



HIGH VOLTAGE DIRECT CURRENT (HVDC) MULTI-TERMINAL LIGADOS A PARQUES EÓLICOS OFFSHORE

ARTIGO ORIGINAL

SANTOS, Eduardo Conceição dos¹, SARTORI, Rodrigo Vinícius²

SANTOS, Eduardo Conceição dos. SARTORI, Rodrigo Vinícius. ***High Voltage Direct Current (HVDC) multi-terminal ligados a parques eólicos offshore.*** Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento. Ano. 07, Ed. 06, Vol. 08, pp. 147-158. Junho de 2022. ISSN: 2448-0959, Link de acesso: <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-eletrica/high-voltage-direct-current>, DOI: 10.32749/nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-eletrica/high-voltage-direct

RESUMO

Com a evolução da indústria e da sociedade, o consumo energético aumentou. Em função disso, o sistema elétrico teve de passar por uma adaptação a fim de conseguir suprir as cargas solicitadas. Em paralelo, começou-se a analisar os benefícios que a utilização do padrão de transporte de carga em corrente contínua traria para todo o sistema. Dentro deste contexto, esse estudo se desenvolveu com base na seguinte questão norteadora: qual é o diferencial do sistema HVDC (Corrente Contínua em Alta Tensão) multi-terminal se comparado ao sistema HVAC (Corrente Alternada em Alta Tensão) na transmissão de energia em parques eólicos offshore? Tendo, portanto, como objetivo principal fazer um comparativo entre a eficiência energética das duas técnicas de transmissão de energia elétrica. Para isso, foi realizada uma análise bibliográfica em artigos, livros e documentos de

¹ Graduando em Engenharia Elétrica pela UNINTER. ORCID: 0000-0001-6076-4940.

² Orientador. ORCID: 0000-0001-8093-6906.



órgãos na área de energia elétrica. Nesse contexto, quanto aos resultados, notou-se que o emprego da tecnologia HVDC multi-terminal permite a diminuição de perdas energéticas ao longo de um linhão, sendo um sistema vantajoso quanto a sua eficiência energética, flexibilidade e autonomia no transporte de energia. Ademais, observou-se que esse sistema promove mais caminhos para a transmissão da energia gerada pelo parque eólico *offshore* ao consumidor.

Palavras-chave: Sistema HVDC Multi-terminal, Sistema SVAC, Transmissão, Energia eólica, Parques eólicos offshore.

1. INTRODUÇÃO

A energia elétrica está presente no cotidiano do ser humano e a sua utilização é de vital importância para que diversos aparelhos e equipamentos possam funcionar corretamente (ALEXANDER, 2013).

Sendo assim, diante da crescente demanda por energia no mundo, há uma importância em se aprofundar no estudo sobre esse tema, sob a necessidade de se criar planos de crescimento na geração e transmissão de energia elétrica, visando maior economia e qualidade.

Posto isso, destaca-se que diversas técnicas de transmissão de energia elétrica são utilizadas na engenharia moderna para o transporte de energia das unidades geradoras até os centros de carga. Em especial, para se transportar cargas energéticas por longas distâncias, geralmente, utiliza-se as linhas de transmissão de Corrente Alternada em Alta Tensão (HVAC) ou as linhas de transmissão de Corrente Contínua em Alta Tensão (HVDC). Porém, a definição de qual linha de transmissão aplicar traz consigo diversas particularidades que podem gerar prós e contras ao projeto em questão (PINTO, 2013).

RC: 119644

Disponível em: <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-eletrica/high-voltage-direct-current>



Desta forma, o presente trabalho se baseou na seguinte questão norteadora: qual é o diferencial do sistema HVDC (Corrente Contínua em Alta Tensão) multi-terminal se comparado ao sistema HVAC (Corrente Alternada em Alta Tensão) na transmissão de energia em parques eólicos offshore? Portanto, o objetivo geral deste trabalho baseou-se em fazer um comparativo entre a eficiência energética das duas técnicas de transmissão de energia elétrica. Assim, como objetivos específicos buscou-se: explicar como funciona o sistema HVDC multi-terminal; apresentar algumas vantagens da tecnologia HVDC em relação ao sistema tradicional AC; e a sua ligação com os parques eólicos *offshore*.

Para isso, a metodologia do artigo foi constituída a partir de uma pesquisa bibliográfica, sendo que o levantamento das informações foi realizado a partir de artigos, livros e sites de órgãos da área de energia elétrica. Sendo assim, as informações foram criticamente analisadas, a fim de desenvolver o presente artigo. Portanto, a metodologia adotada nesta pesquisa baseou-se em uma revisão de literatura qualitativa e descritiva.

Sendo assim, o presente estudo traz à sociedade e ao meio acadêmico o levantamento de informações que nortearão na redução de perdas de energia ao longo do linhão, possibilitando conectar correntes de diferentes frequências, com redução de custos e menor impacto ambiental.

2. SISTEMAS HVDC

Dentre as técnicas de transmissão de energia elétrica utilizadas na engenharia moderna para o transporte de energia, sabe-se que as linhas de transmissão de Corrente Alternada em Alta Tensão (HVAC) ou as linhas de transmissão de Corrente Contínua em Alta Tensão (HVDC) são as mais utilizadas para o transporte de cargas energéticas por longas distâncias. No entanto, destaca-se que o sistema de transmissão em HVDC é uma tecnologia que vem sendo bastante utilizada, ganhando espaço no Brasil e no mundo.

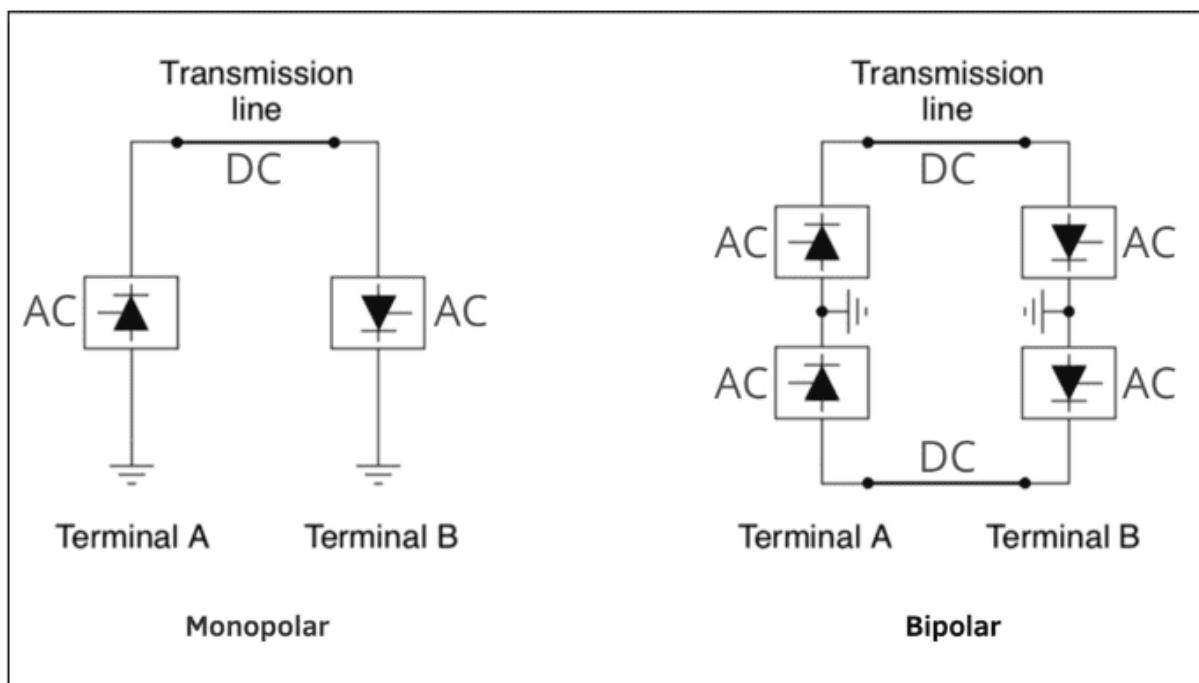
RC: 119644

Disponível em: <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-eletrica/high-voltage-direct-current>



Diante disso, ABB (2019) aponta que a topologia mais simples de HVDC diz respeito ao sistema ponto a ponto, que conecta duas redes AC convencionais através de uma ligação monopolar ou bipolar, conforme demonstra a figura 1.

Figura 1: Ligação monopolar (a) e bipolar (b)



Fonte: Electrical Power Engineering, s.d.

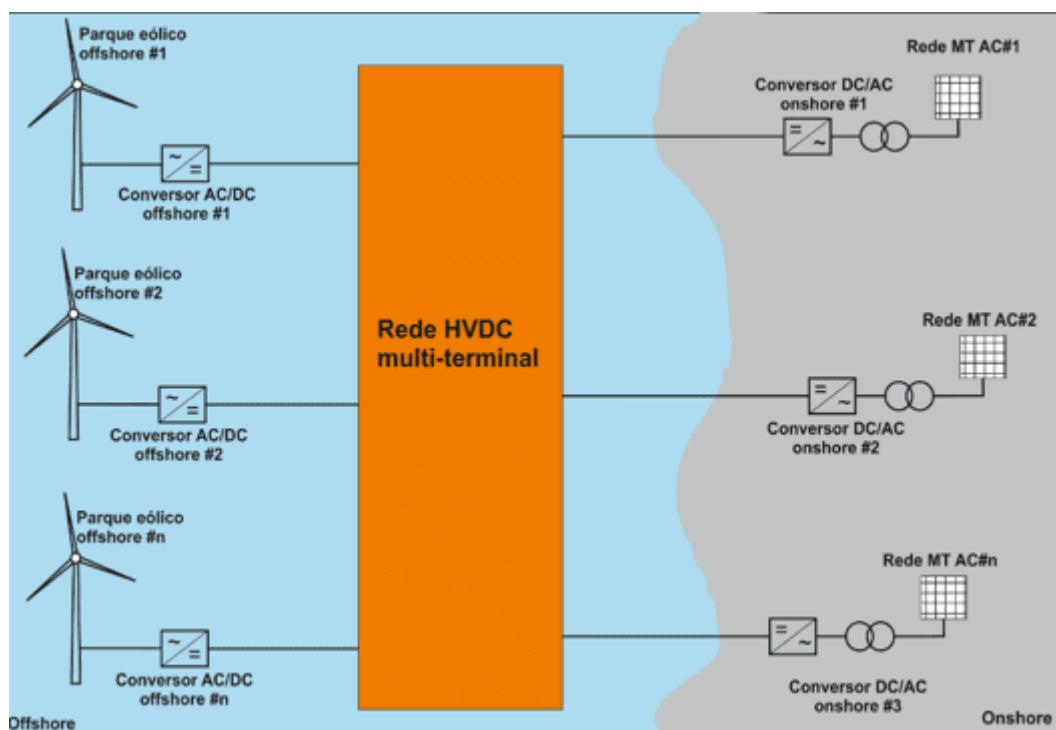
Todavia, esta ligação apresenta desvantagem na ocorrência de defeito do conversor ou do sistema HVDC, em que, no caso de falha, a conexão entre o parque eólico e a rede é perdida, não havendo trânsito de energia de um sentido para o outro, o que evidencia que a configuração ponto a ponto não oferece muita flexibilidade (EKANAYAKE *et al.*, 2011).

Contudo, este tipo de ligação também representa o primeiro passo para o desenvolvimento de uma outra configuração de transmissão de HVDC que está associada às redes multi-terminais, as quais geralmente são construídas passo a



passo a partir de topologias e infraestruturas ponto a ponto já existentes (EKANAYAKE *et al.*, 2011).

Figura 2: Rede HVDC multi-terminal



Fonte: Ekanayake (2011)

Conforme a figura 2, a partir de redes ponto a ponto já existentes são desenvolvidas redes multi-terminais, que são redes mais flexíveis, oferecendo mais vantagens ao sistema HVDC, principalmente em relação à viabilidade econômica do sistema elétrico e ao aumento da capacidade de transmissão.

Nesse contexto, quando estabelecidas redes multi-terminais, torna-se possível a escolha de determinadas topologias que permitem uma poupança de investimento. Assim sendo, essa possibilidade de estabelecer fluxos de energia entre redes continentais distintas tem suscitado um grande interesse nas redes multi-terminais (EKANAYAKE *et al.*, 2011).

RC: 119644

Disponível em: <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-eletrica/high-voltage-direct-current>



Contudo, para Sood (2010), os sistemas HVDC são adequados para transmitir energia de um ponto para outro, usando um conversor AC/DC em cada extremidade do Elo. Os sistemas de transmissão de corrente contínua de alta tensão Multiterminais são usados, onde uma quantidade maior de energia é necessária para a transmissão. Assim, se a aplicação de dois links DC de terminal é bem-sucedida, maior economia e vantagens técnicas podem ser obtidas por um sistema multi-terminal, onde três ou mais conversores DC são interligados por uma rede de transmissão HVDC.

Nesse contexto, Sood (2004) destaca que a implantação de futuras redes HVDC é exclusivamente viável com conversores de fonte de tensão (VSC) subdividida em conversores de dois, três e múltiplos níveis. Nesse aspecto, os conversores multi-nível têm muitas vantagens sobre os outros, havendo dois tipos usados no sistema multi-terminal, sendo eles: o conversor de fonte de corrente (CSC-HVDC) e o conversor de fonte de tensão (VSC-HVDC). Dessa forma, uma das vantagens do VSC – HVDC é que ele é naturalmente adequado para a construção em sistemas multi-terminais (SOOD, 2004).

O sistema VSC – HVDC é amplamente reconhecido como o meio mais eficaz para transmitir energia por longas distâncias. Assim, com a incorporação de uma fonte de tensão no lado DC, ao fornecer para sistemas AC, a conversão de energia VSC pode manter uma tensão prescrita, independentemente da magnitude ou polaridade da corrente que flui através da fonte (SOOD, 2004).

Nesse contexto, o principal diferencial do VSC – HVDC é a sua capacidade de superar a configuração ponto a ponto limitadora de dois terminais das conexões HVDC convencionais.



3. SISTEMA HVDC VERSUS HVAC

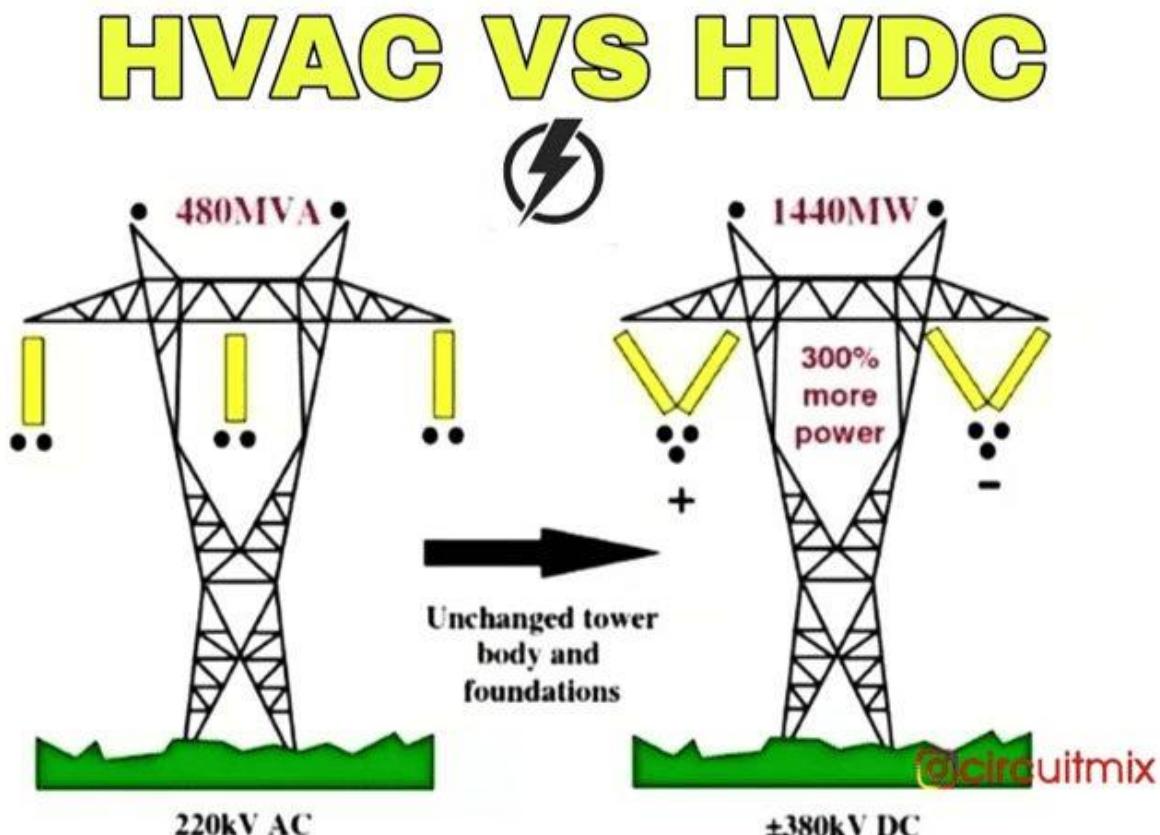
A HVAC é o principal tipo de corrente utilizada para transmissões de energia, porém, atualmente, diversas aplicações de linhão têm apresentado mais vantagem com a utilização do sistema HVDC, tendo em vista a sua eficiência energética (SATO, 2013).

Sendo assim, segundo Marchioro (2014), o conceito de Eficiência Energética se baseia na diminuição de perdas em uma determinada atividade, ou seja, o sistema torna-se eficiente quando passa a melhor utilizar a energia fornecida ou consumida. Deste modo, entende-se que os sistemas HVDC podem ser considerados como uma técnica de eficiência energética para sistemas de potência no mundo moderno, pois valores em torno de 23% já são os resultados obtidos em relação a redução de perdas presentes em sistemas HVAC quando comparados a um sistema equivalente HVDC e, quanto aos custos operacionais, observa-se uma redução de 12% entre os dois sistemas.

Nesse sentido, para Marchioro (2014) e Sood (2004), desconsiderando as estações conversoras e retificadoras, os custos das linhas HVDC são inferiores aos das linhas HVAC em função do projeto estrutural ser de menor esforço e em função da redução de condutores dimensionado em uma transmissão DC; algo que também reduz o porte da torre e, assim, sua ocupação e faixa de servidão necessária.



Figura 3: HVAC versus HVDC



Fonte: Ferreira (2017)[/caption]

Posto o contexto acima, a figura 3 traz um comparativo entre os dois sistemas, onde observa-se que há dois condutores para uma linha HVDC bipolar típica em comparação a três condutores para HVAC trifásico. Assim, uma vez que a transmissão HVDC requer menos condutores, constata-se que o custo da linha é reduzido (SATO, 2013).

Por outro lado, tratando-se dos limites de corrente e tensão, a resistência do sistema AC de um condutor é superior à resistência do condutor para tensão DC devido ao efeito da pele, de modo que a perda de energia é maior na transmissão AC.

RC: 119644

Disponível em: <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-eletrica/high-voltage-direct-current>



Além disso, a tensão da linha em DC determina a espessura do isolamento e o espaçamento do condutor, permitindo que os corredores da linha de transmissão tenham maior densidade de potência, logo, a tecnologia HVDC possibilita a redução das perdas ocasionadas pelo efeito corona, que acontece quando ocorre os picos de tensão mais elevados (SATO, 2013). Nesse aspecto, a transmissão em HVDC tem menos efeito corona e interferências radioelétricas do que a transmissão em HVAC.

Ademais, a perda total de potência no sistema HVDC é inferior a 5 MW para uma tensão de 450 kV em aproximadamente 895 quilômetros, enquanto as linhas aéreas HVAC longas produzem e consomem a potência reativa, o que é um sério problema (SOOD, 2004).

Sendo assim, torna-se oportuno destacar que em razão das linhas de transmissão AC possuírem algumas limitações, de acordo com Mohan (2016), as correntes alternadas (AC) se tornaram mais familiar aos usos industriais e domésticos, ao passo que o uso de transmissão DC passou a ser discutido quando consideradas longas distâncias, sendo utilizada principalmente em aplicações submarinas, conectando parques eólicos *offshore* à terra ou transmitindo eletricidade a longa distância através do mar, onde as linhas aéreas não podem ser usadas.

4. SISTEMA HVDC E OS PARQUES EÓLICOS OFFSHORE

A utilização de fontes inesgotáveis de energia tem sido cada vez mais crescente no mundo. Dessa forma, a energia eólica tem se apresentado como uma das principais fontes de energia renovável, obtida através da força dos ventos e com um enorme potencial para a geração de energia elétrica (PINTO, 2012).

Diante disso, ressalta-se que, no Brasil, a energia eólica foi a principal energia limpa que se destacou nos leilões para implantação deste tipo de fonte. Nesse contexto, Pinto (2012) aponta que existem duas possibilidades de implementação de parques eólicos, a saber: na terra (*onshore*) ou na água (*offshore*), onde os parques eólicos

RC: 119644

Disponível em: <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-eletrica/high-voltage-direct-current>



offshore em relação aos parques eólicos tradicionais (*onshore*) possuem como vantagem a maior velocidade dos ventos.

Posto isso, na Europa, foram instalados 1.558 MW de energia eólica *offshore* (no mar) em 2016 – principalmente na Alemanha, Holanda e Reino Unido, atingindo uma potência total acumulada de 12.631 MW, de acordo com a Associação Europeia de Energia Eólica (WINDEUROPE). Nesse contexto, atualmente, a capacidade instalada no mundo é de quase 500 GW. Contudo, um dos maiores desafios da eólica *offshore* é a transmissão desta energia produzida (PINTO, 2012).

Todavia, após o levantamento de dados, observou-se que o sistema de transmissão HVDC é uma alternativa viável que consegue garantir confiabilidade ao sistema elétrico.

A utilização de redes multi-terminal HVDC aumenta a viabilidade do sistema em virtude do aumento de ligações e consequente aumento no número de caminhos possíveis para a alimentação das redes *onshore*.

Por isso, as fazendas de Geração Eólica *Offshore* são uma das principais aplicações dos sistemas HVDC, se beneficiando das baixas perdas, do alto controle de fluxo energético e de reativos e, ainda, da flexibilidade do sistema, como uso da água para o retorno do sistema, de maneira permanente ou na presença de faltas. Esta técnica é baseada no fato de que, em uma transmissão em corrente contínua, é possível que em caso de falha com um dos ramais da linha, o condutor de aterramento seja utilizado como condutor de carga (SOOD, 2004).

Diante disso, um dos principais incentivos para este arranjo (multi-terminal) é a aplicação em fazendas eólicas *Offshore* para a interligação destas com plataformas petrolíferas ou de gás. Nestas fazendas, a utilização dos sistemas HVDC representa uma das melhores soluções para este caso. É comum plataformas petrolíferas ou de



gás terem sua geração de energia *onshore* com o transporte energético através de linhas de transmissão DC (SOOD, 2004).

Todavia, tendo em vista a crescente integração de produção de parques eólicos tanto *onshore* como *offshore*, observa-se a necessidade do controle de frequência. Através de pesquisas, ficou comprovado que quando grandes quantidades de integração de parques eólicos entram em operação ocorre uma redução da capacidade de regulação de frequência por parte dos sistemas convencionais. Sendo assim, em estações *offshore* ligadas a redes multi-terminais com sistema HVDC, onde não existe uma interseção de comunicação entre as redes *onshore* e *offshore*, é preciso desenvolver controles adicionais para estes contribuírem com serviços auxiliares. Assim, as novas alternativas estão baseadas em esquemas de controle para que a frequência da rede AC *offshore* reflita o que realmente se passa no sistema da rede continental sem o uso de canais de comunicação (SILVA *et al.*, 2012).

Diante disso, é importante considerar que os conversores foram desenhados para manter e controlar a tensão DC nos seus terminais. Esta tensão é controlada por meio da potência entregue à rede AC *onshore*, como foi visto pelos *droop controls*. Logo, para a transmissão em DC não existe frequência associada e, por isso, é necessário desenvolver no conversor *onshore* um controle que permita a transposição das variáveis de frequência que ocorre na rede AC em variações de tensão DC (SILVA *et al.*, 2012).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento do presente artigo pautou-se na seguinte questão norteadora: qual é o diferencial do sistema HVDC (Corrente Contínua em Alta Tensão) multi-terminal se comparado ao sistema HVAC (Corrente Alternada em Alta Tensão) na transmissão de energia em parques eólicos offshore? Tendo isso em vista, adotou-



se como objetivo fazer um comparativo entre a eficiência energética das duas técnicas de transmissão de energia elétrica.

Desta forma, por meio desta pesquisa ficou evidente a grande importância dos sistemas HVDC para sistemas de transmissão de energia elétrica de fontes renováveis, e como este é capaz de adaptar-se às suas variadas configurações. Após diversas evoluções e aprimoramentos, a tecnologia para transmissão em DC mostrou-se capaz de ser aplicada em diversos cenários, permitindo transportes de cargas onde antes não era viável.

Logo, observou-se que os sistemas HVDC permitem o transporte de blocos de energia de grande porte por longas distâncias, ou ainda, a interligação entre sistemas anteriormente incompatíveis entre si, algo que nunca havia sido feito antes pela engenharia moderna.

Assim, com a evolução na eletrônica de potência e as novas configurações, os sistemas HVDC têm apresentado sua capacidade de atuar em etapas do setor elétrico anteriormente dominadas pelos sistemas em AC.

Nesse contexto, verificou-se que para que haja ações de melhorias é necessária a implantação de sistemas HVDC multi-terminal onde as topologias multi-terminais são um dos recursos para garantir mais flexibilidade e autonomia do transporte de energia em DC sem precisar levar essa energia até o lado *onshore*. O sistema multi-terminal possibilita mais de um caminho para o transporte de energia em DC, proveniente de Fazendas Eólicas *Offshore*.

Dessa forma, tem-se como resultados que o sistema HVDC multi-terminal poderia ser melhorado a partir da utilização do conversor por fonte de tensão (VSC). Sendo assim, verificou-se que uma das vantagens do VSC – HVDC é que ele é naturalmente adequado para a construção em sistemas multi-terminais. Além disso,

RC: 119644

Disponível em: <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-eletrica/high-voltage-direct-current>



o investimento em um sistema HVDC ao longo do tempo se torna mais barato do que o convencional.

Neste sentido, recomenda-se um estudo mais profundo acerca desta adoção e acerca de que fatores motivaram estas nações, além da brasileira, a utilizarem a tecnologia HVDC para transportar a energia.

REFERÊNCIAS

- ABB. Asea Brown Boveri. **ABB and Vattenfall recognized for pioneering HVDC technology.** Zurique, Suíça, 2017. Disponível em: <http://new.abb.com/news/detail/1564/abb-and-vattenfall-recognized-for-pioneering-hvdc-technology>. Acesso em: 06 mai. 2021.
- ALEXANDER, K. C. **Fundamentos de Circuitos Elétricos**. 5. ed. AMGH, 2013.
- EKANAYAKE, J et al. **Operation and Control of Multiterminal HVDC Transmission for Offshore Wind Farms.** Power Delivery. IEEE TRANSACTIONS ON. ed. 26, pp. 2596-2604, 2011. Disponível em: <https://www.irec.cat/research/publications/operation-and-control-of-multiterminal-hvdc-transmission-for-offshore-wind-farms/>. Acesso em: 04 mar. 2021.
- FERREIRA, M. J. R. **Estudo do Conversor Comutado a Capacitor de Doze Pulses Aplicado a um Sistema HVDC.** Universidade Federal de Itajubá – MG, Brasil, 2017. Disponível em: <https://repositorio.unifei.edu.br/jspui/handle/123456789/886>. Acesso em: 02 de mar.de 2021.
- MARCHIORO, A. **A Eficiência Energética na Transmissão em Alta Tensão em Corrente Contínua.** Dissertação de Especialização. Programa de Pós-Graduação em Eficiência Energética Aplicada aos Processos Produtivos. Universidade Federal

RC: 119644

Disponível em: <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-eletrica/high-voltage-direct-current>



de Santa Maria - RS. Brasil, 2014. Disponível em:
<https://repositorio.ufsm.br/handle/1/1396>. Acesso em: 26 abr. 2021.

MOHAN, N. **Sistemas Elétricos de Potência:** Curso Introdutório. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

PINTO, M. O. **Energia Elétrica: Geração, Transmissão e Sistemas Interligados.** 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

PINTO, M. O. **Fundamentos de Energia Eólica.** 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

SATO, A. K. **Transmissão de Potência em Corrente Contínua e Corrente Alternada: Estudo Comparativo.** Trabalho de Conclusão de Curso Universidade Estadual Paulista. Guaratinguetá, 2013. Disponível em:
<https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/121076/000734882.pdf?sequenc e=1>. Acesso em: 03 mar. 2021.

SILVA, B. et al. **Provision of Inertial and Primary Frequency Control Services Using Offshore Multiterminal HVDC Networks.** Sustainable Energy. IEEE TRANSACTIONS ON. vol. 3, pp. 800-808, 2012. Disponível em:
<https://ieeexplore.ieee.org/document/6213587>. Acesso em: 23 mar. 2021.

SOOD, K. V. **HVDC and Facts Controllers.** Boston, 2004. Disponível em:
<http://fa.ee.sut.ac.ir/Downloads/AcademicStaff/30/Courses/57/V.%20K.%20Sood,%20HVDC%20and%20FACTS%20Controllers,%20Springer,%202004..pdf>. Acesso em: 30 abr. 2021.

Enviado: Dezembro, 2021.

Aprovado: Junho, 2022.

RC: 119644

Disponível em: <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-eletrica/high-voltage-direct-current>