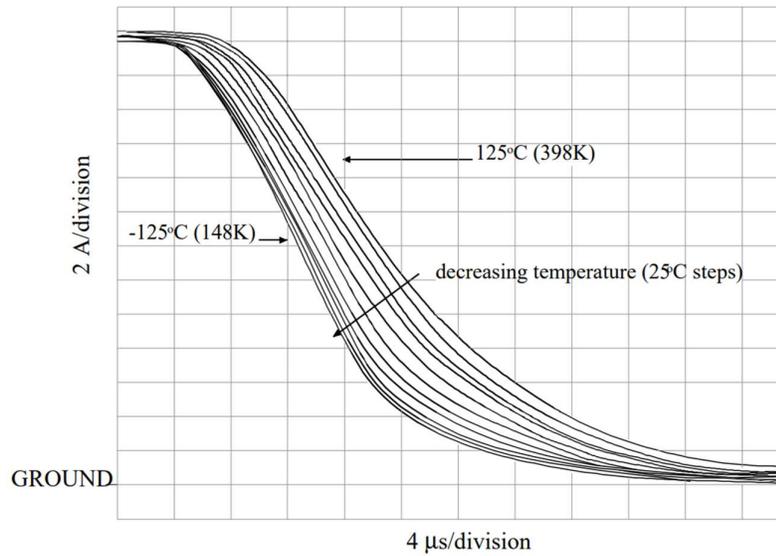


Figura 18 – Influência da temperatura na razão da variação da corrente em relação ao tempo $\frac{\partial i}{\partial t}_T$. [2]



Figura 19 –Válvulas tiristores – SE Foz do Iguaçu - Furnas Eletrobrás

Uma grande vantagem das válvulas tiristores é que elas podem ser associadas em série e em paralelo, alcançando assim as especificações de tensão reversa e a corrente de operação necessárias. No caso mostrado na Figura 19, cada bloco equivale a um tiristor no diagrama do conversor, formado por 4 conjuntos em paralelo de 96 tiristores em série, todos sendo acionados simultaneamente.

IGBT

O dispositivo IGBT (do inglês, *Insulated Gate Bipolar Transistor*) também é um PNP, com a diferença que a porta é isolada, e faz uma conexão MOSFET entre as partes NPN do dispositivo como mostra a Figura 20.

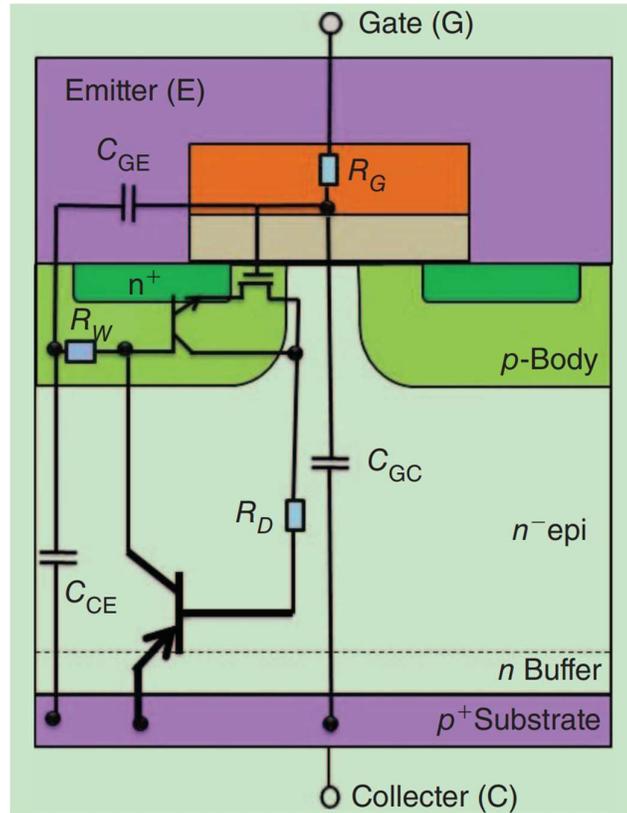


Figura 20 –Esquema do IGBT [6]

Uma forma de visualizar o IGBT é pelo seu circuito equivalente, mostrado na Figura 21. Quando o MOSFET é acionado ele ativa o transistor bipolar principal, que começa a conduzir, permitindo o fluxo de corrente pelo dispositivo.

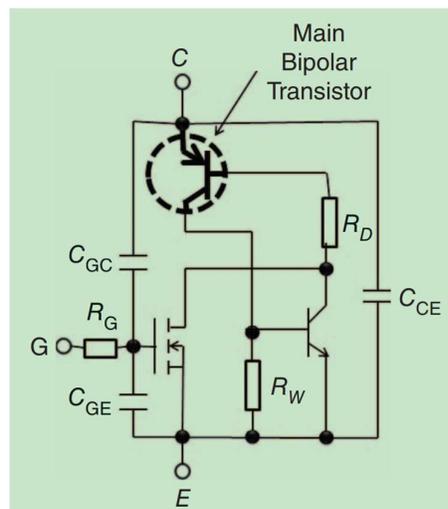


Figura 21 –Circuito equivalente do IGBT [6]

Seu funcionamento é muito parecido com o do MOSFET, com a diferença de poder chavear correntes e tensões maiores. No entanto, sua frequência de chaveamento é inferior à de um MOSFET. Na eletrônica de potência, onde é utilizado, ele difere do tiristor pela sua habilidade de interromper um fluxo de corrente. A variação da corrente no IGBT é extremamente rápida e, diferentemente do tiristor, pode ser desprezada.

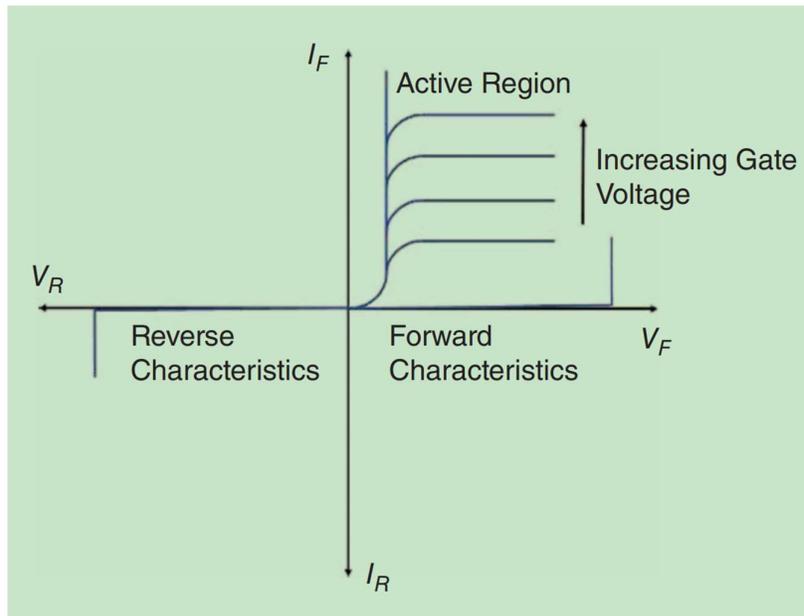


Figura 22 –Curva IxV do IGBT [6]

A Figura 22 mostra o comportamento I-V do IGBT. Nele há a tensão de abertura reversa, a tensão de abertura direta e diferentes curvas de corrente e tensão dependendo da tensão aplicada na porta.

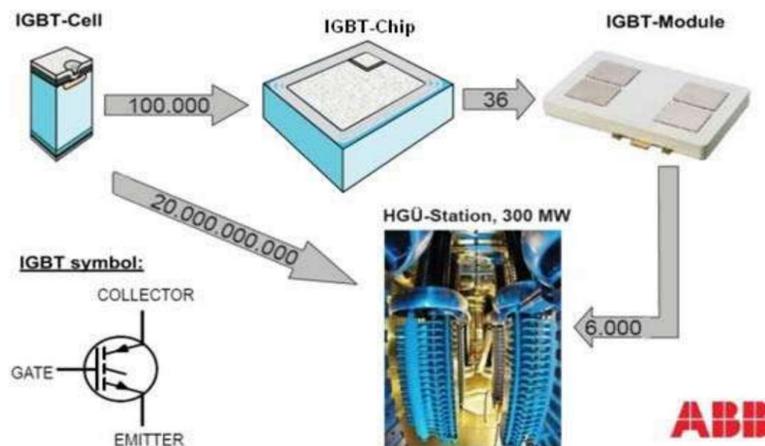


Figura 23 – Processamento das válvulas IGBT Shenai, K. (2015). The Invention and Demonstration of the IGBT [A Look Back]. *IEEE*, 12-16. doi:10.1109/MPEL.2015.2421751

[7]

O IGBT pode ser associado em série ou em paralelo, da mesma forma que os tiristores, Figura 23.

Retificador

Retificador de meia ponte

O retificador mais simples é o de meia ponte, constituído por somente um componente, normalmente o diodo, que permitirá o fluxo de corrente em apenas um sentido. Esta topologia gera um sinal sem a parte negativa, como pode ser visto na Figura 25.

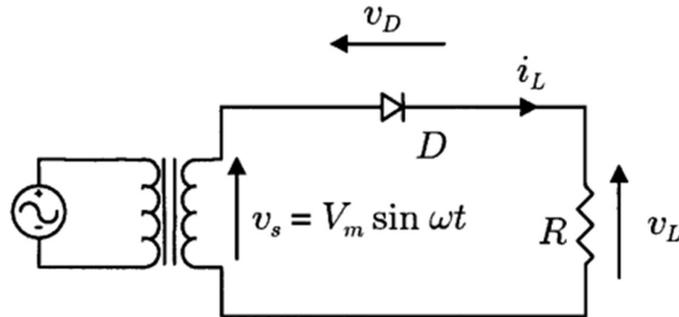


Figura 24 - Esquema do retificador meia ponte a diodo. [2]

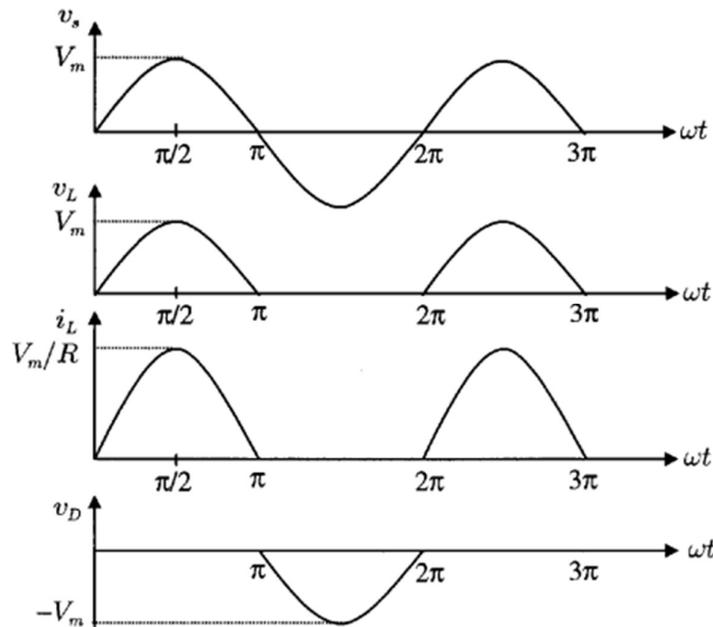


Figura 25 - Funcionamento do retificador meia ponte a diodo. [2]

O retificador usando um diodo não controla a tensão, sendo necessário, para a maior parte das aplicações, um transformador antes da retificação, como mostra a Figura 24.

Retificador de ponte completa

Este retificador é feito com quatro válvulas. Seu exemplo mais simples emprega diodos, no entanto este circuito também pode ser feito por tiristores ou IGBTs, o que permite seu funcionamento no modo inversor.

As válvulas da Figura 26. Durante metade do ciclo, quando $v_s > 0$, os diodos D_1 e D_2 estarão conduzindo. Na outra metade do ciclo, a corrente passará apenas por D_3 e D_4 .

Observando a Figura 27 e a Figura 25, é fácil notar que ambos os conversores não possuem uma tensão e fluxo de corrente contínuos ao longo do tempo. Para conseguir um fluxo de potência estável, é preciso colocar um capacitor em paralelo e um regulador de tensão em série com a carga. O capacitor acumulará a energia, estabilizando o valor da tensão de saída do retificador, reduzindo

a variação pico a pico das oscilações. O regulador de tensão atua consumindo potência, quando for necessário reduzir o valor da tensão, mantendo-a na faixa de valores nominais.

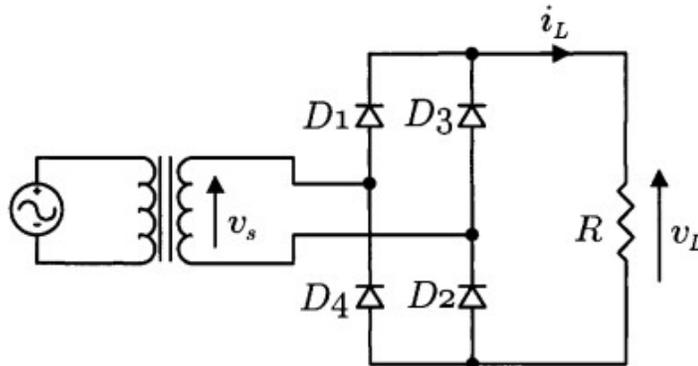


Figura 26 – Esquema do retificador de ponte completa a diodo. [2]

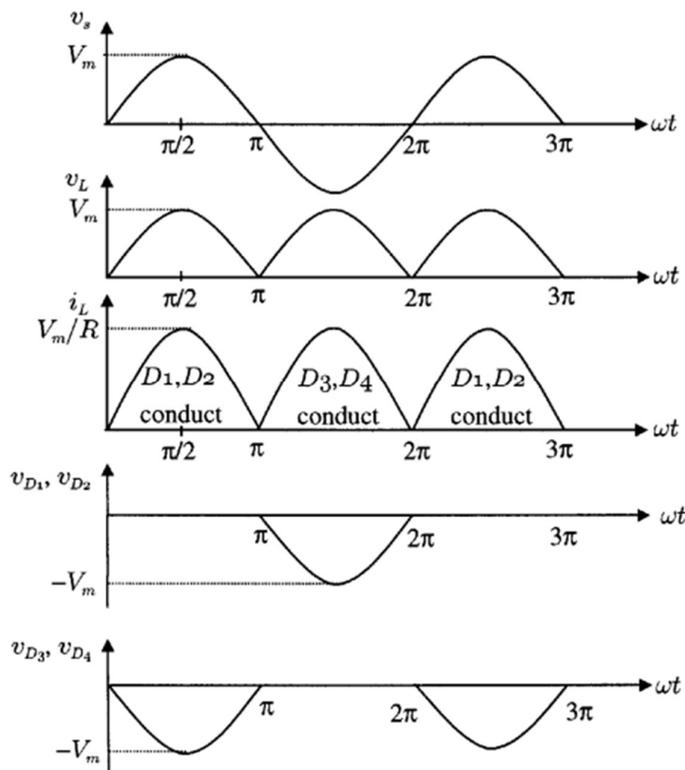


Figura 27– Funcionamento do retificador de ponte completa a diodo. [2]

Para aplicações de baixa potência, quando a carga necessita de uma tensão bem controlada, normalmente se usa o retificador de ponte completa, pois poderá ser utilizado um capacitor de valor nominal menor, de mais baixo custo. É comum que a redução de custo do capacitor compense o gasto criado pela utilização de mais diodos. Em aplicações de alta potência, seria extremamente ineficiente usar este sistema, pois a potência dissipada pelo regulador de tensão seria muito elevada. Na prática este tipo de circuito é apenas utilizado em eletrônica de precisão, para circuitos com potência de até 100 W.

Retificador de 6 pontes

O retificador de 6 pontes é usado para retificar sistemas trifásicos. Comumente é aplicado em sistemas de alta potência, pois sua tensão de saída é mais estável, e pode ser corrigida por filtros.

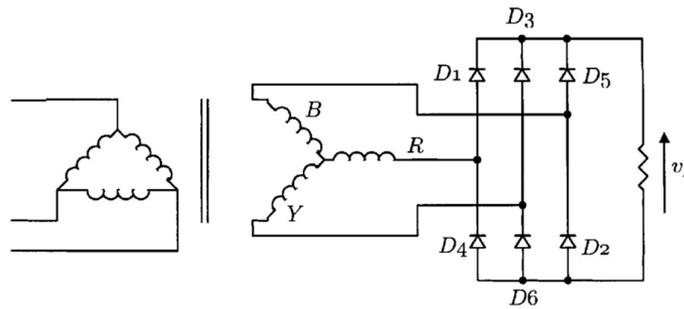


Figura 28 – Esquema do retificador de 6 pontes a diodo. [2]

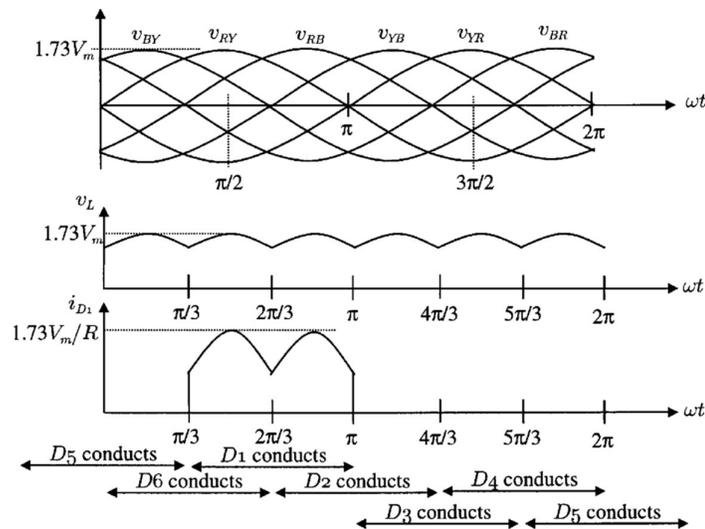


Figura 29– Funcionamento do retificador de 6 pontes a diodo. [2]

Seu funcionamento é similar ao do retificador de ponte completa, pois, em qualquer instante, apenas duas válvulas estarão em operação. No entanto há seis possíveis formas de combinar os pares. Cada combinação ficará ativa durante um sexto do ciclo e os diodos ficarão ativos durante um terço do ciclo. Isto leva a uma tensão de saída estável que pode ser linearizada com um filtro corta faixa ou um filtro passa baixa, caso a aplicação permita. Como os filtros são muito eficientes, este tipo de circuito é geralmente o escolhido para aplicações de maior potência.

Há diversos outros tipos de retificadores, no entanto foram apresentados somente aqueles que são usados também como inversores.

Inversor LCC

Para o estudo de inversores LCC, dois tópicos devem ser introduzidos de forma conjunta: os problemas de comutação e os harmônicos criados no sistema. Para explicá-los será demonstrado o conversor de ponte completa Figura 30. Ele não é utilizado na indústria, porém é didático e simples.

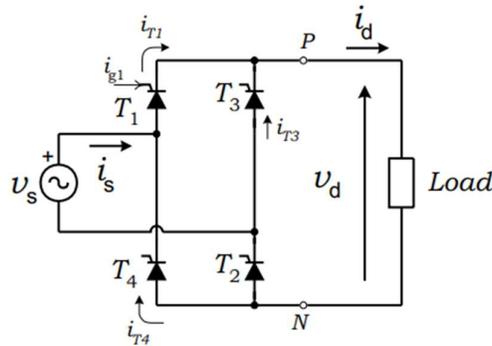


Figura 30– Esquema do conversor de ponte completa a tiristor. [2]

O circuito mostrado na Figura 30 é um retificador, no entanto estamos interessados em sua atuação no modo inversor. Para tal, vamos comparar as tensões e correntes em um sistema onde a carga é puramente resistiva com outro de carga indutiva e resistiva.

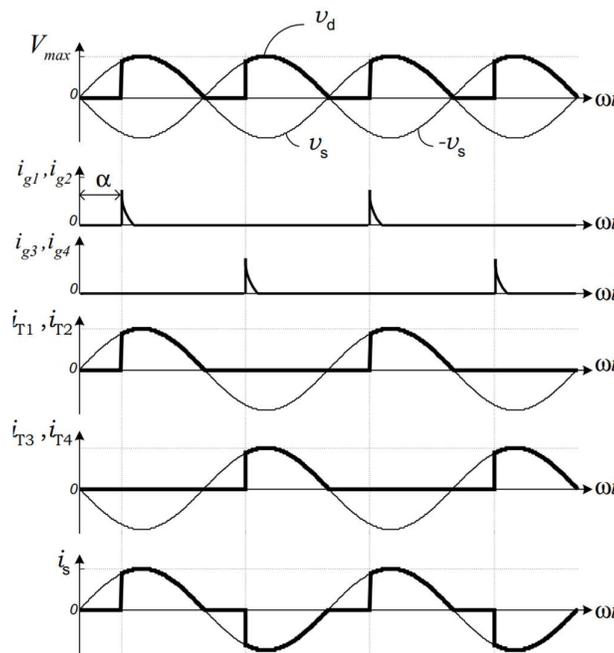


Figura 31– Funcionamento do conversor de ponte completa a tiristor, para uma carga puramente resistiva. [2]

No caso puramente resistivo, se tem um sistema retificador parecido com o do diodo onde é possível controlar quando a válvula começa a conduzir, controlando apenas a potência que está sendo retificada, não a tensão e a corrente.

Este sistema possui a vantagem de poder parar de conduzir em qualquer momento desejado. Isto o torna excelente para os casos em que não é possível outro tipo de controle no lado CC e se planeja uma interrupção de forma abrupta, causada por um problema sistêmico. Na prática, estas situações ocorrem quando há um curto-circuito em uma linha de HVDC, quando um sistema à diodo continuaria conduzindo, alimentando o curto.

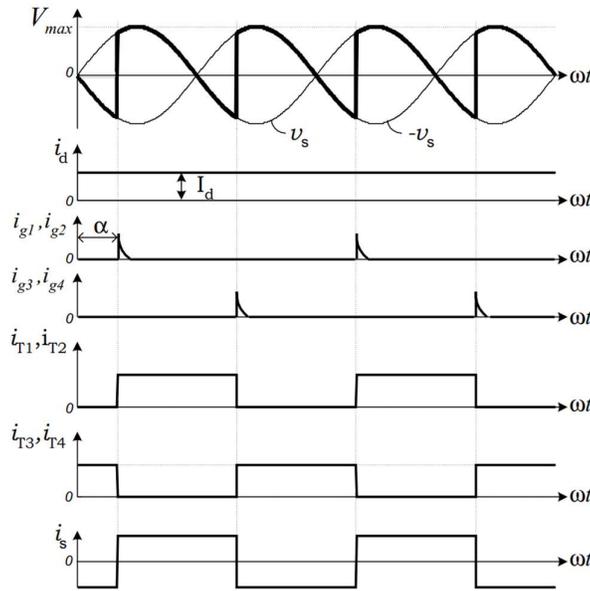


Figura 32- Funcionamento do conversor de ponte completa a tiristor para uma carga resistiva e indutiva. [2]

Quando o sistema possui uma parte indutiva, como é o caso das linhas de transmissão, seu funcionamento se transforma. A parte indutiva da carga fará com que a corrente do lado CC seja contínua, o que resulta em operar o sistema enquanto a tensão CA é negativa. Desta forma, existirá uma transferência de potência do lado CA para a carga, enquanto a tensão for positiva, e da carga para o lado CA, quando a tensão for negativa. Caso haja uma fonte de potência do lado CC, este sistema poderá transmitir potência para o CA, o que é exatamente o objetivo de um inversor. No entanto, isto só acontecerá se o sistema for de caráter indutivo.

Observando a corrente i_s da Figura 32, que vem do lado CA percebe-se que ela é bem diferente da onda senoidal que é esperada. Esta diferença introduz harmônicos no lado CA que devem ser filtrados.

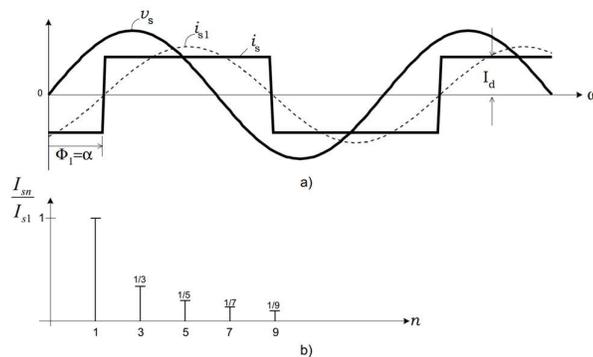


Figura 33- Entrada de corrente no conversor a ponte completa. (a) Formas de onda (b) Espectro de harmônicos [2]

Na análise apresentada, não foi considerado que a corrente que passa pelo tiristor não cessa de forma abrupta, existe um período que ambas as válvulas estão ativas. Este período é denominado de ângulo de comutação μ , e varia de acordo com as especificações de um modelo de tiristor. Levando este ângulo em consideração, as formas de onda se alteram, como mostra a Figura 34.

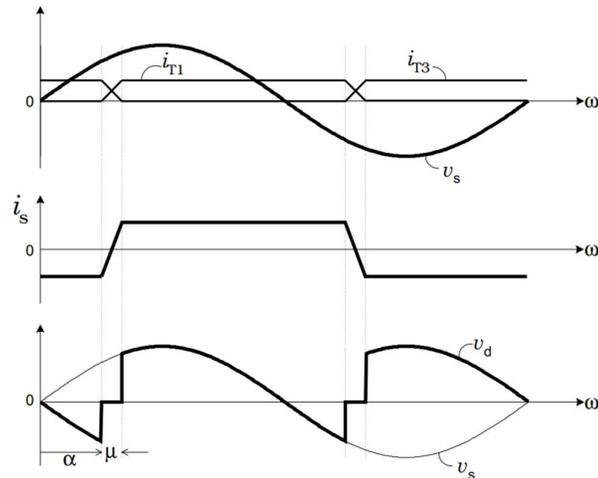


Figura 34- Funcionamento do conversor de ponte completa a tiristor para uma carga resistiva e indutiva levando em consideração o ângulo de comutação. [2]

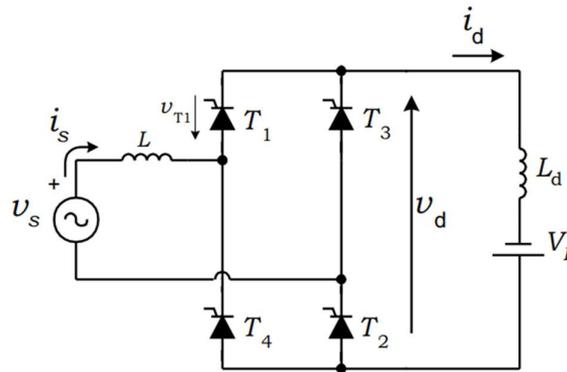


Figura 35- Esquema do conversor de ponte completa a tiristor no modo inversor. [2]

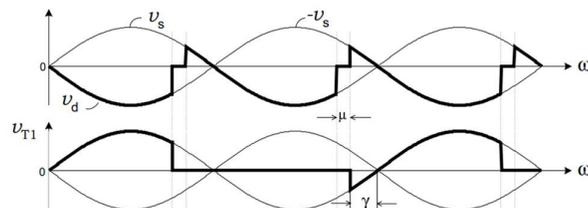


Figura 36- Funcionamento do conversor de ponte completa a tiristor no modo inversor. [2]

Para o tiristor parar de conduzir, é preciso aplicar uma tensão negativa em seus terminais durante um tempo γ . Caso este tempo não seja suficientemente longo, o tiristor continuará no modo de condução, fazendo com que a potência passe do lado CA para o lado CC, como ocorre quando ele opera no modo retificador. Isto não é desejado, pois compromete a transmissão de potência que está ocorrendo na linha. Sendo assim, existe um ângulo máximo que pode disparar o sistema que é dado por:

$$\alpha_{max} = 180 - \gamma - \mu$$

Equação 4

6 pontes

O inversor LCC a 6 pontes possui a vantagem de estabilidade da tensão CC, comum aos sistemas a 6 pontes, com a possibilidade de operar no modo inversor e de poder ser interrompido bruscamente, caso necessário.

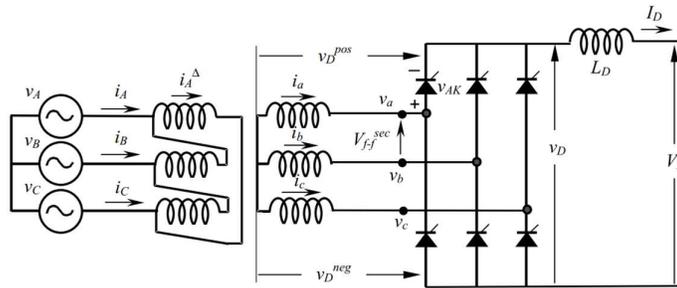


Figura 37- Esquema do conversor de 6 pontes a tiristor. [2]

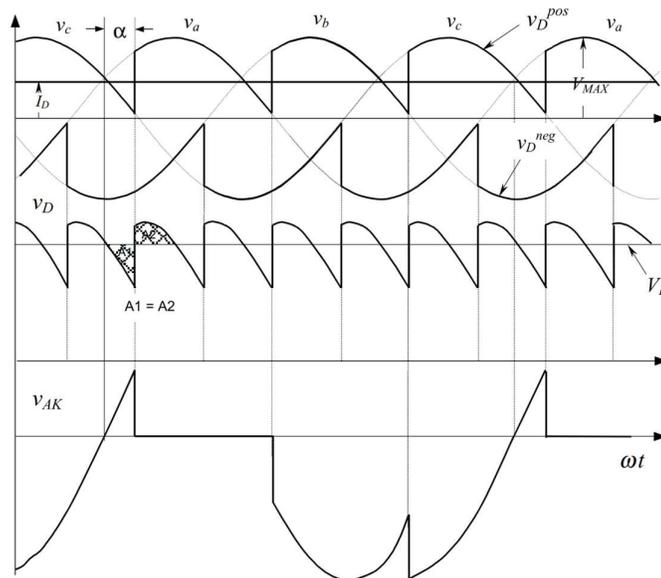


Figura 38- Funcionamento do conversor de 6 pontes a tiristor no modo retificador sem considerar os problemas de comutação. [2]

Considerando o funcionamento ideal, a tensão de saída do retificador é controlada pelo ângulo de disparo.

$$V_d = \frac{3\sqrt{2}V_{f-f}^{sec}}{\pi} \cos \alpha$$

Equação 5

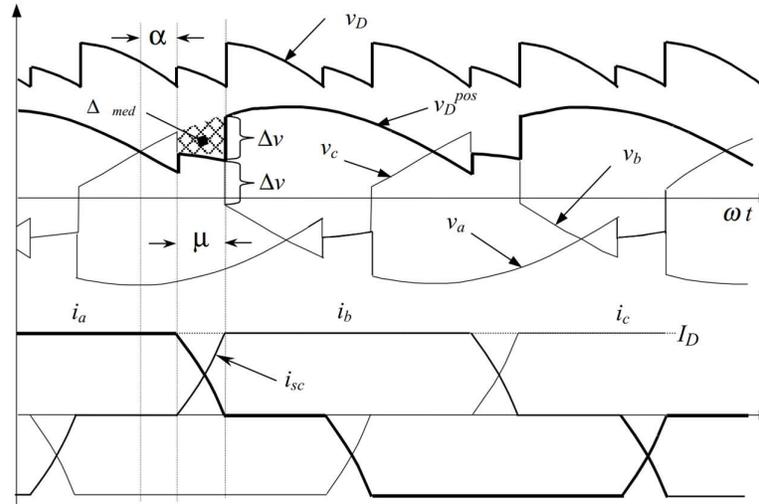


Figura 39– Funcionamento do conversor de 6 pontes a tiristor no modo retificador considerando os problemas de comutação. [2]

Considerando os problemas de comutação, a tensão média final depende do valor médio perdido durante a comutação, conforme apresentado na Equação 6:

$$V_d = \frac{3\sqrt{2}V_{f-f}^{sec}}{\pi} \cos \alpha - \Delta V_{med}$$

Equação 6

Onde:

$$\Delta V_{med} = \frac{3}{2\pi} \int_{\alpha}^{\alpha+\mu} \sqrt{2}V_{f-f}^{sec} \sin(\omega t) d\omega t$$

Equação 7

$$\Delta V_{med} = \frac{3V_{f-f}^{sec}}{\sqrt{2}\pi} (\cos(\alpha) - \cos(\alpha + \mu))$$

Equação 8

A corrente pode ser descrita por:

$$I_D = \frac{V_{f-f}^{sec}}{\sqrt{2}\omega L_s} (\cos(\alpha) - \cos(\alpha + \mu))$$

Equação 9

Então:

$$\Delta V_{med} = \frac{3I_D\omega L_s}{\pi}$$

Equação 10

$$V_d = \frac{3\sqrt{2}V_{f-f}^{sec}}{\pi} \cos \alpha - \frac{3I_D\omega L_s}{\pi}$$

Equação 11

Sendo assim, a tensão de saída do sistema depende do ângulo α e da corrente sendo invertida. É criado um problema circular, onde a tensão entregue define a corrente que passará pelo sistema, e a corrente influencia na tensão que o inversor entregará. Por conta desta interdependência, toda mudança no fluxo de potência em um sistema HVDC que usa a tecnologia LCC deve ocorrer de forma lenta e gradual.

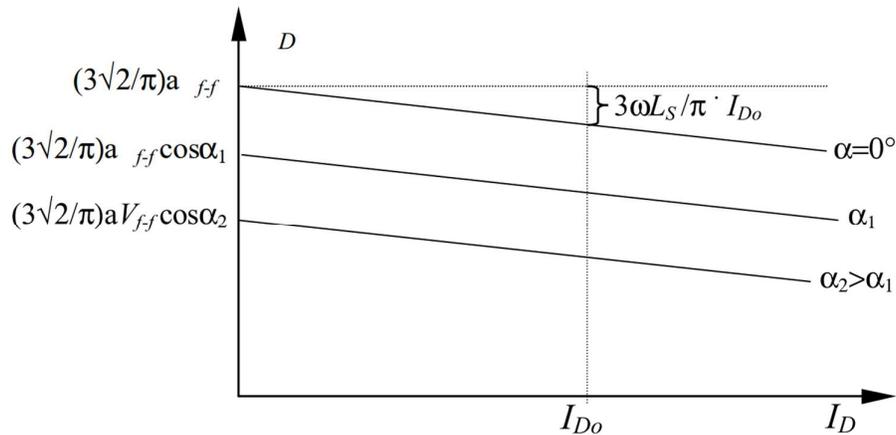


Figura 40- Relação da tensão e a corrente retificada, para diferentes ângulos de disparo, em um conversor de 6 pontes a tiristor. [2]

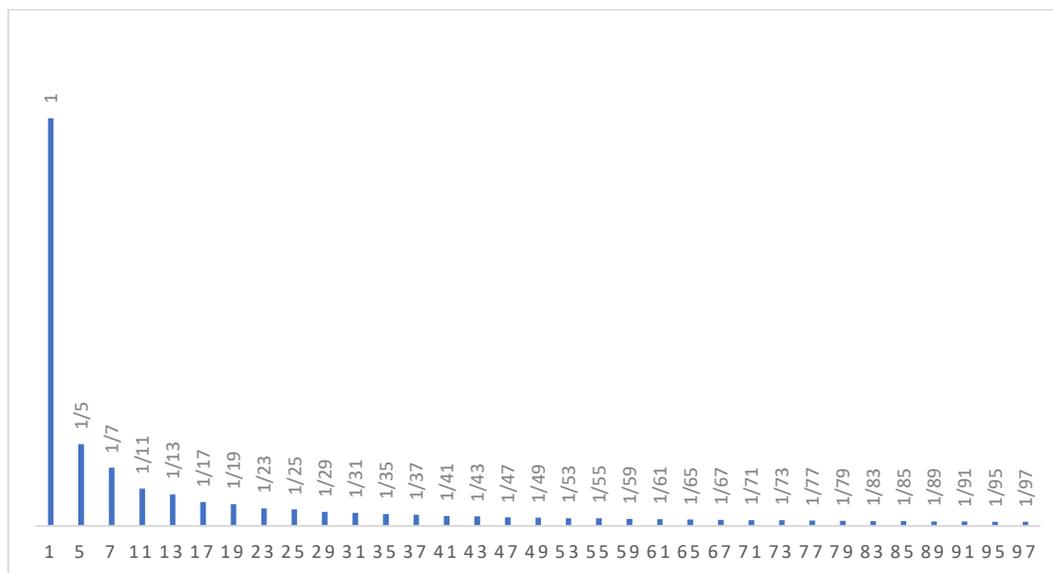


Figura 41- Espectro de Harmônicos do inversor a 6 pontes a tiristor.

12 Pontes

O sistema LCC a 12 pontes opera de forma idêntica ao de 6 pontes. Ou seja, todas as considerações e gráficos discutidos para o de 6 pontes se aplicam ao de 12. A única diferença entre eles são os harmônicos.

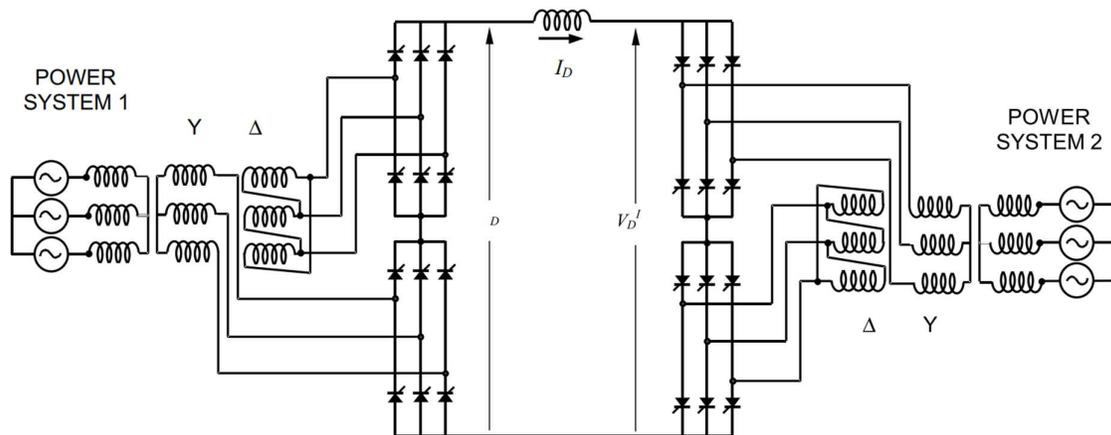


Figura 42– Esquema do retificador de 12 pontes a tiristor. [2]

Observando a figura X vemos que o sistema de 12 pontes é equivalente a um sistema de 6 pontes ligado em uma configuração Δ - Δ em série, enquanto o sistema de 6 pontes é ligado em uma configuração Δ -estrela. Isto faz com que a tensão de saída dele seja a soma de dois sistemas de 6 pontas com uma defasagem de 30° graus.

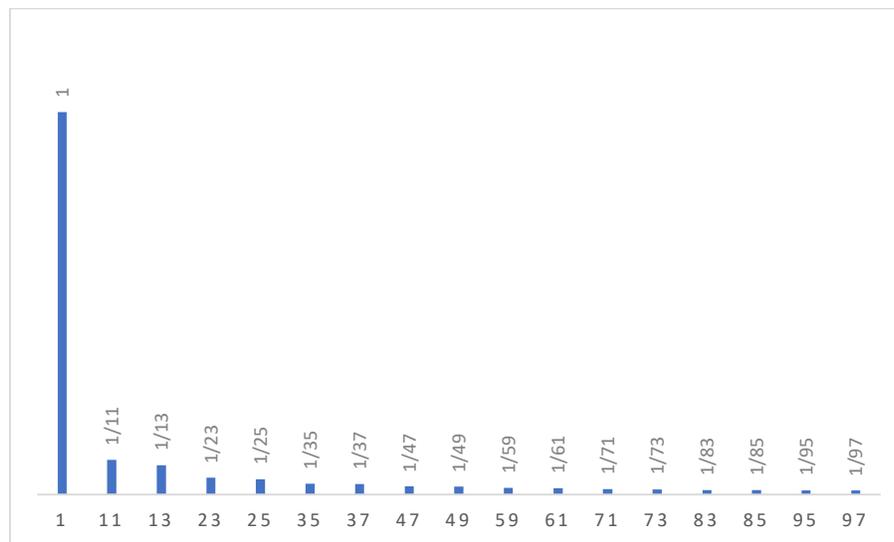


Figura 43– Espectro de Harmônicos do inversor a 12 pontes a tiristor.

Como apresentado na Figura 43, o sistema a 12 pontes não possui os harmônicos de quinta e sétima ordem no lado AC e de sexta ordem no lado CC. Desta forma, as subestações não precisam filtrar estes harmônicos, sendo vantajoso a construção dos sistemas a 12 pontes em detrimento dos de 6, mesmo que seja necessário utilizar o dobro de transformadores. Uma observação importante é que os harmônicos de ordens maiores também precisam ser removidos, no entanto eles possuem uma potência menor, o que leva a filtros menores.

Note que, apesar deste sistema ter o dobro de transformadores, ele possui o mesmo número de tiristores, pois estas válvulas são colocadas em série, para obter a tensão de bloqueio necessária para a aplicação. A tensão não aumenta ao passar o sistema de 12 pontes, quando comparada à do sistema de 6 pontes, somente é dividida em mais etapas.

Além disto, os transformadores no sistema de 12 pontes são menores do que os utilizados no sistema de 6 pontes (para a mesma potência sendo transformada), o que faz com que o aumento no custo desta substituição seja menor do que dobro do valor.

Inversor VSC

O inversor VSC (do inglês, *Voltage Source Converter*) também é referido por CCF, conversor de comutação forçada ou, na sigla em inglês, FCC. Este outro nome deriva da propriedade da válvula IGBT de ser capaz de interromper a passagem da corrente. O nome VSC se origina do fato de o sistema depender apenas do valor da tensão CC para fazer a conversão.

O sistema VSC possui duas vantagens sobre o sistema LCC: não depende da existência de uma tensão CA para poder fazer a inversão e sua inversão é independente da indutância da linha CC. A primeira vantagem possibilita este sistema ser usado para controle de frequência de motores que podem operar fora da frequência da rede.

A segunda vantagem possibilitaria sistemas HVDC multiterminais de fácil controle. Apesar de, teoricamente, ser possível criar um sistema multiterminal usando o LCC, caso ocorra uma falha em uma das subestações que a faça parar de comutar, a corrente será interrompida de forma abrupta. Isto ocasionaria uma mudança em toda a corrente que é transmitida pelo sistema, que deve se adaptar para manter conduzindo enquanto a corrente no lado CC oscila. Esta característica fez com que poucas tentativas de sistemas HVDC LCC multiterminal tenha sido feitas.[5]

Meia Ponte

O conversor de meia ponte VSC, diferente do a diodo ou a tiristor, consegue aproveitar toda a potência do lado CA. Ele é amplamente utilizado na construção dos sistemas MMC, no entanto não é convencional vê-lo aplicado como inversor para motores, por sua incapacidade de interromper a alimentação de um curto.

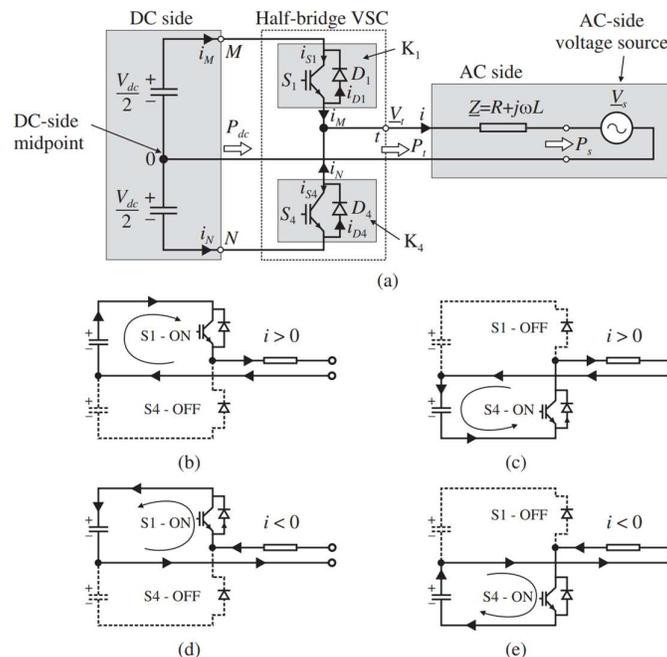


Figura 44- Conversor a meia ponte VSC. (a) - Esquema, (b) a (e) - Diagrama da corrente pelo circuito em diferentes configurações.[5]

No esquema B e E da Figura 44 temos o sistema em uma configuração de inversor, com o fluxo de potência indo do lado CC para o lado CA. No esquema C e D ele funciona como um retificador com o fluxo de potência indo do lado CA para o lado CC.

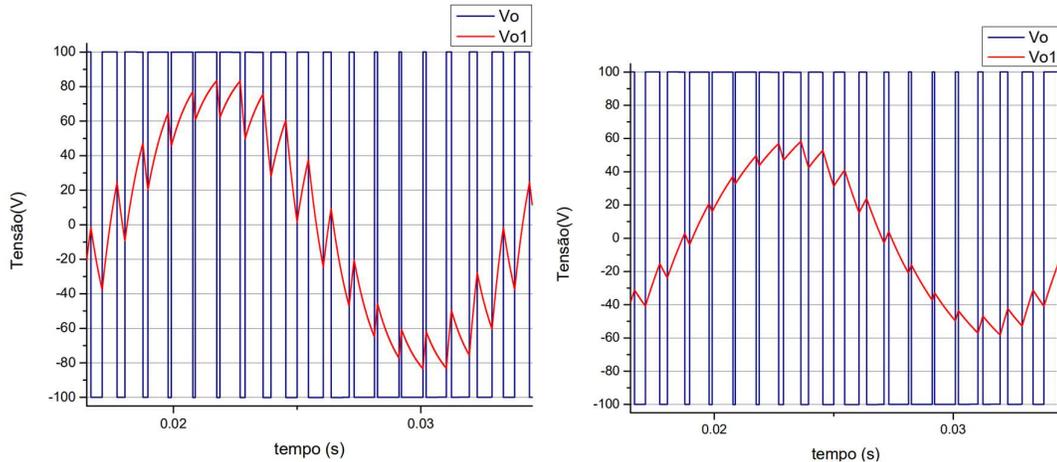


Figura 47- Simulação no MATLAB do circuito com a fonte no lado DC. Em azul a tensão antes de passar pelo indutor, em vermelho a tensão depois de passar pelo indutor. O circuito foi simulado com diferentes níveis de indutância, onde o de maior indutância é o da direita.

Observando a Figura 47 podemos perceber que a tensão de saída, depois de passar pelo indutor, não está em fase com o sinal PWM, ou seja, com a onda CA que se pretendia criar. Esta diferença de fase é definida uma vez que se sabe o valor do indutor em série.

Mudando a amplitude da onda de referência se altera a amplitude da onda de saída, sendo um controle extra que o sistema tem, onde a tensão CC pode variar dentro de um certo nível mantendo a tensão CA. Outro controle é poder aumentar a tensão CA caso preciso, muito utilizado no controle de motores.

Há duas formas de diminuir o impacto dos harmônicos na tensão de saída final. A primeira é aumentar o valor do indutor, que funciona como um filtro passa baixa afetando os harmônicos de mais alta ordem diminuindo assim a razão destes com o de ordem 1, que corresponde a tensão CA que se pretende gerar. Este método acaba diminuindo a tensão CA máxima como é visto na Figura 47.

A segunda forma é aumentar a frequência da portadora, isto gerará uma onda PWM de maior frequência e conseqüentemente harmônicos preponderantes de ordens maiores. A prova matemática pode ser vista em [2], que foi feita para o conversor a 6 pontes VSC porém seu conceito é aplicado.

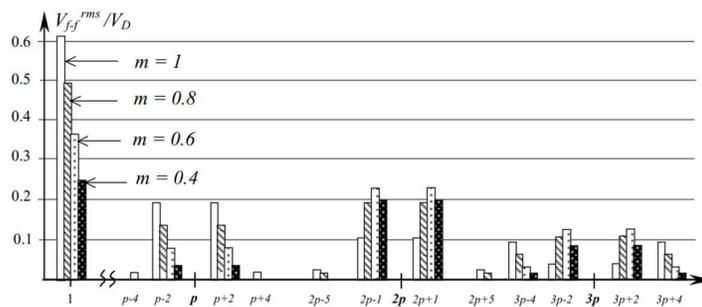


Figura 48- Espectro de harmônicos em um conversor VSC. Onde $m = \frac{V_{mod}^{Max}}{V_{por}^{Max}}$, V_{mod}^{Max} é a tensão máxima da onda modulada, V_{por}^{Max} é a tensão máxima da portadora, $p = \frac{f_{por}}{f_{mod}}$. [2]

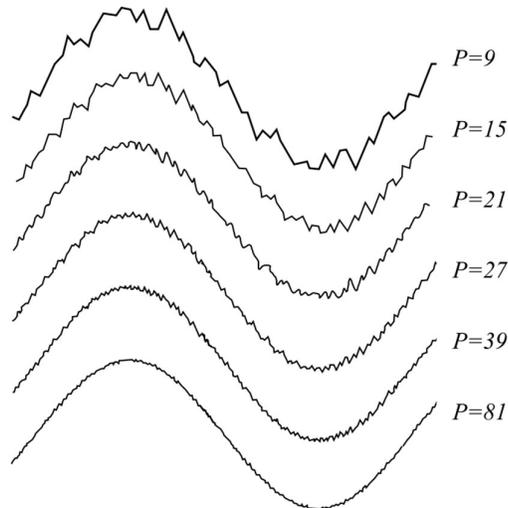


Figura 49– Saída CA para diferentes razões da frequência entre a onda da portadora e a onda modulada. [2]

Normalmente se utiliza uma frequência alta de chaveamento e deixa a própria linha de transmissão filtrar os harmônicos, dispensando assim o uso de filtros, criando subestações mais compactas e baratas.

Ponte completa

O sistema de ponte completa possui algumas vantagens sobre o de meia ponte. Estas vantagens existem por ele ser capaz de criar um valor de tensão nula na saída de seus terminais, possibilitando que um curto no lado CA não afete o lado CC e vice-versa. Além disto a tensão máxima de saída do lado CA é o dobro do caso do de meia ponte para o mesmo valor CC.

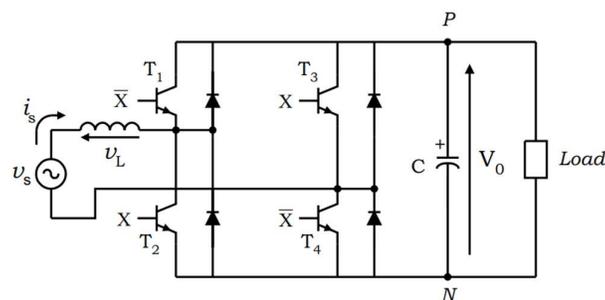


Figura 50– Esquema do retificador de ponte completa VSC. [2]

Este esquema pode operar em 3 estados diferentes: Com as chaves 1 e 4 acionadas aplicando uma tensão positiva na corrente alternada. Com as chaves 2 e 3 acionadas aplicando uma tensão negativa. E com ou as chaves 1 e 3 ou a 2 e 4, ambas aplicando uma tensão nula na saída AC. Para o controle deste dispositivo se usa um controle para 1 e 2 e outro para o 3 e 4, onde sempre que 1 está acionado 2 está apagado, e o mesmo para 3 e 4. Como mostra a Figura 51.

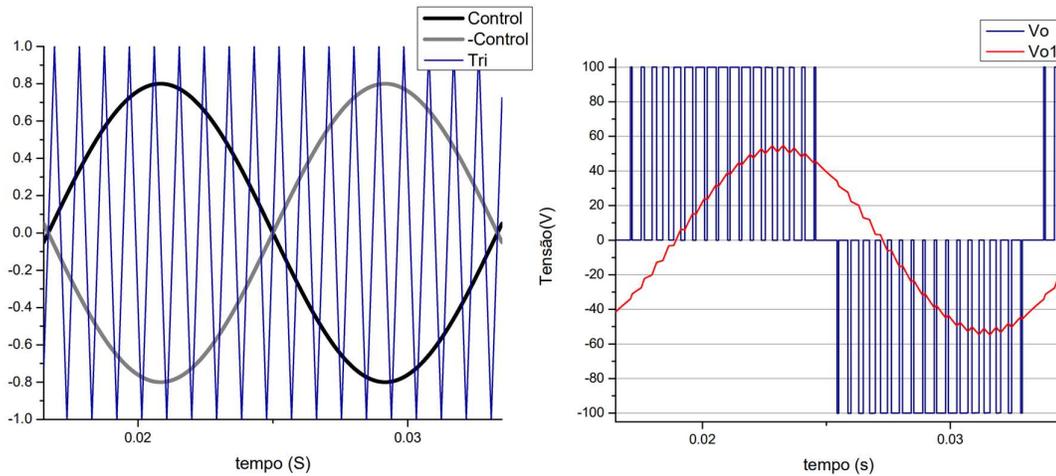


Figura 51–Simulação em MATLAB, Esquerda – Controle, Direita – Tensões antes e depois do indutor.

Observando os gráficos, da Figura 51 e 47, fica evidente a defasagem assim como uma menor concentração de harmônicos no sistema, mesmo com a portadora tendo a mesma frequência. Ou seja, o sistema de ponte completa tem menos harmônicos e maior razão entre o lado CC e CA, o que o torna preferível.

6 Pontes

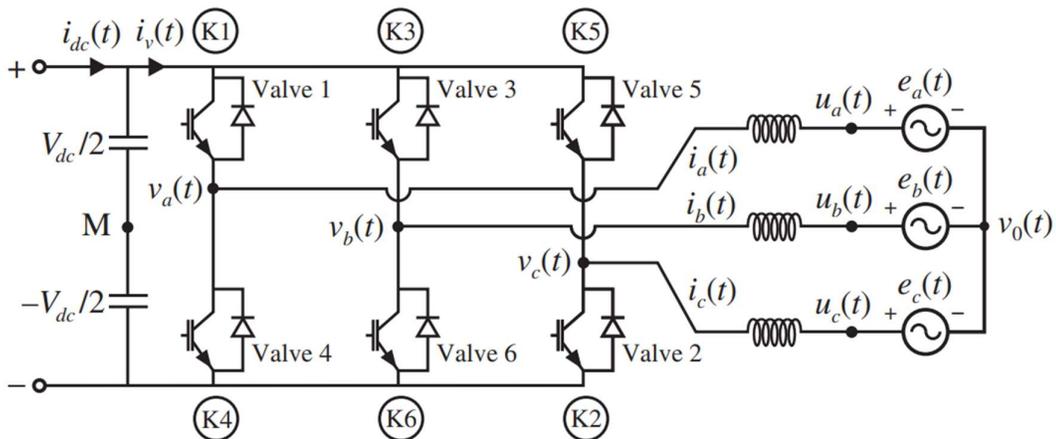


Figura 52– Esquema do retificador a 6 pontes VSC [5]

É denominado como braço (*arm*) cada parte do conversor responsável por uma fase. No caso da fig32 as chaves 1 e 4 formam um braço, a 3 e 6 outro e a 5 e 2 o último. A parte que conecta a fase com a parte CC positiva é denominada braço de cima (*upper arm*) neste caso seriam as chaves 1, 3 e 5. E a parte que conecta com a parte negativa é braço de baixo (*lower arm*).

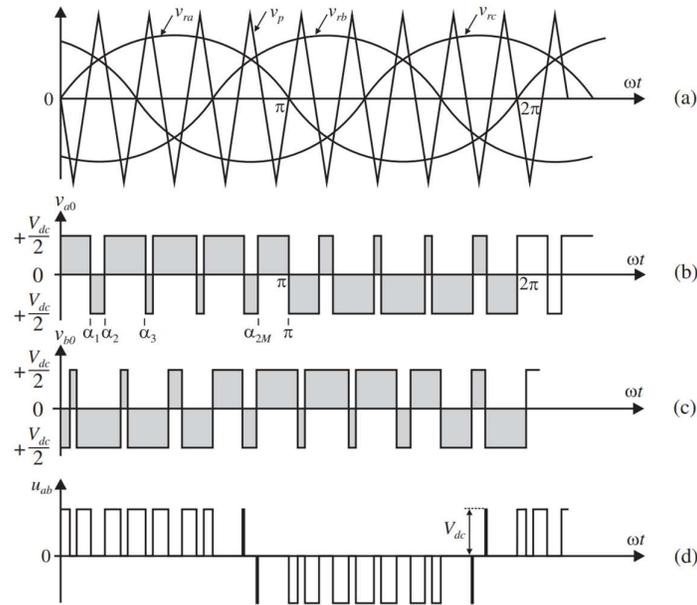


Figura 53- Controle PWM do acionamento das chaves [5]

O sistema a 6 pontes pode ser utilizado em aplicações trifásicas, onde a saída de um braço é idêntica à de um conversor de meia ponte VSC, e a saída do fase-fase remete ao conversor de ponte completa VSC. Cada braço é controlado por uma onda senoidal, sendo o total de 3 ondas que se encontram defasadas de 120°.

Inversor MMC-VSC

A lógica MMC foi desenvolvida para contornar o problema de limitação de tensão máxima dos sistemas VSC. Antes de sua elaboração foi tentada outras topologias para resolver o problema de tensão como a conversor NPC mostra na Figura 55. No entanto elas não foram amplamente utilizadas devido ao aumento de sua complexidade.

O conversor da Figura 55 foi utilizado em uma subestação *back-to-back* em Eagle Pass nos estados unidos. As subestações *back-to-back* servem para conectar duas redes que operam em frequências diferentes. Como a distância entre os dois inversores é pequena (na ordem de metros), as perdas por transmissão são desprezíveis e é possível operar o sistema em um nível de tensão CC menor sem ocasionar perdas de transmissão.

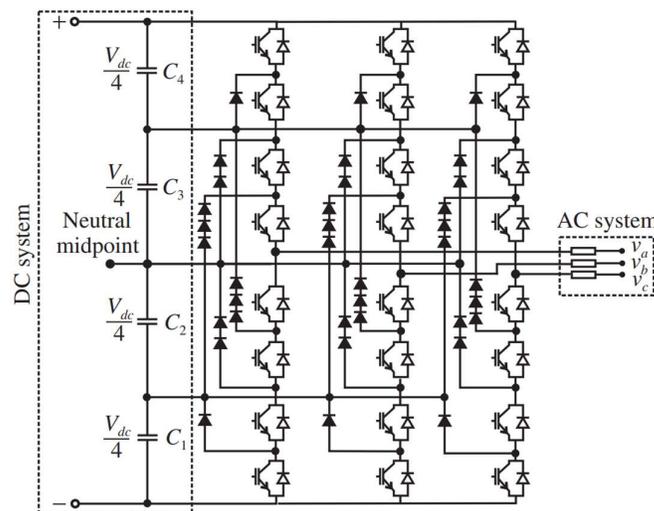


Figura 54- Esquema do conversor trifásico NPC de 5 níveis. [5]

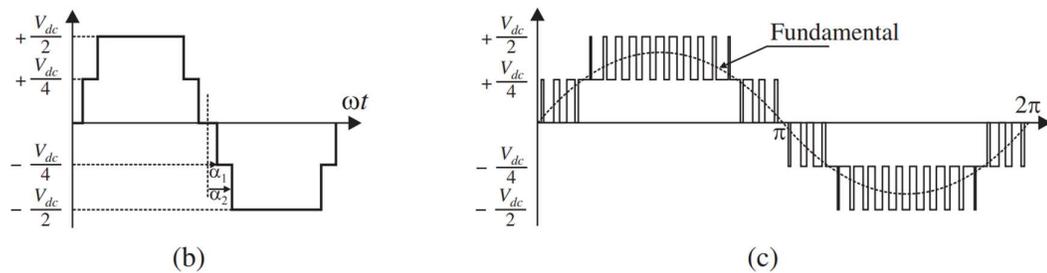


Figura 55- Conversor trifásico NPC de 5 níveis. (b) - saída AC antes do indutor sem modulação PWM, (c) - Saída AC antes do indutor com modulação PWM [5]

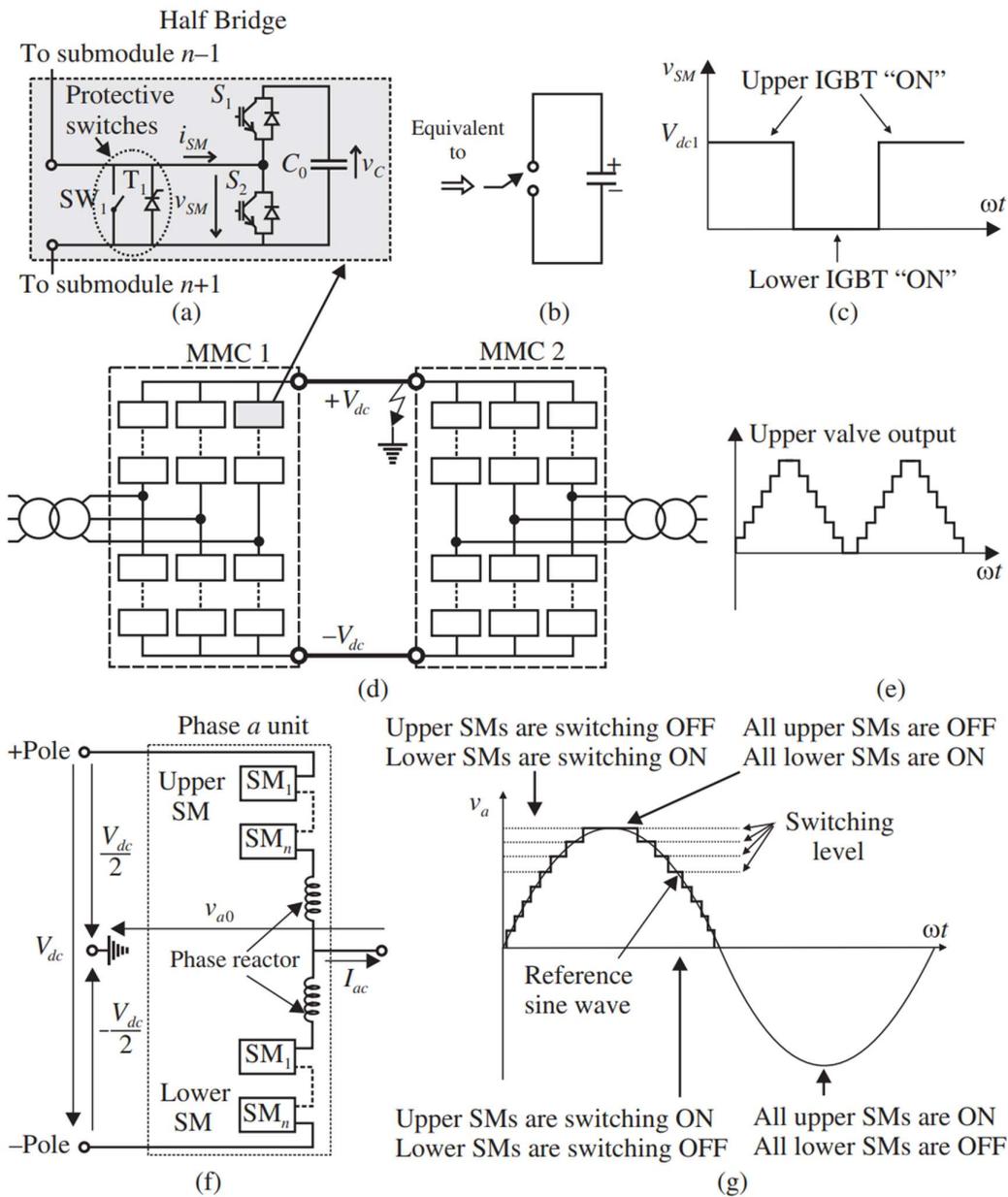


Figura 56- Conversor trifásico MMC com módulo de meia ponte. (a) - Esquema do módulo. (b) - Esquema equivalente do módulo. (c) - Saída do módulo. (d) - Esquema de uma interligação

usando conversores MMC-VSC. (e) – Potencial que o submódulo pode se encontrar. (f) – Esquema de uma fase do conversor MMC-VSC. (g) – Gráfico de saída teórico do controlador[5]

A Figura 56D mostra o esquema básico de um MMC, a grande diferença dele para os outros tipos de circuito é a existência de um submódulo. Este submódulo (Figura 56A), apesar de ser chamado de meia ponte, difere do estudado anteriormente (Figura 44A) por só possuir dois pontos de conexão ao invés de uma entrada CC e outra CA.

O arranjo do submódulo permite que eles sejam ligados em série, onde sua saída/entrada é 0, caso o S2 esteja ativo, ou igual à tensão de seu capacitor, caso o S1 esteja acionado. Pode-se interpretar o submódulo como uma fonte de tensão que varia entre duas tensões; colocando inúmeras fontes variáveis em série é possível controlar com precisão a tensão total de saída.

No sistema MMC existem duas tensões que devem ser controladas: a tensão entre os terminais CC e a tensão entre um terminal da CC com o da CA (ao controlar um, conseqüentemente se controla o outro). A tensão entre os terminais CC deve ser invariante em relação à operação de inversão ou retificação, ou seja, metade das chaves (submódulos) de cada braço devem estar sempre acionadas.

O controle da fase CA ocorre ao alterar a proporção de chaves acionadas entre a parte de cima e de baixo de cada um dos braços, como mostrado na Figura 56G. A máxima tensão CA ocorre quando não há nenhuma chave acionada no braço de cima, fazendo com que, neste instante, a tensão CA seja a mesma que a tensão CC positiva.

Por motivos de segurança de operação, os sistemas são projetados com uma margem. A tensão máxima de operação CA é menor que a tensão de operação CC, evitando o acionamento simultâneo de todas as válvulas de uma parte dos braços. Está margem faz com que a tensão CC possa variar sem que a variação passe para o lado CA. Extremamente útil para sistemas multiterminais onde a saída abrupta de um terminal impacta a tensão C. Ou quando o sistema é composto por terminais LSC e VSC, onde a tensão de saída do LCC depende da corrente sendo entregue.

Nos últimos anos, diferentes técnicas de modulação para sistemas multiníveis foram desenvolvidas, com diversas aplicações, de acordo com suas características. Estas técnicas apresentam diferentes capacidades de redução dos harmônicos, redução de perda de potência por chaveamento, custo computacional, e redução de perda de potência por correntes parasitas criadas pelo desbalanceamento de tensões nos capacitores. As técnicas são demonstradas na Figura 57 e detalhadas em [5].

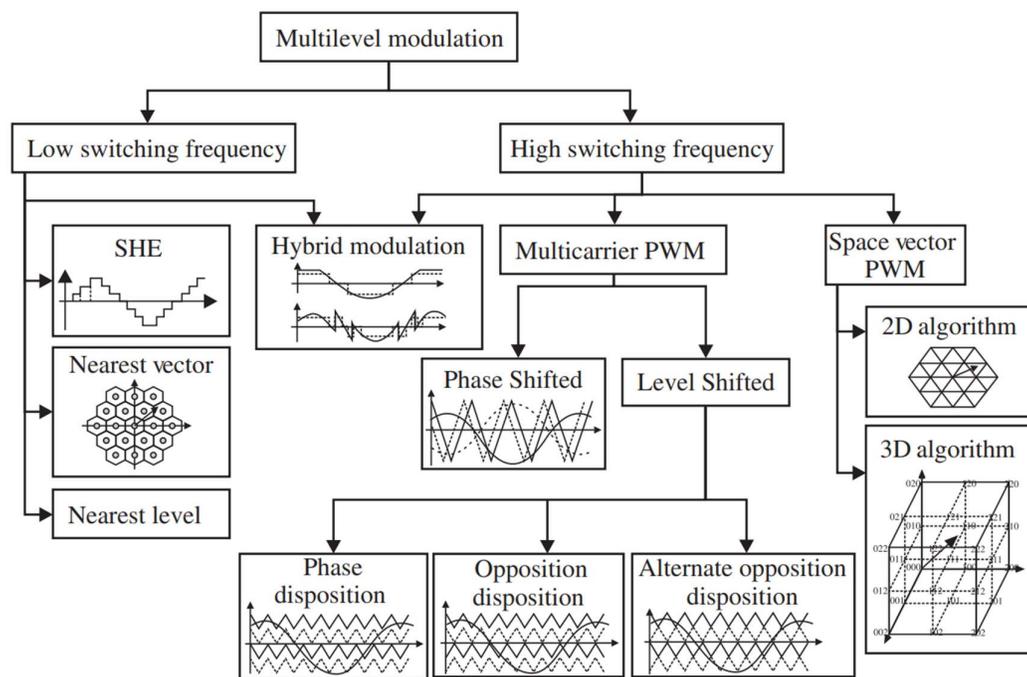


Figura 57- Diferentes tipos de técnicas de modulação[5]

Conversores CC-CC

Historicamente não era possível alterar a tensão de um sistema CC. Apesar de isto ter mudado com a criação dos sistemas buck-boost, estes não são capazes de operar na potência necessária para os sistemas HVDC. O sistema buck-boost pode ser visto com detalhes em [2].

A outra solução para conversores CC-CC é inverter a corrente com um conversor VSC ou MMC-VSC, passar a corrente por um transformador para alterar a razão tensão corrente e depois retificar. Esta retificação pode ser feita com conversores VSC ou MMC-VSC que permiti o sistema transmitir energia pelos dois lados ou por uma ponte de diodos ou tiristores, onde o conversor só poderá transmitir energia em uma direção.

Há diversas formas de fazer a conexão entre os conversores CC-CA e CA-CC para criar os conversores CC-CC, para se aprofundar no assunto recomendo a leitura de [16]

d. Controle do sistema HVDC

Cada um dos conversores que integram o sistema devem operar de forma conjunta, controlando o fluxo de potência que flui pelas linhas HVDC. O modelo de controle do sistema considera que os conversores são fontes de tensão ligadas, e as linhas são uma resistência em serie com uma impedância.

Em regime de operação normal, é esperado variações pequenas na corrente, sendo preciso considerar somente a resistência das linhas e a tensão dos conversores. Em variações bruscas como no caso de um curto-circuito, o controle deve acionar cálculos e modelagens para melhor contornar a variação de tensão e corrente que ocorre nas linhas.

Bipolo VS Monopolo

A linha de transmissão HVDC pode ser um monopolo ou um bipolo. O monopolo é sistema inversor e a linha transmite com um cabo em sua tensão nominal e o outro cabo na tensão da terra. O bipolo é mostrado na Figura 58, na linha Itaipu-Ibiúna que opera em uma tensão nominal de 600KV, onde um dos cabos passa +600KV e no outro -600KV.

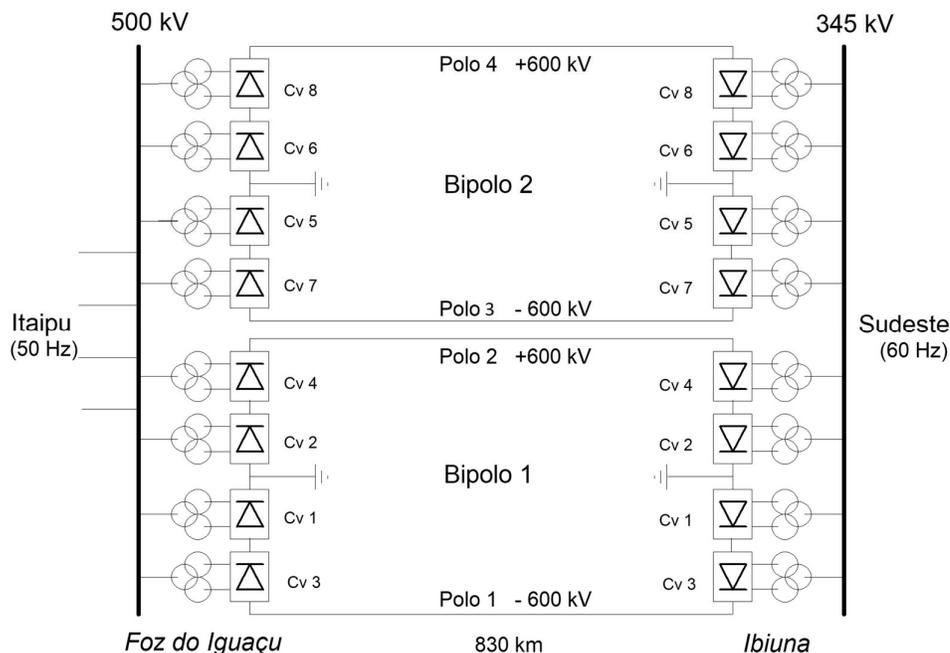


Figura 58– Esquema de operação do bipolo Itaipu-Ibiúna

No caso do bipolo, o sistema pode transmitir usando os cabos do bipolo ou um dos cabos e o eletrodo de terra. Estas duas formas de operação dão uma flexibilidade ao sistema que ainda pode transmitir energia em casos especiais como: Queda de um dos cabos da linha de transmissão, falha em um dos transformadores, ou falha em uma das chaves tiristores.

Como este outro modo de operação usa um cabo e o eletrodo de terra isto significa que a corrente seguirá por um dos cabos e retornará pela terra. Isto pode causar corrosão eletrolítica em estruturas metálicas enterradas no solo e um ressecamento do solo por eletro-osmose. Por conta dos problemas ambientais este modo de operação somente é permitido no Brasil durante um intervalo de 250 hora por ano, o suficiente para resolver a falha e voltar ao modo normal de operação, ou ligar usinas para suprimir os efeitos da perda da linha HVDC [21].

Controle de um sistema Biterminal HVDC LCC

Foram criados 2 protocolos de operação: o CMC (do inglês, *Current Margin Control*) e o CCC (do inglês, *Coordinated Current Control*) para operar uma linha HVDC formada por um retificador e um inversor sendo conversores LCC

O modo de operação CMC visa operar o sistema DC no limite permitido pelo sistema AC ao qual este está ligado, gerando o mínimo de perdas e consumo de reativos. O ponto de operação é inicialmente definido pela máxima tensão que o inversor pode fornecer para o lado AC e pela máxima corrente que o lado AC pode fornecer para o retificador, como mostra a Figura 59 A. A Figura 59B demonstra o *link* de tensão DC entre os dois terminais pela linha de transmissão, que possui uma resistividade não desprezível.

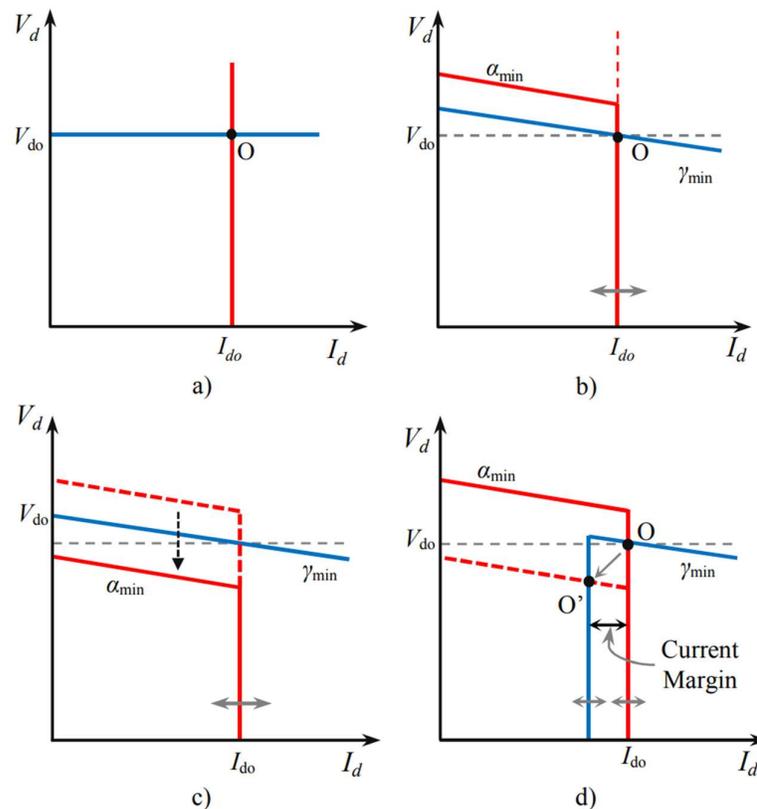


Figura 59- Criação do mapa de operação CMC, azul inversor, vermelho retificador.[3]

Por questões de segurança, é aplicada uma pequena queda nas tensões de operação, criando uma margem de erro para eventuais problemas que possam desbalancear a tensão CA. A criação desta margem pode ser vista nas Figura 59 C e D. Não é recomendável operar sem a margem, pois um curto severo no lado AC levaria à perda de comutação dos inversores, o que interromperia a transmissão.

Em geral a impedância dois lados da linha HVDC é diferente, isto impacta numa diferença de ângulo entre as linhas do gráfico que representam o comportamento da tensão em relação a corrente. Esta diferença pode ser tal que haja mais de um ponto de operação para os mesmos ângulos de disparo Figura 60A. Este problema pode ser evitado criando um sistema de disparo constante ou um sistema que mantenha a tensão em um patamar constante, como é mostrado na Figura 60B. Por fim, é preciso considerar o limite mínimo de corrente, no qual o sistema consegue operar para uma determinada tensão e um ângulo mínimo de operação do inversor, de forma que não se torne um retificador. Levando em conta estas considerações, temos a Figura 60C que apresenta os valores máximos e mínimos de tensão e corrente que o sistema opera.

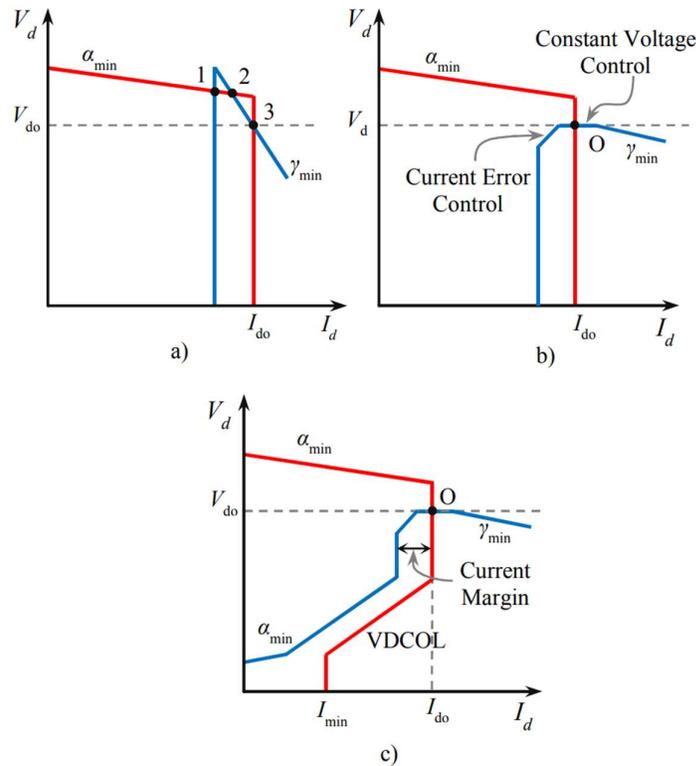


Figura 60– Mapa de operação CMC, azul inversor, vermelho retificador. [3]

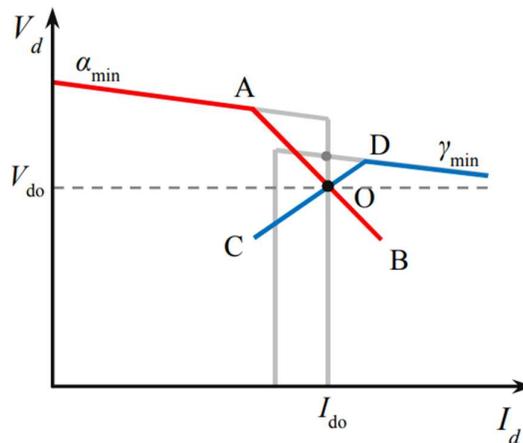


Figura 61– Mapa de operação CCC, azul inversor, vermelho retificador. [3]

O sistema de operação CCC é uma modificação do sistema CMC, onde o sistema opera maximizando a potência que é transferida, ao custo de custo de altas perdas e consumo elevado de

reativos. Isto ocorre, por o sistema estar acima de sua capacidade de tensão e corrente, o que gera uma distorção nas curvas características de tensão e corrente.

Controle de um sistema Biterminal HVDC VSC

O Sistema VSC também possui dois modos de operação, o VMC (do inglês, *Voltage Margin Control*) e o controle de tensão CA. No VMC os terminais conversores atuam em conjunto para manter a tensão da linha constante. A tensão da linha constante é possível pois diferente do LCC o VSC não possui uma correlação entre a tensão e a corrente.

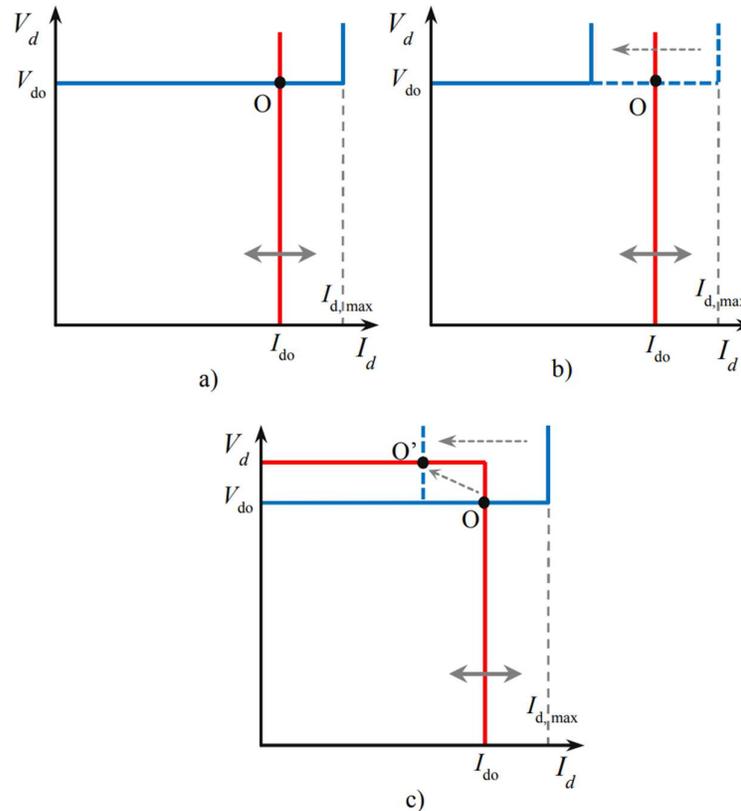


Figura 62– Mapa de operação VMC, azul inversor, vermelho retificador. [3]

A Figura 62A é o ponto de operação, onde a corrente de operação pode variar. Caso algo ocorra com no lado do inversor que ele tenha de mudar bruscamente a corrente que está sendo invertida Figura 62B, o sistema irá responder com um incremento na tensão de operação Figura 62C. O retificador perceberá a mudança na tensão e reduzirá a potência sendo invertida para voltar a tensão de operação.

A vantagem do VSC é que o controle do fluxo de potência pode ocorrer em uma estação e a outra irá se adequar sem precisar de uma coordenação dos terminais. Esta vantagem também ocorre no modo de operação de controle de tensão CA. Este modo é muito utilizado para as eólicas, ele parte do pressuposto que o retificador irá operar sempre no maior ponto de potência CA, e o inversor deve ser responsável pelo controle da tensão da linha.

Na Figura 63A a curva vermelha (retificador) é deslocada no eixo V-I dependendo da potência sendo gerada no eixo CA. A Figura 63B representa o que aconteceria se a potência ultrapassar a capacidade do inversor, para evitar este caso é programado um limite de potência nos retificados. Na Figura 63C é considerado também os limites de equipamento do retificador, sua tensão e corrente máxima de operação.

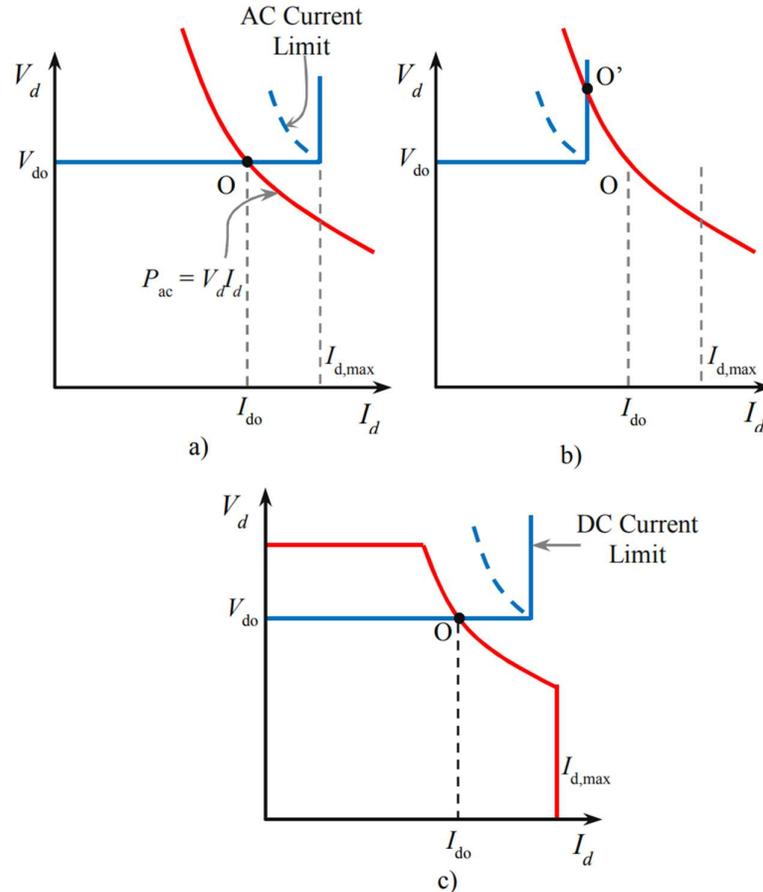


Figura 63- Mapa de operação de tensão controle CA, azul inversor, vermelho retificador. [3]

Controle de um sistema Multiterminal

Os sistemas multiterminais podem ser ligados de duas formas, em série (Figura 64) ou em paralelo (Figura 65). O sistema ligado em série possui o problema clássico de qualquer sistema em série, caso uma conexão caia todo o sistema para de funcionar. No entanto é possível usar a lógica do bipolo para contornar este problema, onde caso uma linha ou subestação encontre problemas é feito uma transmissão especial usando somente uma linha e o terra. Para haver a possibilidade de operar como mononopos independentes é preciso um ponto de terra bem definido, isto nem sempre é possível o que acaba limitando o uso de multiterminais em série.

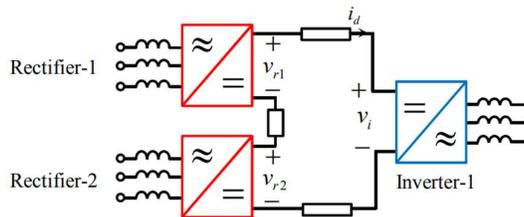


Figura 64- Multiterminal em série. [3]

No sistema em paralelo a falta de um terminal não inviabiliza a operação do sistema, sendo do ponto de vista operacional mais flexível. No entanto sua expansão é limitada pela inexistência de disjuntores CC que atuem de forma rápida o suficiente para evitar que um curto-circuito do lado CC deixe todos os terminais inoperantes.

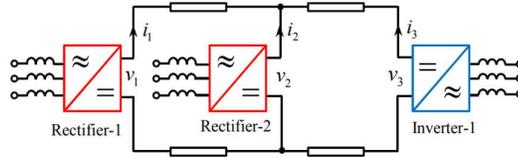


Figura 65- Multiterminal em paralelo. [3]

O sistema multiterminal pode operar com todos os terminais sendo VSC, LCC ou uma mistura de ambos. O sistema quando usa terminais LCC solicita uma coordenação de operação maior para garantir o fluxo de corrente nestes terminais, o que gera uma complexidade na operação e performance insatisfatória[7].

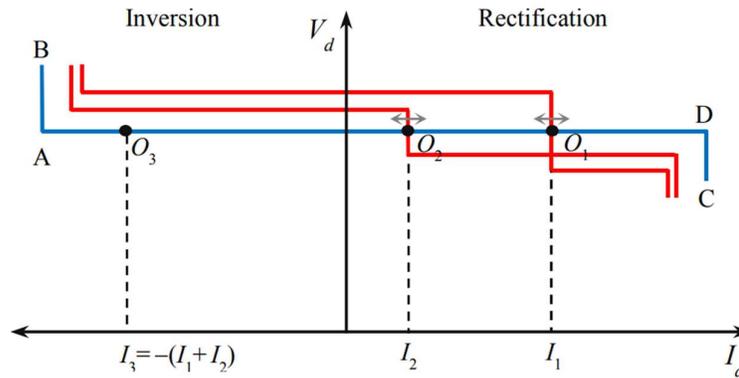


Figura 66- Operação do sistema multiterminal em paralelo VSC. [3]

O sistema multiterminal VSC além de ter a vantagem de operação onde não é necessário uma coordenação dos terminais ele ainda pode ter uma outra vantagem de estipular terminais controladores, onde eles funcionaram como retificadores ou inversores dependendo do nível de tensão. Caso a potência deste terminal atinja o máximo, outro assumiria este papel.

4. Desenvolvimento do estudo de viabilidade

A viabilidade de uma instalação para a produção de energia solar depende do custo dos painéis, o custo do terreno, a intensidade solar, o custo de fontes concorrentes e o custo de conexão com o sistema elétrico.

No Brasil, se uma linha de transmissão serve somente como conexão entre uma usina geradora e o sistema elétrico, o custo de construção e manutenção desta linha deve ser pago pelo seu proprietário. Caso a subestação mais próxima da usina não seja capaz de atender à nova fonte, a usina deverá utilizar outra subestação, capaz de suportar a sua conexão ao sistema de energia.

Para diminuir os custos de conexão com o sistema elétrico, as usinas devem ser instaladas o mais perto o possível de uma subestação capaz de suportá-la. Outra opção é submeter um projeto comprovando o interesse da união na construção de uma nova subestação, ou o ampliado de capacidade de carga de uma existente. A Empresa de Pesquisa Elétrica (EPE) junto com o Operador Nacional do Sistema (nos) e a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) irão avaliar se a segurança energética da entrada da nova fonte justificam o custo de manutenção e construção.

As usinas solares possuem um uso intensivo de terra, fazendo com que o custo do terreno seja um dos principais fatores em seu estudo de viabilidade econômica. Em geral o custo dos terrenos próximos às subestações é elevado, o que os torna comercialmente inviáveis.

É de interesse estudar novas formas de conexão com o sistema, para viabilizar novos projetos ao reduzir o custo de conexão. As duas propostas apresentadas são: a inversão na subestação e a conexão em subestações que possuam um barramento CC.

a. Inversão na Subestação

A primeira proposta é, em vez de inverter a corrente gerada na usina solar, transmitir ela em corrente contínua e inverter na entrada da subestação. Este sistema continuaria com o mesmo custo dos inversores e reduziria o custo de transmissão por quilômetro de linha.

No entanto todas as linhas de transmissão devem ser capazes de lidar com um curto. Sendo assim, para a conexão ser possível, deve se acrescentar um disjuntor entre a saída dos painéis solares e a linha de transmissão, conforme mostrado nas Figura 67 e 68.



Figura 67- Esquema da linha de transmissão em configuração monopolo.

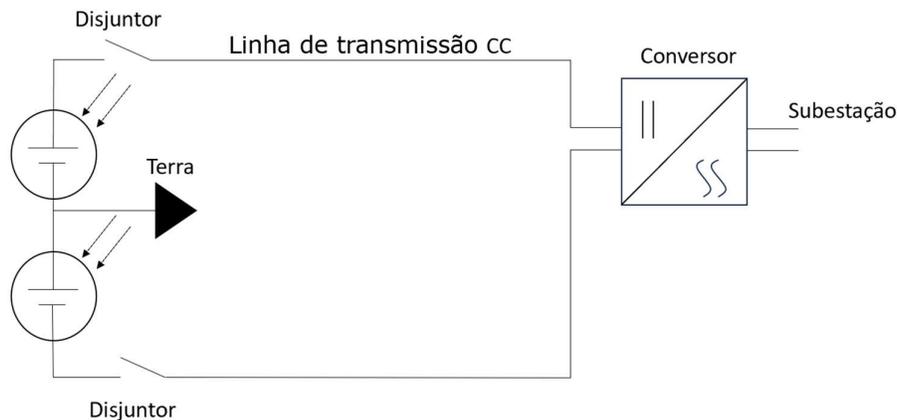


Figura 68– Esquema da linha de transmissão em configuração bipolo.

Apesar de os disjuntores para corrente contínua não conseguirem atuar em um tempo tão curto quanto seria ideal (de 2 a 10 ns, conforme mencionado no capítulo anterior), há disjuntores para corrente contínua. Entretanto, eles não têm atuação rápida o suficiente para impedir que a proteção natural do conversor seja acionada, o que impede um sistema seguro com múltiplas linhas no mesmo terminal.

Os disjuntores para corrente contínua funcionam de forma semelhante àqueles para circuitos em corrente alternada. É necessário utilizar um disjuntor mecânico em conjunto com um sistema para criar um ponto de corrente nula e extinguir o arco elétrico, caso ocorra [9].

Uma importante observação é que não há acréscimo de disjuntores no sistema. Apesar do inversor ser um sistema autossuficiente no quesito de proteção, ainda são necessários os disjuntores da entrada de linha em CA na subestação. A mudança do conversor para dentro da subestação, permite a remoção dos disjuntores de entrada de linha. Caso este conversor tenha transformadores, ele continuará tendo os disjuntores dos transformadores, independentemente da posição.

Neste caso, ocorre uma redução de três disjuntores para um ou dois (dependendo do arranjo). Estes dispositivos são mais caros, por precisar do sistema adicional que cria um ponto de zero. Os cálculos de adequação dos disjuntores dependem da corrente de curto-circuito, corrente nominal e tensão de operação, requerendo técnicas de otimização complexas para definir qual dos sistemas terá um menor custo de disjuntores.

Outra questão deste sistema é que ao alternar a corrente é possível passá-la por um transformador, podendo transmiti-la em tensões mais altas. Isto corresponde à utilização de cabos condutores menores e menos perdas. É possível aumentar a tensão CC que a instalação produz, aumentando o número de painéis em série e diminuindo o número de painéis em paralelo. Esta mudança permite à instalação transmitir em tensão maior e com uma corrente menor.

Deve ser considerado que, apesar da potência a ser invertida ser a mesma, isto não significa necessariamente o mesmo número de chaves conversoras, pois cada válvula possui tensões e a correntes máximas de operação.

Além disto, ao diminuir o número de painéis em paralelo, se aumenta o impacto que um painel com defeito ou sombreado fará em toda a instalação. É vital ter painéis para a substituição e uma rotina de monitoramento de possíveis defeitos nos painéis.

A ideia de inverter a corrente na subestação é válida e pode reduzir custos, no entanto deve se analisar os impactos que possíveis mudanças de arranjo tem na operação. Para o rastreamento do ponto máximo a distância do inversor não fará grande diferença, pois se espera que as variações de intensidade luminosa sejam lentas, fazendo com que a impedância adicional da linha não impacte a operação do sistema.

b. Conexão em barra CC

Caso exista uma subestação com uma barra em tensão contínua, projetada para conexão com diversas fontes, não será preciso inverter a potência, pois o sistema já opera em corrente contínua.

Existem vantagens em se ter um barramento que permita a entrada de fontes em CC. A principal vantagem é que, exceto as hidroelétricas de ciclo reversível, todas as outras formas de armazenamento de energia são em corrente contínua ou precisam ser convertidas para corrente contínua de modo a operar em uma frequência diferente daquela da rede elétrica.

Sendo assim, um barramento em CC ao qual diversas fontes possam se conectar facilitaria a instalação de indústrias que atuem na compra e venda de energia e no fornecimento de serviços de estabilização de carga. Estas indústrias, são extremamente importantes para a estabilização de um sistema dependente de fontes intermitentes, como as fontes de energia solar e eólica.

A compra e venda de energia ajudaria o sistema a aumentar a demanda quando esta é baixa e conseguiria suprir a alta demanda, diminuindo a volatilidade que as fontes intermitentes introduzem.

A estabilização da carga é um serviço de compra e venda em um curto período. Esta operação visa garantir a estabilidade da carga em um sistema no qual sistemas de armazenamento de energia podem entrar e sair de operação repentinamente. Os sistemas de armazenamento ainda não são competitivos e retirar um de seus principais custos pode ser uma forma de deixá-los mais viáveis.

Infelizmente, ainda não há disjuntores CC que atuem de forma rápida o suficiente para evitar que a proteção do inversor atue. Desta forma, caso haja um problema de curto-circuito, o barramento todo será desligado. Isto seria extremamente inconveniente para a operação do sistema, por este motivo, barramentos deste tipo são evitados.

Este problema pode ser resolvido ao conectar o barramento CC em outro barramento CC usando conversores CC-CC de tecnologia VSC, podendo assim diminuir os pré-requisitos temporais de proteção do conversor e dando tempo para que os disjuntores CC possam atuar.

Há três formas de realizar a conexão entre sistemas fotovoltaicos e o barramento CC. As suas características são explicitadas a seguir.

Conexão direta

É possível conectar uma usina fotovoltaica diretamente à barra da subestação. Neste caso, a usina não terá gastos com o inversor, que atualmente representa em torno de 40% do custo da instalação, conforme mostrado na Figura 69, proporção que vem aumentando com o tempo.

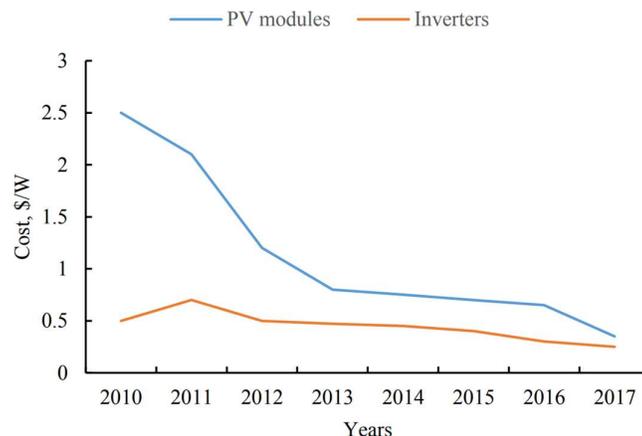


Figura 69– Custo dos painéis solares e inversores ao longo do tempo [14]

No entanto, ao retirar o inversor e fazer uma conexão direta, a instalação perde a capacidade de determinar a tensão de operação dos painéis, perdendo a capacidade de rastrear o ponto de maior potência. O barramento definirá a tensão na qual a usina começa a produzir. Todas as

instalações solares definem uma tensão mínima para a qual os painéis começam a injetar potência na rede, pois os inversores precisam de uma tensão CC superior à tensão CA que eles estão gerando.

A tensão de máxima potência não varia muito com a luminosidade da célula solar. A Figura 12 demonstra a perda de potência ocasionada por o sistema não operar na potência máxima. Esta perda pode ser aceitável, considerando que usar um inversor para evitá-la acarretaria um custo adicional de 66% do valor do investimento (este custo foi calculado considerando que o inversor equivalha a 40% do custo de um projeto normal). O dinheiro economizado com o inversor pode ser utilizado para expandir o projeto dando um aumento em torno de 50% da potência (ao expandir o projeto aumenta o custo de terra e cabos de conexão).

Este sistema também deve contar com disjuntores CC e diodos para garantir a direcionalidade da corrente no sentido de produção. O painel solar equivale a um diodo colocado em polarização direta, sendo assim, ele poderia consumir potência do barramento durante a noite.

Conexão com conversor CC-CC na instalação

Outra forma de conectar a instalação solar à barra é utilizando um conversor CC-CC unidirecional. Este sistema possui a vantagem de poder rastrear a potência dos painéis, e a desvantagem de ter um custo superior ao de um inversor. Esta conexão não é economicamente viável, em comparação à uma conexão direta ao barramento.

Comparado ao sistema de inversão na subestação, este sistema possui a vantagem de ter diversos arranjos, cada qual sendo monitorado em seu ponto de maior potência, diminuindo assim os problemas operacionais de arranjos longos e otimizando a potência para cada um dos arranjos.

O controle de múltiplos arranjos é feito por múltiplos conversores CC-CA, onde a corrente de saída CA de cada conversor será somada. Sua resultante passará por um transformador elevando a tensão, que será posteriormente retificada.

Conexão com conversor CC-CC na subestação

Este sistema combina o alto custo da utilização de um conversor CC-CC e apresenta a falta de flexibilidade do conversor na instalação. Entretanto, a utilização do conversor na subestação possibilita a conexão à uma linha HVDC existente.

Todas as linhas existentes podem ser seccionadas em duas e uma subestação ser colocada no ponto de secção. Esta operação é permitida, desde que não afete negativamente a operação da linha original. Como o terminal se conecta a somente uma linha ele não introduz um novo trecho sujeito a curto-circuito.

Não tendo o problema da lenta atuação dos disjuntores CC, pois o conversor serviria como o sistema de proteção, não há problema na adição deste terminal. Este tipo de conexão é a precursora de uma subestação que aceite a conexão de diversas fontes CC.

Esta forma de conexão é cara, porém pode ser estratégica, caso a empresa planeje expandir suas operações na região. Além disto, linhas HVDC se estendem por centenas de quilômetros, e a possibilidade de se conectar desta forma no sistema melhora a viabilidade econômica pela área na qual a linha está instalada.

5. Conclusão

Este estudo de viabilidade apresenta diversos aspectos dos sistemas de transmissão de energia em corrente contínua de alta tensão (HVDC). Dentre os principais aspectos considerados estão as topologias de inversor e sistemas de conversão CC-CC, destacando os seus componentes fundamentais, como válvulas e dispositivos de proteção.

Os princípios fundamentais de operação dos dispositivos semicondutores foram destacados, como uma maneira de evidenciar as novas tecnologias que precisaram ser desenvolvidas nas últimas décadas para possibilitar a transmissão em HVDC. O grande aumento de eficiência dos conversores, inversores e painéis fotovoltaicos, possibilita uma transição da tradicional corrente alternada, gerada por sistemas tradicionais, para a corrente contínua.

Com o aumento exponencial da geração de energia elétrica por usinas fotovoltaicas, intrinsecamente intermitentes, há uma maior necessidade de estudar métodos de conexão entre diferentes sistemas de transmissão. Neste trabalho foram analisados os principais métodos de conexão, suas vantagens e desvantagens. Foram considerados os custos envolvidos na conexão de usinas fotovoltaicas à sistemas já existentes em corrente alternada ou contínua, destacando a viabilidade econômica de cada conexão.

6. Referências

- [1] Hayt, W. H. (1989). *Engineering electromagnetics*. New York: McGraw-Hill.
- [2] RASHID, M. H. (2001). *POWER ELECTRONICS HANDBOOK*. J. David Irwin.
- [3] HVDC transmission system architectures and control - A review. (2013). *IEEE*. doi:10.1109/COMPEL.2013.6626396
- [4] W. F. (1990). Application aspects of multiterminal DC power transmission. *IEE*, 2084-2098. doi:10.1109/61.103704
- [5] Mircea, E., Liu, C.-C., & Abdel-Aty, E. (2016). VSC-HVDC Transmission. *IEE*, 125-267. doi:10.1002/9781119175391.ch4
- [6] Shenai, K. (2015). The Invention and Demonstration of the IGBT [A Look Back]. *IEEE*, 12-16. doi:10.1109/MPEL.2015.2421751
- [7] ZHOU, S. (2011). Modelling and Control of Multi-Terminal HVDC Networks for Offshore Wind Power Generation. Cardiff, Wales, UK.
- [8] GARZO, R. D. (2002). *High Voltage Circuit Breakers - Design and Applications*. New York: Marcel Dekker, Inc.
- [9] Barnes, M. (2020). HVDC Circuit Breakers—A Review. *IEEE*, 211829-211848. doi:10.1109/ACCESS.2020.3039921
- [10] Kim, C.-K., Sood, V. K., Jang, G.-S., Lim, S.-J., & Lee, S.-J. (2009). *HVDC Transmission: Power Conversion Applications in Power Systems*. Retrieved from <https://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?bknumber=5681191>
- [11] Jahan, M. S., Hamim, S. J., Bhuiyan, M. T., Abeadin, M. J., & Chowdhury, M. N. (2021). Comparative cost analysis of VSC-HVDC and HVAC as transmission system for a 50 MW offshore wind farm in Hatiya Island. *IEEE*, 19-20. doi:10.1109/STI50764.2020.9350463
- [12] Holland, M. (1999). Fundamentals on harmonics. *IEEE*, 11-15. doi:10.1109/CITCON.1999.767026
- [13] Luque, A., & Hegedus, S. (2011). *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*. Wiley.
- [14] Allik, A., Lill, H., & Annuk, A. (2019). Effects of Price Developments on Photovoltaic Panel to Inverter Power Ratios. *IEEE*, 03-06. doi: 10.1109/ICRERA47325.2019.8997104
- [15] Bhang, B. G., Lee, W., & Kim, G. G. (2019). Power Performance of Bifacial c-Si PV Modules With Different Shading Ratios. *IEEE*, 1413-1420. doi: 10.1109/JPHOTOV.2019.2928461
- [16] Grain Philip Adam, I. A. (2016). Review of dc-dc converters for multi-terminal HVDC transmission networks. *IET Power Electronics*, 281-296. doi:10.1049/iet-pel.2015.0530
- [17] Harlow, J. H. (2004). *ELECTRIC POWER TRANSFORMER ENGINEERING*.
- [18] Rezende, S. M. (2014). *Materiais E Dispositivos Eletrônicos*. Livraria da Física.
- [19] [2023 Levelized Cost Of Energy+ | Lazard](#)
- [20] [Renewables Data Explorer – Data Tools - IEA](#)
- [21] [Sismicidade \(ibama.gov.br\)](#)
- [22] Jonnes, J. (2003). *Empires of Light*. Random House Publishing Group, 2003.

[23] E.C. Weiner a b, R. J.-Y. (2018). Effect of capping procedure on quantum dot morphology: Implications on optical properties and efficiency of InAs/GaAs quantum dot solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 240-248. doi:10.1016/j.solmat.2018.01.028