





# 60 anos de HVDC

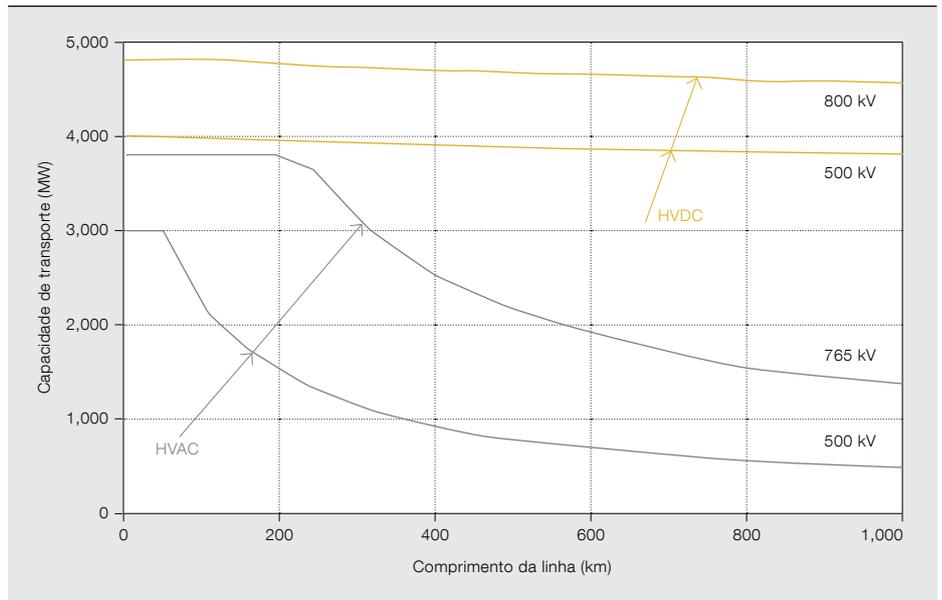
O percurso da ABB de pioneiro até líder de mercado

ANDREAS MOGLESTUE – Um olhar retrospectivo sobre a disputa entre a Corrente Contínua de Edison e a Corrente Alternada de Tesla, na chamada “Guerra das Correntes” da década de 1880, poderia levar-nos a assumir sumariamente que a questão tinha ficado resolvida de uma vez por todas, e a favor da corrente alternada. Mas no decurso dos últimos 60 anos a corrente contínua – a níveis de tensão muito mais elevados do que Edison alguma vez imaginaria – tem estado a regressar em força. A Corrente Contínua em Alta Tensão (HVDC, High Voltage Direct Current) é agora uma parte indispensável das redes de transporte de energia eléctrica por todo o mundo e encontra-se em expansão para outros mercados. A história da ABB está intimamente ligada com a história do transporte em HVDC. As empresas predecessoras da ABB foram pioneiras desta tecnologia e a ABB é hoje não só um firme líder de mercado, mas também a única empresa com capacidade de fornecimento da gama completa de componentes HVDC, incluindo quer serviços globais de engenharia, quer equipamentos tais como transformadores, estações conversoras, semicondutores, cabos e sistemas de controlo.

---

#### Foto de rosto

Os primeiros tiristores para HVDC a nível mundial (em primeiro plano), ligados em série com o conversor original (em segundo plano) na estação conversora de Gotland (c. 1970)



O transporte de energia eléctrica a longas distâncias requer elevados níveis de tensão. Dado as perdas resistivas serem proporcionais ao quadrado da corrente e a potência ser proporcional ao produto entre a tensão e a corrente, uma duplicação da tensão diminui para metade a corrente necessária para uma dada potência transportada, reduzindo-se assim as perdas resistivas para um quarto. A forma mais simples de conseguir níveis elevados de tensão é por meio de transformadores. Mas, infelizmente para a facção da corrente contínua (CC) durante a Guerra das Correntes, o princípio da transformação só se aplica à corrente alternada (CA). O principal proponente da CC, Thomas Edison, não era contudo uma pessoa de desistência fácil. Em vez de assumir a derrota perante este simples facto da Física, recorreu a um contra-ataque com duas frentes. Por um lado, chamou a atenção para os riscos para a segurança provindos das tensões mais elevadas, recorrendo por vezes a métodos horríficos para estimular a desconfiança do público (chegou a electrocutar um elefante, e também esteve envolvido na criação da primeira cadeira eléctrica). Como alternativa à transmissão em alta tensão, Edison promoveu a ideia da geração local de energia. Na altura isto implicava praticamente a construção de uma central eléctrica em

cada bairro, dado a distância limite para o transporte de 110 V CC ser de cerca de 1,6 km. Embora tais centrais fossem dar origem a um problema grave de poluição urbana, em particular dada a tecnologia de geração eléctrica da altura, e apesar também de a própria sugestão nos parecer hoje risível quando vista através da perspectiva da História, a ideia de Edison recolhe presentemente alguma vindicação através do conceito de microgeração – segundo o qual os clientes de uma rede eléctrica podem nela injectar energia (p.ex., solar) que eles próprios geram.

## Já durante a vida de Edison a corrente contínua se encontrava em expansão em muitos sectores.

A segunda frente do contra-ataque de Edison consistiu numa tentativa de desenvolvimento de um sistema próprio de transporte de energia eléctrica a tensões mais elevadas (aparentemente em contradição com o seu activismo anti-alta-tensão). Em 1889, Edison construiu uma linha entre Williamette Falls e Portland, no Oregon, com uma extensão de 22 km e transportando cerca de 130 kW a 4 kV CC. Esta tensão era obtida através da ligação em série de geradores CC, um princípio primeiramente demonstrado numa exposição em Munique, na Ale-

manha, em 1882. Sintomaticamente com o definhamento da corrente contínua, a linha do Oregon teve uma vida curta: foi fortemente danificada por uma inundação em 1890 e posteriormente reconstruída como uma instalação CA pelo concorrente de Edison, a Westinghouse.

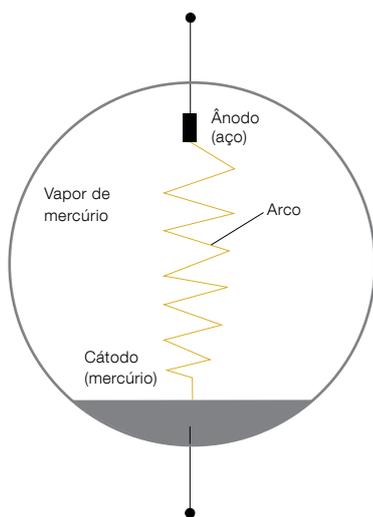
Mas a história do transporte em CC não terminou com aquela inundação. Ainda mesmo em 2006 existiam cerca de 60 clientes ligados ao fornecimento em CC de Edison na cidade de Nova Iorque, o qual seria finalmente desactivado no ano seguinte. Mais é significativo que, já durante

a vida do inventor, a utilização de CC estivesse em expansão em sectores tais como o transporte ferroviário, a fundição de alumínio e as telecomunicações, sectores nos quais

ainda mantém presentemente grande relevância. Novas aplicações entretanto adicionadas incluem o processamento de dados e a energia fotovoltaica. Contudo, em termos de transporte e distribuição, a superioridade da corrente alternada parecia inabalável. Mas seria mesmo assim?

### Inconvenientes da Corrente Alternada

Apesar da rápida adopção de CA trifásica para o transporte e distribuição, as linhas de CA de grande comprimento sofrem de vários inconvenientes. Um dos mais importantes provém do fenómeno da energia



reactiva. A energia reactiva consiste no fluxo de energia que continuamente carrega e descarrega os campos eléctrico e magnético da linha, em sincronismo com as oscilações periódicas da tensão e da corrente, respectivamente. Embora não representando directamente um desperdício, dado a energia ser transferida periodicamente entre os campos eléctrico e magnético, a corrente e tensão adicionais na linha reduzem a sua capacidade económica útil. Quando o comprimento da linha aumenta, aumentam também a sua capacidade e indutância, e portanto a potência reactiva, até se atingir um ponto no qual o transporte comercial de energia deixa de ser viável. É irónico que as leis da Física que permitem o fenómeno da transformação de tensão e corrente, assim possibilitando o transporte de CA em alta tensão, sejam as mesmas que limitam a sua distância de utilização -1.

Existem soluções para o desafio da potência reactiva – por exemplo, os dispositivos

**Notas**

- 1 Um motor-gerador é um par formado por um motor e um gerador partilhando o mesmo veio. Um agregado de motores-geradores pode ser utilizado para aumentar a tensão CC através da ligação dos motores em paralelo e dos geradores em série.
- 2 As válvulas de vapor de mercúrio e o papel da ABB no seu desenvolvimento são discutidos em maior detalhe em “From mercury arc to hybrid breaker”, ABB Review 2/2013, pp. 70–78.
- 3 Contudo, a Brown Boveri & Cie. demonstrou temporariamente em 1939 o transporte em CC de 500 kW ao longo dos 25 km entre Wettingen e Zurique, na Suíça.

FACTS (Flexible Alternating Current Transmission Systems), que efectuam a compensação da potência reactiva. Contudo, o transporte em CC elimina completamente o problema, visto os campos eléctrico e magnético na linha serem constantes e assim só ser necessário estabelecê-los no arranque do sistema.

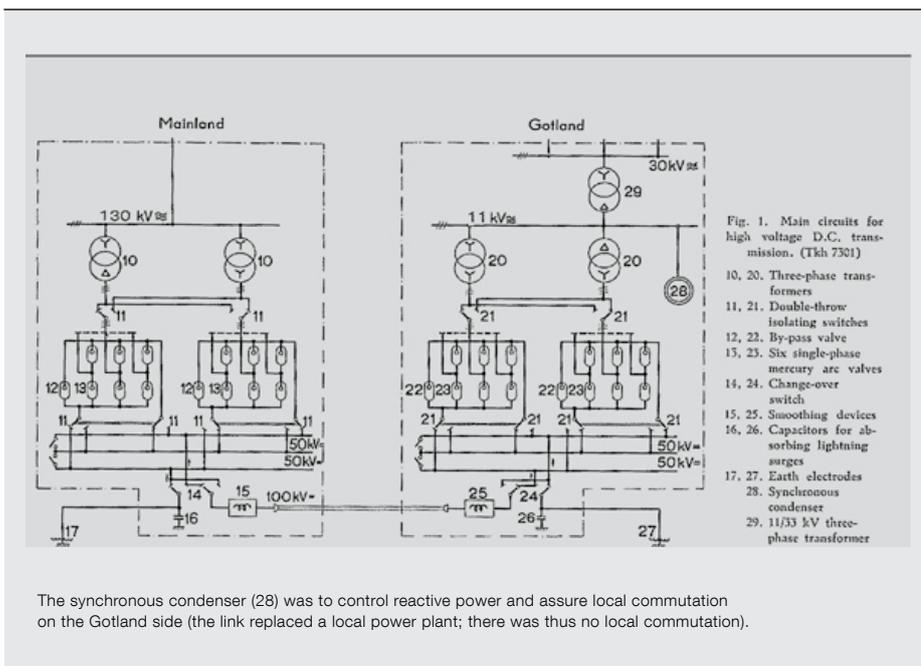
**Válvulas de vapor de mercúrio**

As tentativas iniciais de transporte em corrente contínua a tensões mais elevadas suportavam-se na ligação em série de geradores ou em grupos motor-gerador.<sup>1</sup> Estes sistemas eram assim limitados por restrições mecânicas e não conseguiam competir economicamente com a corrente alternada.

O interesse na conversão CC ressurgiu com o aparecimento em cena de uma nova tecnologia: a válvula de vapor de mercúrio.<sup>2</sup> Esta válvula é formada por uma ampola hermética contendo vapor de mercúrio, vários ânodos metálicos (frequentemente de aço) e um cátodo de mercúrio -2. Após o estabelecimento de um arco eléctrico entre ânodo e cátodo, a corrente que flui através do arco gera calor e ioniza o vapor de mercúrio. Na interface entre o arco e o mercúrio, o bombardeamento por iões leva à libertação de electrões. O ânodo de aço consegue absorver os electrões, mas às temperaturas de operação não os liberta em quantidades significativas. A corrente pode assim fluir do aço para o mercúrio mas não no sentido inverso. A válvula de vapor de mercúrio exibe funcionalidade diódica, tornando-se

Quando o comprimento da linha aumenta, aumentam também a sua capacidade e indutância, e portanto a potência reactiva, até se atingir um ponto no qual o transporte comercial de energia deixa de ser viável.

4 Diagrama da ligação Gotland, mostrando a ligação série de conversores em ambas as estações



ASEA Journal, 1954, p. 142

## A linha de Gotland originou vários novos desafios para a ASEA, um dos principais dos quais a travessia marítima.

assim apropriada para a conversão de AC para CC (rectificação).

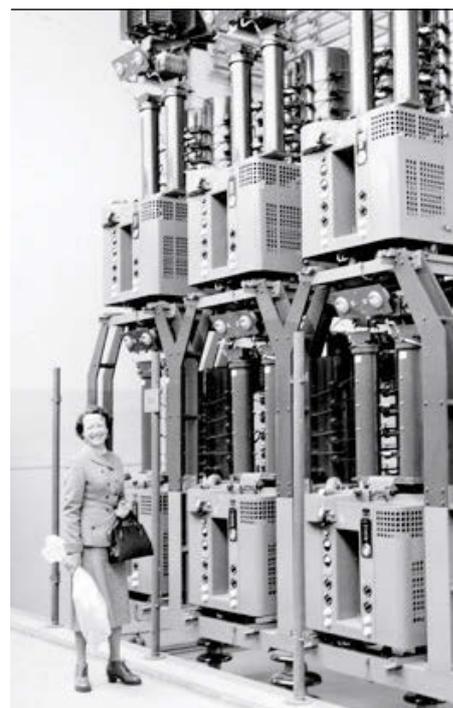
Mas as válvulas de vapor de mercúrio podem também realizar a conversão inversa, de CC para CA. O estabelecimento artificial do arco, p.ex., utilizando um inductor para aplicar um pico de tensão a um eléctrodo auxiliar, permite o início da condução num ponto arbitrário do ciclo.

As válvulas de vapor de mercúrio, pela sua capacidade de realização de ambas as conversões, permitiram a utilização de transformadores, combinando assim as vantagens de transformação da CA com as vantagens de transporte da CC.

A válvula de vapor de mercúrio foi demonstrada pela primeira vez em 1902 pelo inventor americano Peter Cooper Hewitt. A Brown Boveri & Cie., uma das empresas predecessoras da ABB, foi líder no seu desenvolvimento e iniciou a sua comercialização em 1913. As primeiras instalações não tinham contudo como objectivo o transporte de energia em CC, sendo antes utilizadas para rectificação de tensões mais baixas (até cerca de 2,5 kV) para utilizações industriais e em transportes.

Um dos problemas encontrados com o aumento dos níveis de tensão foi o arco de retorno. Um arco de retorno ocorre quan-

5 As três válvulas de um conversor do sistema Gotland (na foto, a esposa de Lamm)

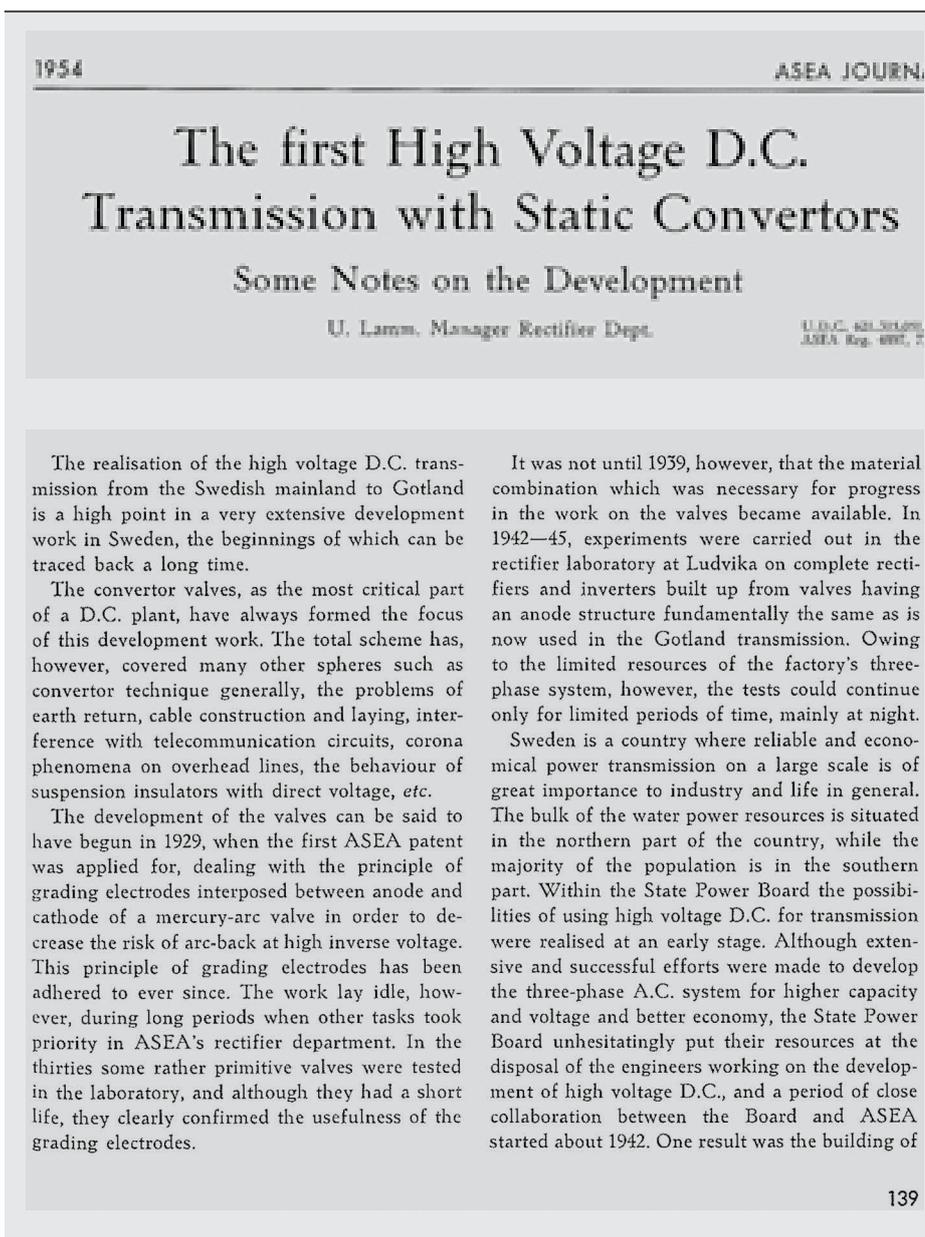


do uma tensão inversa numa válvula não ionizada origina um arco não desejado (no sentido do cátodo para o ânodo), causando não só uma anomalia na operação do circuito mas também possíveis danos permanentes na válvula. Foi a Allmänna Svenska Elektriska Aktiebolaget (ASEA), a outra predecessora da ABB, que iria fornecer o próximo avanço tecnológico. Em 1929, Uno Lamm -3 obteve uma patente para o controlo do arco de retorno através da utilização de um eléctrodo de repartição de potencial. Este é um eléctrodo intermédio ligado a um divisor de tensão que impede a formação de um arco directamente do ânodo para o cátodo. Por este trabalho e pelas suas consequências, Lamm é frequentemente designado "o pai da HVDC".

Apesar desta patente, foi longo o caminho necessário entre a ideia básica e uma implementação fiável. Devido ao comportamento muitas vezes pouco previsível dos arcos, o desenvolvimento destas válvulas rectificadoras era em grande parte um processo de investigação empírica. Para não desestabilizar a rede eléctrica na cidade de Ludvika, onde se localizava o laboratório de desenvolvimento, os ensaios a potências elevadas tinham por vezes de ser realizados a altas horas da noite.

O supervisor sueco do sector energético (SSPB, hoje Vattenfall) seguia com inte-

Os laboratórios da ASEA iniciaram o desenvolvimento de tirístores em meados da década de 1960.



resse o progresso da ASEA. No princípio da década de 1940, a tecnologia já se encontrava suficientemente madura para permitir a construção de uma estação conversora experimental. A localidade escolhida foi Trollhättan, dada a sua proximidade a uma central geradora. A construção começou em 1943, iniciando-se a operação em 1945. Foi construída uma linha de 50 km de extensão, operando a 90 kV e transportando 6,5 MW, interligando esta localidade a Mellerud, localidade onde foi construída uma segunda estação conversora. Esta linha foi construída exclusivamente para fins de ensaios, tendo continuado a desempenhar esse papel até à sua desactivação no final da década de 1960.

#### Gotland

Em 1950, o parlamento sueco aprovou a construção de uma linha HVDC entre a ilha de Gotland e o território continental sueco - 4-5. Esta linha originou vários novos desafios para a ASEA, um dos principais dos quais a travessia marítima. Foi seguida uma solução de ligação submarina, para a qual foi desenvolvido um cabo.

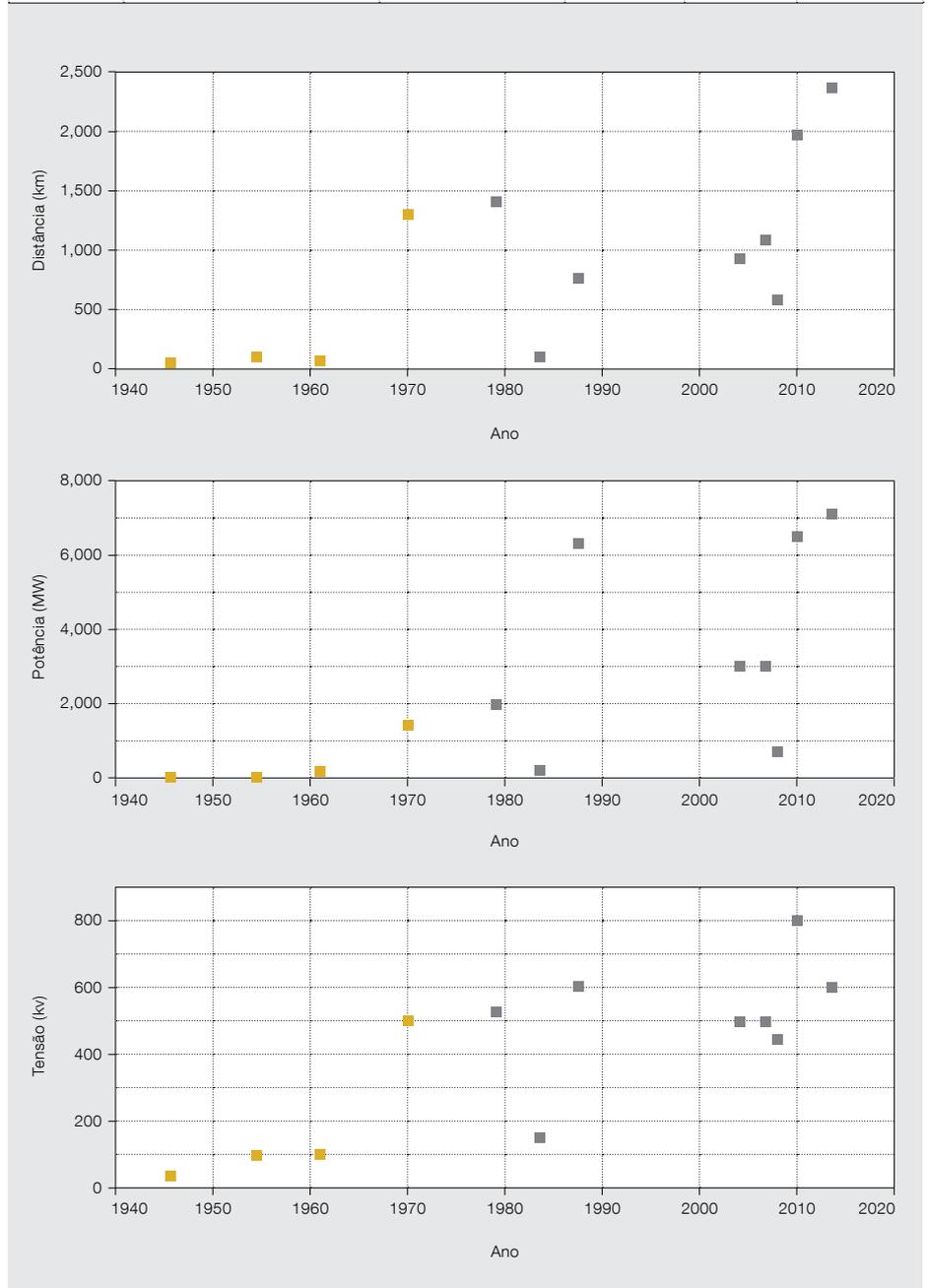
Em 7 de Março de 1954, a linha de 200 A foi energizada a 50 kV. Este valor foi duplicado para 100 kV em 26 de Julho, quando foi adicionado em série um segundo par de conversores. Tinha começado a era da HVDC comercial.

O ASEA Journal assinalou o acontecimento com um artigo escrito pelo próprio

Como alternativa à transmissão em alta tensão, Edison promoveu a ideia da geração local de energia.

7 Uma seleção dos numerosos projectos HVDC entregues pela ABB. A empresa forneceu mais de metade dos 170 projectos existentes a nível mundial.

Ano	Projecto	Conversores	Distância (km)	Potência (MW)	Tensão (kV)
1946	Trollhättan - Mellerud (test line)	Válvulas de vapor de mercúrio	50	6,5	45
1954	Gotland 1		98	20	100
1961	English Channel		64	160	100
1970	Pacific Intertie		1300	1,440	500
1979	Cahora Bassa	Silício	1420	1,920	533
1983	Gotland 2		99	130	150
1987	Itaipu		780	6,300	600
2004	Three Gorges - Guangdong		940	3,000	500
2007	Three Gorges to Shanghai		1060	3,000	500
2008	NorNed		580	700	450
2010	Xiangjiaba - Shanghai		1980	6,400	800
2013	Rio Madeira		2375	7,100	600





HVDC Light utiliza conversores por fontes de tensão (VSC) com transístores bipolares com porta isolada (IGBT), uma tecnologia derivada da utilizada em accionamentos industriais.

Lamm -6. Inicia-se com as seguintes palavras:

“A realização do transporte em corrente contínua a alta tensão entre o território continental sueco e a ilha de Gotland é o culminar de um extenso trabalho de desenvolvimento realizado na Suécia, cujas origens remontam longe no tempo.”

“As válvulas conversoras, o elemento mais crítico de uma instalação CC, constituíram desde sempre o ponto focal deste trabalho de desenvolvimento. O conjunto de todo o trabalho, contudo, cobriu muitas outras áreas, tais como as técnicas de conversão em geral, os problemas do retorno de terra, a construção e assentamento do cabo, a interferência com circuitos de telecomunicações, os fenómenos de efeito de coroa em linhas aéreas, o comportamento em CC de isoladores suspensos, etc.”

O último parágrafo teria cabimento em qualquer publicação sobre HVDC dos últimos 60 anos. Os princípios básicos estabelecidos para Gotland continuam válidos ainda hoje, tendo a ASEA (e posteriormente a ABB) continuado a construir experiência em todas as áreas mencionadas. De facto, a ABB é a única empresa a nível mundial com capacidade para fornecimento próprio de todos os componentes de um sistema HVDC, desde transformadores e estações conversoras e suas componentes até cabos, sistemas de controlo e, mais recentemente, disjuntores.

O segundo projecto comercial HVDC da ASEA foi uma linha de 160 MW entre Inglaterra e França inaugurada em 1961. Seguiram-se outros projectos durante a década de 1960 em locais como a Escandinávia, Itália, Japão, Canadá e Nova Zelândia, alguns dos quais envolvendo de novo travessias submarinas. O culminar do desenvolvimento de projectos HVDC baseados em válvulas de vapor de mercúrio foi o Pacific Intertie, nos EUA, uma linha com 1300 km de extensão entre Celio (Oregon) e Sylmar (sul da Califórnia), construída conjuntamente com a General Electric e inaugurada em 1970, operando a 500 kV e transportando 1440 MW (aumentada para 1600 MW em 1982).

Até 1971, data em que a ASEA cessou o desenvolvimento de válvulas de vapor de mercúrio, as linhas HVDC em que essas válvulas foram aplicadas totalizavam uma potência transportada de 3400 MW -7.

#### Tiristores

No início dos anos 1960 entrou em cena um novo tipo de rectificador que pôs termo à utilização da tecnologia de vapor de mercúrio -8.

O princípio do tiristor foi proposto por William Shockley em 1950. Um tiristor é um-

#### Notas

- 4 A ligação Gotland 1 manteve-se em serviço até 1986. Presentemente a ilha é alimentada por duas ligações HVDC, Gotland 2 e 3, entradas em serviço em 1983 e 1987, respectivamente, com uma capacidade total de 260 MW.

Já em 1992 a ABB propôs uma rede HVDC sobreposta à rede existente com a finalidade de aliviar do transporte de fluxos energéticos de grande volume a longas distâncias.

9 A estação de Jingzhou da ligação Três Gargantas – Guangdong



dispositivo semiconductor com três terminais (ânodo, cátodo e porta). Tal como um diodo semiconductor, conduz corrente apenas num sentido, quando accionado por uma tensão directa; uma tensão inversa esvazia a área da junção de portadores de carga livres e portanto impede a condução. O tiristor tem camadas adicionais entre as zonas n e p que normalmente também impedem a condução, mas a aplicação de uma tensão de disparo na porta do dispositivo inunda esta área com portadores de carga, permitindo a condução. Uma vez esta iniciada, a produção de portadores de carga torna-se auto-sustentável e a corrente de porta pode ser retirada. A condução só se interrompe depois de a corrente principal descer abaixo de um valor de limiar. A sua funcionalidade global é pois a traços largos comparável com a de uma válvula de vapor de mercúrio com eléctrodo de disparo, mas com as vantagens de ser muito mais compacto, apresentar menores perdas, eliminar o risco associado à utilização do mercúrio e ser apropriado para a ligação em série de vários dispositivos de forma a criar rectificadores para tensões mais elevadas.

A ASEA iniciou o desenvolvimento de tiristores em meados da década de 1960. Em 1967 foi agregada à linha de Gotland uma estação conversora experimental. Em 1970, foram adicionados conversores a tiristor em série com as unidades de vapor de mercúrio já existentes -Figura de rosto, aumentando a tensão de operação para 150 kV (contudo sem necessidade de substituição do cabo original, capaz de suportar a tensão mais elevada). 4

Os projectos HVDC desenvolvidos durante a década de 1970 incluem as ligações Noruega – Dinamarca (através do Skagerrak) e Inga – Shaba (Congo), bem como os projectos CU no North Dakota (EUA) e Nelson River 2 (Canadá).

Durante a era do vapor de mercúrio a ASEA era praticamente a única empresa no mercado de HVDC, mas a inovação disruptiva trazida pela muito maior simplicidade dos tiristores permitiu o aparecimento de um grande número de novos competidores. A Brown Boveri & Cie., por exemplo, associou-se à Siemens e à AEG para o fornecimento da ligação de Cahora Bassa entre Moçambique e a África do Sul, em meados dos anos 1970. A ASEA respondeu a esta nova competição com investimento em investigação que lhe permitisse estabelecer a liderança em tiristores HVDC.

Um projecto marcante dos anos 1980 foi a linha de 6300 MW do Itaipu (Brasil), adjudicada a um consórcio formado pela ASEA e PROMO e entrada em serviço por fases entre 1984 e 1987. O projecto Quebeque – Nova Inglaterra, de 2000 MW e com entrada serviço pela mesma altura, foi a primeira instalação HVDC multiterminal a nível mundial.

Em 1988, a ASEA e a Brown Boveri & Cie. fundiram-se para formar a ABB. Em 1995 a ABB lançou uma nova geração de estações conversoras, tendo como característica-chave a utilização de conversores de condensadores comutados (CCC) que permitiam o corte controlado da condução

sem necessidade de esperar por um zero da corrente. Este foi uma dos avanços mais marcantes na conversão desde 1954, permitindo uma melhoria na controlabilidade e na redução da potência reactiva. Esta tecnologia foi utilizada pela primeira vez na interconexão de 1999 entre o Brasil e a Argentina (projecto Garabi), transportando uma potência de 2200 MW.

A ABB continuou a elevar os níveis de tensão e corrente. Em 2004 foi inaugurada a linha HVDC Três Gargantas – Guangdong (China), transportando 3000 MW a  $\pm 500$  kV através de uma distância de 940 km -9. Em 2007, uma linha de 1060 km com as mesmas estipulações interligou as Três Gargantas a Xangai. O ano de 2010 viu a entrada em serviço da linha UHVDC (corrente contínua a ultra-alta tensão) entre Xiangjiaba e Xangai (China), a uma tensão de  $\pm 800$  kV, 6400 MW de potência e com 1980 km de comprimento. Em 2013, o sistema Rio Madeira (Brasil) iniciou o transporte de 7100 MW a uma distância de 2375 km.

Mas HVDC não é apenas o transporte de potências cada vez mais elevadas a distâncias cada vez maiores. Seguindo na tradição da linha de Gotland, os sistemas HVDC são também altamente adequados para interligações submarinas, dado a elevada capacidade dos cabos blindados utilizados tornarem o transporte em HVDC vantajoso sobre HVAC para distâncias a partir de algumas dezenas de quilómetros -10. Por exemplo, em 2008 o sistema NorNed, com 580 km, interligou a Noruega e os Países Baixos.

**10 Cabo da ligação HVDC Fenno – Scan, completado em 1989 entre a Suécia e a Finlândia, a ser carregado para um navio.**



**Sistemas mais leves**

Numa escala mais reduzida, HVDC pode também ser utilizada para interligação energética com instalações offshore tais como parques eólicos ou plataformas de petróleo ou gás -11. Para as gamas mais baixas de potência a ABB introduziu na década de 1990 o sistema HVDC Light®. Em lugar do uso de tiristores, HVDC Light utiliza conversores por fontes de tensão (VSC, Voltage Source Converters) com transístores bipolares de porta isolada (IGBT, Insulated Gate Bipolar Transistor), uma tecnologia derivada da utilizada em accionamentos industriais. HVDC Light apresenta as vantagens de melhor controlabilidade, capacidade de controlo da potência reactiva e possibilidade de arranque sem alimentação externa, podendo assim ser ligado a redes autónomas sem comutação local e além disso também ser utilizado para estabilizar redes CA pré-existentes. A concepção compacta do sistema HVDC Light permite que as estações conversoras sejam contentorizadas e entregues no local de instalação como uma peça única de equipamento, simplificando os ensaios e a entrada em serviço.

**A rede HVDC**

Muitos novos desafios se apresentam às redes de energia eléctrica do futuro, um dos principais sendo a transformação radical do panorama da geração eléctrica. As centrais geradoras tradicionais têm

**Notas**

5 Ver também “Breakthrough!: ABB’s hybrid HVDC breaker, an innovation breakthrough enabling reliable HVDC grids”, ABB Review 2/2013, pp. 6–13.

**11 Elevando um módulo offshore HVDC Light para colocação em plataforma petrolífera no Mar do Norte**



sido construídas principalmente próximo dos centros de consumo, mas o rápido aumento da quota de mercado das energias renováveis implica que cada vez mais energia venha de regiões remotas. Esta energia terá de ser transportada a grandes distâncias, muitas vezes através de áreas onde a rede tradicional é fraca e não adaptada ao suporte da carga extra. Já em 1992, Gunnar Asplund, da ABB, propôs uma rede HVDC sobreposta à rede existente com a finalidade de aliviar do transporte de fluxos energéticos de grande volume a longas distâncias.

Mas a construção de uma rede de corrente contínua não é tão simples como possa parecer, sendo um dos obstáculos técnicos principais a inexistência de um disjuntor apropriado. Em redes CA, os disjuntores são utilizados para isolar de forma rápida e segura uma secção da rede, por exemplo para evitar que uma perturbação nela ocorrida afecte a parte restante. Quando um disjuntor CA abre, forma-se entre os contactos um arco que continua a conduzir corrente até à próxima passagem por zero da corrente. Não existindo em CC tais passagens por zero, é necessária uma nova abordagem, e essa falta vinha há muito impedindo o desenvolvimento de topologias HVDC mais complexas. A ABB resolveu finalmente este problema em 2012. O disjuntor híbrido utiliza uma combinação de semicondutores e interruptores mecânicos para cortar o fluxo CC de uma forma atempada e segura.5

**CC ou AC?**

Final, quem ganhou na realidade a Guerra das Correntes? A corrente contínua está a avançar dentro de áreas que têm sido tradicionalmente aplicações de corrente alternada, mas provavelmente nunca irá conseguir destroná-la completamente. Talvez, passados mais de 120 anos, possamos declarar um empate: Os livros de História do futuro darão reconhecimento tanto a Tesla como a Edison.

**Andreas Moglestue**

ABB Review  
Zurique, Suíça  
comunicacao-corporativa@pt.abb.com

**Leitura adicional**

U. Lamm, The First High Voltage D.C. Transmission with Static Convertors: Some Notes on the Development, ASEA Journal 1954, pp. 139–140.

I. Lidén, E. Uhlmann, S. Svidén, The Gotland D.C. Link: The Layout of the Plant, ASEA Journal 1954, pp. 141–154.

R. Wetzel, Die Geschichte des Quecksilberdampfgleichrichters bei BBC Deutschland 1913–1963, PhD thesis University of Stuttgart, 2001.

G. Asplund, L. Carlsson, O. Tollerz, 50 years HVDC – from pioneer to world leader, Parts 1 and 2, ABB Review 4/2003, pp. 6–13.

L. Haglöf, P. Danfors, HVDC Veterans Presentation, Visby Gotland, 2004.

H. R. Zeller, The winning chips: History of power semiconductors at ABB, ABB Review 3/2008, pp. 72–78.

G. Asplund, L. Carlsson, HVDC: ABB – from pioneer to world leader, ABB Review 4/2008, pp. 59–64.