



Laboratório de Qualidade da Energia Elétrica

www.feis.unesp.br/laqee

Transmissão em Corrente Contínua

Módulo 1

Luís Carlos Origa de Oliveira

✓ **1. A Batalha dos Sistemas CA e CC**

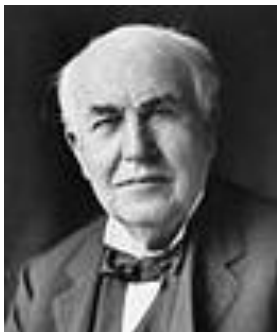
2. Viabilidade da Transmissão em CC

3. Conversores CA-CC e a Tecnologia HVDC

4. Características Operacionais dos Conversores

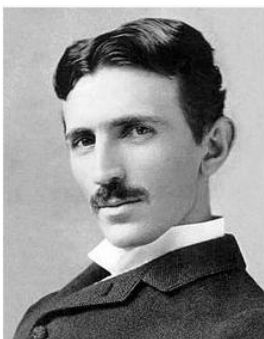
5. Interação Entre os Sistemas CA e CC

6. Modelo CC e Variáveis de Controle



Thomas A. Edison (1847-1931)

Americano, grande inventor do século 19. Baseava-se muito no processo de tentativa e erro para desenvolver seus projetos, ignorando a teoria. Desenvolveu vários dispositivos que influenciaram a vida humana em todo o planeta.



Nikola Tesla (1856-1943)

Nascido no Império Austro Húngaro, atualmente pertencente à Croácia. Desde sua infância, destacou-se pela descomunal inteligência e criatividade exacerbada. Inventor nato e detinha um grande conhecimento teórico.

Em **1882**, já com grande aceitação e financiado pela grande empresário J.P. Morgan, Edison desenvolveu todo um sistema de geração e distribuição de Corrente Contínua para iluminação pública da cidade de Nova Iorque, primeira no mundo a substituir o antiquado método de iluminação a gás, por energia elétrica.

Edison vislumbrou os Estados Unidos inteiro utilizando o seu sistema de geração e iluminação, fato este que lhe rendeu uma renda incalculável.



Thomas Edison



J. P. Morgan

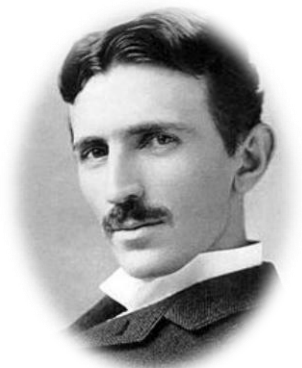
Tesla, trabalhando na França conheceu Charles Batchelor que encantado com seu brilhantismo recomendou-o a Thomas Edison com a carta de apresentação: *"I know two great men, one is you and the other is this young man"*.

Surgiu então a oportunidade de explicar ao seu chefe sobre a **Corrente Alternada**. Recebeu críticas severas de Edison que classificou a CA como perigosa e ainda sustentava que na América já estava sendo implantada a CC. Começaram aí as desavenças entre ambos.

Tesla demitiu-se e em menos de três anos já tinha registrado diversas patentes em aplicações de CA.

Como reconhecimento acadêmico, foi convidado a participar da AIEE (American Institute of Electrical Engineers), atual IEEE.

A teoria da CA encantou George Westinghouse, que viu oportunidade de lucrar neste campo. Ofereceu emprego a Tesla em sua empresa a Westinghouse Electrical Company. A **batalha CA x CC** começava a ser travada.



Nikola Tesla



G. Westinghouse

CC x CA



Corrente Contínua



Edison



Morgan



Corrente Alternada



Tesla

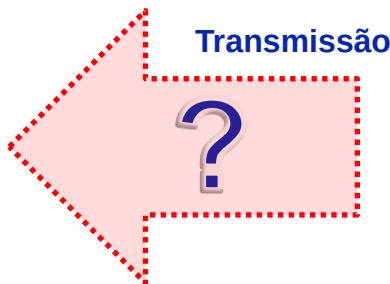


Westinghouse

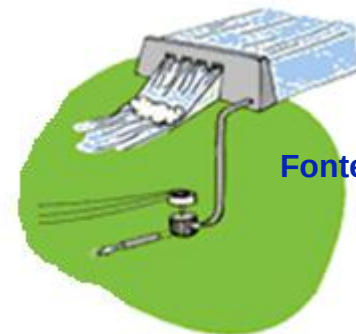
- ✓ questões científicas envolvidas nessa disputa favorecia da CA;
- ✓ para desqualificar o uso da CA, os defensores da CC se apoiavam na demonstração dos perigos oferecidos pelo uso da CA;
- ✓ embate decisivo foi no processo licitatório para escolha do sistema de geração e distribuição de energia elétrica de Niagara Falls para alimentar a cidade de Buffalo situada a 40 km de distância;
- ✓ Westinghouse Company ganhou com um orçamento substancialmente inferior (1890).
- ✓ A primeira batalha foi vencida pela CA de Tesla



Consumo



Transmissão



Fonte de Energia

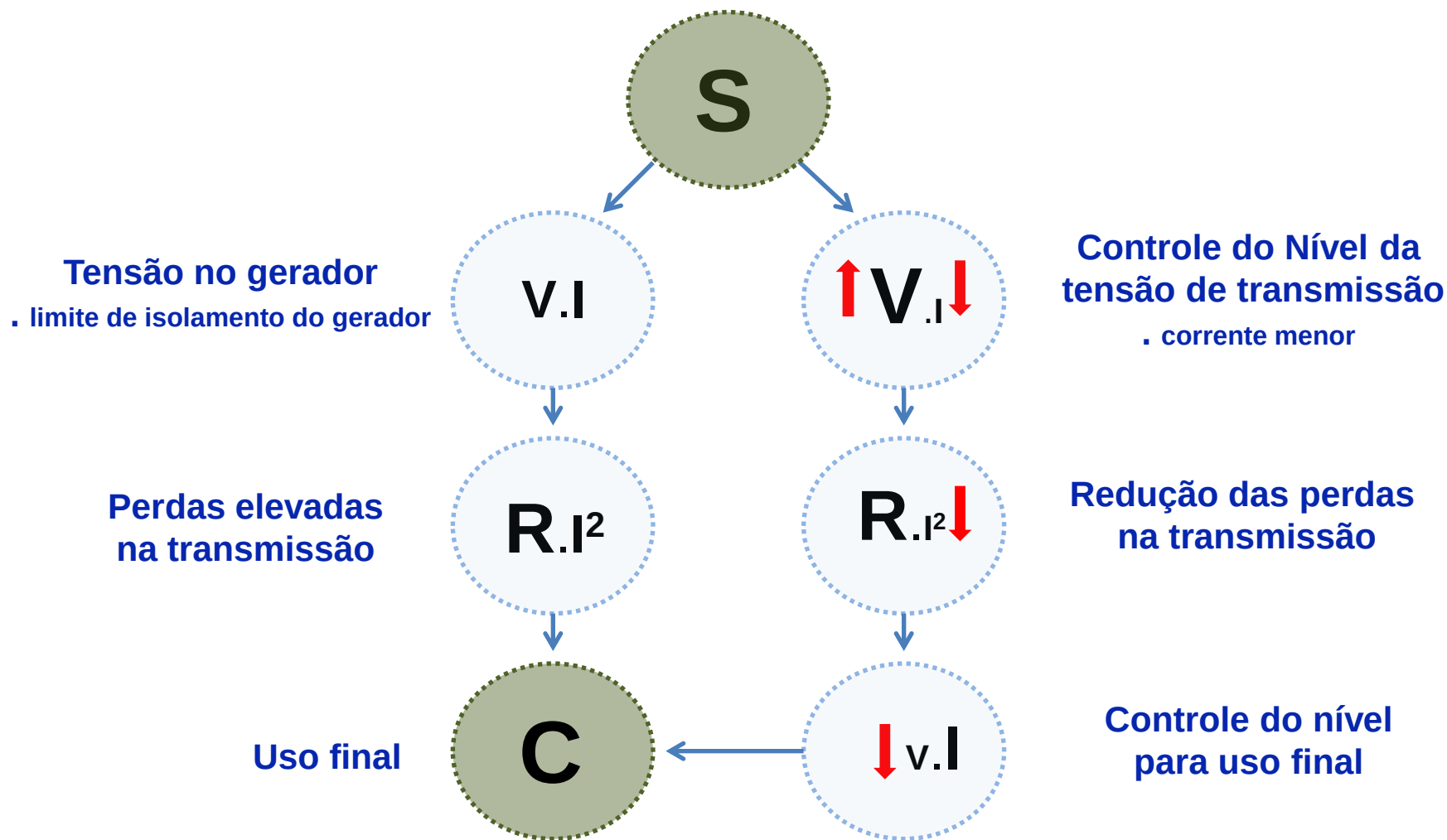
A potência transmitida é proporcional ao produto da tensão pela corrente elétrica

$$S = V.I$$

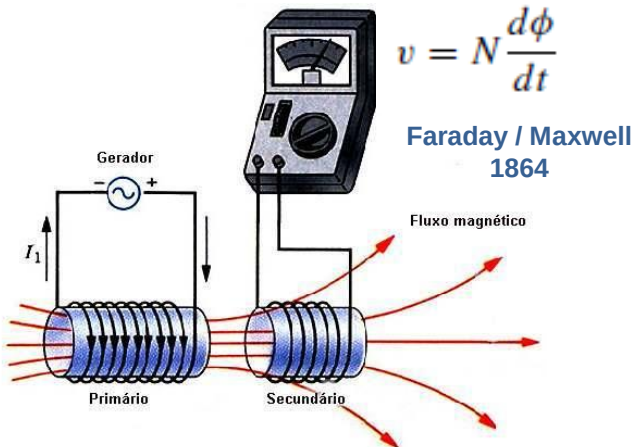
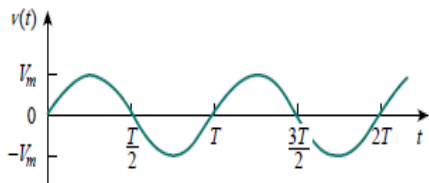
Parte da potência transmitida é dissipada na forma de calor

$$P = R.I^2$$

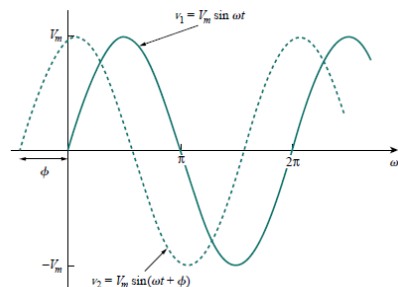
Potencia disponível na geração



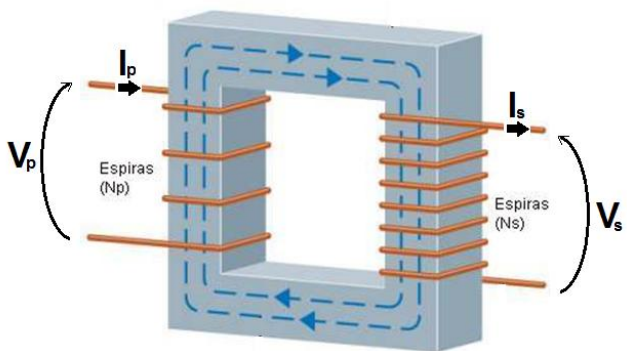
Geração com forma de onda senoidal



Derivadas e integrais são funções senoidais



Adequação dos níveis de tensão:



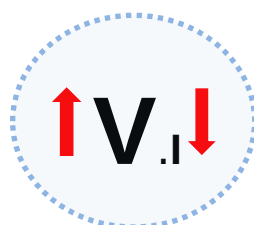
$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{N_p}{N_s} \quad I_p N_p = I_s N_s$$

“Transformador”



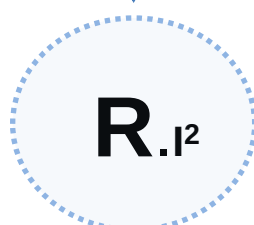
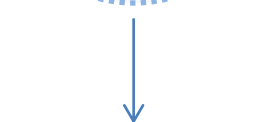


Potencia disponível na geração



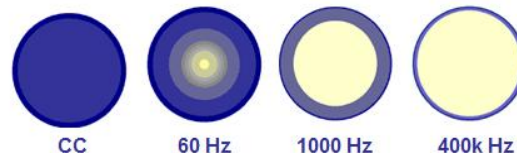
Controle do Nível da tensão de transmissão

- . Inviável de CC até a década de 50
- . Possível em CA com o uso de transformadores



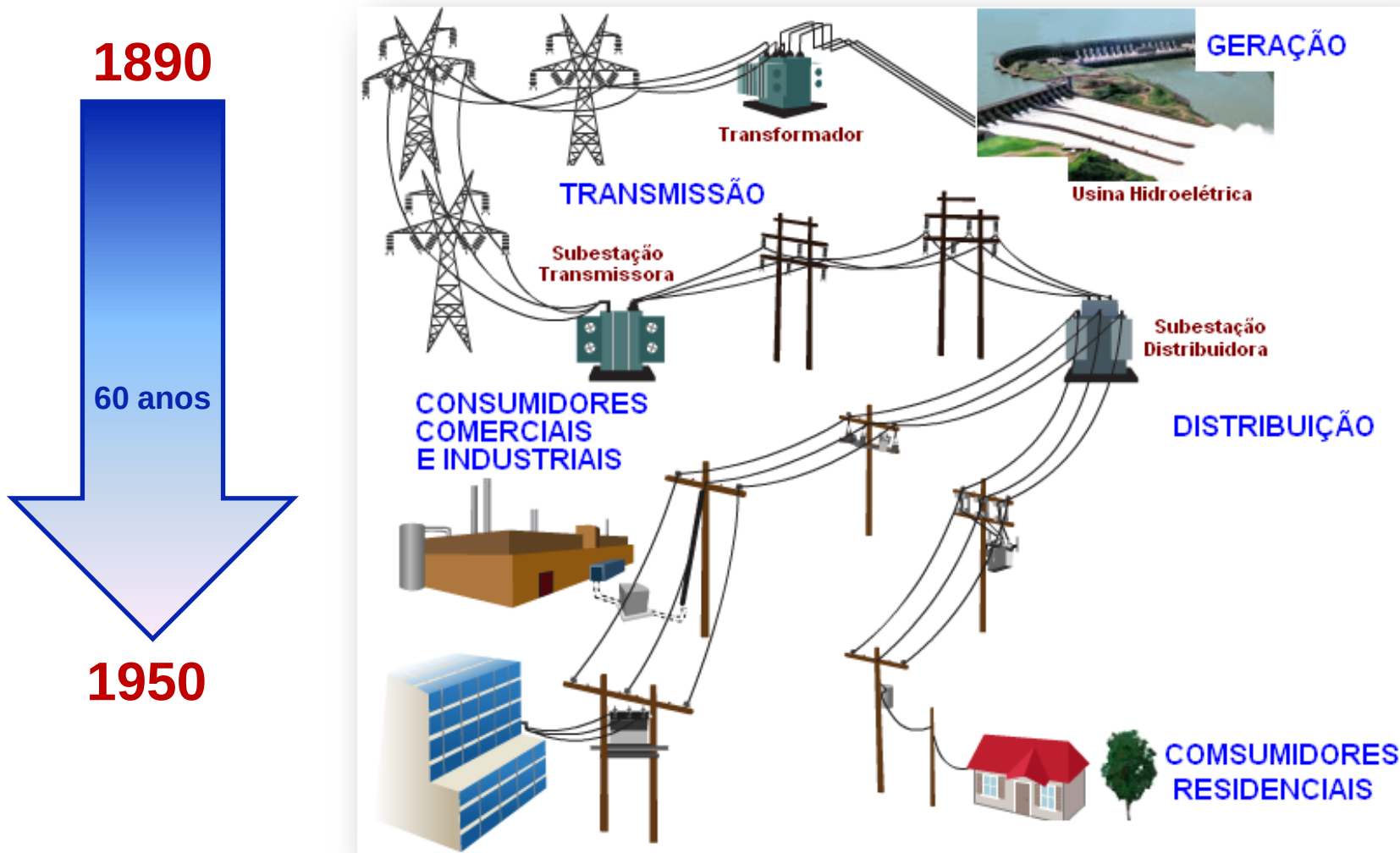
Redução das perdas na transmissão

- . $R_{ca} > R_{cc}$ (efeito pelicular)



- . Para a mesma corrente I , as perdas em CC são menores.

Constituição básica de um sistemas de transmissão em CA



1. A Batalha dos Sistemas CA e CC

✓ 2. Viabilidade da Transmissão em CC

3. Conversores CA-CC e a Tecnologia HVDC

4. Características Operacionais dos Conversores

5. Interação Entre os Sistemas CA e CC

6. Modelo CC e Variáveis de Controle

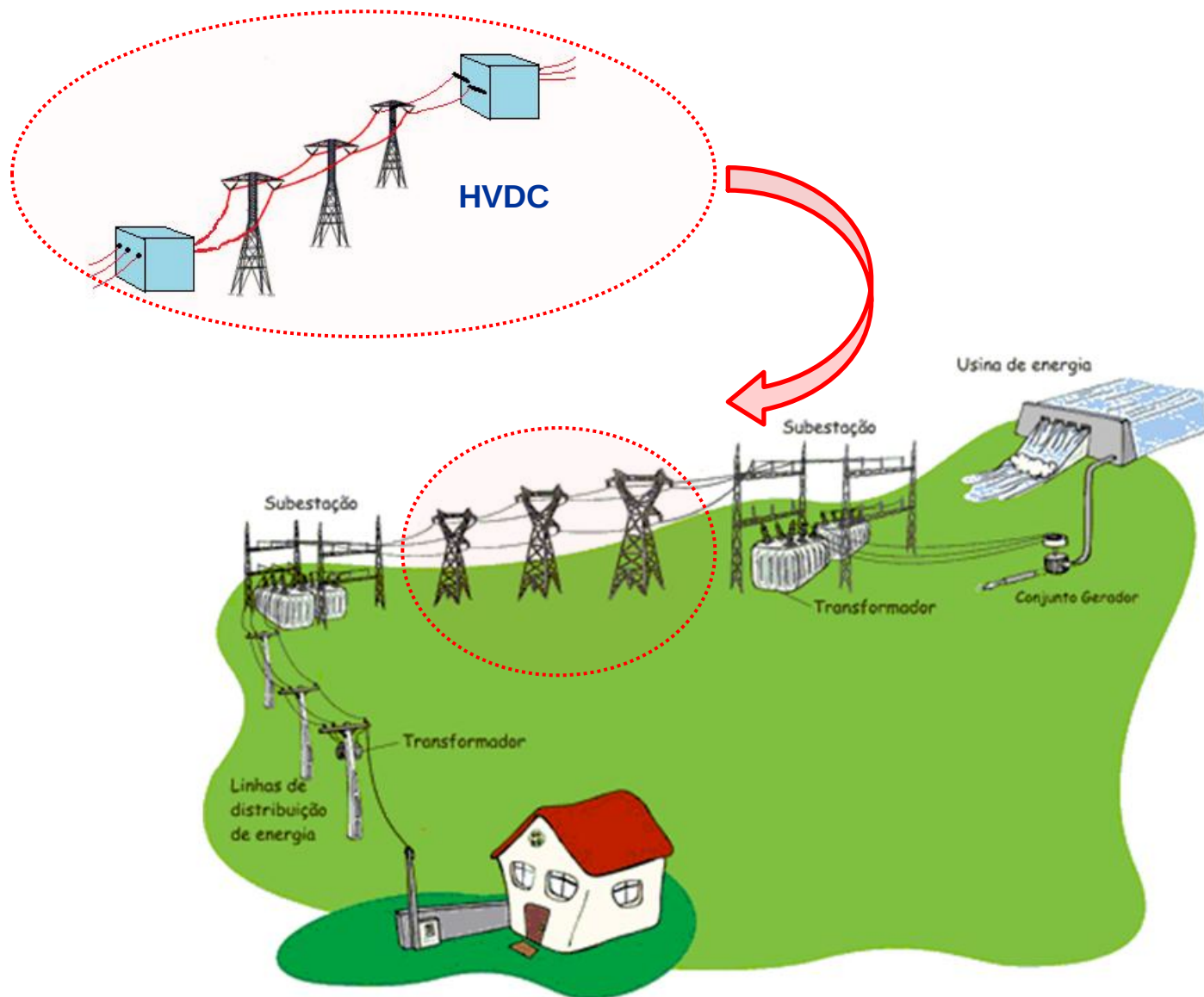
Marco histórico: 1958 (chaves eletrônicas - semicondutores dopados - silício).

Três grupos:

Diodos : o estado de operação é controlado pelo circuito de potência.

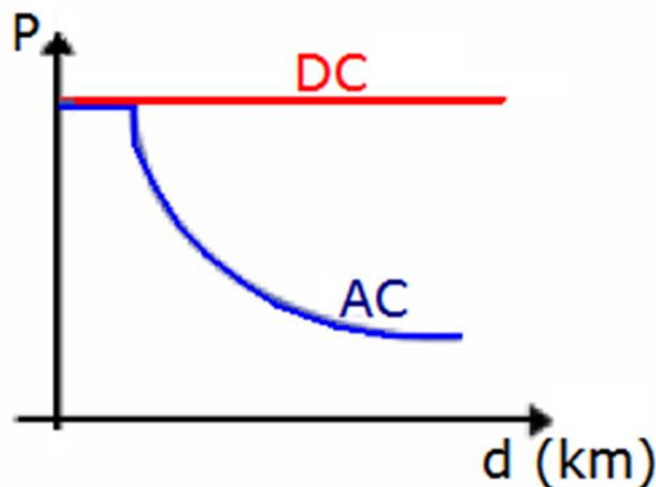
Tiristores : condução através de um sinal de controle + polarização direta
bloqueio é feito pela interrupção da corrente no circuito de potência.

Chaves Controladas : conduzem e bloqueiam através de sinal de controle.
(GTO, MOSFET, IGBT, MCT)



Capacidade de Transmissão / Comprimento da Linha

- ✓ **Transmissão CC** : não tem restrições técnicas que limitam o comprimento da linha
- ✓ **Transmissão CA** : necessidade de compensação reativa série e paralela



Ex: em 1.500 Km de linha, o sistema HVDC perde menos de 8% da sua capacidade de transmissão de energia, enquanto o sistema de corrente alternada pode perder até 25%.

Transmissão aérea:

Condutores iguais: $I_{cc} = I_{ca}$

Mesma cadeia de isoladores: $V_{cc} = \sqrt{2}V_{ca}$

Potência Ativa por fase: $P_{ca} = V_{ca}I_{ca} \cos \phi$

Potência por pólo: $P_{cc} = V_{cc}I_{cc}$

Nestas condições tem-se:

Relação de potências:

$$\frac{P_{cc}}{P_{ca}} = \frac{V_{cc}I_{cc}}{V_{ca}I_{ca} \cos \phi} = \frac{\sqrt{2}V_{ca}I_{ca}}{V_{ca}I_{ca} \cos \phi} = \frac{\sqrt{2}}{\cos \phi}$$

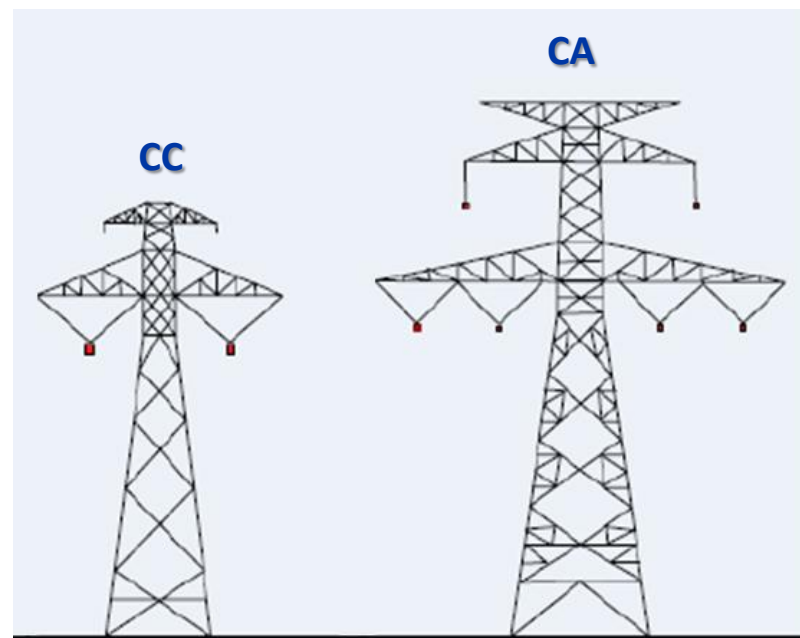
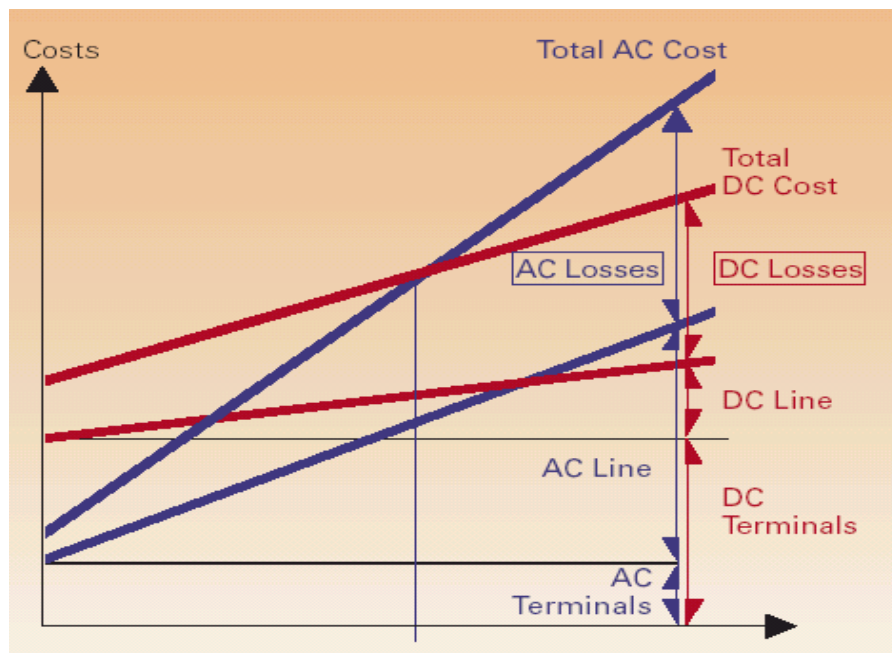
Relação de Potência totais ($\cos \phi = 0,94$):

$$\frac{P_{cc}^T}{P_{ca}^T} = \frac{2P_{cc}}{3P_{ca}} = \frac{2(1,5P_{ca})}{3P_{ca}} = 1$$

MESMA CAPACIDADE DE TRANSMISSÃO

• **MESMA CAPACIDADE DE TRANSMISSÃO em HVDC COM:**

- 2/3 do número de isoladores
- 2/3 do comprimento total dos condutores
- Secção transversal menor
- Estruturas mais simples
- Perdas menores (efeito pelicular)



Distâncias de Transmissão Críticas:

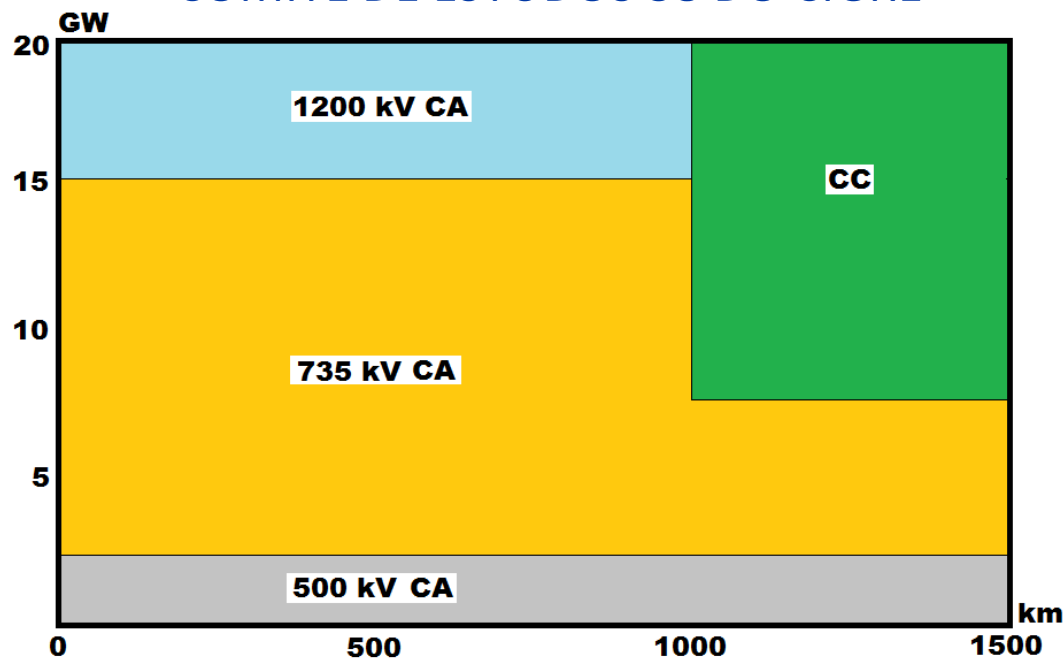
✓ Linhas Aéreas : $300\text{km} < D < 600\text{km}$

Opção economicamente atraente para transmissão de grandes blocos de energia a longas distâncias

• TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

- 70 % a 80 % dos custos unitários decorre das linhas de transmissão;
- Não há tecnologia mais econômica que outras para todos os níveis de potência a ser transmitida;
- As perdas são determinantes nos estudos econômicos.

• COMITÊ DE ESTUDOS 38 DO CIGRÉ



- Entre 1000 e 1500 km e acima de 7 GW a transmissão CC é a mais indicada

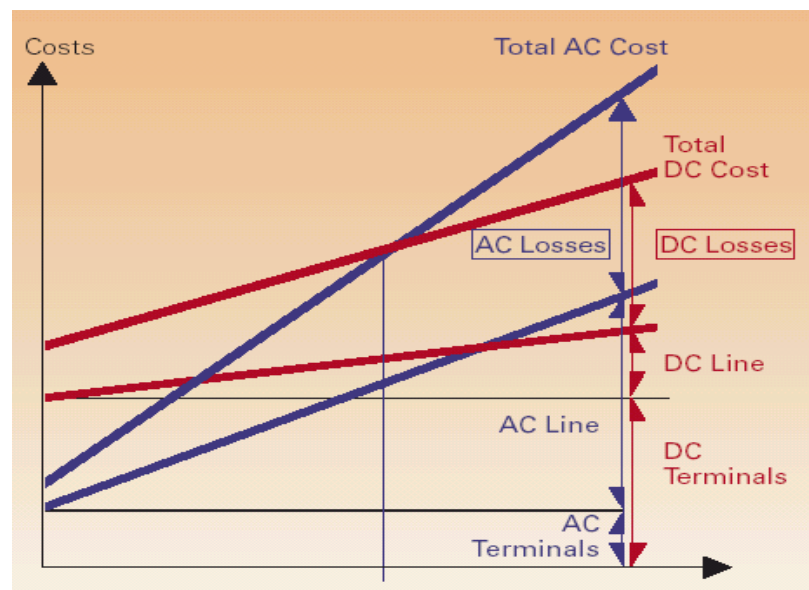
• Transmissão por cabos:

Suportabilidade de tensão

- CA 100 kV / cm
- CC 300 kV / cm

Energia reativa em CA:

- 3000 kVar / Km (à 220 kV)
- (CC dispensa compensação)



Distâncias de Transmissão Críticas:

√ Cabos : $30\text{km} < D < 50\text{km}$

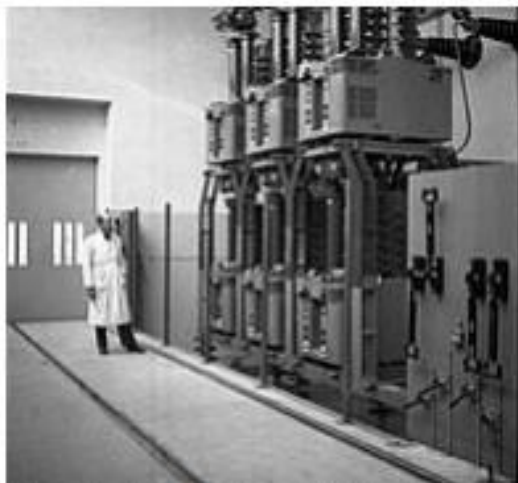
Travessias marítimas
Zonas urbanas congestionadas

Após a construção de várias linhas experimentais ...

Primeira transmissão HVDC: interligação da ilha de Gotland com o continente sueco, à 96 km.

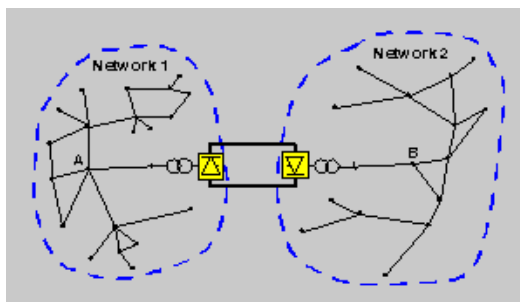
Sistema HVDC : 20 MW, 200 A ,100 kV

Entrou em operação comercial em 1954



Sala das válvulas dos conversores tipo arco-a-mercúrio de 6-pulsos

Interconexão de sistemas CA com frequências diferentes (elo assíncrono)



50Hz / 60Hz – Back to back



50Hz / 60Hz – linha CC

Transmissão a longa distância (aérea) e transmissão por cabos



Itália – Grecia (40km)



Pacific intertie (USA -1360 km)



Conexão ao SIN (BR- 2500 Km)

Histórico:

1950 - Operação experimental (URSS) linha aérea 113 Km, 30 MW, 200kV, vapor de mercúrio.

1954 - Primeiro sistema HVDC operando comercialmente, interligando ilha de Gotland ao continente

1960 – Tiristores de potência disponibilizados comercialmente.

1962 – Nova Zelândia 600MW, 250kV, 567 Km (aérea)+ 38Km (cabo) , vapor de mercúrio.

1970 – USA Pacific Intertie 1440 MW, 400kV, 1354 Km (aérea), vapor de mercúrio.

1975 _ Inglaterra Kingsnorth 640 MW, 266kV, 82 Km, (subterrâneo)- vapor de mercúrio

1975 – Cabora- Bassa (Africa do Sul) , 960MW, ± 266 kV, 1410Km (aérea), tiristores

1977 – Noruega/Dinamarca , 500MW, 250 kV, 100Km(aérea) + 130Km(cabo) – tiristores

1983 – Brasil – sistema Itaipú (Elo Acaray) 6300MW, 600kV , 800 Km (aérea) - tiristores

✓ 145 projetos HVDC encontram-se em andamento em todo o mundo

Várias aplicações:



Europa



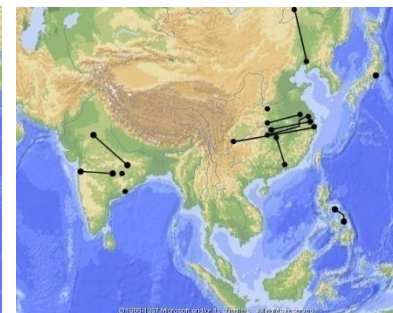
América do Norte



América do Sul



África



Ásia

Projeto Brasileiro Atual:

Objetivos:

- ✓ Escoar energia gerada nas UHE Santo Antônio e Jirau
- ✓ Atender a demanda da região SUL e SUDESTE
- ✓ Acesso ao sistema interligado nacional (SIN)



Alternativas para a Transmissão:

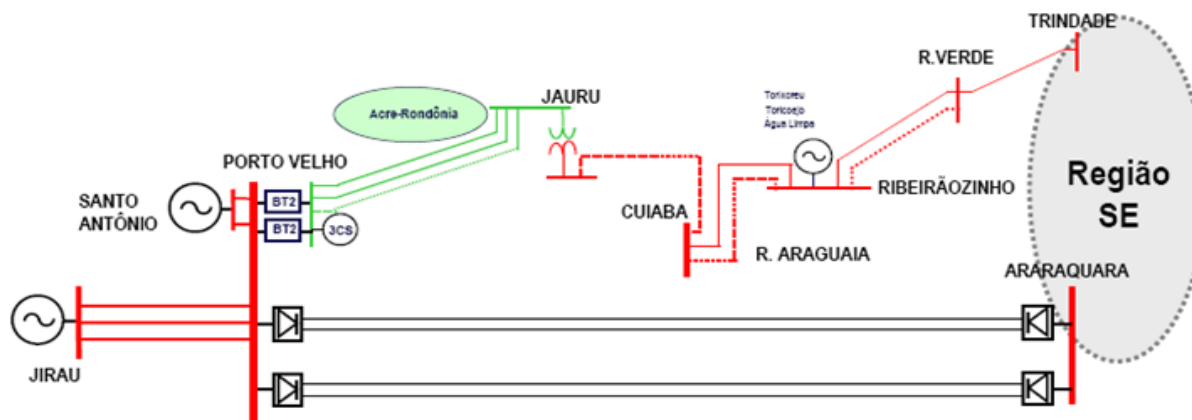
- ✓ Sistema em CA convencional
- ✓ Sistema em CC (HVDC)
- ✓ Sistema Híbrido CA e CC

Sistema CA : 500 kV (4 e 5 circuitos)

Alternativa CC (HVDC)

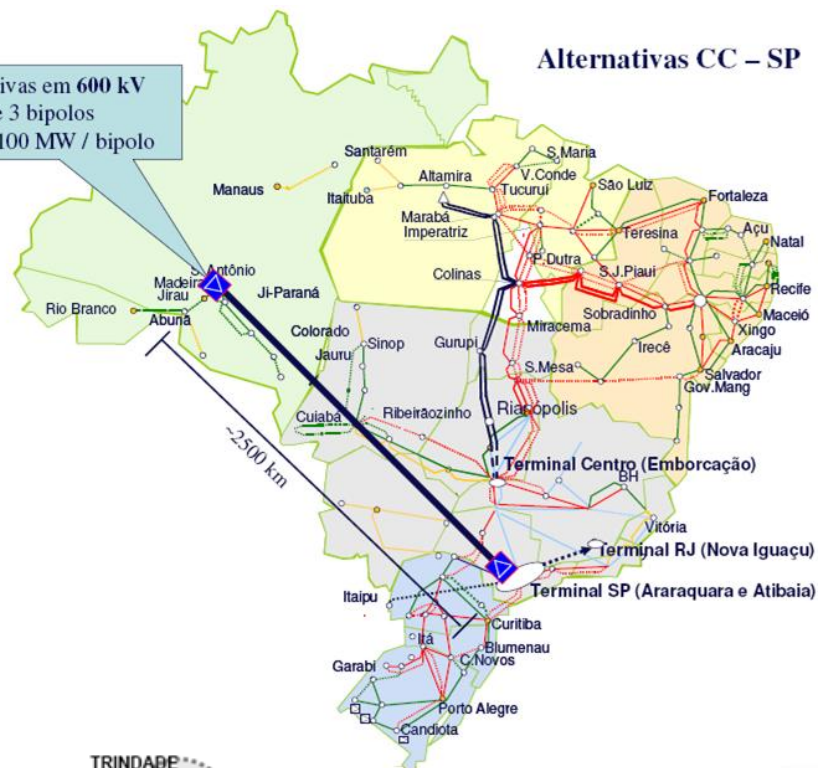
Sistema CC : ± 600 kV (2 e 3 bipolos)

QUANTIDADE CC	
Equipamento	MVA(r) - km
LT 765 kV	-
LT 500 kV	602
LT 230 kV	-
LT CC	4.750
Trafos	8.553
C. Sincrono	300
C. Estático	370
C. Série	0
C. Shunt	0
Reator Shunt	782
Bipolos	2 x 3150 MW



Alternativas em 600 kV
2 e 3 bipolos
3150 e 2100 MW / bipolo

Alternativas CC – SP

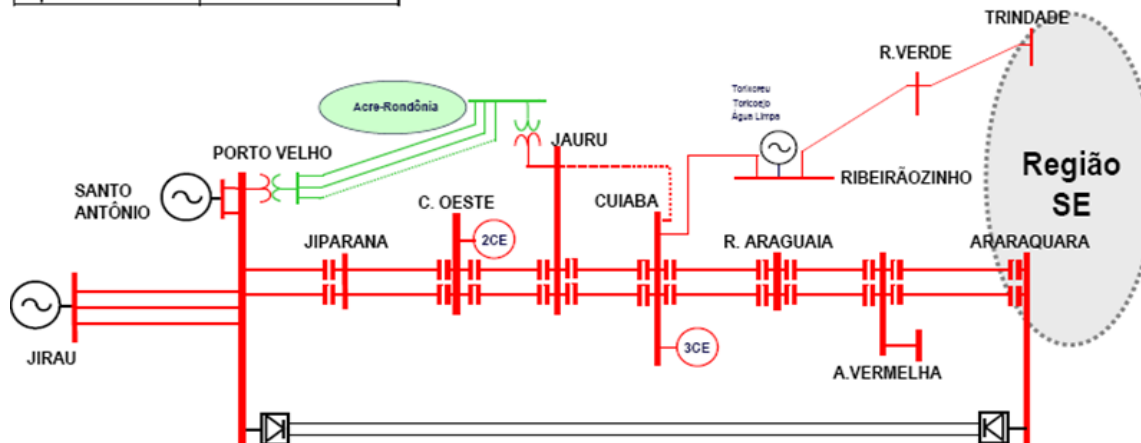


Alternativa Híbrida

Sistema CC : ± 600 kV (1 e 2 bipolos)

Sistema CA : 500 kV (2 e 3 circuitos)

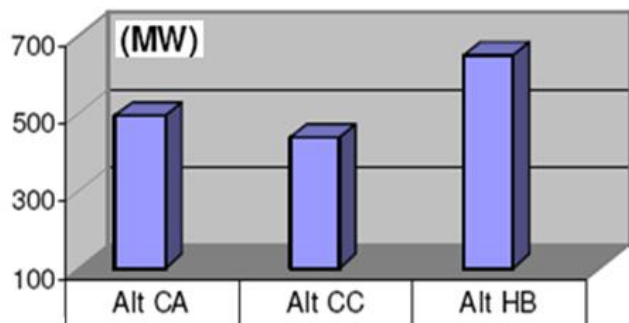
ALTERNATIVA HIBRIDA	
Equipamento	MVA(r) - km
LT 765 kV	-
LT 500 kV	4.755
LT 230 kV	-
LT CC	2.375
Trafos	9.801
C. Estático	2.590
C. Série	12.530
C. Shunt	1.200
Reator Shunt	10.309
Bipolo	1 x 3150 MW



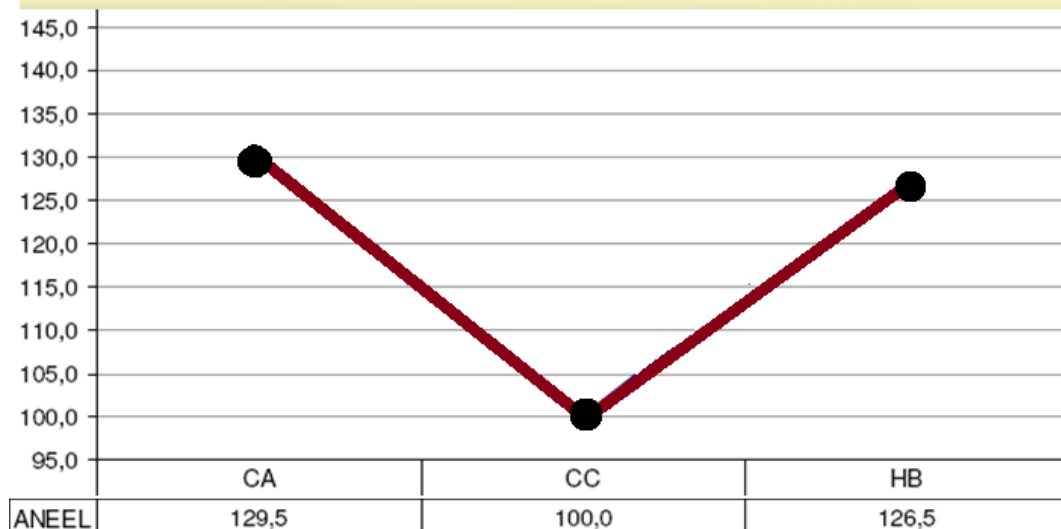
PREMISSAS:

- Investimentos com estruturas, cabos , isoladores, etc.;
- Investimentos com compensação reativa;
- Investimentos em subestações;
- Custo das perdas técnicas;
- Custos de manutenção;
- Confiabilidade e flexibilidade operacional ;
- Impacto ambiental.

Perdas elétricas nas linhas para despacho máximo (6300 MW)



Comparação dos Custos Globais das alternativas (%)

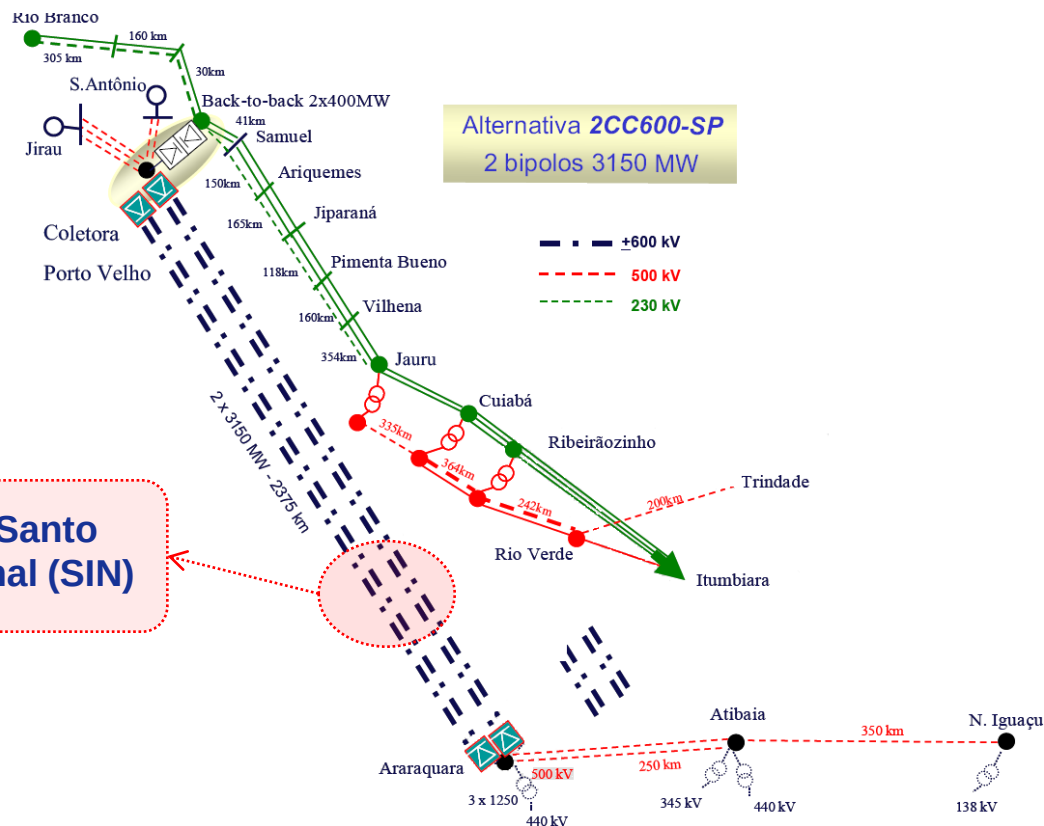




Interligação CC das usinas de Jirau e Santo Antônio ao Sistema Interligado Nacional (SIN)

✓ **Dois bipolos CC (2x3150 MW ± 600 kV)** para Interligar as subestações Coletora Porto Velho (RO) e Araraquara (SP) com extensão aproximada de 2375 km

✓ **Dois back-to-back (2x400 MW)**





Laboratório de Qualidade da Energia Elétrica

www.feis.unesp.br/laqee

Material disponível



- Início
- Produção Bibliográfica
- Boletins técnicos
- Equipe técnica
- Projetos P&D
- Infraestrutura
- Parcerias
- Eventos
- Agenda
- Material de apoio
- Cursos**
 - Cargas Elétricas Especiais
 - HVDC**
 - Compensação de Sistemas Elétricos
 - Qualidade da Energia Elétrica
 - Transitórios de Chaveamento
 - Electric Power Quality in Distributed Networks with Renewable Energy
- Laboratório Remoto
- Plataforma Moodle
- Localização
- Acesso Restrito

[Página inicial](#) > [Departamentos](#) > Engenharia Elétrica > Pesquisas e Projetos > LQEE

LQEE - Laboratório de Qualidade da Energia Elétrica





O Laboratório de Qualidade da Energia Elétrica (LQEE), é uma unidade auxiliar de ensino, pesquisa e prestação de serviços do Departamento de Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP. O LQEE possui uma equipe técnica formada por professores especializados na área de Qualidade da Energia Elétrica, técnicos em eletrotécnica e alunos de pós-graduação.

Revistas online do setor elétrico



Luís Carlos Origa de Oliveira
origa@dee.feis.unesp.br