

Sistemas Elétricos de Potência I

PROF. LUCAS CLAUDINO



Sumário

Unidade 1 | Introdução aos sistemas elétricos de potência (SEP)

Seção - 1.1 O sistema elétrico de potência (SEP)

Seção - 1.2 Equipamentos elétricos utilizados em SEP

Seção - 1.3 Subestações de energia

Unidade 2 | Análise do sistema elétrico de potência

Seção - 2.1 Sistema por unidade (PU)

Seção - 2.2 Geradores e cargas utilizados em SEP

Seção - 2.3 Introdução ao fluxo de potência



Sumário

Unidade 3 | Sistemas de transmissão em corrente contínua (HVDC)

Seção 3.1 - Introdução aos sistemas de transmissão em corrente contínua

Seção 3.2 - Sistemas HVDC com elo de corrente

Seção 3.3 - Sistemas HVDC com elo de tensão

Unidade 4 | Automação dos sistemas de distribuição de energia

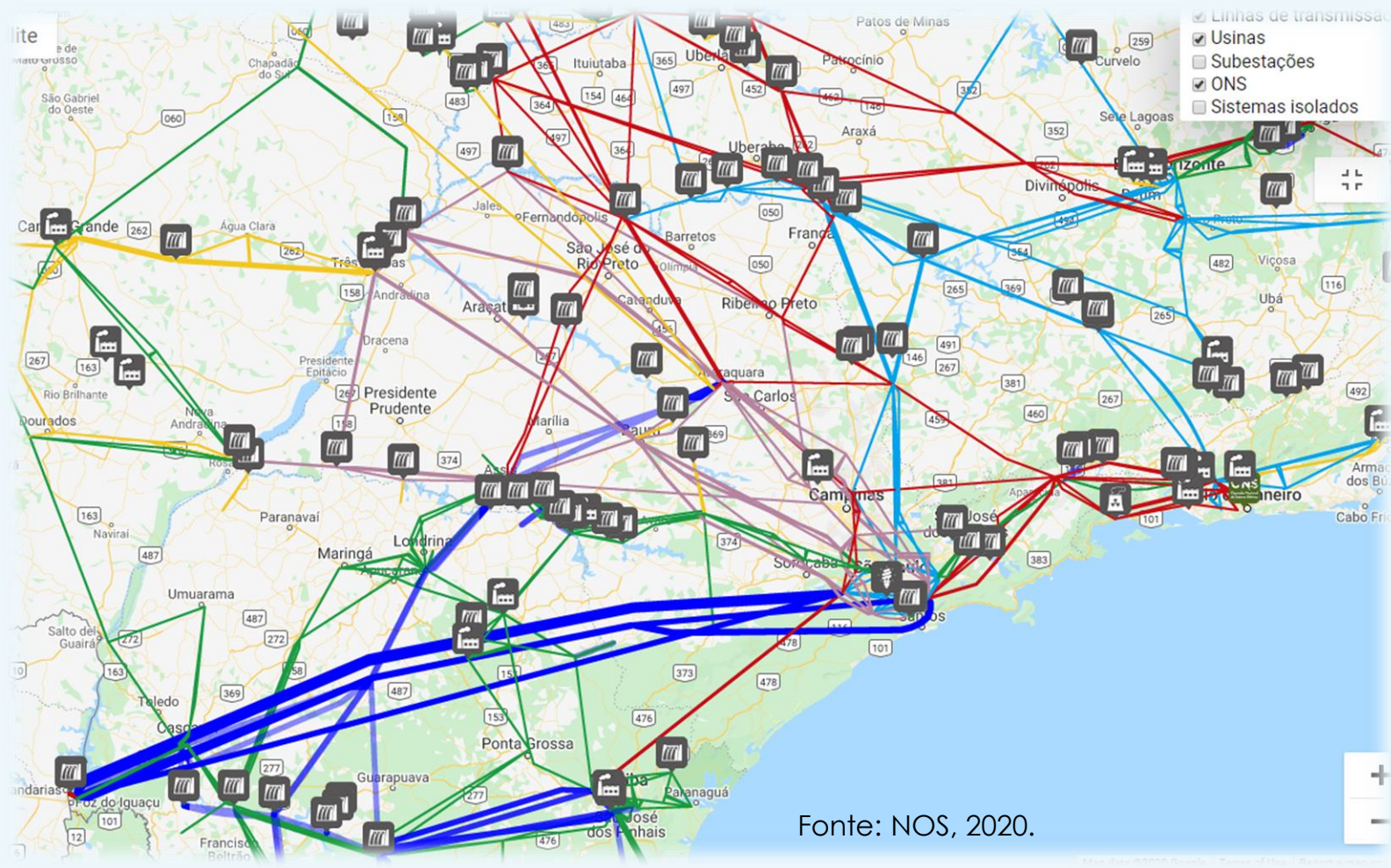
Seção 4.1 - Motivações para a automação do sistema de distribuição de energia

Seção 4.2 - Monitoramento das redes de distribuição

Seção 4.3 - O sistema de gerenciamento da distribuição e suas funções

CONCEITOS

Contextualização



<http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/mapas>

SEP

Longas
distâncias
Alta potência
Interferência

CONCEITOS

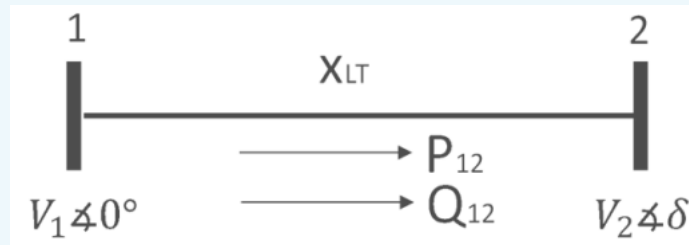
Introdução à transmissão em corrente contínua



Motivação

- Transmissão em CA: desvantagens para transmitir muita potência a grandes distâncias.

► Exemplo:



$$X_{LT} = 0,03 \text{ pu/km}$$

► Para 50 km: $X_{LT} = 0,03 \times 50 = 1,5 \text{ pu}$

► Para 500 km: $X_{LT} = 0,03 \times 500 = 15 \text{ pu}$

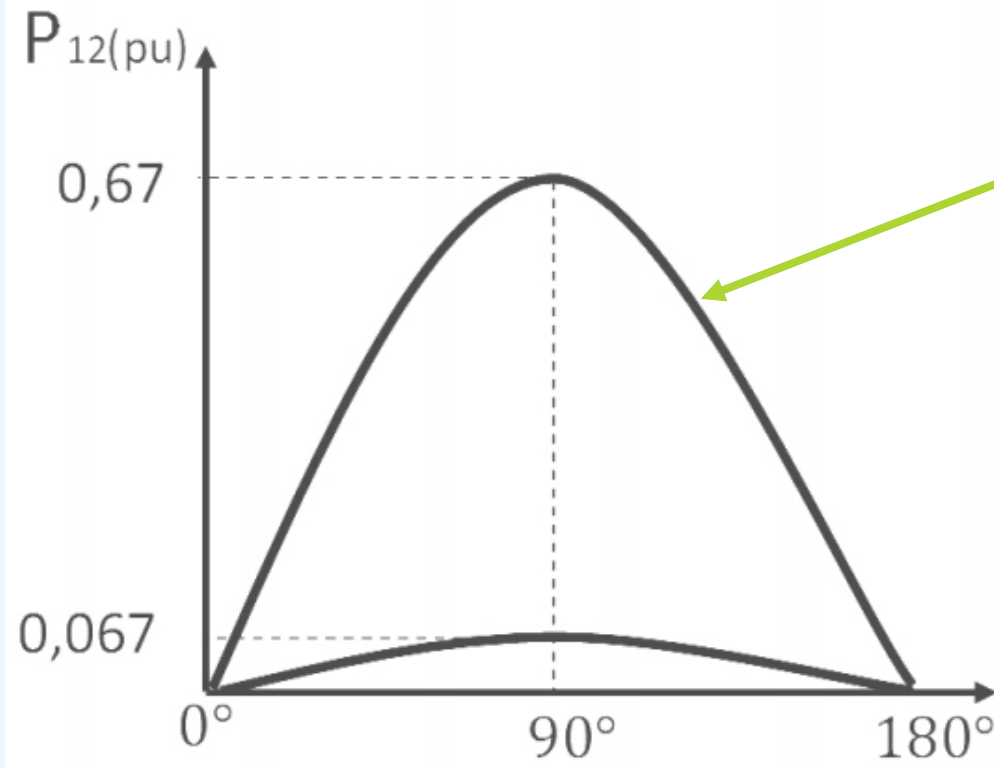
Fonte: Silva, 2019, p. 105.



Considerando que $|V_1|$ e $|V_2|$ permaneçam em 1 pu:

Potência ativa que trafega pela linha:

$$P_{12} = \frac{V_1 V_2}{X_{LT}} \sin(\delta)$$



Redução na capacidade de transferência de potência

Fonte: Silva, 2019, p. 106.



Motivação

- Redução de perdas -> aumento do nível da tensão;
- Elevação de tensão CC: grandes conversores de frequência;
- Elevação de tensão CA: possível uso de transformador;
- Bons resultados enquanto a demanda era baixa.



Linha do tempo

Até início
do séc.
XX: baixa
demanda

1945:
primeiro
sistema
HVDC

1954:
primeiro
uso
comercial
de HVDC

1901: válvula de mercúrio e
retificador a vapor de mercúrio

Fonte: elaborada pelo autor.



Linha do tempo

1972: primeiro HVDC
com válvulas de
tiristores

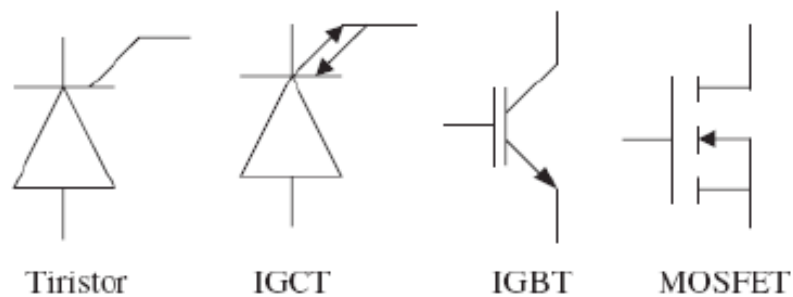
1990: evolução de
semicondutores

Fonte: elaborada pelo autor.

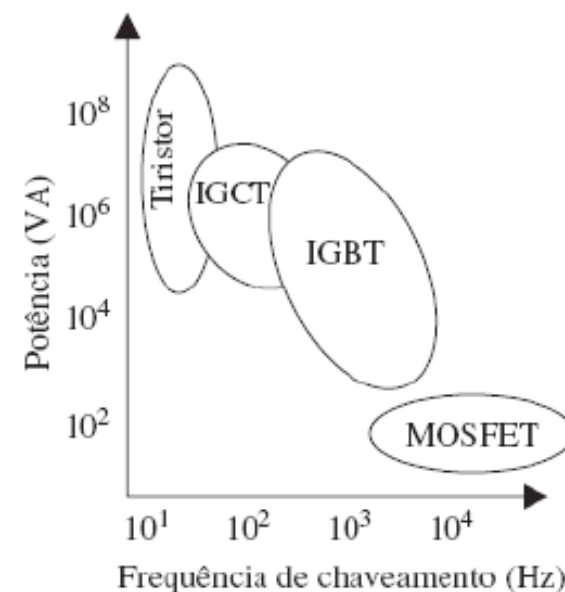
1970-2000: evolução
de conversores
comutados



Dispositivos semicondutores de potência Tiristor, IGCT IGBT e MOSFET



(a)

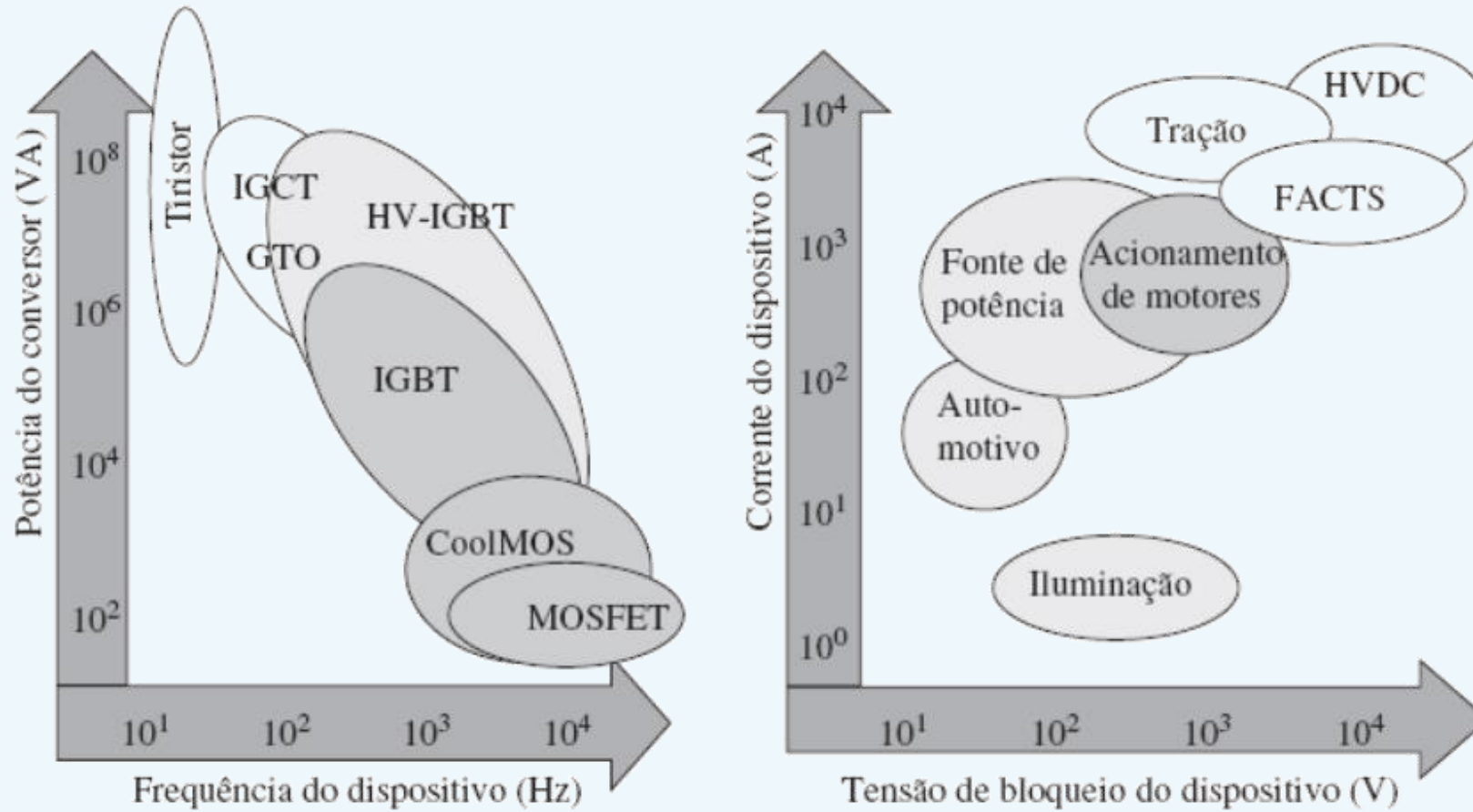


(b)

Fonte: Mohan (2014, p.101).



Desenvolvimento e escolha de semicondutores



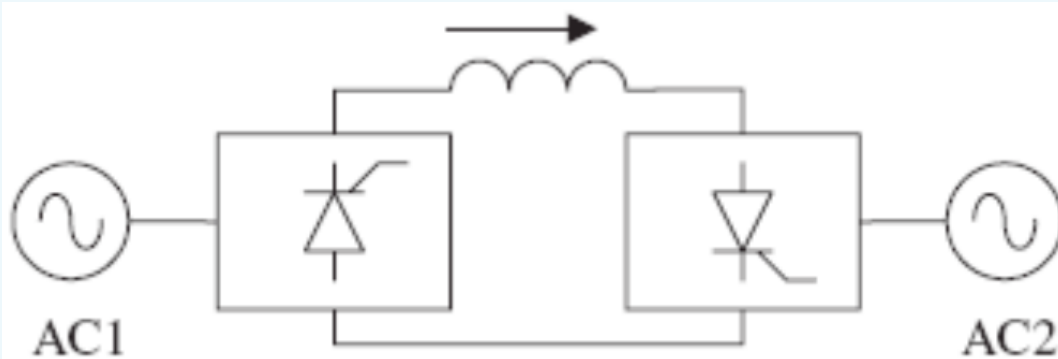
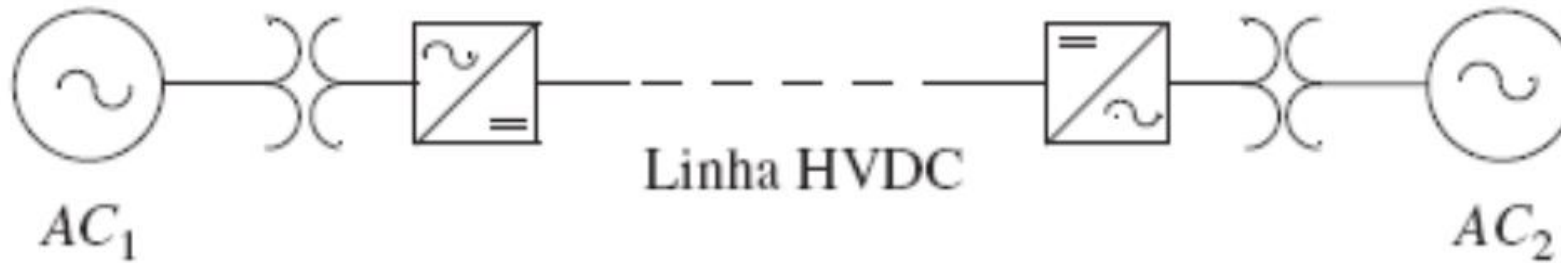
Fonte: MOHAN, 2014, p. 102.

CONCEITOS

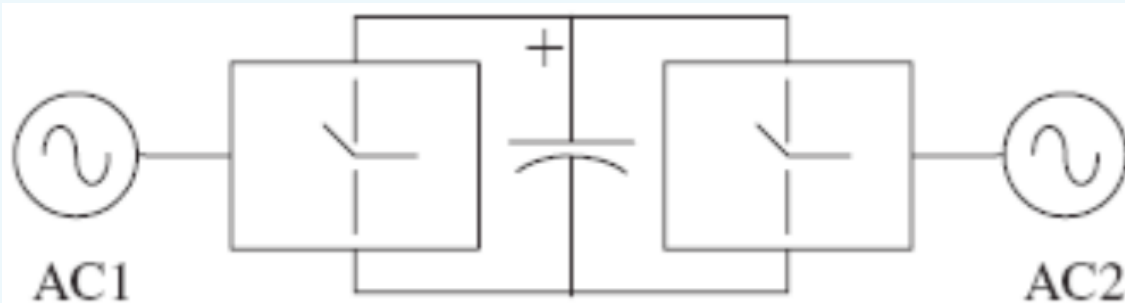
Transmissão em corrente contínua



Sistema HVDC - Corrente Contínua em Alta Tensão



HVDC com elo
de corrente



HVDC com elo
de tensão



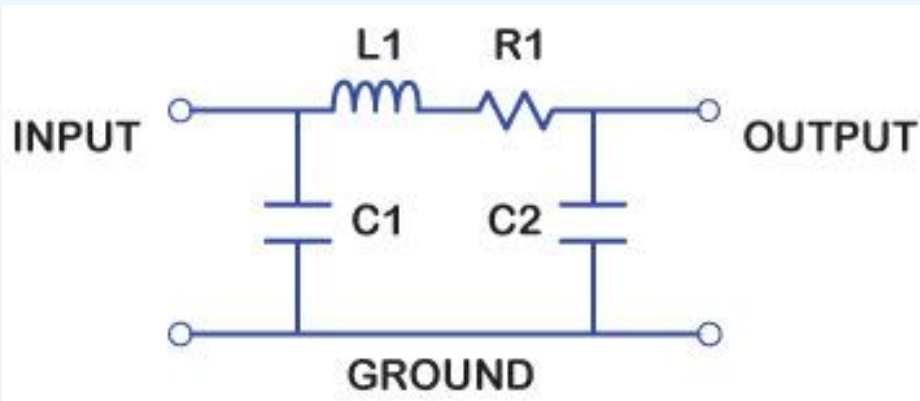
Elementos de um HVDC

- Disjuntor CA: isolação em caso de falhas;
- Filtro CA e banco de cap.: filtrar harmônicos do conversor;
- Reatores e filtros CC: reduzir ondulação e proteger dispositivos durante a comutação

**Conversor → principal
componente**



Vantagens do HVDC - 1



- Maior a LT -> mais componentes são adicionados!
- RC é um filtro e atenua tensões.
- Maior RC -> maior atenuação
- **DC -> $Z_L=0$ e $Z_c=\text{inf.}$**



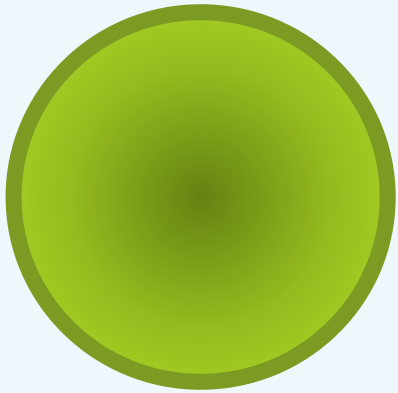
Vantagens do HVDC - 2

$$S = P + jQ$$

- DC só transfere potência ativa! O que realmente interessa!



Vantagens do HVDC - 3



- ▶ \uparrow freq. \downarrow seção efetiva \uparrow Resist.
- ▶ **DC usa toda a seção!!!**

Fonte: elaborada pelo autor.



Vantagens do HVDC - 4

- ▶ **DC:** facilidade de conexão entre sistemas distintos
 - Mesma magnitude e mesma polaridade
 - Conexão com diodos ainda protege contra polaridade reversa
- ▶ **AC:** dificuldade de conexão entre sistemas distintos:
 - Mesma magnitude
 - Mesma fase
 - Mesma forma
 - Mesma frequência



Desvantagens do HVDC

- Necessário mais pot. reativa no conversor;
- Manutenção frequente dos isoladores;
- Perdas adicionais em transformadores e conversores;
- Necessidade de boa refrigeração;
- Semicondutores de potência: tecnologia cara;
- Introdução de harmônicos.

SITUAÇÃO PROBLEMA

SP: Consultoria
para sistema de
transmissão



Situação Problema

- ▶ **Você:** consultor de planejamento de sistemas de transmissão.
- ▶ **Desafio:** licitação para LT maior que 700 km conectando dois sistemas CA.
- ▶ **Complicações** ambientais (direitos);
- ▶ **Instabilidade;**
- ▶ **Alta radiointerferência**



Fonte: Elaborado pelo Autor (2022)

**Qual tecnologia
utilizar?**

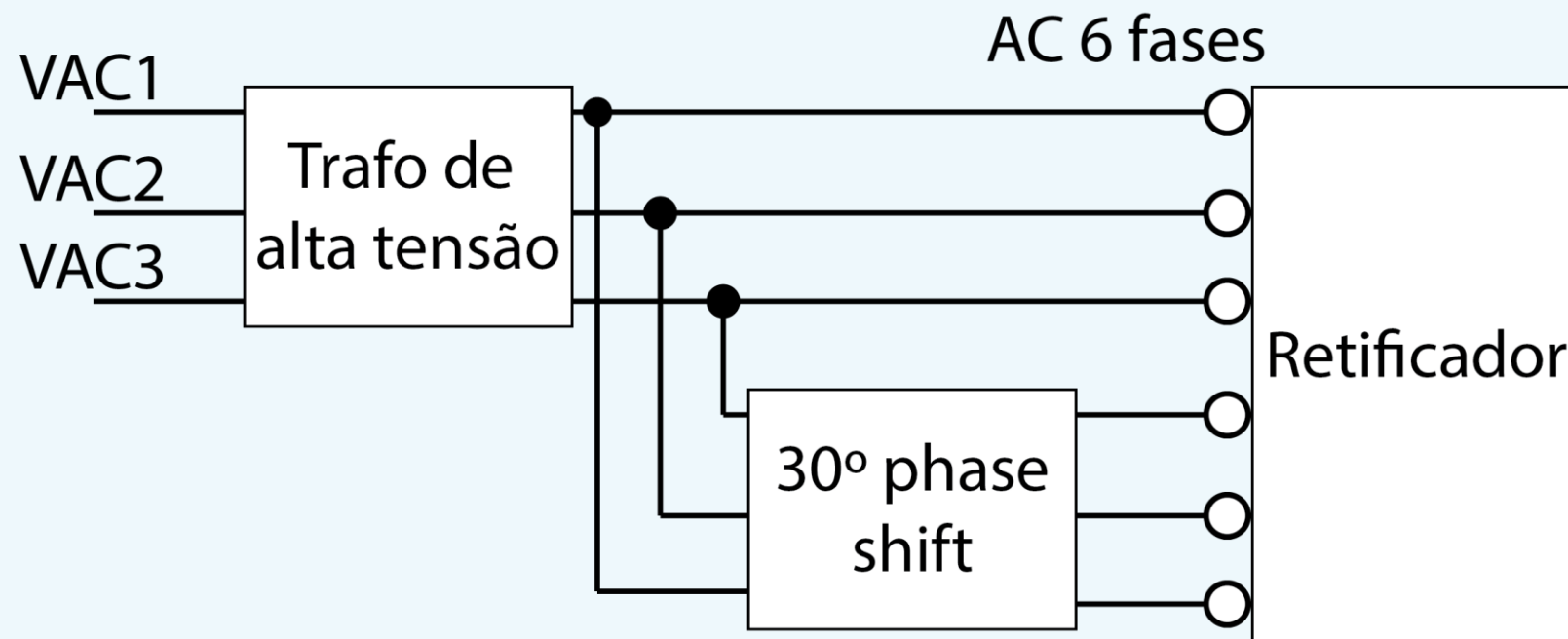


Resolução da SP

- ▶ Utilizar HVDC
 - Boa para transmissão de grandes potências;
 - Economia em cabeamento e torres de sustentação;
 - Grandes distâncias -> CA oferece muitas perdas
 - CA -> necessidade de manipulações intermediárias;
 - HVDC: menos susceptível a radiointerferências;
 - Baixas perdas por efeito corona



Resolução da SP



Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)

EXERCÍCIOS





As restrições socioeconômicas e ambientais para a construção de novas linhas de transmissão têm sido um entrave para a expansão dos sistemas de transmissão. Dessa forma, no planejamento da transmissão busca-se sempre diversificar as fontes de geração e, concomitantemente, busca-se otimizar a área ocupada pelas linhas de transmissão com a garantia de uma maximização da sua capacidade de transmissão de energia.

Assinale a alternativa em que contém uma justificativa viável para construção de uma linha HVDC.

- a) As linhas HVDC são mais baratas que as linhas de transmissão convencionais CA.
- b) É possível utilizar linhas de transmissão CC por conta da facilidade de conversão de tensão utilizando transformadores.
- c) Em alguns casos os limites de estabilidade das linhas CA podem ser alcançados mais facilmente, pois com o aumento da distância também se aumenta a reatância da linha.
- d) Ao realizar a transmissão CC em baixas tensões, as perdas de transmissão são menores que quando utilizadas as linhas de transmissão CA em altas tensões.
- e) O uso da tecnologia HVDC não exige elementos de eletrônica de potência que causam harmônicas na linha e, dessa forma, tornam-se mais viáveis que as linhas CA.



► Quando falamos de sistemas de transmissão em corrente contínua, podemos destacar algumas vantagens em relação aos tradicionais sistemas CA. Considere as afirmativas a seguir sobre as principais vantagens do sistema HVDC:

I - As perdas por efeito corona são baixas, e a radiointerferência é menor.

II - A estabilidade transitória do fluxo de potência pode ser melhorada ao se fazer uma conexão paralela de linhas HVAC (*high-voltage alternating current*) e HVDC.

III - Estações intermediárias são necessárias.

Assinale a alternativa correta.

- a) Apenas as afirmativas I e II são corretas.
- b) Apenas as afirmativas I e III são corretas.
- c) Apenas as afirmativas II e III são corretas.
- d) Todas as afirmativas estão corretas.
- e) Nenhuma afirmativa está correta.



- A aplicação do HVDC é destinada a transmitir _____ quantidades de potência por _____ distâncias, onde um sistema de transmissão CC tende a ser mais econômico que um sistema de transmissão CA. Por exemplo, quando se utiliza a transmissão de energia por meio de cabos submarinos, o sistema HVDC é quase sempre a opção _____.

Assinale alternativa que completa corretamente os espaços do texto.

- a) Pequenas – longas – descartada.
- b) Pequenas – pequenas – descartada.
- c) Grandes – pequenas – escolhida.
- d) Grandes – longas – escolhida.
- e) Grandes – pequenas – descartada.



Uma das aplicações das linhas de transmissão em corrente continua é a interligação de fazendas eólicas de geração de energia em alto mar, aplicações chamadas de offshore.

Com base na escolha por linhas de transmissão em CC, avalie a seguinte asserção preenchendo suas lacunas:

Dentre as _____ do uso da corrente continua nessas aplicações é que as linhas de transmissão produzem campos magnéticos e elétricos estáticos, os quais são incapazes de induzir correntes e tensão em objetos próximos as instalações por meio de acoplamento indutivo ou capacitivo. Um outro aspecto _____ das linhas de transmissão em corrente continua em aplicações offshore é que em condições de mau tempo, os níveis de ruído devido à radio interferência são _____ em relação à corrente continua.

Assinale a alternativa correta:

Escolha uma:

- a.melhorias – econômico – iguais
- b.vantagens – positivo – menores
- c.desvantagens – interessante – maiores
- d.desvantagens – negativo - maiores
- e.vantagens – menor – negativos



Usina Hidroelétrica Santo Antônio, a quarta em geração no Brasil, utiliza transmissão em corrente contínua para interligação com o Sistema Interligado Nacional .

“A Usina Hidrelétrica Santo Antônio, localizada no rio Madeira, com sede no Município de Porto Velho (RO), tem potência instalada mínima de 3.568,8 MW e 2.424,2 MW médios de energia assegurada e é composta por 50 turbinas do tipo Bulbo.[...] A construção da UHE Santo Antônio teve início em setembro de 2008 e, iniciou sua operação comercial em março de 2012. Em 03 de janeiro de 2017, a usina foi concluída, entrando em operação plena com a capacidade para fornecer energia elétrica suficiente para abastecer cerca de 45 milhões de habitantes.[...]

Sistema de conexão associado

A Hidrelétrica Santo Antônio está conectada ao Sistema Interligado Nacional (SIN) por duas linhas de transmissão em alta tensão (600 kV) e corrente contínua. E outra linha de 230kV, construída para atender ao consumo exclusivo dos Estados de Rondônia e Acre. Com extensão de 2.375 km – a mais longa do mundo – essas linhas ligarão a subestação conversora construída na cidade de Porto Velho (RO), à subestação de Araraquara, no estado de São Paulo, após atravessar cinco estados e 90 municípios. A produção da Hidrelétrica Santo Antônio é colocada no Sistema Interligado Nacional (SIN) pela subestação de Araraquara e distribuída aos consumidores de todas as regiões do país. Este sistema de transmissão permite a conexão total do estado de Rondônia ao SIN, também realizada parcialmente pelo sistema Acre-Rondônia. Essa conexão aumenta a qualidade e confiabilidade da energia elétrica recebida e permite a desativação das térmicas instaladas na região.[...]"



Considerando as vantagens e desvantagens da transmissão em corrente contínua, marque falso (F) ou verdadeiro(V) para as afirmações a seguir:

- () Para o projeto de interligação da Hidrelétrica Santo Antônio com o SIN foi escolhida a transmissão em corrente contínua devido ao menor custo, em relação a transmissão em corrente alternada, para transmissão a grandes distancias como nesse projeto onde as conexões estão separadas por 2375km.
- () Uma desvantagem da transmissão em corrente contínua é a necessidade de subestações intermediárias.
- () A necessidade de investimentos em conversores de alto custo representa uma desvantagem do sistema de transmissão em corrente contínua em relação ao sistema de corrente alternada.
- () No projeto de interligação da Hidrelétrica de Santo Antônio ao SIN um dos fatores que reduziram o custo da linha de transmissão foi o fato da transmissão em corrente contínua utilizar apenas dois cabos, um para cada pólo, o que reduz também o dimensionamento das torres que irão suportar um número menor de cabos.
- () A linha de transmissão entre a Hidrelétrica de Santo Antônio e Araraquara em São Paulo passa por regiões de clima tropical chuvoso. Segundo Vasconcelos (2015), uma das vantagens da transmissão em corrente contínua em relação a corrente alternada é a diminuição do efeito corona em situações de tempestades, as perdas no sistema de corrente contínua são menores que nos sistemas de corrente alternada.

A seguir assinale a alternativa com a sequência correta.

- a.V-V-V-F-F
- b.F-F-V-F-F
- c.V-F-V-V-V
- d.F-F-V-F-V
- e. V-V-F-F-V





" As vantagens técnicas aliadas às vantagens de ordem econômica oferecidas por linhas ou cabos de custos mais baixos, a redução nas faixas de servidão e os níveis mais baixos de campos eletromagnéticos tornam a utilização de elos de corrente contínua uma boa opção para a transmissão de energia em longas distâncias." Analisando o conjunto de vantagens relacionadas à transmissão em corrente contínua, verifique as afirmações a seguir e assinale a alternativa INCORRETA:

- a. O solo representa um ótimo condutor para a corrente contínua, por isso em projetos onde há a necessidade de linhas subterrâneas a transmissão em corrente contínua deve ser considerada em conjunto com outros fatores como potência a ser transmitida e distância entre as conexões.
- b. Diminuição das perdas por efeito Joule, considerando mesma seção e mesmo nível de isolamento dos condutores: um sistema de transmissão em corrente contínua otimizado gera menores perdas que um sistema em corrente alternada. para uma mesma capacidade de potência.
- c. Linhas de transmissão em corrente contínua apresentam um custo de implantação menor em relação à corrente alternada por utilizarem menos cabos e consequentemente torres transmissão mais leves.
- d. Do ponto de vista ambiental a transmissão em corrente contínua apresenta vantagens como a necessidade de áreas menores para a faixa de servidão.
- e. Para a transmissão de grandes blocos de potência a longas distancias a transmissão em corrente contínua em geral se mostra econômica e tecnicamente vantajosa em relação a corrente alternada.

INTERVALO

Sistemas Elétricos de Potência I

PROF. LUCAS CLAUDINO