

Linhas de transmissão de corrente contínua

Ryan Hamerly

22 de outubro de 2010

Submetido como curso para [Física 240](#), Universidade de Stanford, Outono de 2010

Em 2008, os habitantes do mundo consumiram energia a uma taxa média de 15 terawatts (ou seja, $1,5 \times 10^{13}$ W) no total. Em um determinado dia, consumimos a energia equivalente a 40 milhões de toneladas de carvão, ou equivalentemente, 30.000 bombas atômicas de dez quilotoneladas. E como a maioria dos consumidores não quer viver ao lado de uma usina ou de uma plataforma de petróleo, transmitir essa energia ao usuário final é um desafio especialmente importante.

Ao longo da maior parte da história, a energia foi colhida localmente, principalmente sob a forma de madeira. A transição da madeira para o poder do carvão foi uma das principais causas da Revolução Industrial e, de fato, alguns estudiosos afirmaram que a abundância de madeira e carvão nos Estados Unidos e na Grã-Bretanha desempenhou um papel dominante no crescimento das economias dessas nações. este período. No entanto, carvão, petróleo, gás e madeira não são fontes de energia muito convenientes. A fim de convertê-los em trabalho mecânico, é necessário um motor de combustão, que além de fazer muito barulho e produzir odores desagradáveis, representa um perigo muito real para a segurança em casa ou no local de trabalho. Para convertê-los em luz, é necessário uma lâmpada de óleo, que é uma fonte de luz muito ineficiente e um perigo de fogo notório. De fato,

A eletricidade preenche bem esse nicho. A invenção do motor de corrente alternada e da lâmpada incandescente permitiu que a energia elétrica fosse aproveitada para fornecer iluminação e trabalho mecânico a milhares de usuários finais, sem os riscos e ineficiências associados à queima de combustíveis. [1,2] A geração de eletricidade poderia ser centralizada para usinas de energia, onde as economias de escala permitem que ela seja gerada de forma muito mais eficiente do que no domicílio individual ou no local de trabalho, e transmitida aos usuários finais por meio de cabos elétricos.



Fig. 1: A demanda por iluminação elétrica foi um fator importante na expansão da cobertura elétrica no início do século XX. (Fonte: [Wikimedia Commons](#))

Transmissão AC

Existem duas abordagens diferentes para a transmissão elétrica: corrente contínua (DC, proposta por Edison) e corrente alternada (AC, proposta por Tesla). A Corrente Direta funciona aplicando uma voltagem elétrica constante, da qual a maioria dos dispositivos atrai uma corrente elétrica constante. As baterias são uma fonte comum de corrente contínua, e os eletrônicos mais modernos exigem corrente contínua para operar. Em um esquema de corrente alternada, a tensão oscila em função do tempo - geralmente a uma taxa de 50 ou 60 Hz.

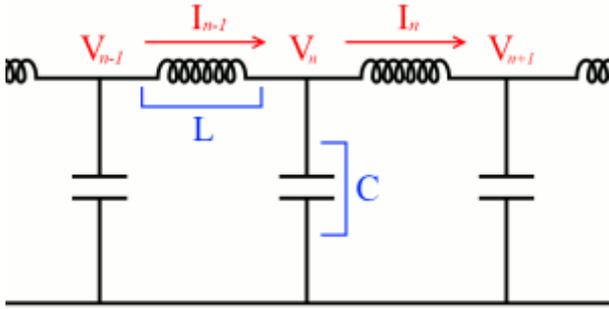


Fig. 2: Esquema de uma linha de transmissão elétrica, dividida em segmentos discretos. No limite contínuo, L e C são substituídos pela condutância e capacitância por unidade de comprimento.

transmitida via corrente alternada.

Um cabo elétrico pode ser modelado como uma linha de transmissão, ou equivalentemente, como uma cadeia infinita de capacitores e indutores, como mostrado na figura, onde C e L se referem à capacitância e à indutância por unidade de comprimento. As Equações de Kirchoff dão:

$$V_n - L\dot{I}_n - V_{n+1} = 0 \quad \dot{V}_n + I_n - I_{n-1} = 0$$

Tomando o limite do contínuo, encontramos soluções de onda de corrente alternada da forma

$$V = V_0 e^{i(\pm kx - \omega t)} \quad I = V/Z_0 \quad \omega = c|k|$$

Onde

$$c = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

Ambos os tipos de eletricidade são igualmente capazes de alimentar lâmpadas, motores elétricos e a maioria dos aparelhos. O que torna a corrente alternada superior do ponto de vista de transmissão de energia é o fato de que, devido ao princípio da indução magnética, é muito fácil e barato aumentar ou diminuir a tensão por meio de um transformador de núcleo de ferro. Como a energia dissipada em uma linha de transmissão é dimensionada como o quadrado da corrente, e como o aumento da tensão usando um transformador diminui a corrente, é possível reduzir drasticamente as perdas usando a transmissão de energia de alta tensão. O princípio da indução magnética só funciona para correntes alternadas, e esta é a razão pela qual, durante o século passado, quase toda a eletricidade comercial foi produzida e

são a velocidade de propagação de onda e a impedância característica. (A tensão e a corrente são ambas grandezas reais. Como o sistema é linear, a parte real de uma solução complexa é uma solução em si). A potência transmitida através da linha em qualquer ponto é

$$P = V_0 I_0 = V_0^2 / Z_0$$

A tensão é limitada pela força de ruptura do meio dielétrico (ar cerca de 3 MV / m). Isso limita fundamentalmente o poder que pode ser transportado em qualquer fio. O resultado é independente da frequência de oscilação, a partir da qual podemos inferir que o mesmo limite deve restringir os cabos CC, bem como os cabos CA.

Há outra limitação um pouco mais sutil para a potência e a eficiência da transmissão de CA - o *efeito da pele*. Este efeito, exclusivo dos sistemas AC, evita que a corrente flua no interior dos cabos condutores. O efeito é mais pronunciado quanto maior a frequência, então os cabos CC não sofrem desta limitação. Em geral, o efeito de pele limita o diâmetro prático dos cabos a 3 centímetros. Cabos mais finos transmitem eletricidade com menos eficiência do que cabos grossos e, como resultado, o efeito de pele tem um impacto negativo na eficiência da linha de energia.

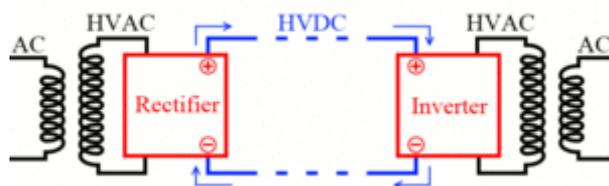


Fig. 3: Principais componentes de um sistema de transmissão elétrica de corrente contínua. Os sistemas realistas também podem incluir um fio terra conectando o retificador e o inversor, o que permite que o dispositivo funcione com metade da energia se um dos cabos estiver danificado.

Visão Geral da Transmissão DC

A Corrente Direta oferece uma alternativa à transmissão CA convencional que cura muitos dos defeitos da CA. Não deve ser pensado como um *substituto* para a transmissão AC, que na maioria dos contextos funciona bem, mas sim como uma *alternativa* para aplicações particulares em que as linhas CA são impraticáveis ou dispendiosas. Tais aplicativos incluem:

1. Conexões entre redes elétricas não sincronizadas,
2. Ligações subterrâneas ou submarinas de mais de 50 km de comprimento,

Ligações acima do solo com mais de 800 km de comprimento

Conexões sobre regiões onde os custos da terra são um fator dominante. [3,4]

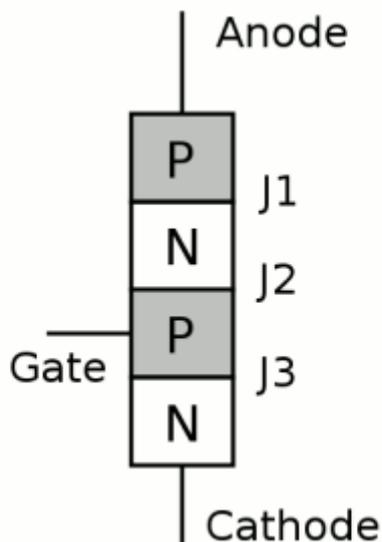


Fig. 4: Diagrama de um tiristor. (Fonte: [Wikimedia Commons](#))

Um sistema de transmissão de corrente contínua consiste tipicamente em três partes. A energia elétrica entra no sistema na forma de corrente alternada - gerada, por exemplo, em uma estação de energia local, é convertida em CA de alta tensão usando transformadores CA padrão e convertida em energia CC por meio de um circuito conhecido como um *retificador*. A energia elétrica é então transferida pelos *cabos de energia CC* e convertida de volta em corrente alternada por meio de um *inversor*. Vale a pena notar que, enquanto a corrente que flui através dos fios é CC, tanto a entrada como a saída do sistema são CA, e assim os cabos CC podem ser perfeitamente integrados em redes elétricas de corrente alternada preexistentes. [3]

Sistemas de corrente contínua são vantajosos por várias razões. Primeiro, eles podem transmitir um pouco mais

de energia por cabo em comparação com os sistemas CA de voltagem equivalente. Em segundo lugar, o controle dos circuitos do retificador e do inversor facilita a sincronização da entrada e saída da transmissão nas respectivas redes de energia. Além disso, os circuitos CC geralmente podem funcionar com capacidade parcial mesmo quando uma das linhas está inativa. No entanto, em muitas circunstâncias, essas vantagens devem ser ponderadas em relação ao aumento dos custos do equipamento de conversão CA-CC.

A primeira linha moderna de transmissão de energia de CC era um cabo submarino que conectava Gotland Island à Suécia em 1954. A corrente contínua foi gerada usando válvulas de arco de mercúrio, uma tecnologia que foi amplamente substituída por tiristores de estado sólido. [5]

Conversão AC-DC

O principal obstáculo técnico da transmissão CC é a conversão da corrente alternada em corrente contínua e vice-versa, de modo que a linha de transmissão possa interagir com as redes elétricas existentes. Atualmente, isso é tratado com circuitos chamados *retificadores* e *inversores*, que usam um diodo disparado de alta voltagem chamado *tiristor*.

Um tiristor é composto por quatro camadas alternadas de semicondutor do tipo N e P. Funciona como um diodo com um gatilho; antes que o dispositivo seja acionado, ele não conduzirá, mas depois conduzirá eletricidade enquanto o tiristor permanecer com polaridade direta. Uma vez que a polarização direta é removida, o dispositivo parará de conduzir e só poderá ser retomado posteriormente.

O conversor CA-CC mais simples consistiria em um único tiristor, um indutor e uma fonte de corrente alternada. O tiristor é acionado no meio do ciclo e conduz a corrente por uma fração de um período. Sendo um diodo, no entanto, ele para de conduzir quando a voltagem aponta para o outro lado, e aguarda o restante do período antes de ser acionado novamente. Desta forma, o tiristor age da mesma maneira que um diodo típico. A tensão resultante, longe de ser uma fonte DC ideal, é uma série periódica de pulsos positivos. No entanto, ao contrário do caso AC, todos os pulsos têm a mesma polaridade. Combinando corretamente pulsos de diferentes fontes AC, podemos suavizar o sinal irregular e criar uma saída CC muito mais adequada.

Isso pode ser feito com três fontes CA sincronizadas, oscilando 120 graus desfasadas uma da outra. Em vez de um único tiristor, um emprega seis unidades, cada conjunto para acionar uma vez por ciclo. Pegue o pólo positivo no conversor mostrado na Fig. 5. No tempo t_1 , o primeiro tiristor dispara e a corrente flui através da primeira linha CA. Um terço de um período depois, no tempo t_2 , o segundo tiristor dispara, e como neste ponto o potencial na segunda linha excede o da primeira linha, o primeiro tiristor é negativo e desliga. Um terço de um período depois, o terceiro tiristor dispara, a terceira linha fornece o terço final da energia DC para o ciclo e o ciclo se repete. Um padrão de repetição semelhante pode ser traçado para o pólo negativo. As tensões nesses pólos ainda não são uniformes, mas, no entanto, esse circuito, chamado de *ponte de conversão de 6 pulsos*, fornece uma fonte de energia CC muito mais consistente do que o modelo de um tiristor descrito acima. [3]

Os sistemas de transmissão DC comerciais fazem ainda melhor do que isso usando uma ponte de conversão de 12 pulsos que suaviza ainda mais o sinal; e para eliminar qualquer oscilação na linha, os retificadores colocam filtros passa-faixa nas extremidades CA e CC do circuito. Aplicando um

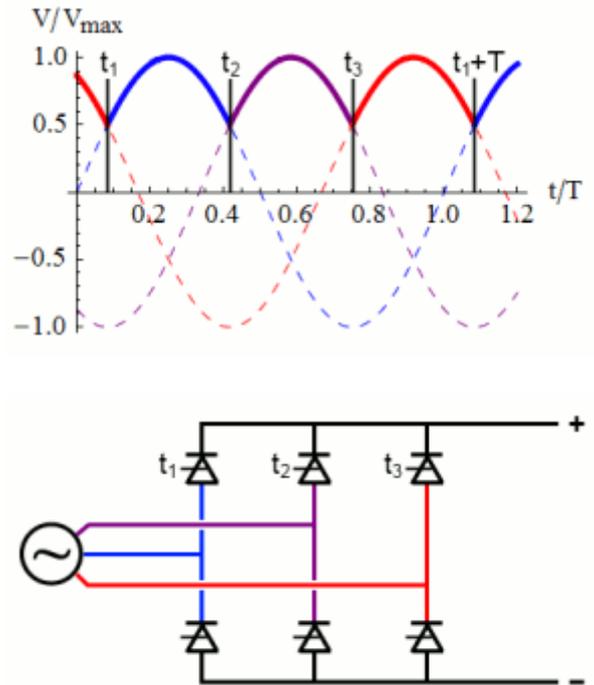


Fig. 5: Parte superior: Três fontes de tensão CA. Acionando os tiristores nos tempos t_1 , t_2 e t_3 , o retificador produz uma saída que corresponde à voltagem máxima das três fontes. Inferior: Esquema simplificado de uma ponte conversora de 6 pulsos. O dispositivo converte uma fonte CA de 3 polos em uma saída CC. Cores correspondem às tensões plotadas no painel superior.

esquema similar, pode-se usar tiristores para converter a energia CC de volta para AC - isto é, para executar a função do *inversor*. [3]

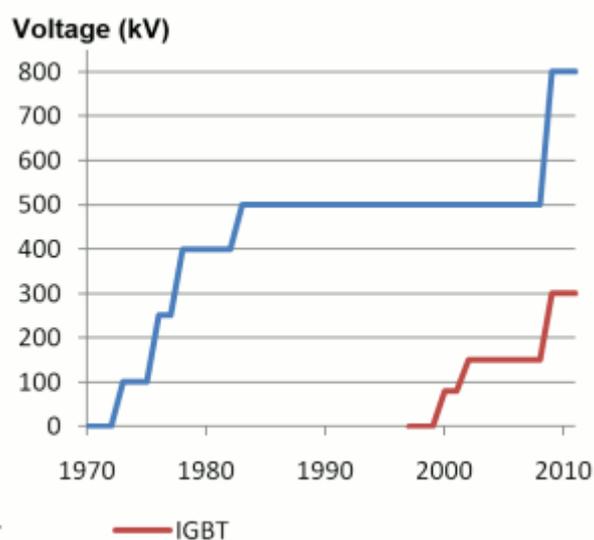
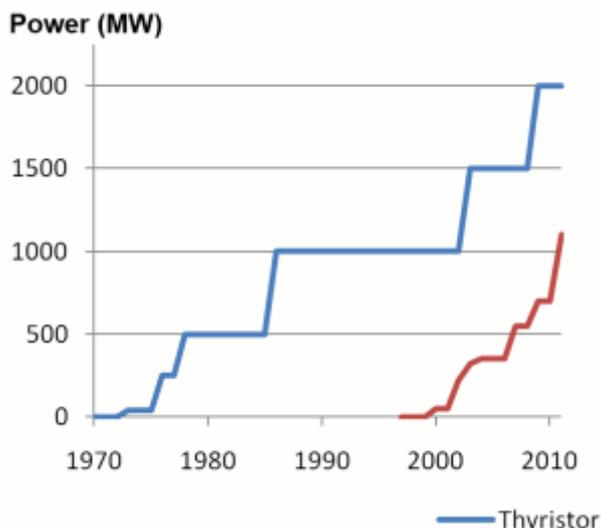


Fig. 6: Desenvolvimento de Tiristores e Tecnologia IGBT. [8]

As primeiras linhas de transmissão de CC dependiam de válvulas de arco de mercúrio, mas na década de 1970, os tiristores haviam assumido o mercado. [3] Nos últimos 20 anos, as empresas de energia têm impulsionado o estado da arte na tecnologia de tiristores, mais do que duplicando o consumo de energia do dispositivo e aumentando sua voltagem em 50%. Avanços adicionais, como os conversores de tensão de fonte (VSC) e os transistores bipolares de portal isolado (IGBT), podem em breve tornar econômicos os esquemas de transmissão de CC de menor escala. Com esses avanços na tecnologia subjacente, o futuro da transmissão de energia CC é promissor.

Economia

O custo de um esquema de transmissão de alta voltagem depende de quatro fatores principais: o custo dos transformadores, o custo dos cabos e torres, o custo do terreno sobre o qual as linhas se encontram e o custo das perdas devido ao aquecimento ôhmico em as linhas de energia. [6] Quanto à primeira contagem, o AC ganha as mãos para baixo. Ao contrário dos transformadores de potência baratos, os retificadores AC-to-DC são extremamente caros. [7] No entanto, o preço dos transformadores não depende do comprimento do fio, portanto, se as linhas CC se mostrarem mais baratas ou mais eficientes do que as linhas CA, haverá algum ponto de equilíbrio além do qual a DC se torna melhor opção.

A maior eficiência da DC para projetos particularmente grandes decorre do fato de que a tensão em um fio DC é constante. Essa constante, V_{max} , está relacionada a várias questões de engenharia, bem como à geometria da configuração da linha de energia e à força elétrica de decomposição do ar. Restrições semelhantes definem o tamanho dos fios CA e, como resultado, uma torre de CA de 500 kV de 3 cabos é cerca de 1,5 vezes maior que uma torre de 500 kV de 2 cabos. [4] Isso gera aproximadamente 30% de economia nos custos de linha. Mas para linhas muito longas, a *estabilidade do sistema* limitações colocam AC em uma desvantagem adicional; Além disso, as estações de comutação intermediárias são geralmente necessárias para linhas de CA de longa distância, aumentando ainda mais os custos. A partir desses fatos, chegamos à conclusão geral de que uma linha CC pode carregar pelo menos o dobro de energia de uma linha CA com a mesma voltagem. [8]

Como mostra a Fig. 7, isso significa que uma linha de energia CC será significativamente menor que seu equivalente CA, aproximadamente por um fator de dois. Como AC e DC usam aproximadamente os mesmos tipos de cabos, isso se traduz em custos de linha reduzidos e custos de torre reduzidos. [6] Além disso, a distância ao solo exigida é reduzida consideravelmente. Em regiões onde a terra é cara e os regulamentos são rigorosos, a obtenção de uma faixa de terra contígua pode ser um desafio tanto quanto colocar as linhas em si - e a DC é 40-50 % mais barata a esse respeito. A DC foi escolhida no projeto Rihand-Delhi (Índia) e no projeto Queensland (Austrália), em parte as torres eram mais compactas. [5]

Além disso, a DC se beneficia de perdas de linha diminuídas devido ao aquecimento ôhmico. Sem dúvida, isso se deve, pelo menos em parte, ao fato de as linhas CC não experimentarem nenhum efeito de pele, permitindo que os cabos fiquem mais grossos para diminuir a resistência da linha. De fato, as linhas CC de alta tensão geralmente têm uma taxa de perda de cerca de 3%, em comparação com a taxa de 6% para as linhas CA. No entanto, com exceção das linhas mais longas, onde as taxas de perda crescem significativamente maiores do que esse valor, os custos devido a ineficiências são apenas um fator menor na economia das linhas de energia. [8]

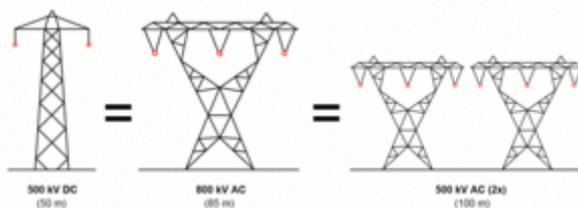


Fig. 7: Três configurações de alta tensão com capacidade de 2 GW. A folga necessária para a linha CC é um pouco menor do que a exigida para os equivalentes CA. [4]

A confiabilidade desempenhará um papel adicional no debate. É possível (embora não desejável) que um sistema DC funcione com metade da energia se um dos cabos ou transformadores falhar. Isso é conseguido com a execução de um fio de aterramento (que não precisa ser isolado) ao longo dos fios de transporte de energia e usando o terra para transmitir energia da linha de transporte de energia sobrevivente para formar um circuito fechado a metade da tensão original. Alternativamente, pode-se renunciar a esse fio extra e simplesmente conduzir o circuito através do solo em caso de falha. No entanto, essas vantagens precisam ser balanceadas contra o fato de que os transformadores tiristores geralmente são menos confiáveis do que os transformadores CA tradicionais, o que pode tornar os sistemas DC menos confiáveis.

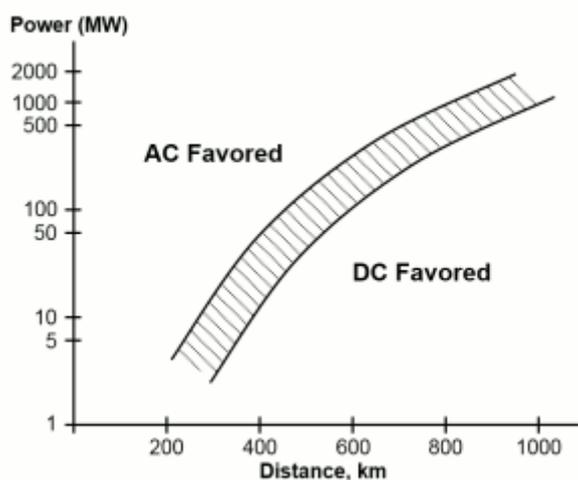


Fig. 8: Distância de equilíbrio em função da tensão. [4,5]

quilômetro para as linhas CC é significativamente menor. Portanto, existe um comprimento de linha de ponto de equilíbrio além do qual o DC se torna a opção mais barata. Para cabos acima do solo, o comprimento do ponto de equilíbrio é da ordem de 800 quilômetros. Para cabos submarinos, é muito mais curto - normalmente cerca de 50 km, porque a corrente alternada se dissipa rapidamente embaixo d'água. [9]

Aplicações

Como o HVDC quebra mesmo para linhas particularmente longas, ele encontrou um nicho conectando redes de energia maiores a usinas isoladas. Muitas fontes de energia, particularmente as renováveis, concentram-se em regiões onde há pouca ou nenhuma população. Transportar essa energia para os centros populacionais requer linhas longas de alta tensão, muitas vezes superiores a 1000 km. Parques eólicos offshore fornecem um exemplo, e de fato a primeira instalação desse tipo construída no Reino Unido foi ligada à ilha por meio de um cabo CC de alta tensão de 26 km. [9] Em uma escala muito maior, mais de um terço dos 22 GW produzidos pela Barragem das Três Gargantas na China é transportado para o leste e o sul da China por meio de cabos de 500 kV DC. [10]

Pelas mesmas razões, DC de alta tensão pode fornecer energia barata para consumidores de energia isolados em todo o mundo. Por exemplo, as ilhas do sudeste do Alasca, as áreas remotas no norte do Canadá e as comunidades de mineração no oeste da Austrália dependem atualmente de geradores locais movidos a óleo para sua eletricidade. Linhas CC de alta tensão, particularmente aquelas desenvolvidas com a nova tecnologia VSC, podem tornar econômico conectar esses centros de carga isolados à rede principal. [3]

Tanto a Europa quanto a América do Norte são abrangidas por uma série de diferentes redes de energia. Estas redes não operam todas em fase e, na Europa em particular, não operam frequentemente na mesma frequência. Os chamados conectores CC "back-to-back" - conectores que incluem um retificador e inversor de tensão modesta, mas cuja linha de transmissão é tão curta quanto insignificante - podem ser construídos para conectar essas redes, permitindo que as empresas de energia forneçam necessitavam de eletricidade para regiões com demanda especialmente alta, para arbitrar flutuações de preços de eletricidade e evitar blecautes. Tais estratégias de negócios não seriam possíveis com conexões AC tradicionais, já que conectar duas redes de energia fora de fase pode facilmente resultar em sobrecarga e blecautes. Um conector DC back-to-back, por outro lado,



Fig. 9: Esquimós nas ilhas do Alasca podem um dia depender da eletricidade DC para aquecer seus iglus. (Fonte: [Wikimedia Commons](#))

Conclusão

Enquanto a corrente alternada dominou as linhas de força durante um século, os tiristores de estado sólido tornaram a corrente contínua uma alternativa viável em certas circunstâncias. Embora seja improvável substituir a corrente alternada como a forma dominante de energia elétrica, ela se tornou mais econômica que a CA para linhas aéreas que excedem 800 km e linhas submarinas ou subterrâneas que excedem 50 km - tornando a DC a escolha ideal para conexões e conexões especialmente longas usinas isoladas e consumidores. Além disso, conexões CC back-to-back permitem que redes elétricas assíncronas sejam conectadas, proporcionando maior estabilidade de preços e proteção contra blecautes.

© Ryan Hamerly. O autor concede permissão para copiar, distribuir e exibir este trabalho de forma inalterada, com atribuição ao autor, apenas para fins não comerciais. Todos os outros direitos, incluindo direitos comerciais, são reservados ao autor.

Referências

- [1] N. Tesla, "Electric Motor", Patente No. 416194 (1889).
- [2] T. Edison, *Melhoria em Luzes Elétricas*, Patente No. 214636 (1879).
- [3] J. Cochrane e R. Hauth, "HVDC Power Transmission", na *Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering* (Wiley, 2001).
- [4] P. Hartley, "[Transmissão HVDC: Parte da Solução de Energia?](#)", James A. Baker III Instituto de Políticas Públicas, Rice University, maio de 2003.
- [5] R. Rudervall, JP Charpentier e R. Sharma, "[Sistemas de Transmissão de Corrente Contínua de Alta Tensão \(HVDC\)](#)", Energy Week 2000, Washington, DC, 7-8 de março de 2000.
- [6] MP Bahrman e BK Johnson, "O ABC das Tecnologias de Transmissão HVDC", *Revista IEEE Power and Energy* **5**, No. 2 (2007).
- [7] M. Rabinowitz, "Sistemas de Energia do Futuro. 4", *Power Eng. Rev.* **20**, No. 8, 4 (2000).
- [8] MP Bahrman, "Visão Geral da Transmissão HVDC", em [Proc. IEEE Power Systems Conferência e Exposição 2006](#) (IEEE, 2006), p. 18
- [9] P. Bresesti *et al.*, "Conexão HVDC de WindFarms Offshore ao Sistema de Transmissão", *IEEE Trans. em Conversão de Energia* **22**, 37 (2007).
- [10] H. Guo, "[Pesquisa de Três Gargantas Power Grid \(TGPG\)](#)", Proc. 2000 IEEE Power Eng. Soc. Encontro de Inverno **1**, 3 (2000).