



Soluções Não Convencionais em CA
Adequadas para Transmissão a Distância Muito Longa
Uma Alternativa para o Sistema de Transmissão da Amazônia

Troncos de Transmissão Baseados em
Linhas Não Convencionais com
Pouco Mais de Meia Onda

Extrato de artigos, apresentações em diversos fóruns (incluindo órgãos internacionais e entidades governamentais) e documentos recentes, de professores e alunos de pós-graduação da COPPE/UFERJ e da UNICAMP e de engenheiros ligados ao setor elétrico

CP, Abril de 2008

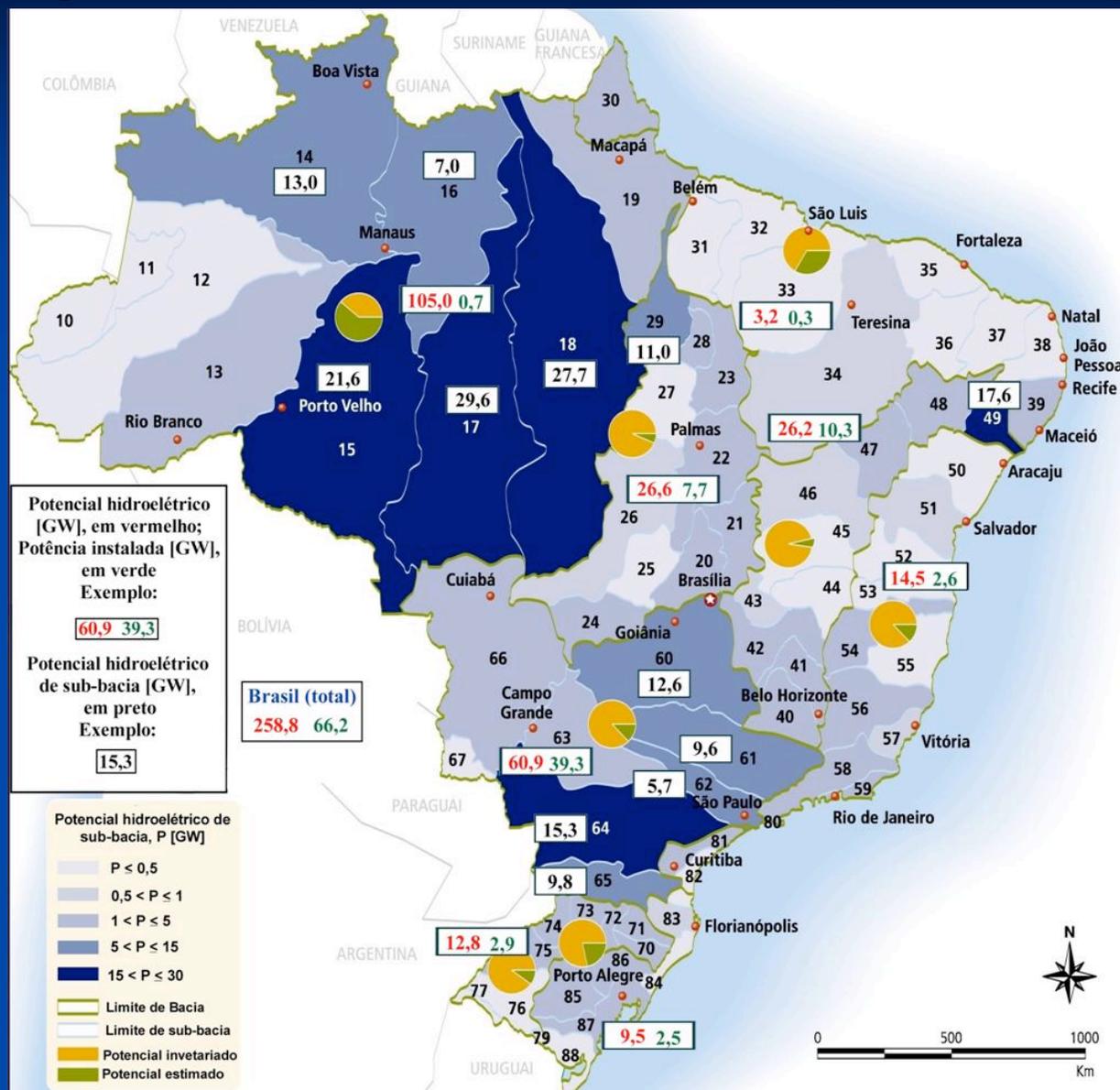
INTRODUÇÃO

- Há vários casos no Mundo em que o uso de importantes recursos energéticos, interessantes sob o ponto de vista estratégico, econômico ou de impacto ambiental, impõe uma solução correta para transmissão a distância muito longa, por exemplo da ordem de dois a três mil quilômetros.
- Um exemplo, muito importante para o setor elétrico brasileiro, é a opção natural, a médio prazo, de basear o seu crescimento nos recursos hidroelétricos da Bacia do Amazonas, com geração complementar moderada baseada noutras fontes.
- Esta escolha impõe uma solução adequada para transmitir a maior parte dessa energia a distâncias da ordem de 2500 km.

- Não é adequado extrapolar soluções desenvolvidas para distâncias de transmissão médias da ordem de poucas centenas de quilômetros.
- Há dois tipos de soluções potencialmente interessantes:
 - *A* - Transmissão em corrente alternada (CA/AC) baseada em linhas de transmissão não convencionais (LNC), com, também, uma solução não convencional do tronco de transmissão.
 - *B* - Transmissão em corrente contínua (CC/DC).
- As soluções *A* e *B* são, ambas, essencialmente “ponto a ponto”, sem prejuízo de eventuais adaptações de tipo subsidiário.
- Obteve-se soluções muito interessantes, baseadas em troncos de transmissão em corrente alternada, não convencionais, com capacidade de transmissão unitária de 2 GW a 12 GW, sem necessidade de compensação reativa, ou com compensação reativa muito reduzida, e sem necessidade de subestações intermediárias.

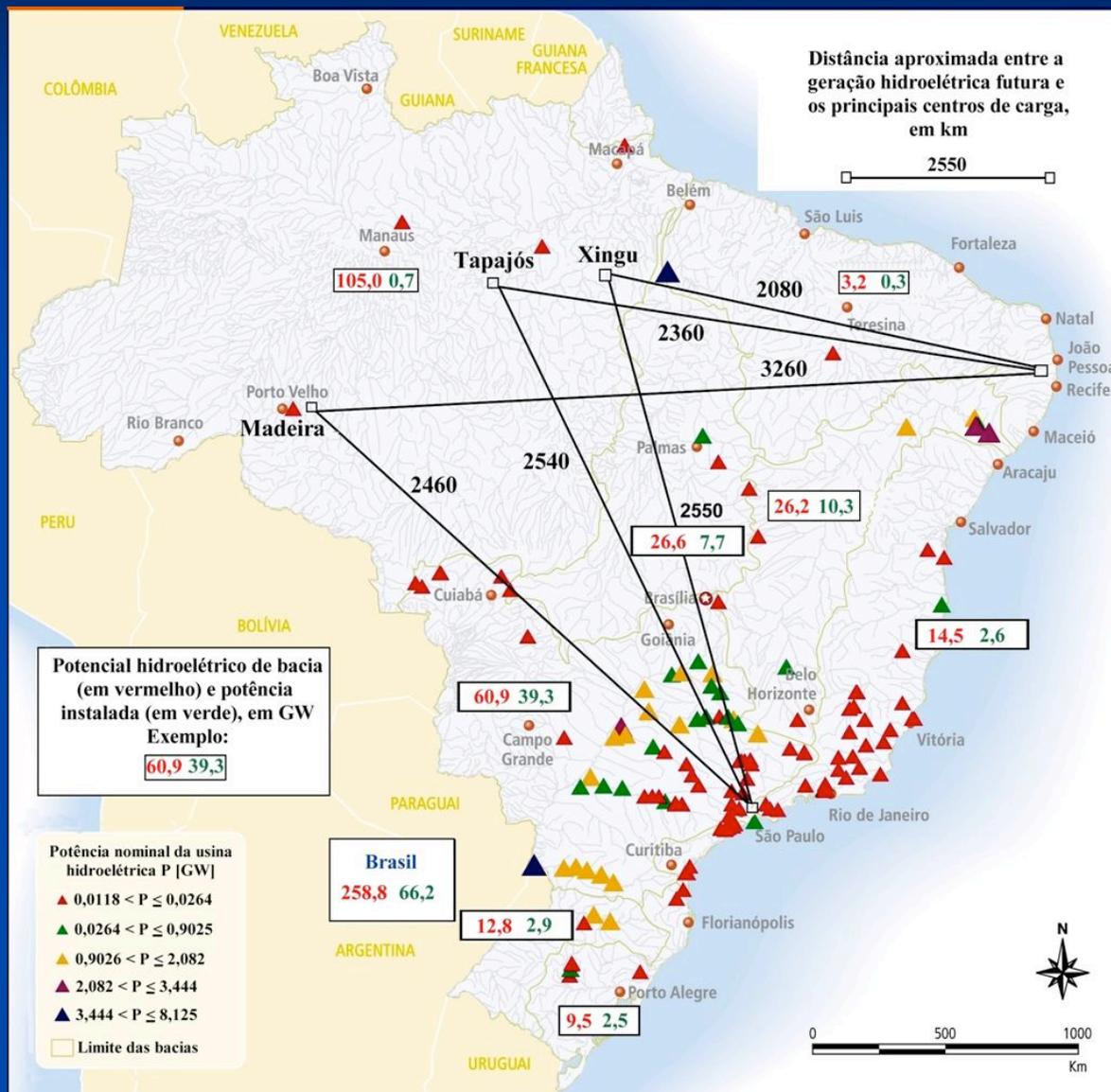
- Esses troncos podem ser energizados e desenergizados com a manobra de um único disjuntor, com sobretensões de manobra moderadas, têm perdas moderadas, comportamento muito favorável para variações de carga e estabilidade eletromecânica de redes interligadas, originam campo eletromagnético próximo da linha moderado, têm pequeno impacto ambiental e têm custo, tipicamente, muito menor que alguns sistemas de transmissão recentes baseados em soluções convencionais (por exemplo, os custos por unidade de capacidade de transmissão de troncos de transmissão apresentados neste artigo são da ordem de um quinto a um quarto do custo de sistemas de transmissão recentes).
- Fez-se também uma análise sistemática para detecção de condições potencialmente críticas de soluções não convencionais, que podem ser muito diferentes das condições críticas de sistemas convencionais. Identificou-se, também, procedimentos para limitar eventuais condicionamentos indesejáveis, fazendo uso adequado das características específicas de tais sistemas de transmissão.

Potencial de geração hidroelétrica por sub-bacia e bacia hidrográfica e potência instalada por bacia [GW]



Fonte: Elaborado com base em dados de Eletrobrás, Sistema de informação do potencial hidroelétrico brasileiro SIPOT, Abril de 2003

Distâncias básicas de transmissão entre novas usinas na Bacia do Amazonas e centros de carga



Distribuição geográfica de usinas hidroelétricas em operação em Setembro de 2003

Fonte: Elaborado com base em dados de ANEEL, BIG – Base de dados de geração, 2003

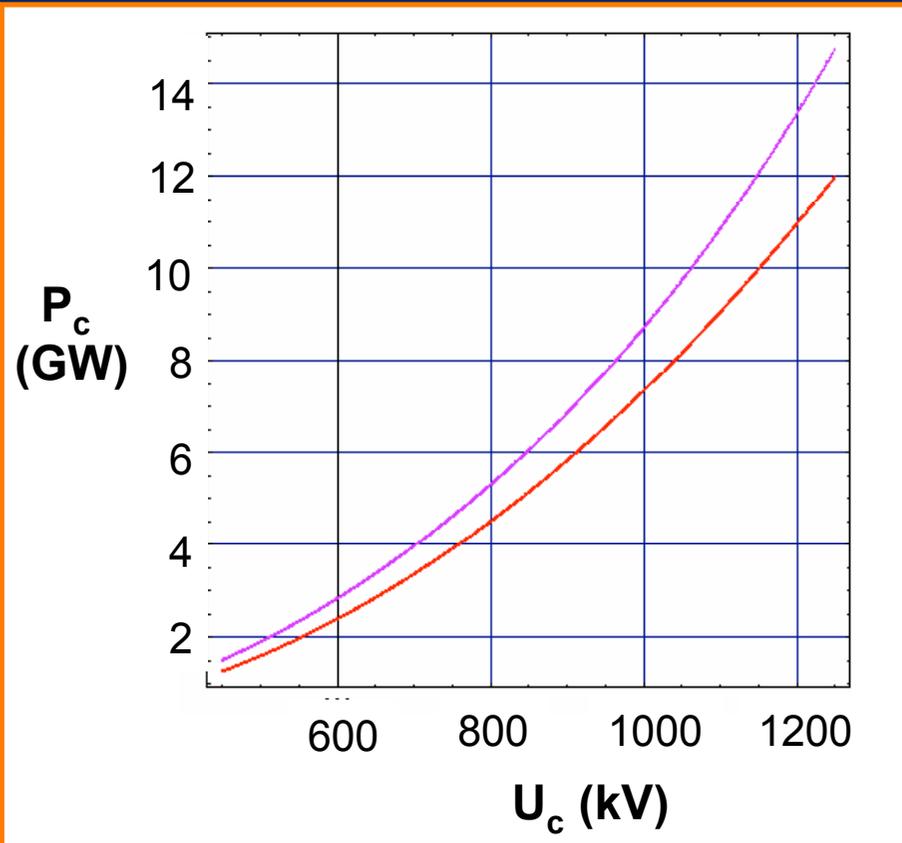
UMA ALTERNATIVA NÃO CONVENCIONAL DE SISTEMA DE TRANSMISSÃO A GRANDE DISTÂNCIA

- Principais aspectos de sistemas de transmissão baseados em “Linhas Não convencionais” (LNC), trifásicas, trifásicas duplas ou hexafásicas, definidas com base nos seguintes critérios:
 - Não considerar restrições que resultem apenas de soluções usuais;
 - Impor apenas restrições relacionadas com condicionamentos físicos básicos e com desempenho, segurança e impacto ambiental;
 - Otimização de parâmetros físicos de acordo com as funções operacionais e os objetivos específicos da linha, incluindo custos, perdas, confiabilidade operacional, gama de transmissão e de condicionamentos operacionais, e impacto ambiental, ponderados ao longo da vida útil do sistema de transmissão e na gama de cenários pertinente.
- Identificou-se um conjunto de propriedades físicas básicas que permitiu escolher um número limitado de parâmetros com elevada correlação com diversos outros parâmetros, físicos, de desempenho e de custo

- **É viável uma análise robusta de otimização, baseada num número moderado de parâmetros e nos condicionamentos específicos do sistema de transmissão considerado.**
- **Para transmissão a distâncias muito longas (da ordem de 2000 km ou mais), há soluções interessantes baseadas, aproximadamente, em:**
 - **Seleção de troncos de transmissão que se comportem com um “comprimento “elétrico” um pouco superior ao comprimento de meia onda (a frequência industrial);**
 - **Ligação ponto a ponto, sem manobra por trechos;**
 - **Compensação reativa nula ou muito reduzida;**
 - **Linhas não convencionais (LNC) com elevada capacidade de transmissão (em comparação com linhas convencionais);**
 - **Otimização conjunta de linhas, equipamento de rede critérios de proteção e manobra, detectando e evitando condições potencialmente críticas;**
 - **Impor apenas restrições relacionadas com condicionamentos físicos básicos e com desempenho, segurança e impacto ambiental.**

- **Estas soluções permitem:**
 - Bom desempenho do tronco de transmissão quanto a estabilidade eletromecânica;
 - Bom desempenho do tronco de transmissão quanto a sobretensões de manobra;
 - Custo muito menor que o de soluções “tradicionais”;
 - Confiabilidade operacional muito superior à de soluções “tradicionais”;
 - Impacto ambiental muito menor que o de soluções “tradicionais”.
- Para estas soluções, a potência característica é, aproximadamente, o limite de potência transmitida (diferentemente do que sucede com linhas “curtas”).

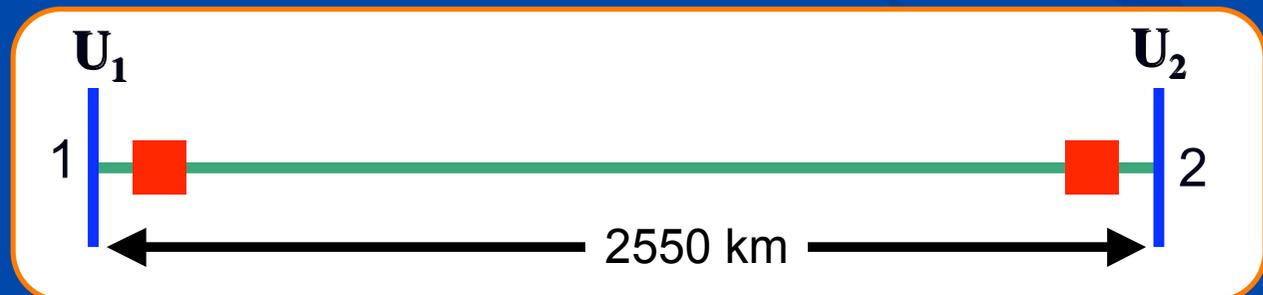
Resultados para linhas não convencionais (LNC), trifásicas, de tensão até 1250 kV, otimizadas para transmissão a distâncias muito longas (da ordem de 2000 km ou mais)

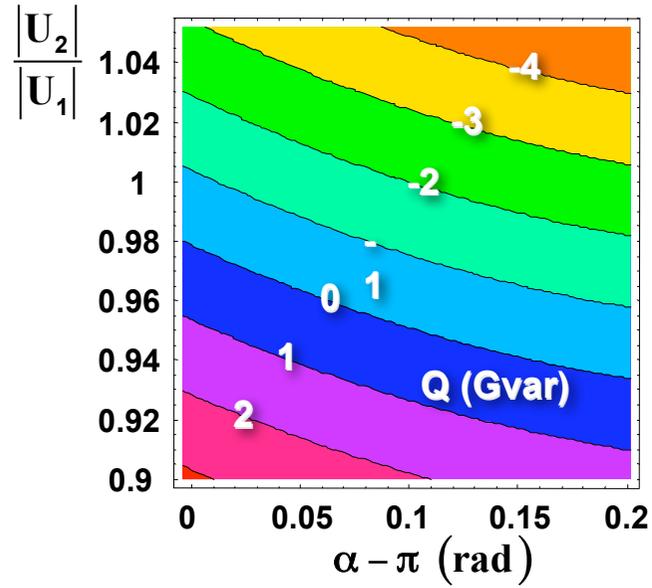
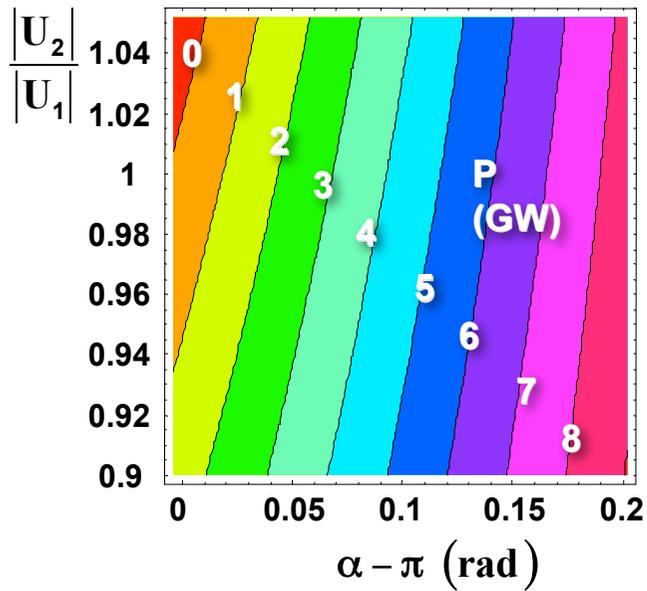


Potência característica, P_c , que pode ser obtida, com critérios prudentes, com LNCs trifásicas, em função da tensão, U_c , entre fases, para tensões até 1250 kV.

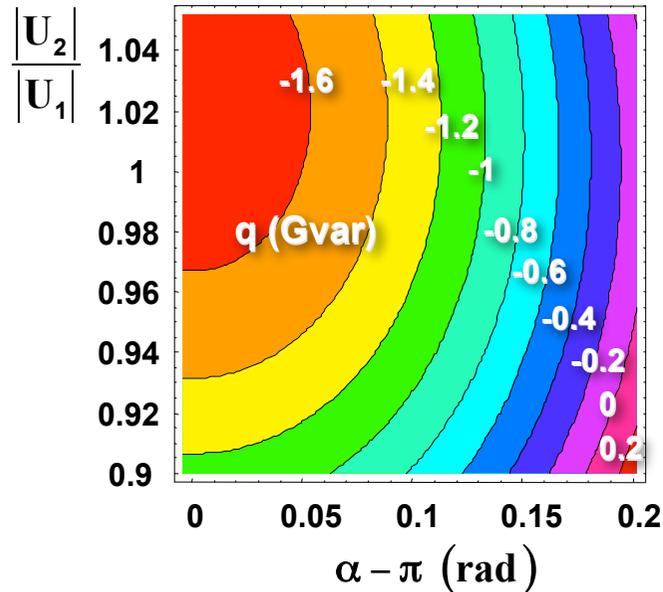
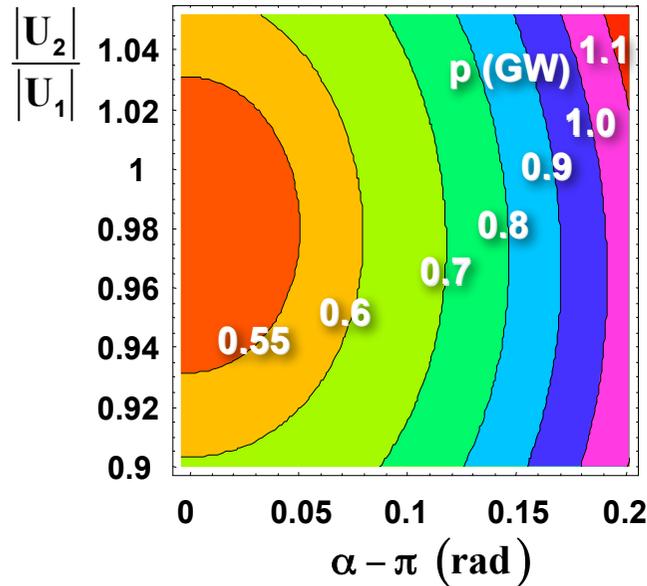
As curvas em vermelho e violeta representam a gama típica de P_c que pode ser obtida, dependendo de condições e opções específicas.

Representação esquemática de uma linha trifásica de 1000 kV, $P_c = 8,6$ GW, 2550 km, sem compensação reativa.





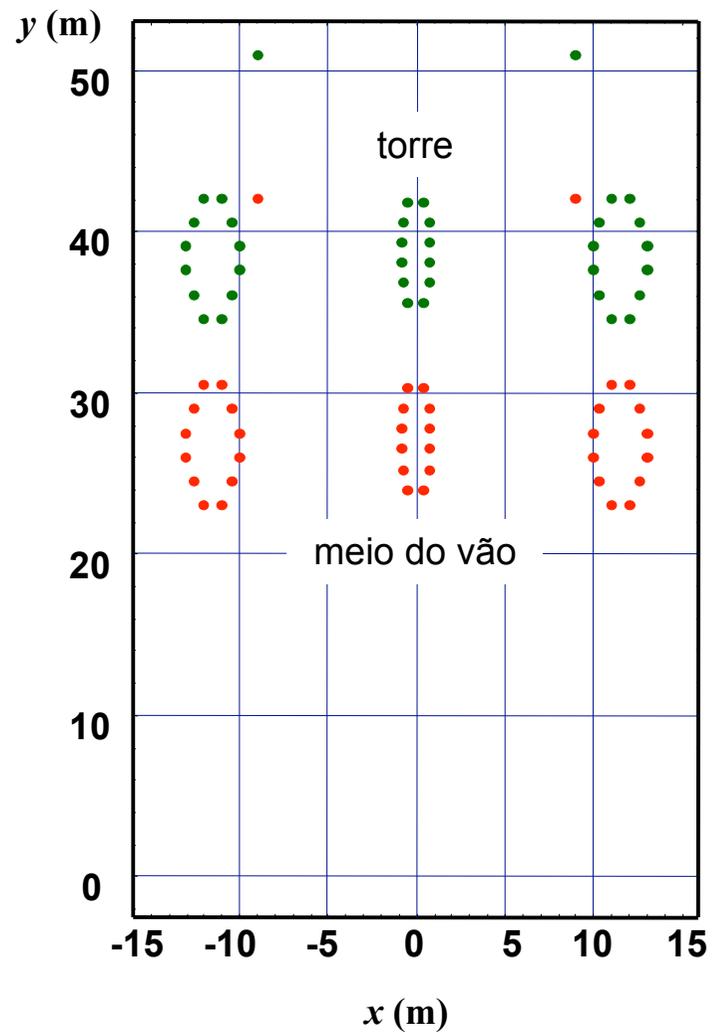
Potência, P (em GW), e potência reativa, Q (em Gvar), no terminal 1 da linha, com tensão $U_1 = 1000$ kV em função da defasagem, α , e da relação entre módulos, das tensões nos terminais 2 e 1.

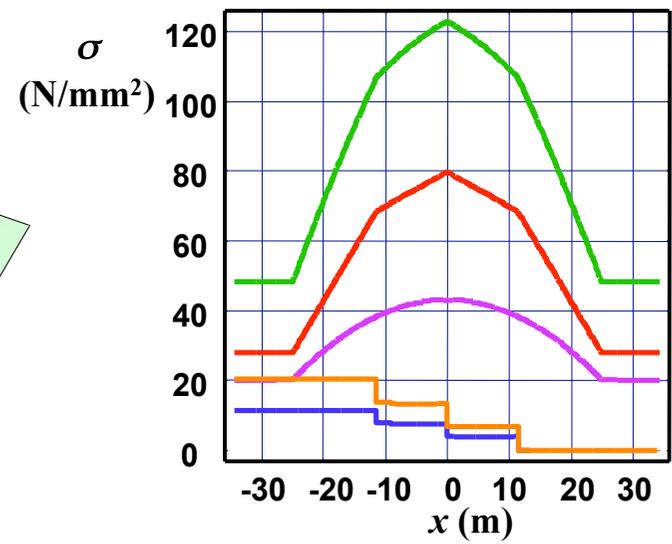
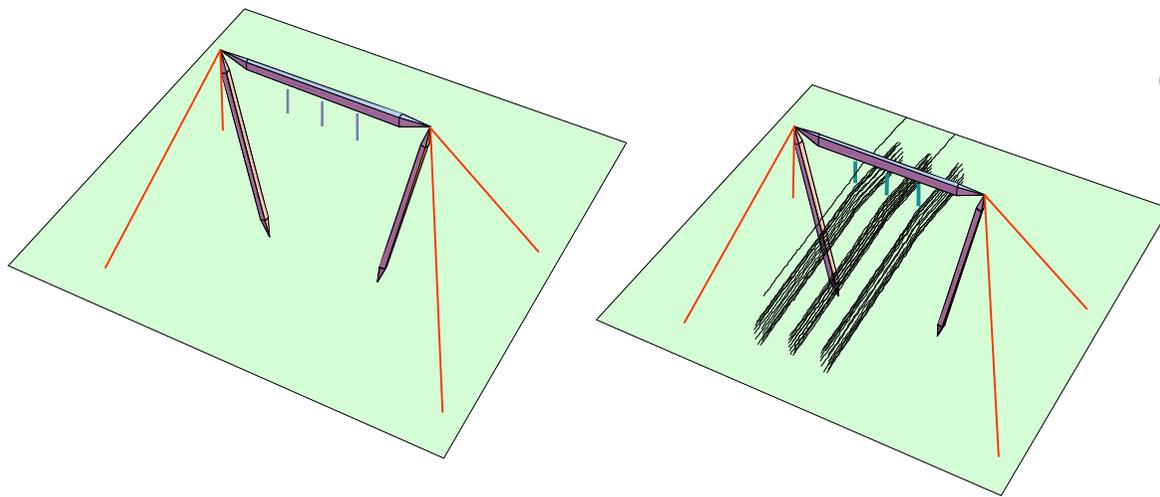
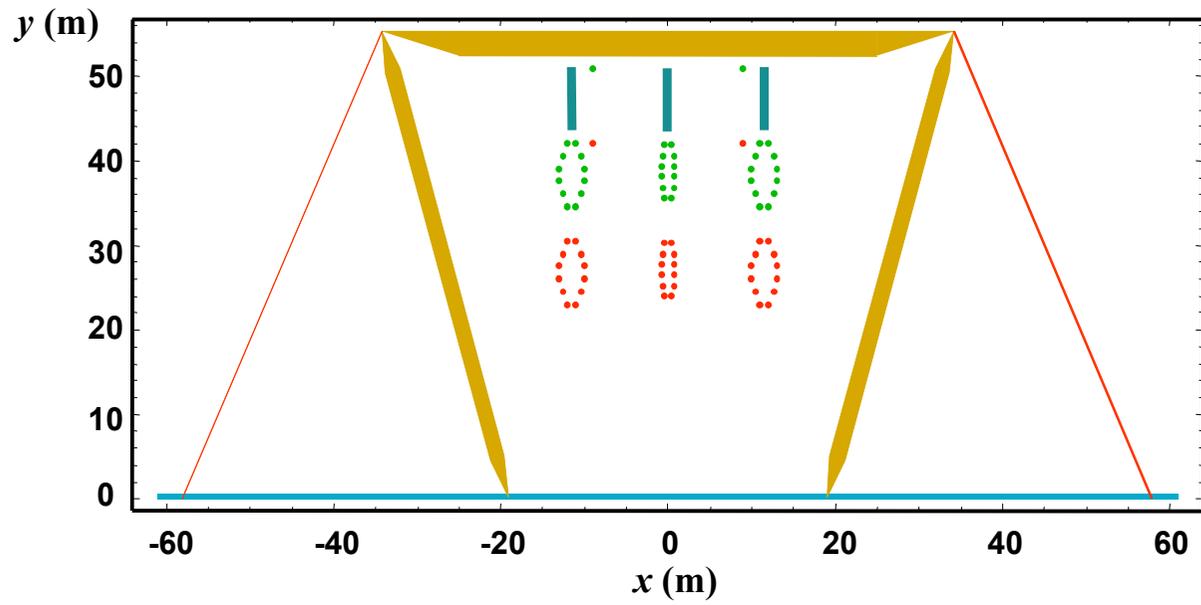


Perdas, p (em GW), e consumo de potência reativa, q (em Gvar), da linha, com tensão $U_1 = 1000$ kV, em função da defasagem, α , e da relação entre módulos, das tensões nos terminais 2 e 1.

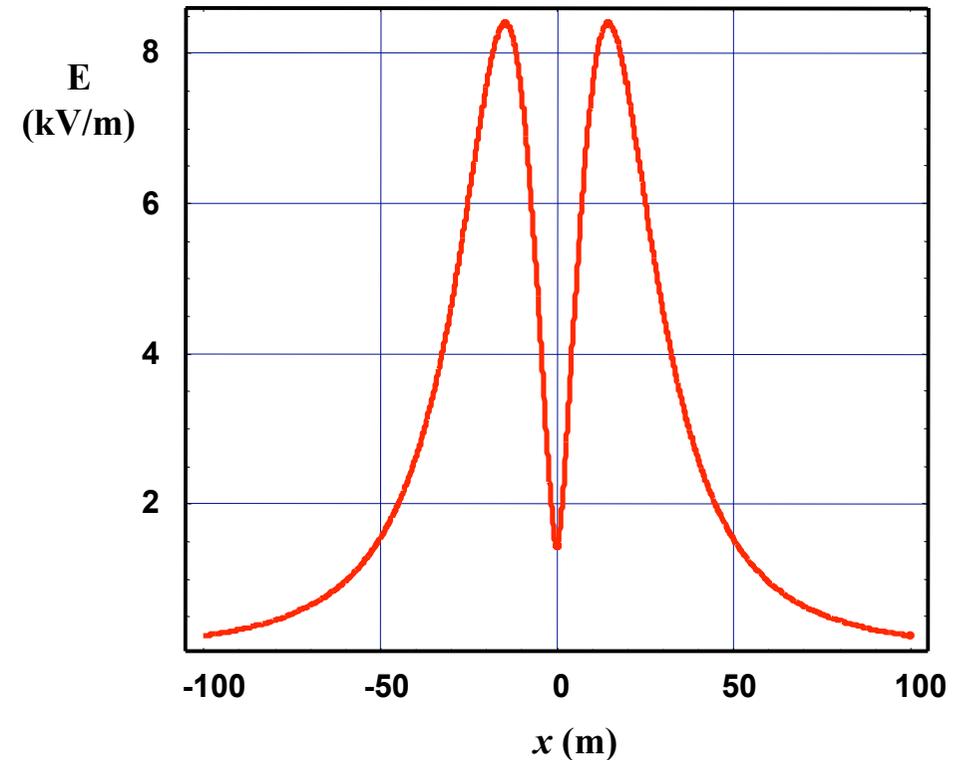
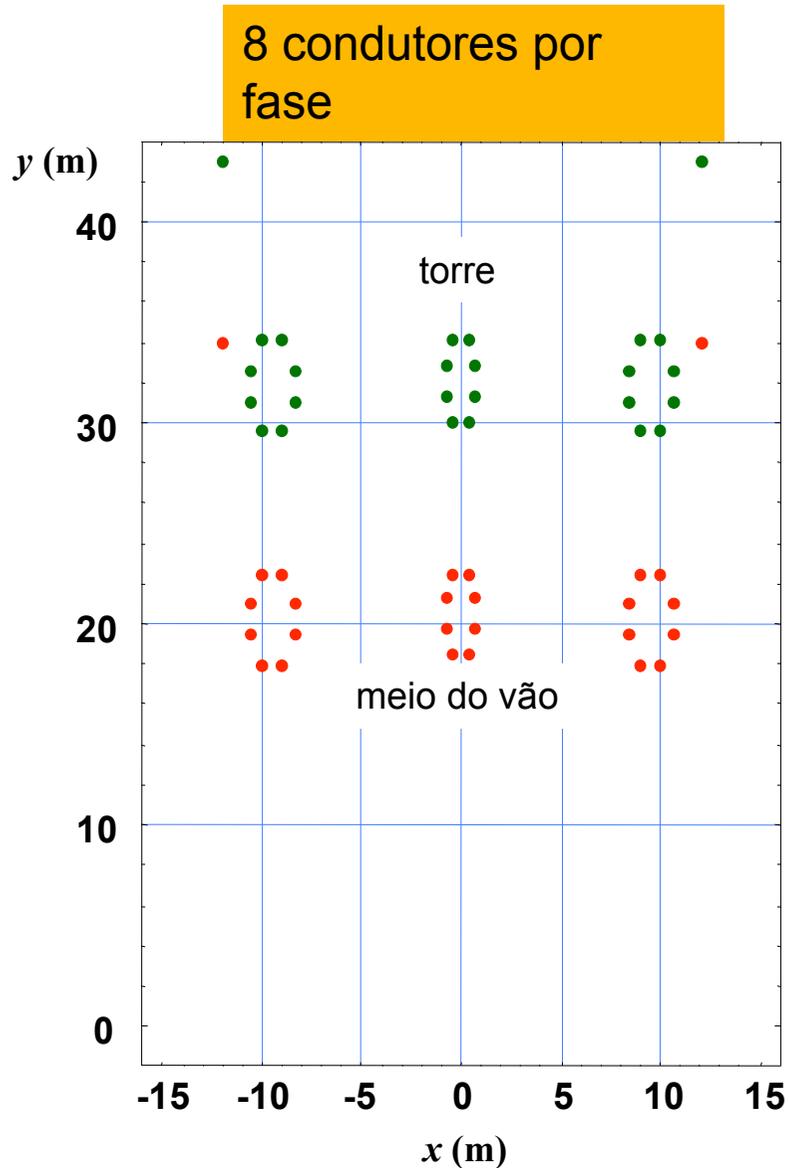
$U_1 = 1000 \text{ kV}$
 $P_c = 8,6 \text{ GW}$

12 condutores por fase



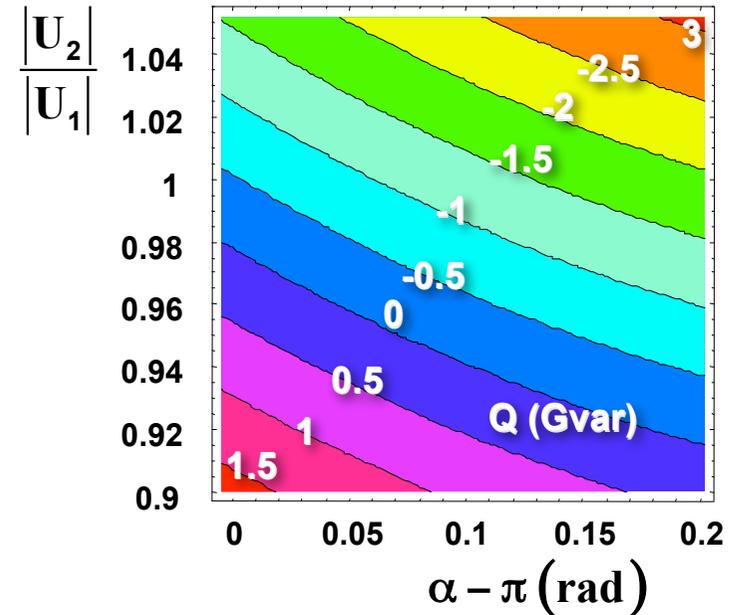
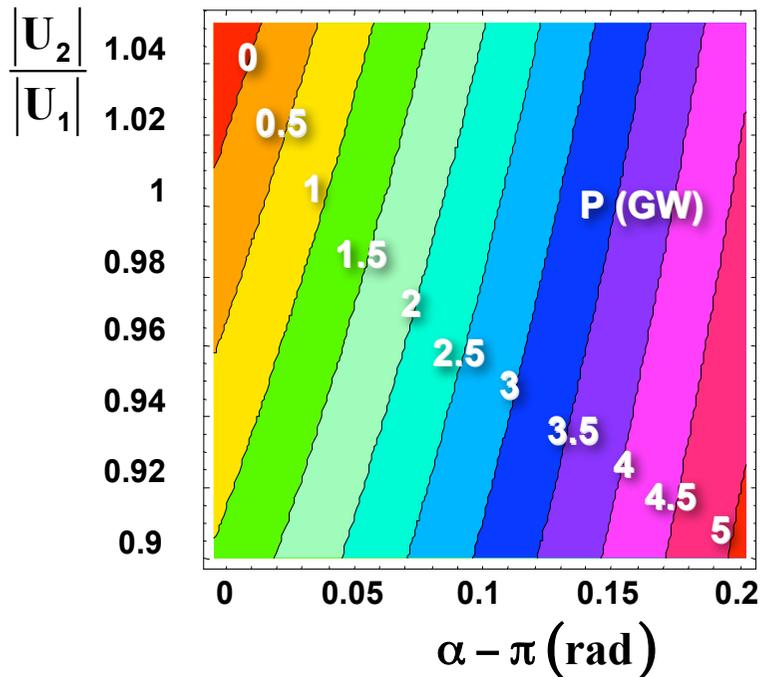


RESULTADOS PARA UMA LINHA TRIFÁSICA DE 800 kV, 2550 km, COM POTÊNCIA CARACTERÍSTICA $P_c = 4,8$ GW



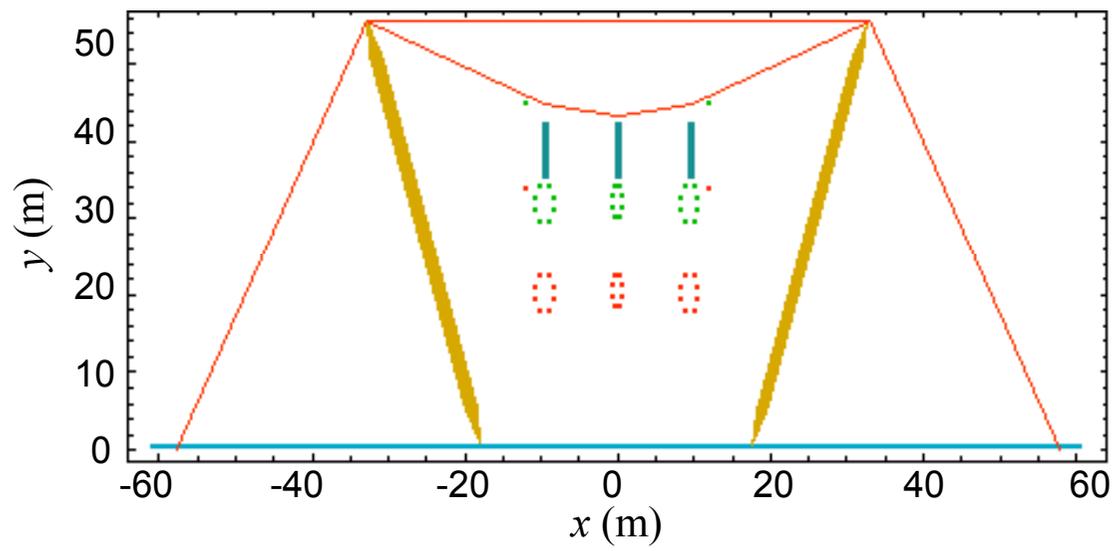
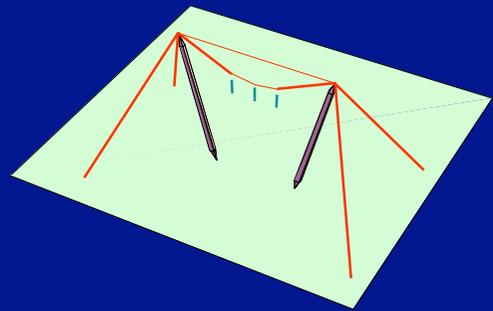
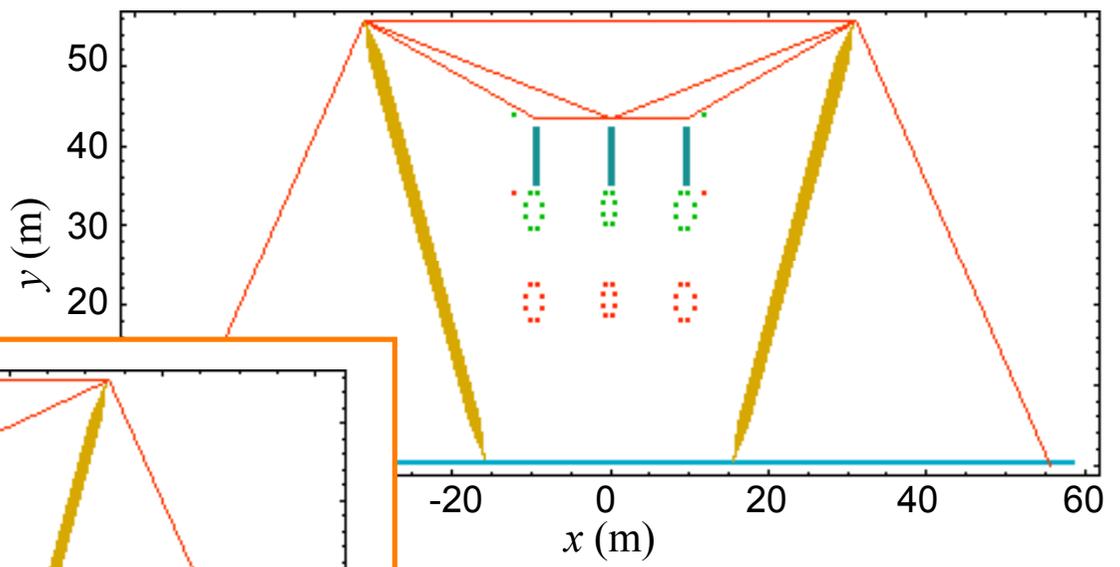
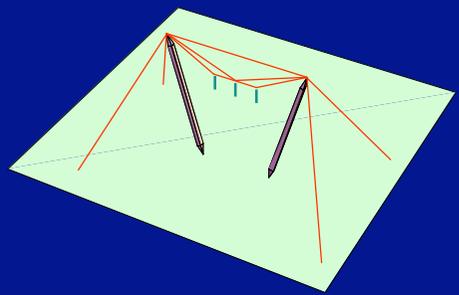
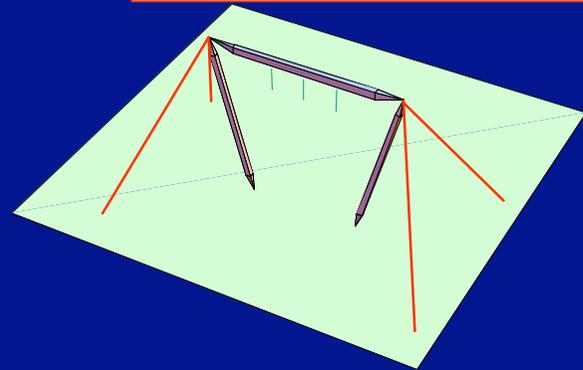
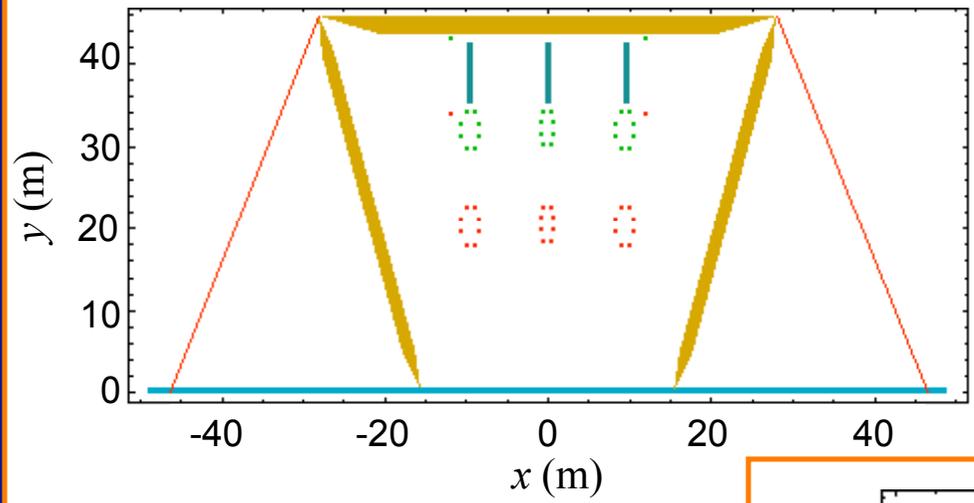
Campo elétrico, ao nível do solo, a meio do vão, no exemplo de linha, para cabos a 25° C, num vão de 500 m, em solo plano horizontal, sem vento.

LINHA TRIFÁSICA DE 800 kV, 2550 km, COM POTÊNCIA CARACTERÍSTICA $P_c = 4,8 \text{ GW}$



Potência, P (em GW), e potência reativa, Q (em Gvar), no terminal 1 da linha, com tensão $U_1 = 800 \text{ kV}$, em função da defasagem, α , e da relação, $\frac{|U_2|}{|U_1|}$, entre módulos, das tensões nos terminais 2 e 1.

Exemplos de estruturas



Análise exemplificativa de custos comparativos

Sistema de transmissão similar a projeto recente baseado em sistemas convencionais (Caso a)

Exemplo de sistema de transmissão não convencional de 1000 kV, P = 8,6 GW (Caso b)

Exemplo de sistema de transmissão não convencional de 800 kV, P = 4,8 GW (Caso c)

Parcela de custo	Custos totais, C			Custos relativos, $c = C / P$			c_b / c_a	c_c / c_a
	C_a	C_b	C_c	c_a	c_b	c_c		
	(Caso a)	(Caso b)	(Caso c)	(Caso a)	(Caso b)	(Caso c)		
	1 GW	8,6 GW	4,8 GW	1 GW	8,6 GW	4,8 GW		
C_1	1,00	2,56	1,80	1,00	0,298	0,375	0,298	0,375
C_2	0,70	0,00	0,00	0,70	0,000	0,000	0,000	0,000
$C_t = C_1 + C_2$	1,70	2,56	1,80	1,70	0,298	0,375	0,175	0,221

C_1 - Custo da linha, excluindo subestações intermediárias e compensação reativa ao longo da linha e nas redes interligadas, para permitir a operação da linha

C_2 - Custo de subestações intermediárias e de compensação reativa ao longo da linha e nas redes interligadas, para permitir a operação da linha

Exemplo da transmissão das usinas do Madeira para o Sudeste

Sistema de transmissão em CA do tipo apresentado, baseado em duas linhas de 800 kV (Caso a)

Sistema de transmissão em CC conforme documentos divulgados e artigos publicados (Caso b)

Custo total (investimento) [10^9 R\$]		$C_b - C_a$ [10^9 R\$]	C_b / C_a
C_a (Caso a)	C_b (Caso b)		
5,34	7,02	1,68	1,31

A solução do tipo apresentado, em CA, é competitiva com corrente contínua.

Alternativas constantes do documento R1 disponibilizado pela EPE em 01/04/2008

Sistema de transmissão em CC (Caso c)

Sistema de transmissão em CA “convencional”, baseado em linhas de 765 kV (Caso d)

Sistema de transmissão híbrido, baseado num bipolo de CC e num sistema de transmissão em CA “convencional”, com linhas de 500kV (Caso e)

Custos relativos (investimento) tomando o Caso c como referência (para três alternativas de estimativa de custos)		
C_c (Caso c)	C_d (Caso d)	C_e (Caso e)
1	1,351 a 1,406	1,218 a 1,250

As soluções de tipo “convencional” em CA (Caso d), ou parcialmente em CA (Caso e), não são competitivas com corrente contínua.

Conclusões - 1

- Os custos relativos (por unidade de capacidade de potência transmitida, e para o mesmo comprimento de linha) dos exemplos apresentados:
 - São cerca de 30 % e de 38 % do custo relativo da linha de comparação baseada em soluções convencionais (excluindo subestações intermediárias e compensação reativa ao longo da linha e nas redes interligadas, para permitir a operação da linha).
 - São cerca de 18 % e de 22 % do custo relativo da linha de comparação baseada em soluções convencionais (incluindo subestações intermediárias e compensação reativa ao longo da linha e nas redes interligadas, para permitir a operação da linha).

Conclusões - 2

- A solução não convencional apresentada permite custos de transmissão a distâncias muito longas (da ordem de 2000 a 3000 km) muito menores que sistemas de transmissão em corrente alternada baseados em soluções desenvolvidas para sistemas de transmissão tradicionais, com distâncias de transmissão de poucas centenas de quilômetros.
- Os projetos recentes com capacidade de transmissão, por tronco, da ordem de 1 GW não atingem a “dimensão crítica” economicamente adequada para transmissão a distância muito longa, e compatível com o potencial de geração disponível, para a qual a transmissão a distância muito longa é economicamente atrativa. Por outro lado, esses projetos não consideraram a procura de soluções inovadoras otimizadas para a potência e a distância de transmissão envolvidas.
- A transmissão não convencional em CA/AC, aqui apresentada, e a transmissão em CC/DC são potencialmente competitivas. A sua comparação correta impõe uma otimização separada dos dois tipos de soluções e uma comparação objetiva e quantitativa do resultado.
- Algumas comparações de alternativas de CA/AC e CC/DC apresentadas em alguns documentos e artigos recentes resultam de uma análise não correta de aspectos conceituais relevantes de alternativas CA/AC adequadas para transmissão a muito longa distância, nomeadamente de alternativas do tipo apresentado.

Conclusões - 3

Para a transmissão das usinas do Madeira para o Sudeste:

- A solução do tipo apresentado, em CA, é competitiva com corrente contínua.
- As soluções de tipo “convencional” em CA, ou parcialmente em CA, constantes do documento R1 disponibilizado pela EPE em 01/04/2008, não são competitivas com corrente contínua.

Ensaio com sistema real para evidenciar a simplicidade e comportamento do sistema de transmissão apresentado:

- Identificou-se a possibilidade de fazer um ensaio real de um sistema de transmissão com 2600 km, utilizando linhas similares de 500 kV, sem compensação reativa e manobrado de uma extremidade com um único disjuntor. A preparação e realização deste ensaio são muito simples.
- A realização deste ensaio, já apresentada formalmente a diversas entidades, permitiria esclarecer eventuais “dúvidas reais” sobre a factibilidade e simplicidade da solução.