



**Universidade Federal de Santa Maria – UFSM  
Educação a Distância da UFSM – EAD  
Universidade Aberta do Brasil – UAB**

**Curso de Pós-Graduação em Eficiência Energética Aplicada aos  
Processos Produtivos**

**Polo: Panambi**

**A EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NA TRANSMISSÃO EM ALTA TENSÃO  
EM CORRENTE CONTÍNUA**

MARCHIORO, Alison<sup>1</sup>

Orientador: MARTINS, Geomar<sup>2</sup>

**RESUMO**

O presente trabalho aborda o tema eficiência energética e seus princípios, referenciando a transmissão em corrente contínua em altas tensões (HVDC) como mais uma alternativa neste contexto. Na sequência do trabalho, durante o referencial teórico, é apresentado um breve histórico da evolução da transmissão HVDC, também suas vantagens e desvantagens e algumas características do seu sistema de controle. Após a apresentação dos objetivos do trabalho e da metodologia utilizada, são descritos alguns critérios de análise comparativa de sistemas de transmissão, baseados no critério econômico e apresentadas algumas informações sobre perdas na transmissão em corrente contínua (DC). Em seguida é efetuada

também uma comparação de custos e perdas entre o sistema HVDC e a transmissão de corrente alternada em alta tensão (HVAC). Neste contexto são apresentados gráficos e ilustrações, devidamente interpretados, possibilitando efetuar uma avaliação da aplicação da transmissão em corrente contínua para melhoria da eficiência energética em determinadas aplicações.

**Palavras-chave:** Transmissão de Energia, HVDC, Eficiência Energética.

#### **ABSTRACT:**

This paper discusses the energy efficiency theme and its principles, referencing the HVDC transmission in High Voltage Direct Current as one of alternatives in this context. During the theoretical framework, a brief history of the evolution of HVDC transmission, their advantages and disadvantages and some features of its control system are presented. After the objectives of the study and the methodology are described some benchmarking criteria of transmission systems based on economic criteria and presented some information about transmission losses in Direct Current (DC). Also is performed a comparison of costs and losses between the HVDC system and the High Voltage Alternate Transmission (HVAC). In this context are presented graphs and illustrations, showing that this technology properly interpreted, allowing improving energy efficiency in certain applications.

## **1 INTRODUÇÃO**

O crescimento populacional das últimas décadas, vinculado à evolução dos equipamentos elétricos e processos de automação, alavancou o consumo de energia. As reservas naturais estão cada vez mais escassas, com o aumento da produção devido à elevação do consumo de energia, visualiza-se um aumento da poluição mundial. Neste contexto, o conceito de Eficiência Energética vem ganhando destaque.

O autor Patterson (1996) descreve que “eficiência energética” é um termo que, em geral, refere-se a um menor consumo de energia para a produção da mesma quantidade de um serviço ou produto útil. Complementando, Sola (2006) expõe que em sistemas de conversão de energia, o conceito de eficiência energética

está ligado à minimização de perdas na conversão de energia primária em energia útil, que realiza trabalho. As perdas são intrínsecas aos processos de conversão de energia e ocorrem, em maior ou menor escala, em qualquer tipo de energia disponibilizada, seja térmica, mecânica ou elétrica.

Segundo Silva (2011), na Europa, a geração e a transmissão estão perto do limite de capacidade. As atuais interligações da rede europeia norte-sul “back-bone” já estão totalmente carregadas. Além disso, as perdas na transmissão, responsáveis por aproximadamente 10% de toda a energia gerada, estão em alguns casos, com ameaça de aumento. Por este motivo, existe uma necessidade urgente da aplicação de novas tecnologias de geração e transmissão, que sejam mais eficientes e minimizem o impacto ao meio ambiente. Como exemplo, temos as fontes renováveis de energia e as aplicações de geração distribuída.

O Brasil possui sua matriz energética baseada na geração hidráulica, e por possuir uma grande dimensão territorial, existe a necessidade de implantação de estratégias eficientes em transmissão de energia, pois os grandes centros de geração estão geralmente distantes dos centros de carga. Sendo assim, existe uma busca constante por opções que minimizem as perdas no processo de transmissão de energia elétrica em grandes distâncias. Uma alternativa bastante aplicada atualmente, para atenuar perdas nestas aplicações, é a transmissão em altas tensões em corrente contínua, chamado de HVDC (High Voltage in Direct Current).

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1 Histórico**

Segundo Silva (2011), Kimbark (1971) e Kundur (1994), os estudos envolvendo a eletricidade com suas aplicações práticas, iniciaram em corrente contínua (DC). A corrente alternada (CA) foi sua sucessora. A primeira estação elétrica no mundo, localizada na “Pearl Street” em Nova Iorque, foi construída por Thomas A. Edison e iniciou a operação em 1882. Ela fornecia corrente contínua em 110 V por 1,6 km para 59 clientes em Manhattan.

Com o advento do transformador, os circuitos polifásicos e do motor de indução nos anos de 1880 e 1890, foi possível implantar o sistema elétrico de potência em CA. Quando o primeiro sistema CA apareceu, surgiram duros

argumentos entre os proponentes de sistemas DC. Os adeptos de DC justificavam que a corrente alternada era perigosa porque usa alta tensão. Como resultado das suas vantagens, contudo, o sistema de potência elétrica CA tornou-se o mais aplicado do mundo.

Mesmo desta forma, as vantagens da transmissão em DC nunca foram esquecidas. Porém, como atualmente a geração é efetuada em CA, uma planta de transmissão DC requer que a corrente alternada seja convertida em contínua e após ser reconvertida. Sendo assim, a viabilidade deste tipo de transmissão depende do desenvolvimento dos conversores comutadores para alta tensão e potência.

A primeira aplicação comercial de transmissão HVDC ocorreu entre a ilha de Gotland e o sistema interconectado da Suécia em 1954, descreve Sood (2004). Este sistema usava válvulas de arco de mercúrio e possuía capacidade de transmissão de 20MW em 100 KV, através de um elo HVDC submarino de 96Km.



Figura 1: Fotos da obra da primeira aplicação Comercial em HVDC

Fonte: ABB® (2014).

Com o desenvolvimento das válvulas tiristoras, a transmissão HVDC foi se

tornando mais atrativa. O primeiro sistema HVDC que utilizou esta tecnologia foi o esquema de Eel River em 1972, com capacidade de transmissão de 320MW, que efetuou a interconexão energética entre as províncias de New Brunswick e Quebec. A partir deste, os tiristores tornaram-se os equipamentos mais empregados em estações conversoras.

Segundo Kundur (1994), o desenvolvimento dos equipamentos tiristores, que resultou na diminuição de seu tamanho, custo e melhoria de sua confiabilidade, foi um dos fatores que mais contribuíram para alavancaram a aplicação da tecnologia HVDC no mundo.

Com o desenvolvimento de estações conversoras que utilizam tensões cada vez mais elevadas, diminuindo custos de linha de transmissão e perdas, tornou-se possível transmitir até 5000MW em uma linha monofásica bipolar conforme descrito por Szechtman, Maruvada e Nayak (2007), trazendo assim, benefícios de ordem técnica e ambiental através da redução de faixas de servidão e níveis mais baixos de campos eletromagnéticos.

## **2.2 Vantagens de Sistemas em HVDC**

Segundo Kimbark (1971) e Sood (2004), para transmissões de longa distância, o fator predominante para utilização de sistemas em HVDC é o econômico, já que, economiza-se no custo das linhas de transmissão e perdas energéticas, de modo que, possam cobrir os custos de implantação das estações conversoras. Porém, algumas vezes isto passa a não ser o ponto principal na escolha da utilização de um sistema HVDC, mas problemas voltados ao meio ambiente ou a capacidade de controle do sistema energético, assumem maior importância para a aplicação. Oferecem uma poderosa alternativa para aumentar a estabilidade do sistema de potência, tão bem como, melhorar a flexibilidade de operação do mesmo, já que, não depende do ângulo de estabilidade transitória como os sistemas em AC.

Segundo Kundur (1994), Custódio (2009) e Arrillaga, Liu, Watson (2007) e Sood (2004), quando se trata de distâncias mais curtas ou até mesmo quando não há transmissão pelo elo HVDC (HVDC back-toback), outras vantagens são decisivas para sua aplicação, dentre elas podemos citar:

- Em um sistema CA e DC paralelos, a modulação das quantidades DC (corrente ou potência) aumenta o limite de estabilidade de regime permanente do sistema CA;
- A transmissão de potência DC é independente da abertura angular entre os terminais CA;
- Permite a interligação entre sistemas de diferentes frequências (50-60Hz).
- Impede fluxos indesejáveis em linhas de transmissão CA paralelas;
- Possibilita o controle de intercâmbios garantindo que as margens de estabilidade do sistema sejam mantidas;
- Controla o fluxo de energia e evita a sobrecarga, prevenindo disparos em cascata, restringindo assim falhas do sistema em condições de contingência múltipla;
- Para transmissão submarina a partir de 50 km, a transmissão DC é, atualmente, a única solução prática.
- Uso eficiente da capacidade de geração;
- Maior potência transmitida por condutor;
- Admite o uso de retorno por terra;
- Linhas de transmissão com construções mais simples;
- Não incrementa a corrente de curto-circuito no sistema CA;
- Baixa corrente de curto-circuito na linha de corrente contínua;
- Menor impacto ambiental;
- Menor perda de energia para transmissão e longas distâncias;
- Menor investimento para transmissões em longa distância.

Segundo FDTE (2012), no que se refere aos critérios de confiabilidade, cada bipolo CC se assemelha a um circuito duplo CA, desde que possa transmitir no modo monopolar com retorno pela terra, ou seja, durante um determinado tempo, caso ocorra perda de um polo, a terra passa a funcionar como polo de retorno, não interrompendo o fluxo de potência.

### **2.3 Desvantagens de sistemas em HVDC**

Sood (2004) descreve que a transmissão em HVDC tende a possuir custos mais elevados para pequenas distâncias. Apesar de não necessitar de compensação de reativos da linha de transmissão, os custos são aumentados devido à necessidade de instalação de conversores e filtros. Também descreve como pontos negativos: a complexibilidade dos sistemas de controle, a geração de harmônicas no processo de retificação/conversão que necessitam ser filtradas e o alto custo dos equipamentos de conversão.

Os autores Arrillaga, Liu e Watson (2007) relatam que apesar do sistema de transmissão DC apresenta valores de correntes de curto-circuito inferiores aos sistemas de transmissão CA, as falhas de comutação nos tiristores dos conversores são perturbações que podem comprometer a estabilidade dinâmica e a continuidade do fornecimento de energia.

#### **2.4 Funções do Sistema de Controle HVDC**

Para que seja possível efetuar uma transmissão confiável em sistemas em HVDC é necessário um sistema de controle com várias funcionalidades, que apesar de complexo e ter um custo relativamente elevado possibilita algumas funcionalidades interessantes ao sistema de transmissão em HVDC relatados por Arrillaga, Liu e Watson (2007) e Sood (2004).

Em uma típica aplicação de conexão CC de dois terminais conectando dois sistemas de corrente alternada (Figura 2), as principais funções dos controles DC são:

- Controlar o fluxo de potência entre os terminais;
- Proteger o equipamento contra estresses por tensão ou corrente causados por faltas;
- Manter o fator de potência o mais alto possível;
- Evitar falha de comutação;
- Estabilizar os sistemas AC conectados em qualquer modo de funcionamento da conexão DC.

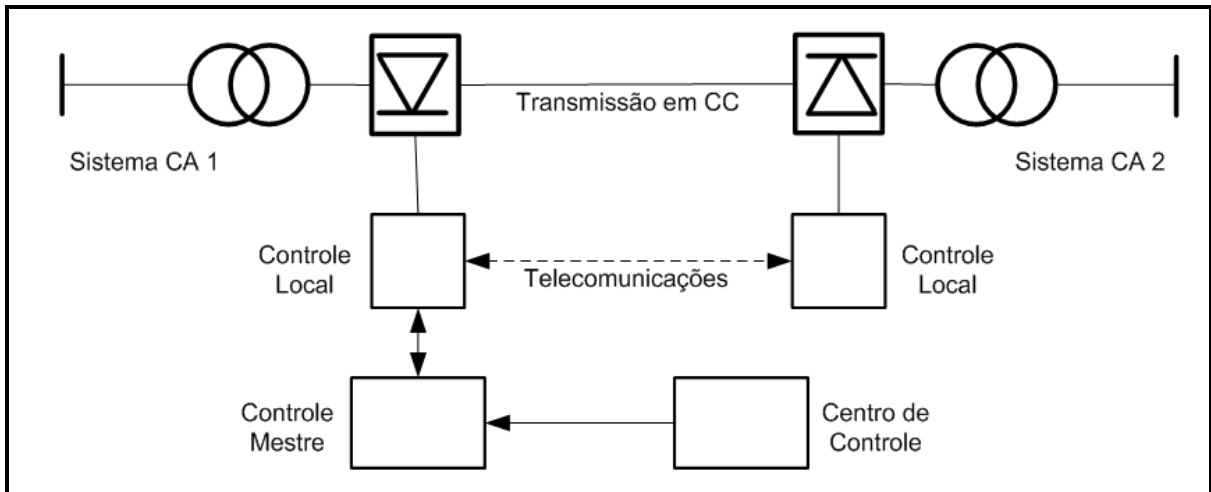


Figura 2: Conexão DC típica Interligando dois Sistemas CA

Fonte: própria.

A Figura 2 mostra uma interligação típica, os dois terminais DC possuem seus próprios controladores locais. Um centro de despacho centralizado irá enviar a ordem de potência a um dos terminais ao qual irá atuar como um controlador mestre que tem a responsabilidade de coordenar as funções de controle da conexão DC. Além das funções primárias, é desejável que os controles DC tenham as seguintes características:

- Limitar a máxima corrente DC: devido a uma inércia térmica limitada das válvulas de tiristoras para sustentar as sobrecorrentes, a corrente DC máxima é normalmente limitada a valores inferiores a 120% durante um intervalo limitado.
- Manter máxima a tensão DC para a transmissão: isso reduz as perdas de transmissão.
- Minimizar o consumo de potência reativa: implica que os conversores devem operar com um ângulo de disparo baixo.

Além das características acima desejadas, os controles DC terá que lidar com os requisitos de regime permanente e dinâmico da conexão em corrente contínua, conforme mostrado na Tabela 1.



Tabela 1: Requisitos de uma Conexão DC

<b>Requisitos em Regime Permanente</b>	<b>Requisitos Dinâmicos</b>
<b>Limitar a geração de harmônicas não características</b>	Mudanças graduais na corrente DC ou fluxo de potência
<b>Manter a precisão da variável controlada, ou seja, corrente cc e/ou ângulo de extinção constante</b>	Fluxo de potência reverso
<b>Lidar com as variações normais nas impedâncias do sistema de corrente alternada devido a mudanças na topologia</b>	Variação na frequência do sistema CA

Fonte própria.

### 3 OBJETIVOS

#### 3.1 Objetivo geral

Para que seja possível a transmissão de energia, geralmente são necessárias subestações e linhas de transmissão, de modo que, a energia elétrica seja levada da fonte geradora até os pontos de consumo. Os sistemas de transmissão são responsáveis por um incremento no custo da energia, tanto devido a sua construção e manutenção, quanto às perdas energéticas presentes neste processo.

Este trabalho tem o objetivo de analisar o sistema de transmissão em HVDC como uma forma de atenuar as perdas no processo de transmissão de energia. Desta maneira, a ideia é aplicar esta tecnologia como alternativa de eficiência energética no próprio processo global da distribuição de eletricidade.

#### 3.2 Objetivo específico

O objetivo específico deste trabalho é transcrever sobre a transmissão de energia em corrente contínua. Pretende-se estudar sobre as características deste

tipo de transmissão de eletricidade, contendo suas aplicações, vantagens e desvantagens. Como atualmente é predominante a transmissão em corrente alternada, busca-se estabelecer um comparativo entre ambos os sistemas de transmissão em relação aos custos e perdas, para então, possibilitar visualizar as aplicações em que a tecnologia HVDC é mais econômica e eficiente.

#### **4 METODOLOGIA**

O presente trabalho aborda aspectos referentes à aplicação da tecnologia de transmissão de energia elétrica em HVDC. A metodologia aplicada é baseada nas referências bibliográficas sobre o assunto. Primeiramente são descritas as vantagens e desvantagens da transmissão em corrente contínua, simultaneamente são citadas suas aplicações, descrevendo também de forma breve, algumas funções do sistema de controle embargado nesta tecnologia.

Também embasado na bibliografia, são apresentados os estudos existentes de comparação entre a transmissão de energia elétrica em AC e DC. Neste aspecto são apresentados os critérios de cálculo aplicados por alguns autores para estabelecer os custos de um sistema de transmissão. Após é efetuada a apresentação e interpretação dos dados disponibilizados por diferentes estudos. Desta forma, são apresentados os resultados comparativos dos custos, perdas e do impacto ambiental entre os dois sistemas de transmissão, isto se torna possível através de gráficos e figuras ilustrativas, de modo a demonstrar de forma visual os aspectos relacionados.

Nas observações finais, é efetuada a inter-relação específica entre a transmissão em HVDC e o conceito de eficiência energética, proveniente dos estudos comparativos com a transmissão em corrente alternada convencional.

#### **5 RESULTADOS E DISCUSSÕES**

##### **5.1 Aspectos Comparativos de Custos em Sistemas de Transmissão**

A avaliação comparativa entre sistemas de transmissão é baseada principalmente na análise de custos. Sendo consideradas as características técnicas, bem como a fiabilidade e a disponibilidade oferecida pelas alternativas de

transporte de energia, desta forma, se torna possível fazer uma seleção entre CA ou transmissão DC.

Para os critérios de avaliação de custos de linhas de transmissão será abordada a metodologia segundo FDTE (2011), FDTE (2012) e Santos (2012).

Para estabelecer o custo de uma linha de transmissão em geral, são utilizados alguns fatores, que são demonstrados na Figura 3:

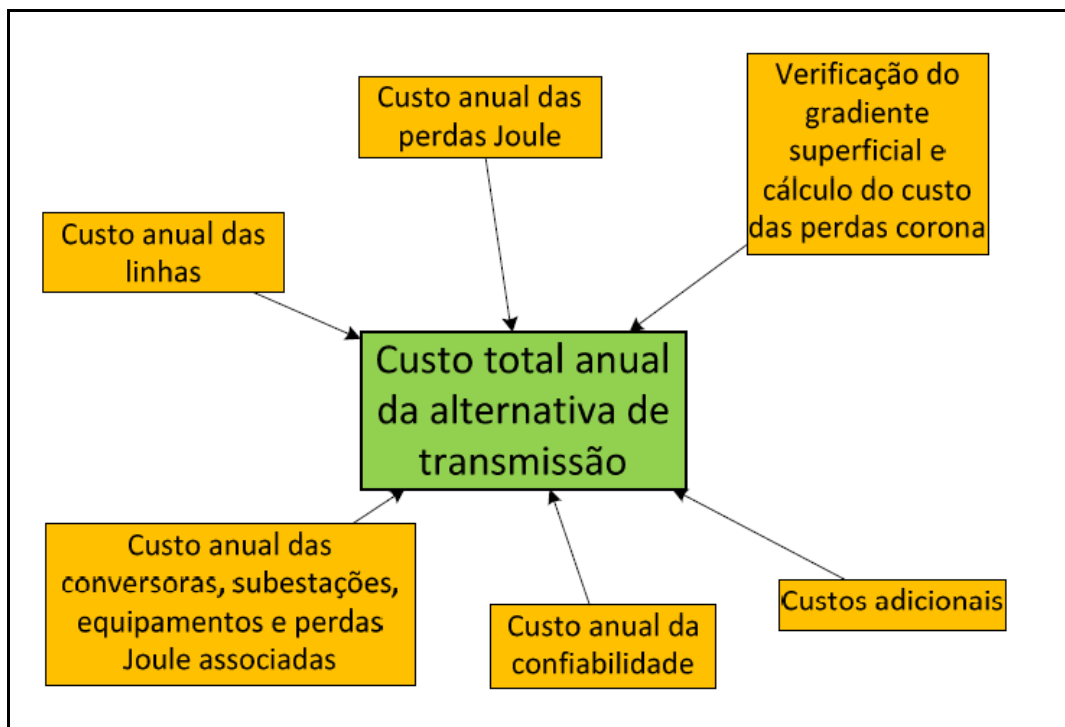


Figura 3: Custo da transmissão de Energia Elétrica

Fonte: Santos (2012).

O custo da linha engloba as indenizações pelo acesso de faixas de servidão, além dos materiais construtivos como: a torre: que possui seu valor estimado em função de seu peso, as fundações, o condutor: que deve ser escolhido após a análise econômica do projeto, cabo de guarda, os isoladores: que possuem seu valor de acordo com a classe de tensão, estais, amarrações e acessórios, além da mão de obra de instalação de todos os equipamentos citados.

## 5.2 Perdas nas Estações Conversoras

Segundo os autores Jardini e Nolasco (2008), as perdas nas Estações Conversoras devem ser especificadas de uma maneira apropriada pelo fabricante.

Perdas acima do valor garantido especificado estão sujeitos a penalidades monetárias.

Também descrevem que a medição direta de perdas de uma Estação Conversora não é possível devido à precisão inadequada dos instrumentos de medição e métodos disponíveis atualmente. Por esta razão, para determinar as perdas totais é usualmente realizada a soma das perdas individuais dos componentes do sistema.

Mesmo as perdas individuais dos componentes mais importantes de um sistema HVDC só podem ser determinadas com algum grau de incerteza. É efetuada utilizando uma combinação de medições e teste de campo, ajustes matemáticos para as condições reais e circunstâncias, e consideração de medições individuais para execução de sistemas HVDC. O procedimento recomendado para o cálculo das perdas em estações conversoras é descrita na norma IEC 61803.

Devem ser somadas as perdas em:

- Válvulas Conversoras
- Transformadores conversores
- Sistema Auxiliar (contemplando sistema de refrigeração de válvulas, transformadores e outros)
- Reator de Alisamento
- Filtros do Circuito AC e Banco de Capacitores
- Filtros DC

A Tabela 2 apresenta a contribuição típica de cada componente dos terminais de um sistema de transmissão HVDC, tanto sem transmissão de energia, quanto em carregamento nominal. A referida tabela apresenta as perdas totais dos dois terminais, sendo possível verificar que o maior índice de perdas refere-se aos transformadores e as válvulas tiristoras.

Tabela 2: Perdas Típicas nos terminais HVDC

Componentes	Em Standby	Com Transmissão (Potência Nominal)
<b>Filtros de Harmônicas:</b>		
Filtros AC	4%	4%
Filtros DC	0%	0,1%
<b>Transformadores Conversores</b>	53%	47%
<b>Válvulas Tiristoras</b>	10%	36%
<b>Consumo do Sistema Auxiliar:</b>		
Sistema de Resfriamento de Válvulas	4%	3%
Sistema de Resfriamento de Transformadores	4%	1%
Sistema de Condicionadores de Ar	15%	4%
Outros	10%	1%
<b>Referência para um Bipolo de 2000MW</b>	2.2 MW	14 MW

Fonte: adaptada de Arrillaga, Liu e Watson (2007).

Os autores Arrillaga, Liu e Watson (2007) ainda relatam que as perdas nas estações conversoras são geralmente maiores que em subestações de corrente alternada convencional, devido à quantidade de equipamentos necessários para a conversão de energia e a adição das válvulas tiristoras. Porém essa diferença entre as perdas não é tão elevada, pois segundo ABB (2014), as perdas de toda uma estação do tipo HVDC clássico é, atualmente, de 0,6%, em contrapartida segundo ONS (2014), a perda admissível apenas para um transformador de uma subestação de HVAC é de 0,3%.

### 5.3 Perdas em linhas de Transmissão

As perdas devido ao efeito corona, tanto nas linhas de transmissão de

corrente alternada, quanto em corrente contínua, ocorrem devido ao movimento dos íons positivos e negativos. No entanto, há diferenças básicas entre o mecanismo físico envolvidos nas perdas corona AC e DC.

Segundo Jardini e Nolasco (2008), nas linhas de corrente alternada, os íons positivos e negativos criado devido à corona, são sujeitas a um movimento oscilatório no campo alternando presente perto dos condutores e são, por conseguinte, limitado a uma região muito estreita em torno dos condutores. Em linhas de corrente contínua, no entanto, os íons com a mesma polaridade que o condutor afastar-se dela, enquanto os íons de polaridade oposta são atraídos para o condutor e são neutralizados em contato com ele. Assim, o condutor positivo na coroa atua como uma fonte de íons positivos que preenchem todo o espaço entre e o condutor e a terra, e vice-versa, para o condutor negativo. O caso mais amplamente utilizado é a linha de transmissão HVDC bipolar, neste o condutor positivo e negativo nas emissões de corona tendo a mesma polaridade que o respectivo condutor.

Devido à complexidade dos cálculos teóricos e o grande número de fatores que influenciam as perdas devido ao efeito corona em linhas de transmissão HVDC, na prática, geralmente são utilizadas fórmulas empíricas. No entanto, a quantidade de dados disponíveis de linhas de corrente contínua é muito mais limitada do que no caso de linhas de corrente alternada e, conseqüentemente, a precisão e aplicabilidade de fórmulas empíricas podem ser limitados.

Segundo FDTE (2012) as perdas joule referem-se à perda de energia devido à dissipação de calor gerada pela passagem da corrente elétrica pelo condutor e pode ser calculada conforme a Equação (1) para a transmissão em corrente contínua e Equação (2) para corrente alternada:

$$JL_{cc} = 2 * r * I^2 = \frac{1}{2} * r * \left( \frac{P}{V_{pt}} \right)^2 \quad (1)$$

$$JL_{ca} = 3 * r * I^2 = r * \left( \frac{P}{V_{ff}} \right)^2 \quad (2)$$

Onde:

- JL<sub>cc</sub>: são as perdas joule em corrente contínua em MW/km.

- JLca: são as perdas joule em corrente alternada em MW/km.
- r: resistência do feixe por polo em  $\Omega/\text{km}$ .
- I: corrente que passa pelo condutor em A.
- V<sub>pt</sub>: tensão polo-terra em kV
- V<sub>ff</sub>: tensão fase-fase em kV.
- P: potência nominal em MW.

Vários autores, dentre eles Arrillaga, Liu e Watson (2007), Sood (2004) e também Jardini e Nolasco (2008), além dos cálculos apresentados por FDTE (2012), indicam que as perdas tanto por efeito corona, quanto por joule, são bastante inferiores em linhas de transmissão em corrente contínua comparadas com a corrente alternada para classes de tensão e potência transmitidas semelhantes.

## 5.4 Comparativo entre custos de transmissão AC e DC

### 5.4.1 Custo das Linhas de Transmissão

Segundo Sood (2004) o custo das linhas em HVDC são inferiores ao HVAC, pois é necessário um menor número de condutores e até mesmo linhas, para mesma classe de tensão em altas potências, conseqüentemente, menor ocupação de faixa de servidão. A Figura 4 demonstra uma ilustração comparativa entre a transmissão em AC e DC necessária para transmitir uma mesma quantidade de potência:

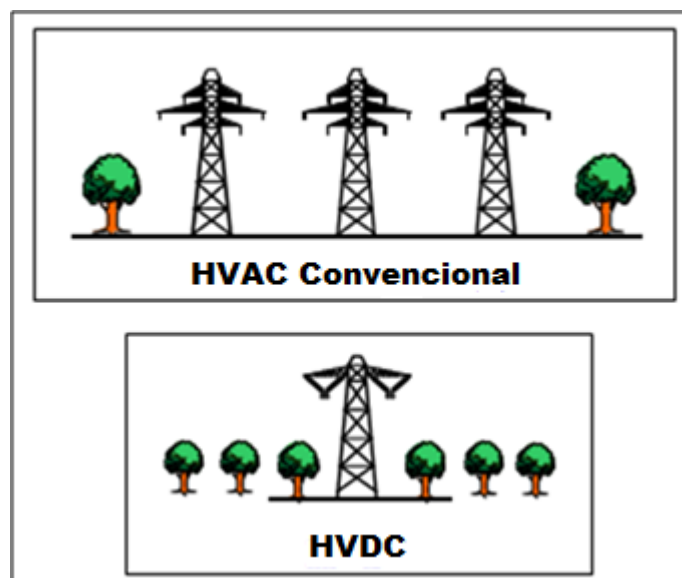


Figura 4: linhas de transmissão em HVDC e HVAC

Fonte Própria.

Pode-se observar que o impacto ao meio ambiente e os custos construtivos são bastante inferior na construção de linhas de transmissão em HVDC.

Outro fator que influencia nos gastos são as perdas, basicamente devidas aos efeitos Joule e corona. Os mesmos recebem influência da potência transmitida e a classe de tensão. Como citado anteriormente, os sistemas em HVDC apresentam menor índice de perdas, tanto relacionadas ao efeito Joule, quanto corona.

#### 5.4.2 Custo Global do sistema de transmissão HVDC

Para efetuar uma análise mais completa, devem ser ponderados os custos e as perdas relacionadas a todo sistema de transmissão, ou seja, contemplando também à instalação dos equipamentos das estações conversoras no caso de transmissão HVDC e subestações terminais e compensadoras para o caso da transmissão em HVAC.

Os autores Jardini e Nolasco (2008) representam de forma gráfica os custos de uma transmissão em HVDC para uma distância de 1500 km em diferentes classes de tensão, fracionando cada componente do sistema de transmissão. Podemos verificar a contribuição de cada componente do sistema HVDC nos custos globais de transmissão através da figura 5:

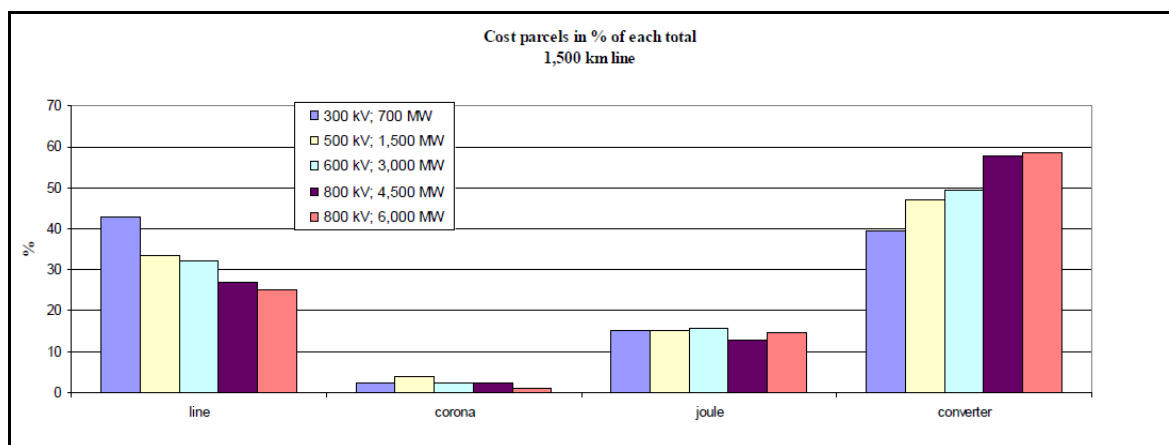


Figura 5: Custos da transmissão HVDC por componente do sistema

Fonte: Jardini e Nolasco (2008).

Pode-se observar que para a distância de 1500 km o custo da linha foi superior ao custo do conversor apenas para a alternativa de 300 kV e 700MW,



porém com o aumento da distância o valor da linha tende a contribuir mais para o custo global. A Figura 5 representa muito bem a contribuição percentual dos custos da transmissão HVDC, demonstrando inclusive a influência da porcentagem das perdas, tanto por efeito corona, quanto pelas perdas joule.

A Figura 6 ressalta as informações anteriores, demonstrando a contribuição da linha e da estação para diferentes distâncias em relação à potência transmitida. Percebe-se neste gráfico, que com o aumento da potência transmitida, a contribuição do custo da subestação torna-se mais significativa, isto ocorre, pois para possibilitar uma maior transmissão de potência ativa, deve haver uma mudança muito mais significativa na estação do que na linha, como por exemplo, aumento da classe de tensão e elevação da capacidade dos transformadores conversores e tiristores. Já a linha DC, pode transmitir capacidades elevadíssimas de potência ativa com apenas dois condutores.

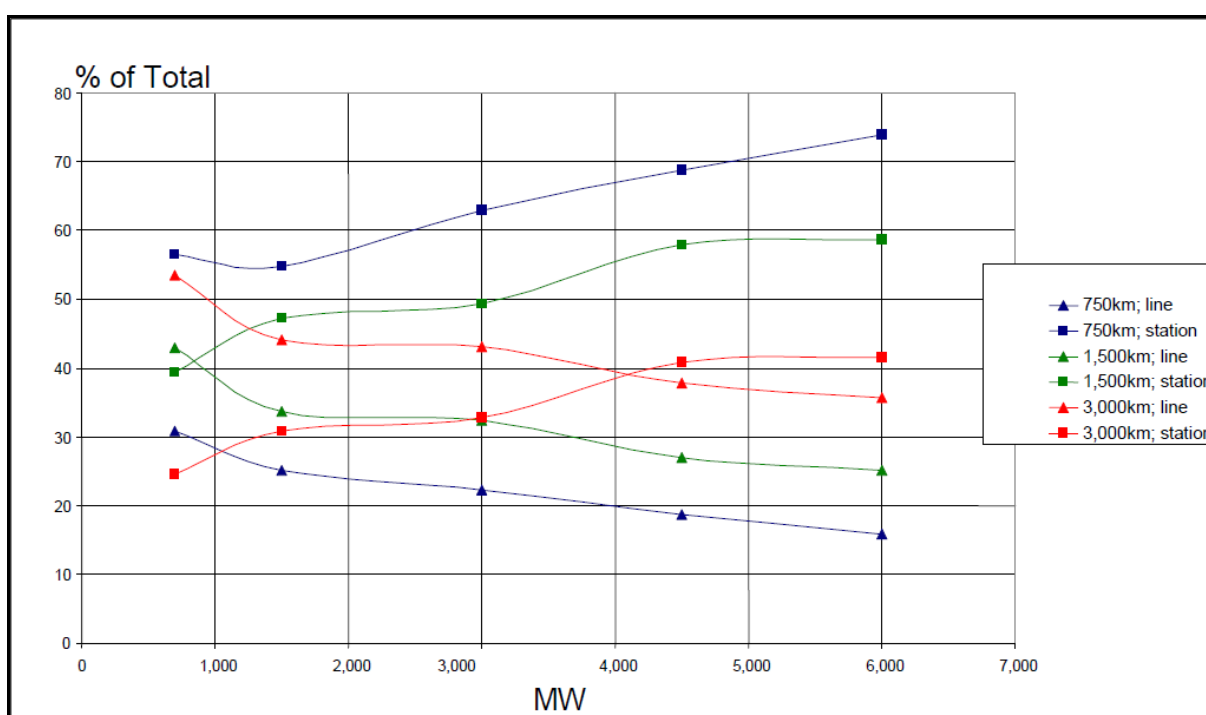


Figura 6: Contribuição dos custos em função da potência transmitida

Fonte: Jardini e Nolasco (2008).

### 5.4.3 Comparação do Custo Global entre Transmissão AC e DC

Os autores Arrillaga, Liu e Watson (2007), apresentam um gráfico de comparação entre perdas globais (contemplando terminais e linhas) de transmissão AC e DC para diferentes níveis de tensão, conforme Figura 7:

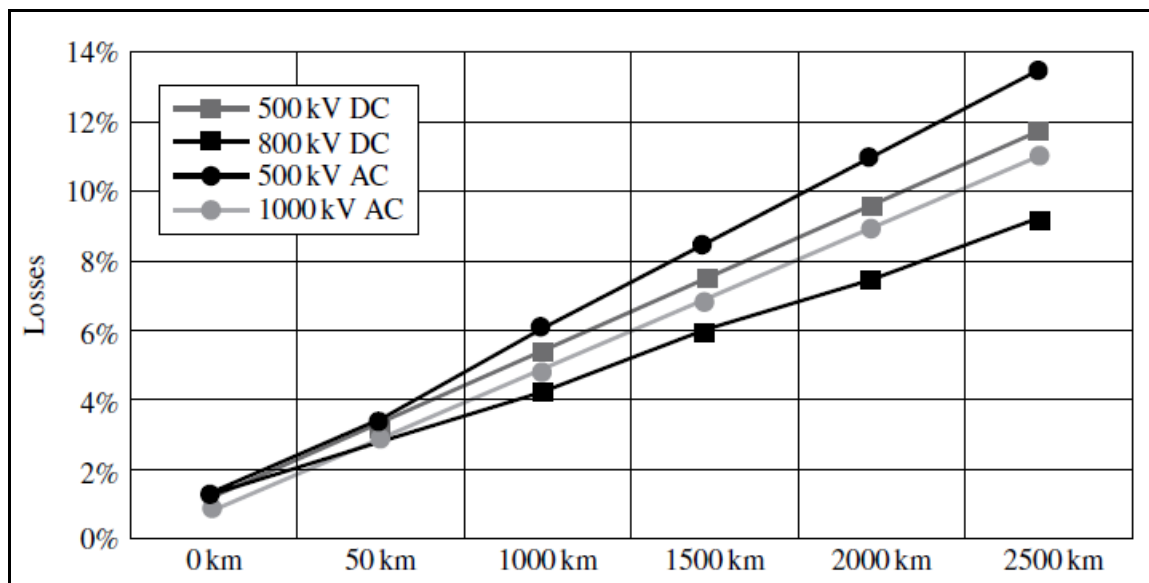


Figura 7: Perdas de transmissão em relação à distância

Fonte: Arrillaga, Liu e Watson (2007).

Pode-se verificar que para a classe de tensão de 500 kV, as perdas do sistema de transmissão AC é superior ao DC para praticamente todas as distâncias. Porém, esta diferença aumenta consideravelmente com o aumento do comprimento da linha, chegando a uma diferença, entre as perdas, de mais de 2% para uma distância de 2500 km. Também, pode ser observado que quanto maior a classe de tensão, menor o índice de perdas, tanto no sistema AC, quanto DC.

Para sistemas HVDC a cotação da estação conversora inclui os valores de tiristores, transformadores conversores, pátio e filtros AC e DC, sistema de controle, proteção e comunicação, serviço auxiliar, entre outros. Já para os sistemas em HVAC, o custo é inferior ao sistema HVDC, pois não necessita de um sistema de controle e proteção tão aprimorado, os transformadores possuem um custo inferior e não necessitam de válvulas tiristoras, pátio DC e filtros de harmônicas. Porém, existe a necessidade de construção de estações compensadora de reativos para transmissão em longas distâncias.

Portanto, na comparação de custos com a transmissão AC, o sistema em DC possui um gasto mais elevado no que se refere aos terminais, porém o custo da linha é inferior. Desta forma, a partir de uma determinada distância crítica, o investimento inicial do projeto passa a ser inferior ao AC, conforme ilustrado na Figura 8:

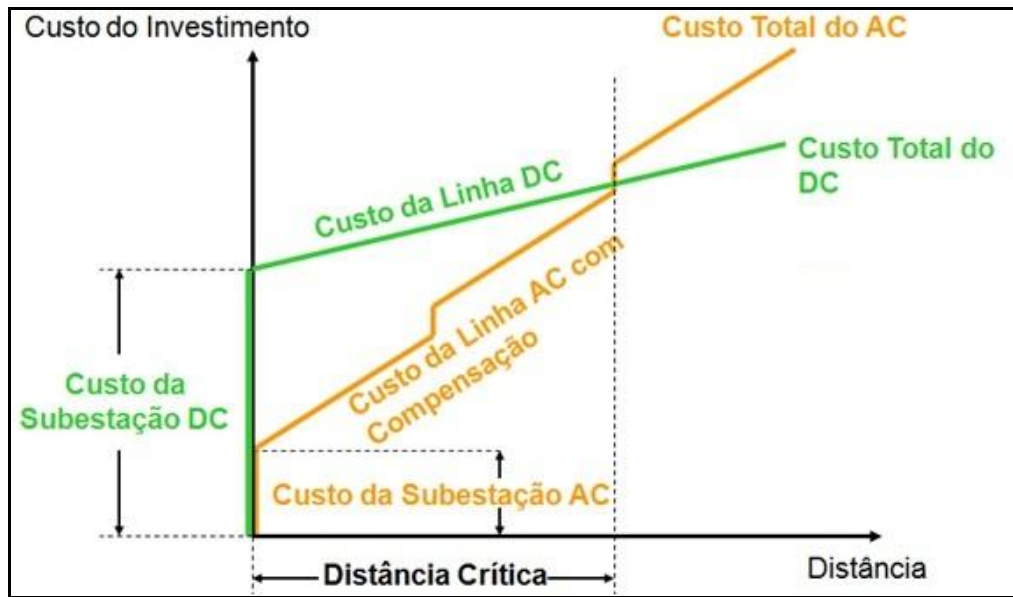


Figura 8: Custo do investimento da transmissão em AC e DC

Fonte Própria.

Na Figura 8, percebem-se algumas elevações bruscas no decorrer da linha de custos da transmissão em AC, estas se referem às subestações compensadoras de reativos, geralmente instaladas nas transmissões em grandes distâncias.

Através da análise de todos estes fatores citados anteriormente neste capítulo e ainda levando em consideração o atendimento aos critérios de estabilidade, sobrecarga, N-1, curva de carga e valores de energia, os autores de FDTE (2012) apresentam algumas alternativas econômicas de sistemas em HVDC (Figura 9) e em HVAC (Figura 10) levando em consideração valores reais de mercado e também taxa de conversão de moeda para equipamentos cotados no exterior. A análise destes autores levou em consideração não apenas o custo inicial do investimento, ilustrado na Figura 8, mas também os custos de manutenção e das perdas energéticas durante o período de vida útil do sistema.

Para estimar os custos de operação e manutenção é usada uma porcentagem do valor do sistema de transmissão. Também são contabilizados os juros em relação ao tempo de construção e aplicado o fator de recuperação de capital (FRC).

Os gráficos das Figuras 9 e 10 apresentam o custo anual dos sistemas de acordo com a potência transmitida, contemplando algumas alternativas de classe de tensão para determinadas distâncias de linha de transmissão:

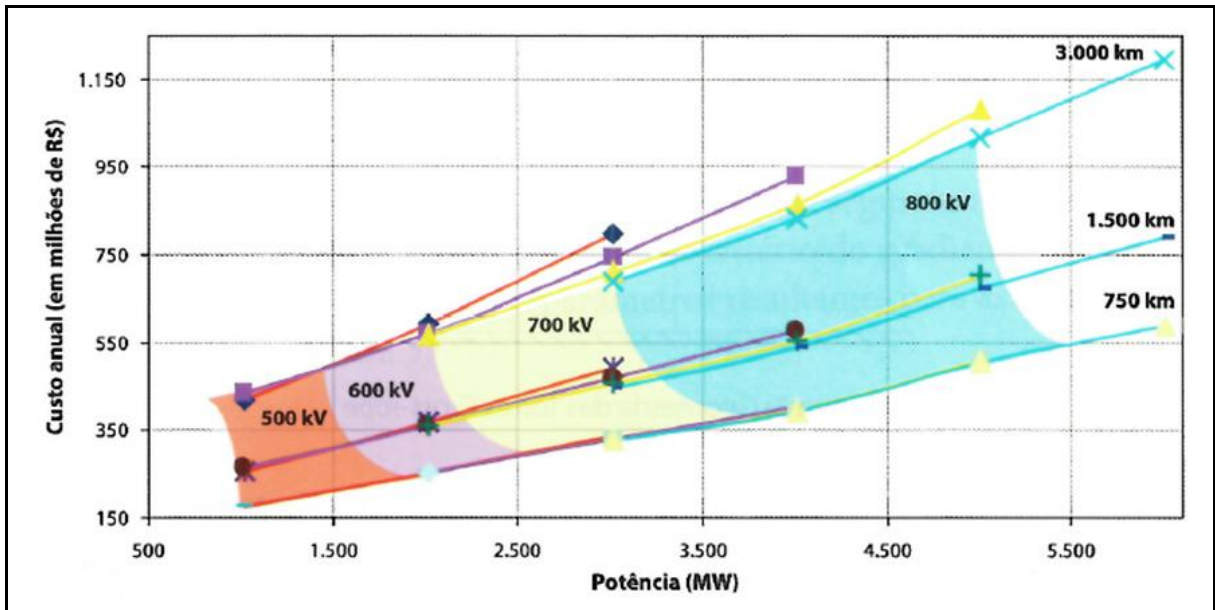


Figura 9: Custo da transmissão em HVDC

Fonte: FDTE (2012).

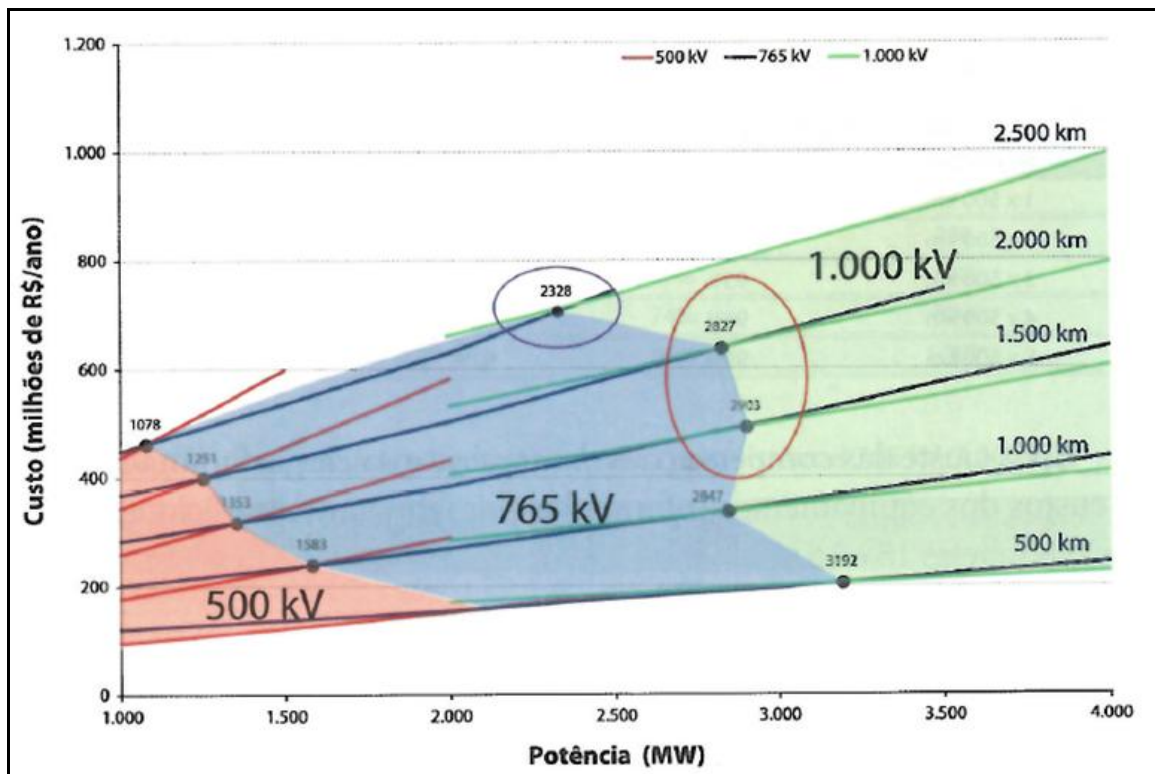


Figura 10: Custo da transmissão em HVAC

Fonte: FDTE (2012).

Através das figuras 9 e 10, com opções econômicas para diferentes classes

de tensão, tanto em AC quanto DC, foi possível estabelecer um comparativo entre as melhores opções para ambos os sistemas de transmissão, de acordo com os custos globais em relação à distância, conforme a Figura 11:

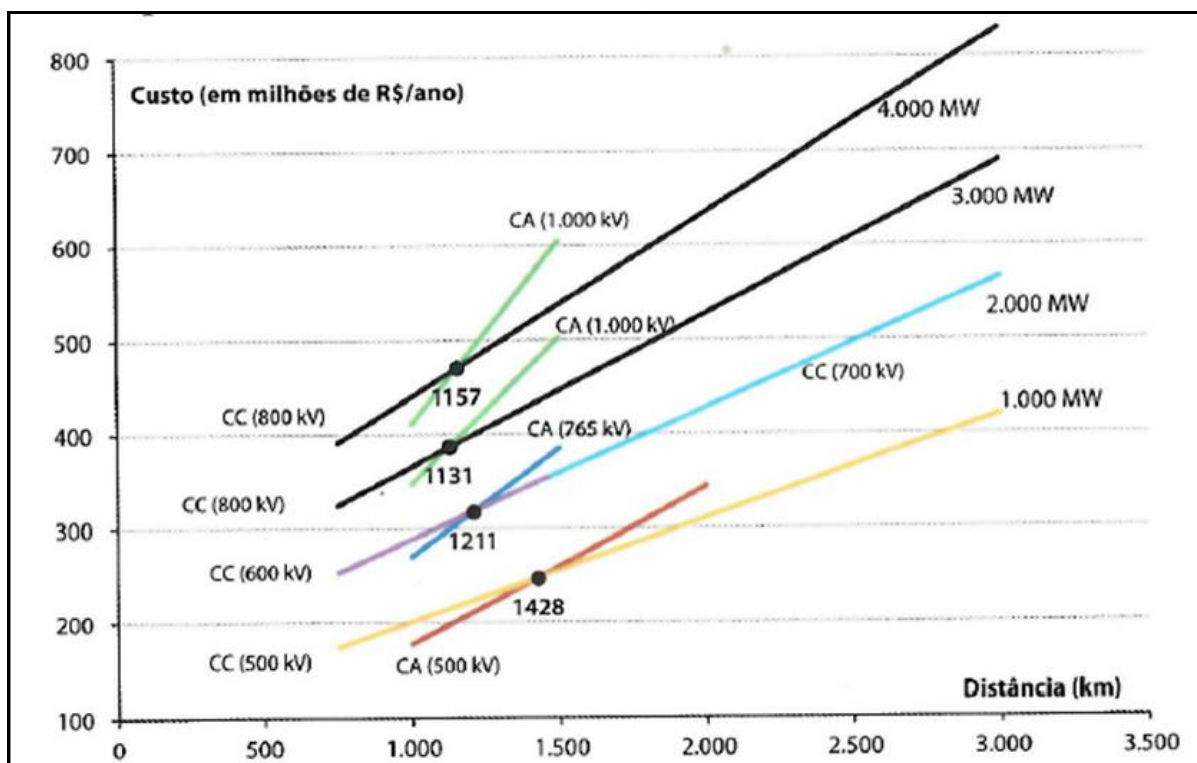


Figura 11: comparativo de custos entre HVDC e AC

Fonte FDTE (2012).

Com o gráfico da Figura 11, é bem evidente a aplicação de sistemas em HVDC para grandes distâncias, pois o custo das linhas, somados ao valor de manutenção e perdas é inferior ao sistema HVAC a partir de uma determinada distância.

## 6 CONCLUSÕES E OBSERVAÇÕES FINAIS

O conceito de Eficiência Energética baseia-se no princípio da diminuição de perdas em uma determinada atividade, ou seja, desempenhar um determinado processo utilizando menos energia. Neste contexto, podemos observar a validade da aplicação de sistemas de transmissão em HVDC no que se refere à Eficiência Energética, principalmente para longas distâncias.

Como as novas grandes fontes geradoras estão, geralmente, distantes dos maiores centros de carga, a aplicação dos sistemas em HVDC vem sendo bastante difundida. Principalmente pelo fato de que a transmissão em corrente contínua, como pôde ser observada neste trabalho, é mais eficiente. Porém outros fatores contribuem para a implantação deste sistema.

A transmissão em corrente contínua apresenta, para longas distâncias, custos inferiores à transmissão em corrente alternada convencional, para uma mesma potência nominal. Apesar do capital inicial para construção das estações conversoras serem elevados, para longas distâncias, a economia da linha de corrente contínua, compensa os investimentos dos terminais.

Outro fator favorável à transmissão em HVDC se deve a ocupação de uma menor faixa de servidão em complemento a um índice inferior de perdas, desta forma, contribui com o meio ambiente por diminuir o desmatamento e atenuar a contribuição para o efeito estufa. Portanto, este sistema de transmissão possui vantagens ao meio ambiente em comparação com a transmissão em AC convencional, pois por ser mais eficiente, gera uma menor emissão de dióxido de carbono pelo critério da energia conservada.

O presente trabalho atendeu os objetivos propostos, pois apresentou as vantagens da transmissão em HVDC em suas aplicações. Por possuir uma melhor Eficiência Energética, ter um custo de implantação mais baixo e gerar um impacto menor ao meio ambiente, a transmissão em HVDC é uma das melhores alternativas para transmissão de energia, principalmente na aplicação em longas distâncias. Provavelmente por este motivo existem vários projetos futuros e em andamento utilizando esta tecnologia no Brasil e no mundo.

## **7 REFERÊNCIAS**

ABB®. <<http://new.abb.com/br/empresa/abb-no-brasil/historia>> - visita em: 08/11/2014

ARRILLAGA, J., LIU, Y. H. e WATSON, N. R. **Flexible Power Transmission – The HVDC Options**. England, 2007.

ASSIS, A,K,T. **Os Fundamentos Experimentais e Históricos da Eletricidade**. Quebec, 2010.

CUSTÓDIO, D. T. **Utilização do Elo de Corrente Contínua para o Amortecimento**

**de Oscilações Eletromecânicas em Sistemas Elétricos de Potência.** Dissertação de Mestrado UNICAMP. Campinas, Março de 2009.

FDTE – Fundação para o Desenvolvimento Tecnológico da Engenharia. **Alternativas Não Convencionais Para a Transmissão de Energia Elétrica em Longas Distâncias.** Brasília, 2012.

JARDINI J. A. e NOLASCO J. F. **Impacts of HVDC Lines on the Economics of HVDC Projects.** CIGRE JWG-B2.17/B4/C1.17, June 2008.

KIMBARK, E. W. **General aspects of DC transmission and comparison of it with AC transmission.** In: **Direct Current Transmission.** Wiley-Interscience, 1971.

KUNDUR, P. **Power System Stability and Control.** McGraw-Hill, 1994.

ONS – Operador Nacional do Sistema. **Requisitos Mínimos para Transformadores e para Subestações e seus Equipamentos.** Submódulo 2.3, revisão 1.0, 2009. Disponível em: <http://www.ons.org.br>. Visualizado em 01/11/2014.

PATTERSON, M. **What is energy efficiency? Concepts, indicators and methodological issues.** Energy Policy, maio 1996.

SANTOS, M. L. **Transmissão de Energia Elétrica em Meia-Onda e em Corrente Contínua – Análise Técnico-Econômica.** Tese de Doutorado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2012.

SILVA, M, T, F. **Projeto & Desenvolvimento de um padrão para Alta Tensão em Corrente Contínua na Faixa de 1 kV a 50 Kv.** Dissertação de Mestrado PUC-Rio, 2011.

SOOD, K.V. **HVDC and Facts Controllers.** Boston, 2004.

SOLA, A. V. H. **Fatores Humanos como Barreiras para Eficiência Energética em Indústrias.** Dissertação de Mestrado, Universidade Tecnológica Federal do Paraná - TFP, 2006.

SZECHTMAN, M., MARUVADA P. S., e NAYAK, R. N. **800-KV HVDC on the horizon.** IEEE Power and Energy Magazine, April 2007.