



**SEMINÁRIO DE TRANSMISSÃO DE
ENERGIA EM LINHAS DE MEIA ONDA
CAMPINAS, 26 e 27 de NOVEMBRO de 2013**



Estudo da conexão da UHE de Belo Monte ao SIN através da alternativa de transmissão em Meia Onda

L.C.Ferreira Gomes, L.C.P. Silva, M.C.Tavares

1. Contexto

- Busca de recursos energéticos distantes dos principais centros consumidores (distâncias > 2000km)
- Na China: reservas de carvão no Noroeste do país e principais centros consumidores no sudeste
- Na Rússia: conexão com Coreia do Sul e interligação parte Asiática com Europeia
- Na África: geração na região das cachoeiras do Inga e consumo na África do Sul
- No Brasil: usinas hidrelétricas a serem construídas na bacia Amazônica e principais consumidores no SE e NE



Distância das principais UHE em construção aos principais centros consumidores

2. Sistema Teste

- Perspectiva do SIN montado pela EPE para 2019
- 6 cenários de diferentes carregamentos do SIN e do tronco em meia onda
- 3 tipos de corredores de transmissão ensaiados
- Estudos realizados no ANAREDE, limitando-se ao regime permanente

2.1 Sistema Teste - Perspectiva para 2019

- Usinas de Santo Antônio e Jirau com transmissão híbrida
- Integração de Manaus ao SIN
- Inserção de Belo Monte:
 - Transmissão HVDC para Nordeste
 - Transmissão em Meia Onda para Sudeste (Assis)
- Reforços na malha de 500kV e 440kV perto de Assis

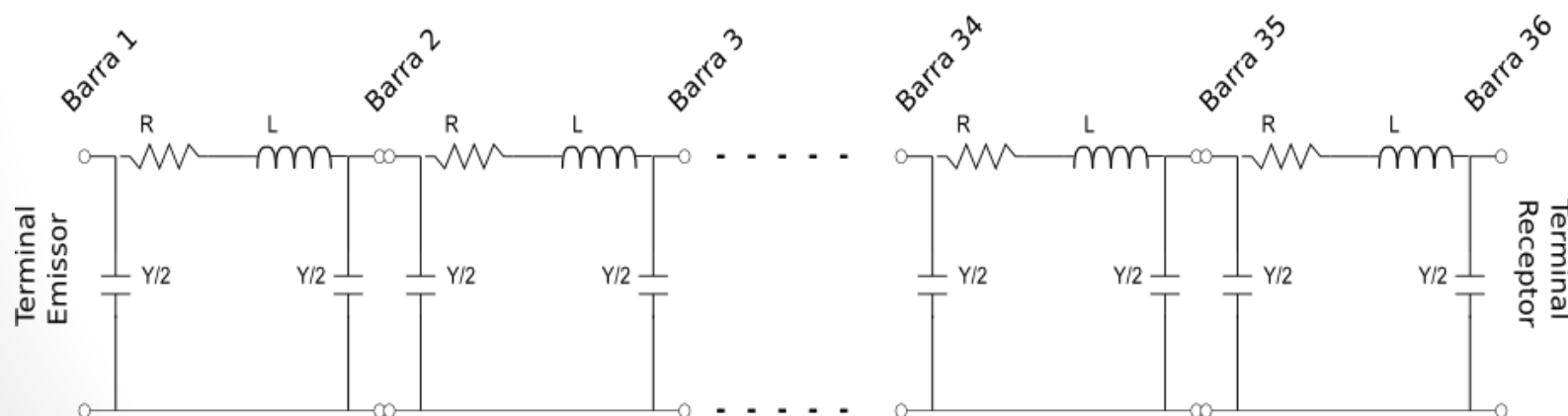
2.2 Sistema Teste – Cenários Estudados

- Grande variação na geração de Belo Monte
- Mudança no sentido do fluxo de potência entre os subsistemas Norte e Sudeste

CENÁRIOS FORNECIDOS PELA EPE						
	Carregamento	Geração BM	EloCA	Sentido	EloCC	Amazônia
CEN 1	Pesado	11GW	6800 MW	N -> S	3500 MW	663,8 MW
CEN 2	Pesado	11GW	7300 MW	N -> S	3500 MW	172 MW
CEN 3	Pesado	500MW	2173 MW	S -> N	-397,1 MW	2545 MW
CEN 4	Pesado	2GW	880 MW	N -> S	-347,8 MW	1464,8 MW
CEN 5	Pesado	0 GW	4400 MW	S -> N	3199,8 MW	663 MW
CEN 6	Leve	11GW	7150 MW	N -> S	3300 MW	523 MW

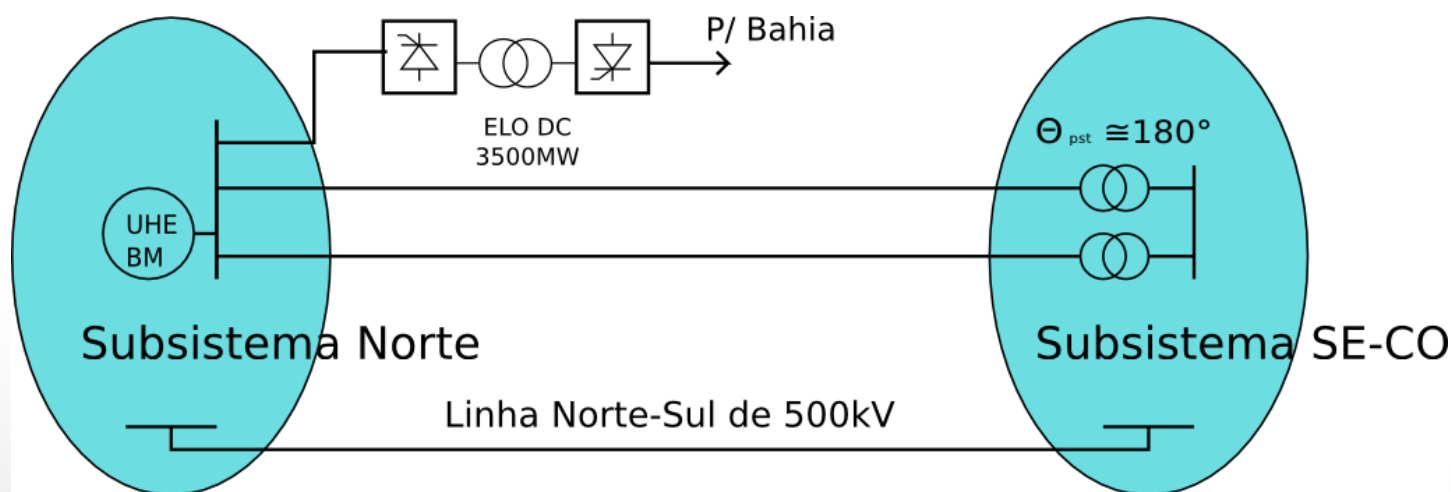
2.3 Sistema Teste – Modelagem e conexão das linhas

- 2644km conectando Altamira-PA a Assis-SP
- Cada linha com 35 trechos π em série



2.3 Sistema Teste – Modelagem e conexão das linhas

- Transformadores defasadores de cerca de 180° na extremidade de Assis (subsistemas já conectados, portanto referência angular é a mesma)
- Transformadores de conexão com larga variação da defasagem angular e valores de tapes



2.3 Sistema Teste – Modelagem e conexão das linhas

- 800 kV :
 - Duas configurações: tronco com 3 e 2 linhas
 - Parâmetros (SIL principal limitante do carregamento)

R (Ω/km)	Reatância(Ω/km)	Susc. ($\mu\Omega/\text{km}$)	SIL(MW)	Zsil (Ω)
0,0066	0,17248	9,902	4846,56	132,05

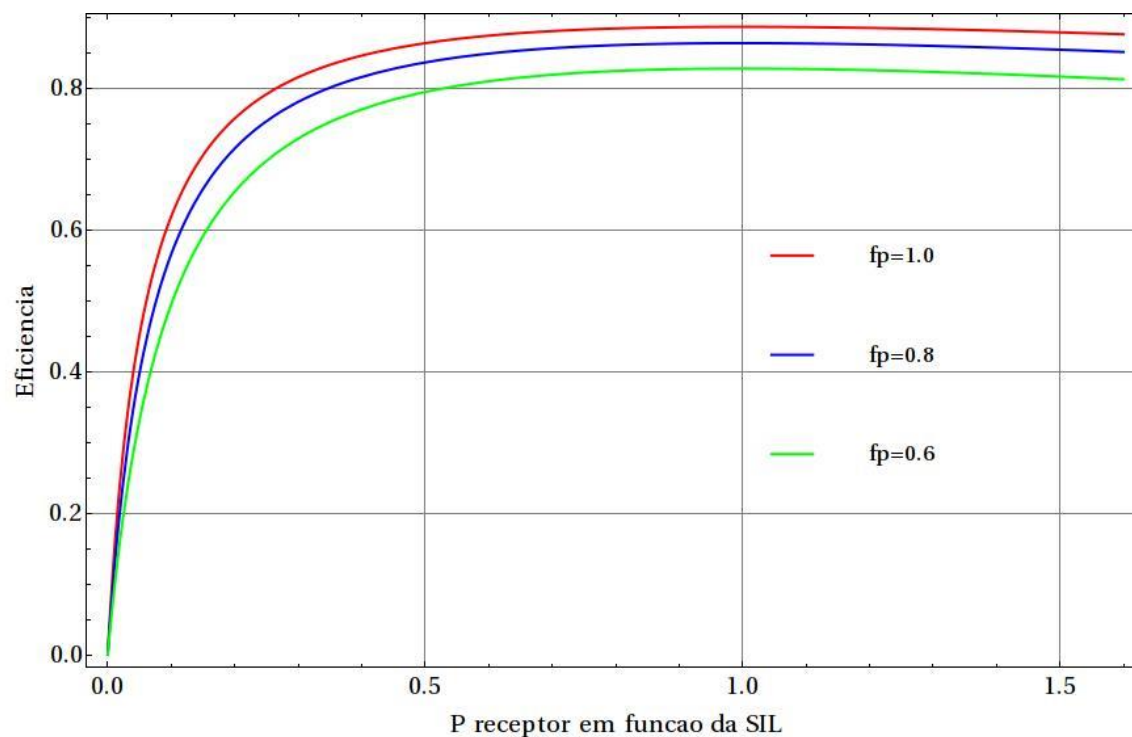
- 1000 kV
 - Configuração com 2 linhas
 - Parâmetros

R (Ω/km)	Reatância(Ω/km)	Susc. ($\mu\Omega/\text{km}$)	SIL(MW)	Zsil (Ω)
0,006425	0,1611	10,64	8100	123,46

3.1 Linhas de 800kV – Controle da Eficiência

- Manipular tensão operacional tal que

$$P_{transmitida} = SIL_{operacional} = \frac{V_{rec}^2}{Z_{SIL}}$$



3.1 Linhas de 800kV – Controle da Eficiência

- Transformadores com larga faixa de variação de tapes
- “Tap ideal”, cinco valores abaixo e seis acima ($\pm 10\%$)
- Varredura dos valores de tap em cada terminal (144 casos por cenário)

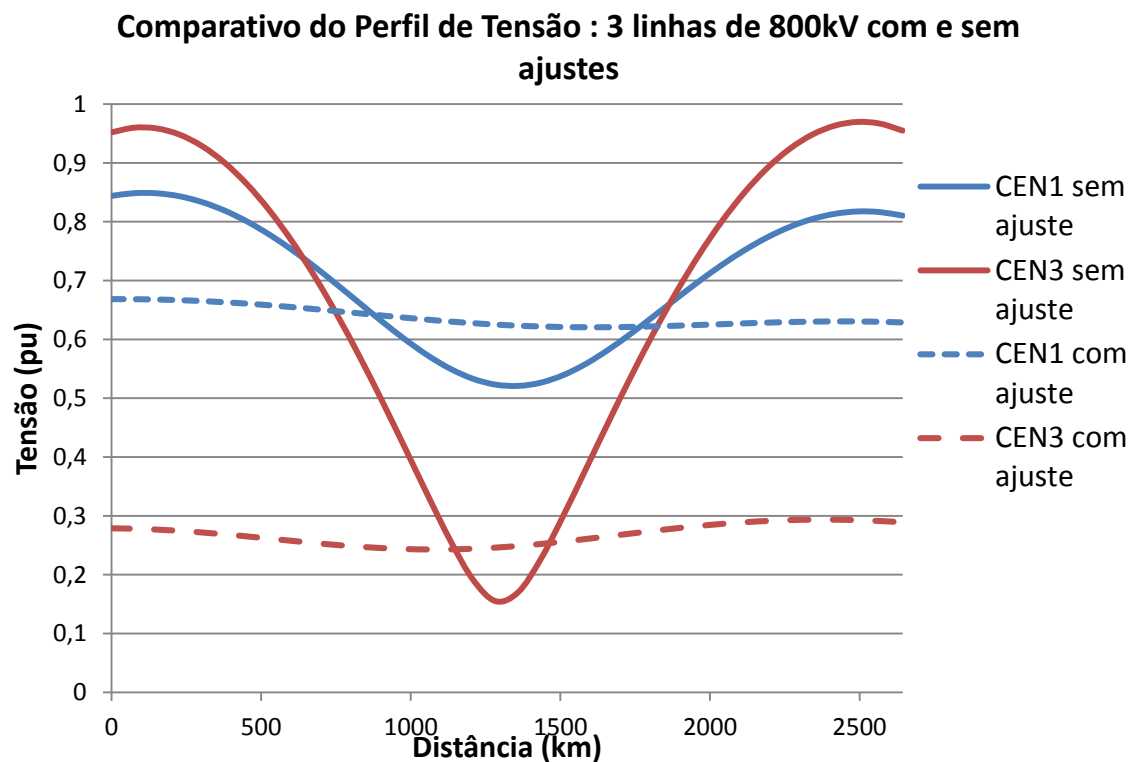
	3 x 800kV		2 x 800kV	
	Tensão (kV)	Tap (a/ab)	Tensão (kV)	Tap (a/ab)
	p/ Psil=Pt		p/ Psil=Pt	
CEN1	547,4	1,46	670,4	1,19
CEN2	567,0	1,41	694,4	1,15
CEN3	309,3	2,59	378,8	2,11
CEN4	196,9	4,06	241,2	3,32
CEN5	442,0	1,81	541,4	1,48
CEN6	561,0	1,43	687,1	1,16

3.1 Linhas de 800kV – Controle da Eficiência

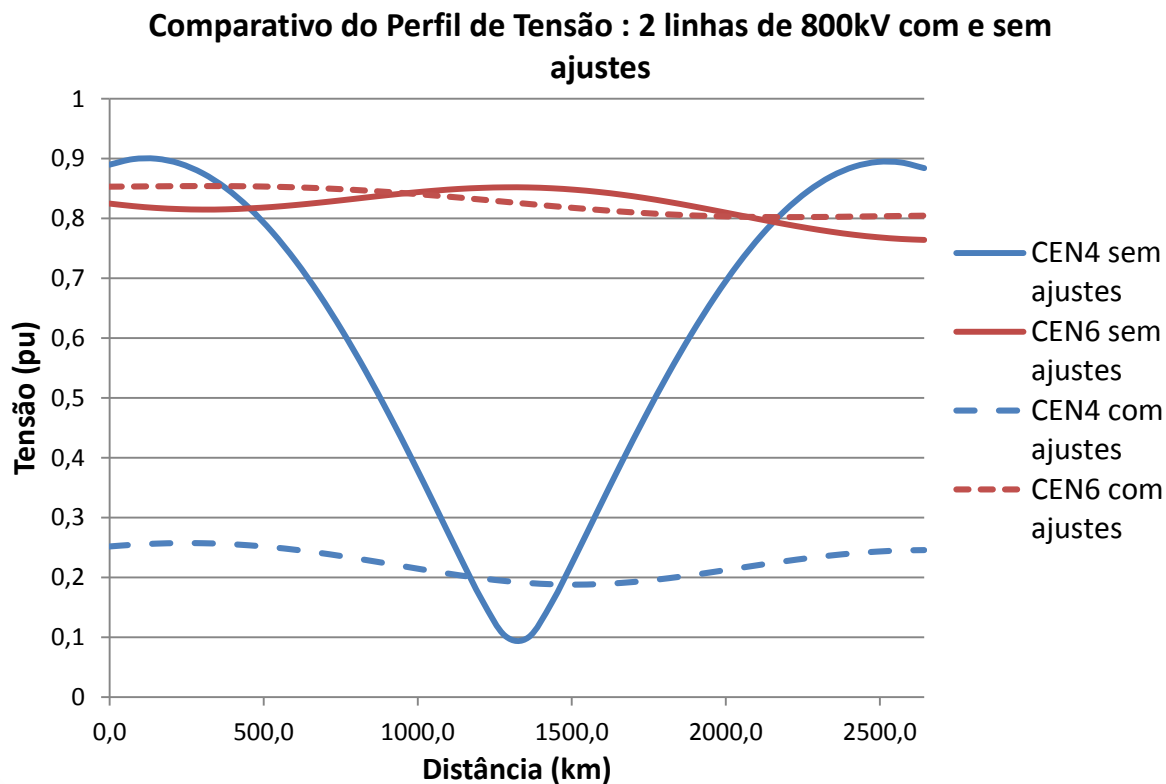
- Diminuição de perdas em especial nos casos de baixo carregamento
- Valores mínimos e máximos após ajuste próximos da média

		PERDAS					
		CEN1	CEN2	CEN3	CEN4	CEN5	CEN6
3x800kV	Sem Ajuste	13,18%	12,80%	24,10%	56,33%	14,01%	12,40%
	Melhor	12,38%	12,43%	12,45%	15,52%	12,43%	12,38%
	Pior	12,72%	12,84%	14,66%	19,56%	13,42%	12,61%
	Média	12,47%	12,63%	13,25%	16,91%	12,84%	12,45%
2x800kV	Sem Ajuste	12,44%	12,60%	21,69%	46,27%	13,34%	12,53%
	Melhor	12,38%	12,40%	12,43%	14,78%	12,44%	12,38%
	Pior	12,67%	12,99%	13,96%	19,07%	13,00%	12,62%
	Média	12,48%	12,67%	12,55%	16,21%	12,63%	12,45%

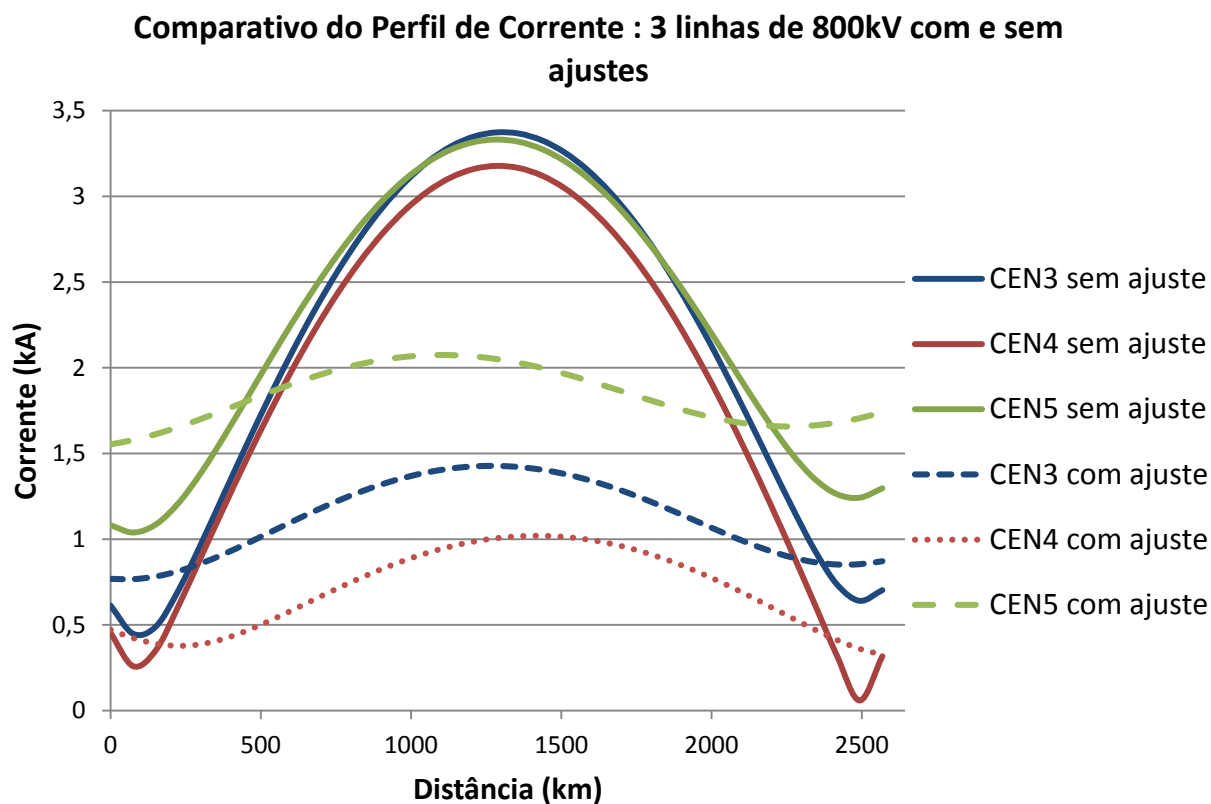
- Redução substantiva da tensão operacional nos cenários de baixo carregamento
- Perfis de tensão e corrente mais planos



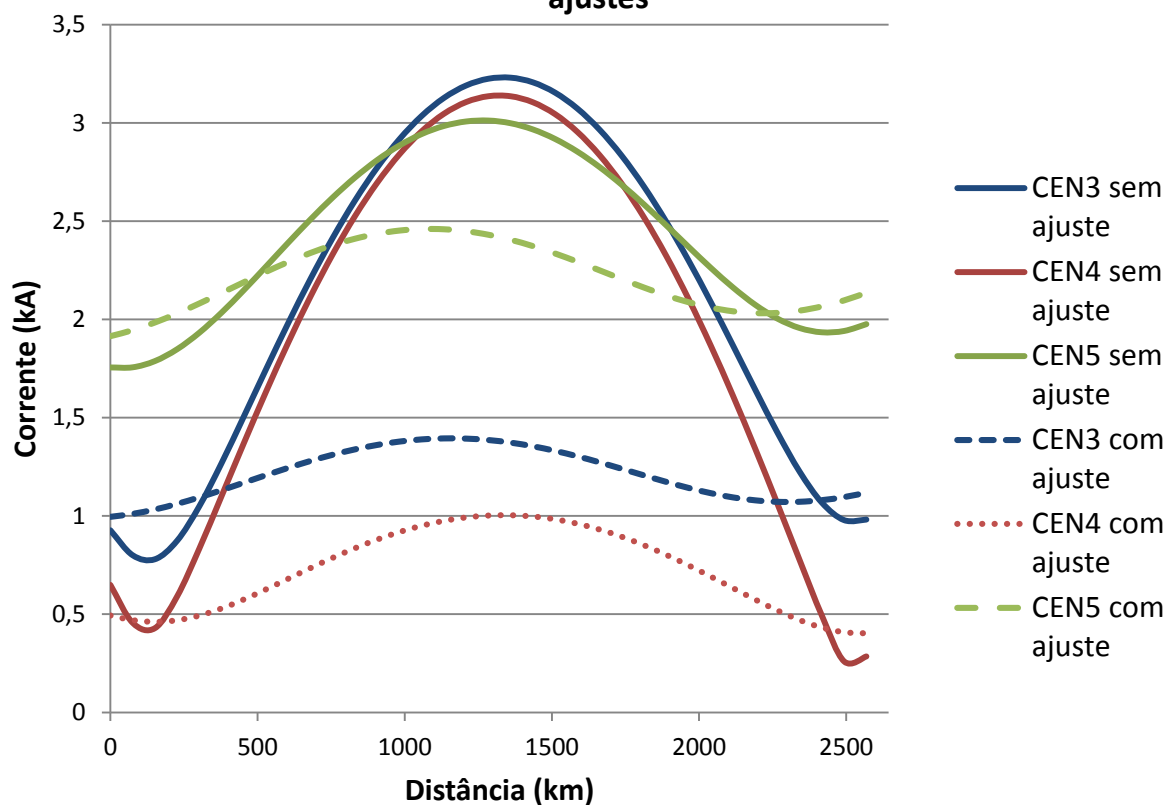
- Redução menos acentuada nos cenários de alto carregamento do tronco. Ainda assim abaixo da nominal convencionalmente aceito



- Redução da corrente no meio da linha, implicando em redução substancial das perdas



Comparativo do Perfil de Corrente : 2 linhas de 800kV com e sem ajustes



3.1 Linhas de 800kV – Controle da Eficiência

- Tensões nos terminais de conexão dentro de valores razoáveis para cenários futuros de longo prazo

		Tensões Barras de Conexão											
		CEN1		CEN2		CEN4		CEN5		CEN6		CEN11	
	V (pu)	Altamira	Assis	Altamira	Assis	Altamira	Assis	Altamira	Assis*	Altamira	Assis	Altamira	Assis
3x800kV	MÍN	0,98	0,95	1,08	0,97	1,04	1,02	1,06	1,08	1,00	1,00	1,04	0,92
	MÁX	1,03	1,04	1,11	1,07	1,05	1,07	1,07	1,08	1,06	1,10	1,07	1,07
	MÉDIA	1,00	0,99	1,10	1,02	1,04	1,06	1,06	1,08	1,03	1,05	1,06	1,00
2x800kV	MÍN	1,00	0,92	1,09	0,95	1,03	1,01	1,06	1,08	1,01	1,01	1,04	0,92
	MÁX	1,02	1,03	1,12	1,08	1,05	1,08	1,06	1,08	1,05	1,07	1,07	1,06
	MÉDIA	1,00	0,98	1,09	1,03	1,04	1,05	1,07	1,08	1,03	1,04	1,05	0,99

3.1 Linhas de 800kV – Controle da Eficiência

- Fluxo de potência dependente do valor de tap

$$P_{km} = \left(\frac{V_k}{a_{km}} \right)^2 g_{km} - \left(\frac{V_k}{a_{km}} \right) V_m g_{km} \cos(\theta_{km} + \phi_{km}) - \left(\frac{V_k}{a_{km}} \right) V_m b_{km} \sin(\theta_{km} + \phi_{km})$$

$$b_{km} = -\frac{x_{km}}{r_{km}^2 + x_{km}^2} \approx -\frac{1}{x_{km}} \rightarrow P_{km} = \frac{V_k V_m \sin(\theta_{km} + \phi_{km})}{a_{km} \cdot x_{km}}$$

- Alteração da tensão operacional implica em mudança do carregamento da linha - aumento do tap diminui o carregamento - entra-se em um processo circular

		CEN1	CEN2	CEN3	CEN4	CEN5	CEN6
Fluxo de P(MW) no T. Emissor	Sem Ajuste	6808	7303	2045	881	4405	7150
	Com Ajuste	6300	7255	1354	401	4087	7216
Variação Percentual		-7,46%	-0,67%	-33,84%	-54,42%	-7,22%	0,91%
Variação Absoluta (MW)		-508	-48	-693	-480	-318	66

3.2 Linhas de 800kV – Uso dos PSTs para Controle da Eficiência e Carregamento

- Manipulação da defasagem dos PSTs na conexão em Assis para controle do carregamento
- Apenas nos cenários de menor carregamento do tronco AC

	CEN3	CEN4	CEN5
Defasagem Inicial	210°	180°	180°
Defasagem Modificada	220°	165°	190°

- Aumento do carregamento -> menor perturbação no sistema inicial significando maior percentual de casos convergidos

	FLUXO DE POT ATIVA NO TERMINAL DE ENVIO (MW)					
	3 x 800kV			2 x 800kV		
	Sem Ajustes	Com Ajuste de Tap	Com Ajuste de Tap e Fase	Sem Ajustes	Com Ajuste de Tap	Com Ajuste de Tap e Fase
CEN3	2045	1354	1516	2503	1194	1247
CEN4	881	401	632	1032	366	579
CEN5	4405	4087	4310	4730	4048	4264

	Percentual de Convergência			
	3 x 800kV		2 x 800kV	
	Fase Inic.	Fase Final	Fase Inic.	Fase Final
CEN1	56,79%	-	40,28%	-
CEN2	53,09%	-	39,58%	-
CEN3	19,30%	73,39%	40,28%	56,14%
CEN4	98,25%	100,00%	85,96%	99,71%
CEN5	66,67%	89,58%	21,53%	55,56%
CEN6	100,00%	-	100,00%	-

3.2 Linhas de 800kV – Uso dos PSTs para Controle da Eficiência e Carregamento

- Diminuição das Perdas nos cenários de menor carregamento do tronco

		PERDAS MÉDIAS	
		Fase Inicial	Fase Modificada
3 X 800 kV	CEN3	13,25%	12,72%
	CEN4	16,91%	13,32%
	CEN5	12,48%	12,82%
2 X 800 kV	CEN3	12,94%	12,67%
	CEN4	16,21%	13,20%
	CEN5	12,63%	12,75%

3.3 Linhas de 800kV – Estudo do Fluxo de Reativos

- Alta correlação entre diferença entre as tensões terminais e fluxo de reativos pela linhas
- Alta correlação entre a razão das tensões terminais e o fluxo de reativos pelas linhas

	Correlação entre:	CEN1	CEN2	CEN3	CEN4	CEN5	CEN6
3 linhas	($V_e - V_r$) e Q_e	0,9507	0,9904	0,9298	0,9899	0,9304	0,9406
	(V_e/V_r) e Q_e	0,9867	0,9988	0,8889	0,9874	0,9505	0,9825
2linhas	($V_e - V_r$) e Q_e	0,9889	0,9936	0,9828	0,9779	0,9759	0,936
	(V_e/V_r) e Q_e	0,9964	0,9967	0,9914	0,9771	0,9817	0,9824

3.3 Linhas de 800kV – Estudo do Fluxo de Reativos

- Não observou-se correlação linear entre outras grandezas observadas como:
 - Fluxo de reativos e fluxo de potência ativa
 - Diferença entre as tensões terminais e fluxo de potência ativa
 - Razão entre as tensões terminais e fluxo de potência ativa
- Cada degrau no tap muda o perfil do fluxo de reativos, diminuindo a amplitude entre valores mínimos e máximos
 - Indica a possibilidade de controle do fluxo de reativos através da manipulação dos tapes dos transformadores de conexão

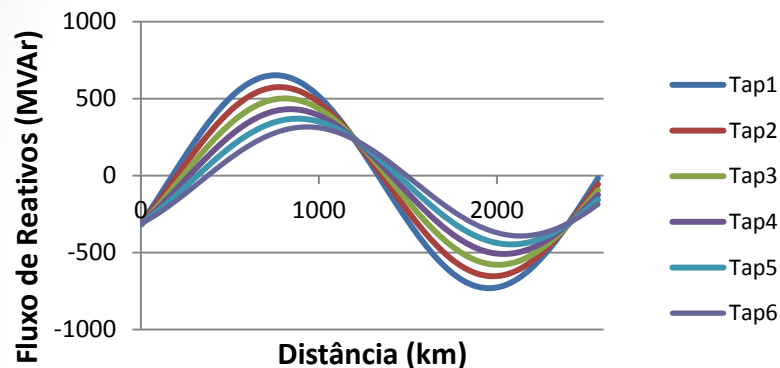
3.3 Linhas de 800kV – Estudo do Fluxo de Reativos

- Alta correlação entre a amplitude do perfil dos reativos e perdas

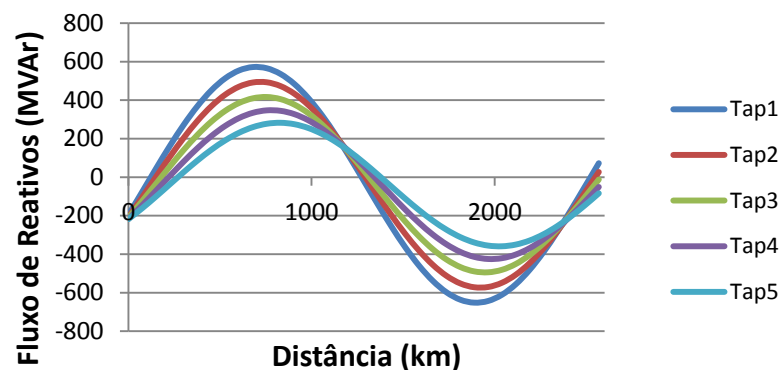
CORRELAÇÃO ENTRE AMPLITUDE DO PERFIL E PERDAS						
	CEN1	CEN2	CEN3	CEN4	CEN5	CEN6
3 linhas	0,9162	0,9696	0,9939	0,9525	0,9572	0,4729
2linhas	0,7484	0,9260	0,9244	0,9317	0,8085	0,0971
Alteração de fase	3 linhas		0,9641	0,9036	0,8784	
	2linhas		0,7854	0,9034	0,8938	

- Perfis para cenário 1 são mostrados a seguir. O padrão repete-se para os outros cenários

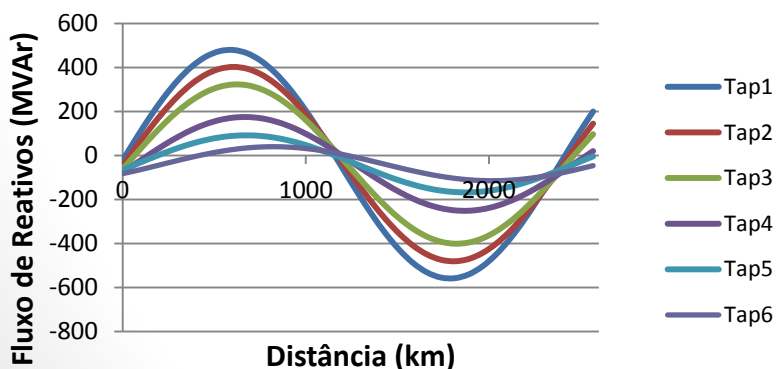
Fluxo de Reativos - CEN1 - Tap Receptor na posição 1



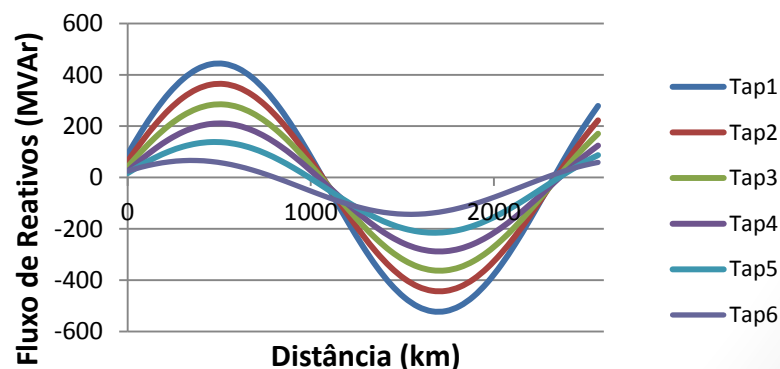
Fluxo de Reativos - CEN1 - Tap Receptor na posição 3



Fluxo de Reativos - CEN1 - Tap Receptor na posição 6



Fluxo de Reativos - CEN1 - Tap Receptor na posição 8



4. Linhas de 1000kV

- Adotou-se o mesmo procedimento de varredura dos tapes utilizado anteriormente
- Explorou-se a defasagem do PST de forma mais abrangente: 3 defasagens por cenário
- Variação do valor do reator na barra de Assis-SP (5 valores diferentes) e observação dos impactos
- Totalizam-se 15 ensaios de varredura de tap por cenário

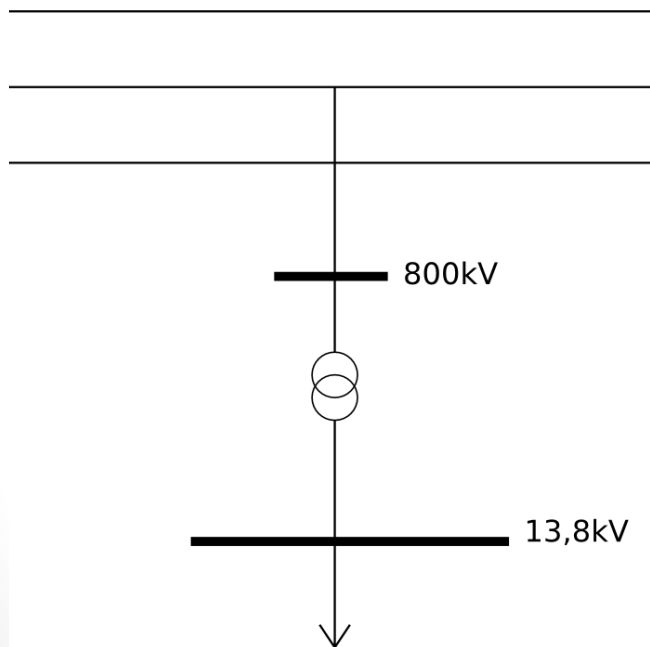
5 – Injeção e extração de potência em pontos intermediários

- Estudo da viabilidade de conexão de cargas ou geração em pontos intermediários do tronco sem uso de eletrônica de potência
- Escolha de 3 pontos de conexão: um quarto da linha (barra fictícia 9), meio da linha (barra fictícia 18) e em três quartos (barra fictícia 27)
- Três valores de potência injetada/extraída: 50MW, 100MW, 200MW e 300MW, sendo a perspectiva de consumo em possíveis pontos de conexão inferior aos 200MW
- Cenários base utilizados com eficiência próxima à máxima teórica e defasagem implicando em carregamento próximo aos cenários recebidos pela EPE

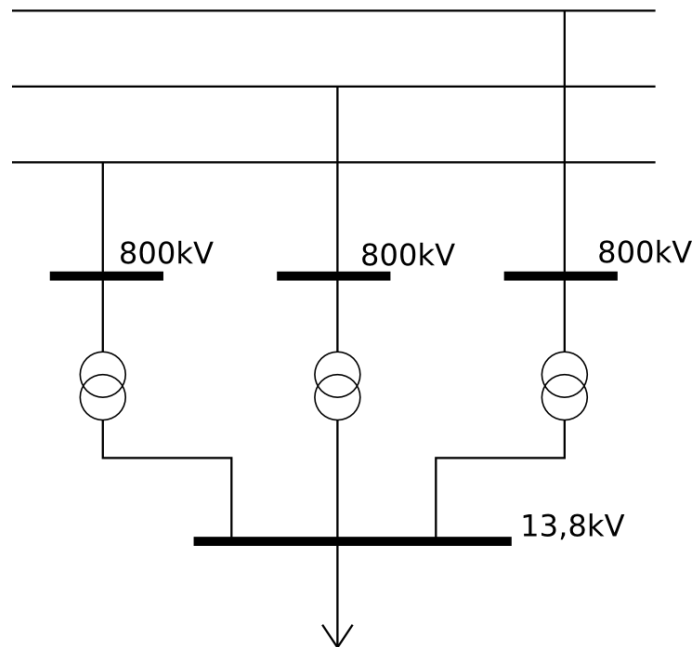
5 – Injeção e extração de potência em pontos intermediários

- Duas formas de conexão

Tronco AC



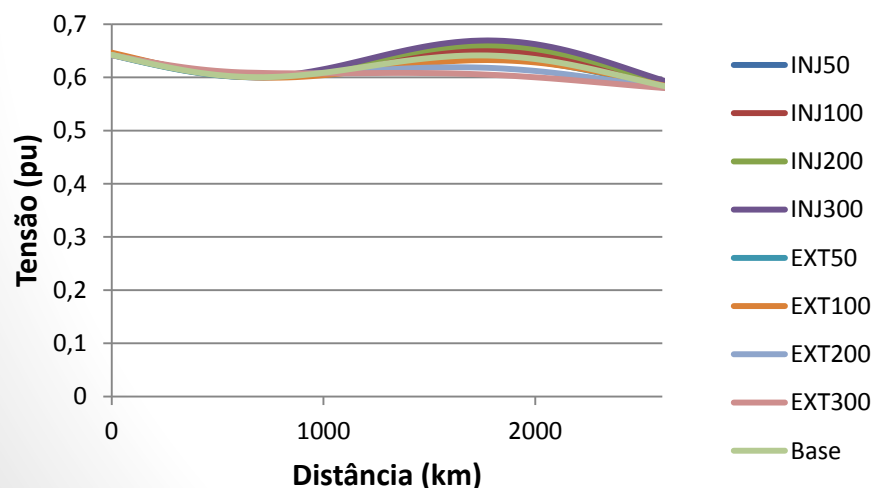
Tronco AC



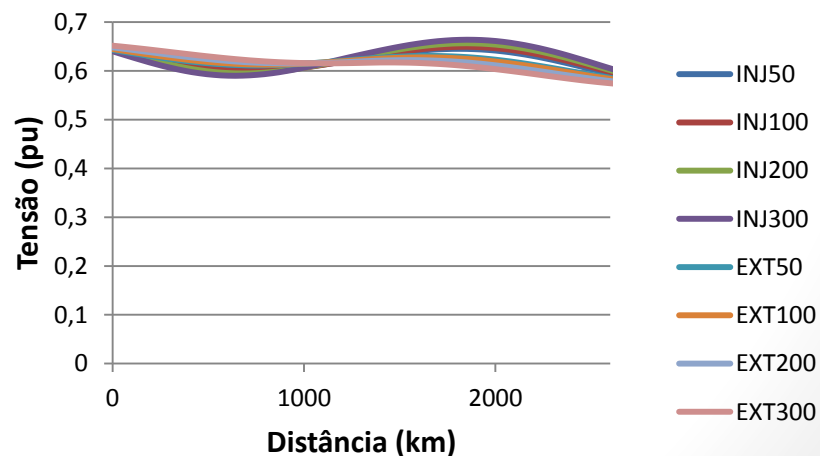
5 – Injeção e extração de potência em pontos intermediários

- Perturbação na tensão e na corrente são maiores quanto menor o carregamento do tronco e quanto mais próxima o ponto de retirada/injeção estiver dos terminais

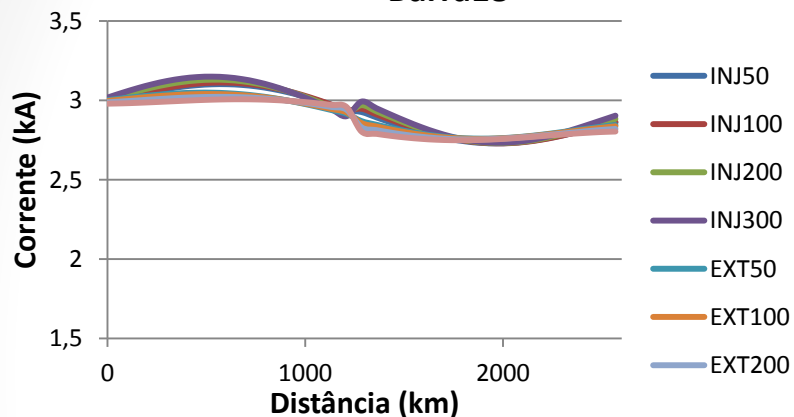
Perfil de Tensão – 2x1000kV - CEN1 - Barra09



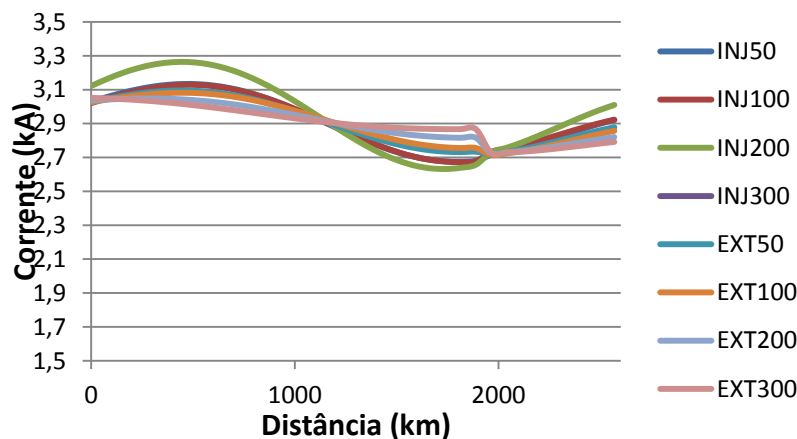
Perfil de Tensão – 2x1000kV - CEN1 - Barra18



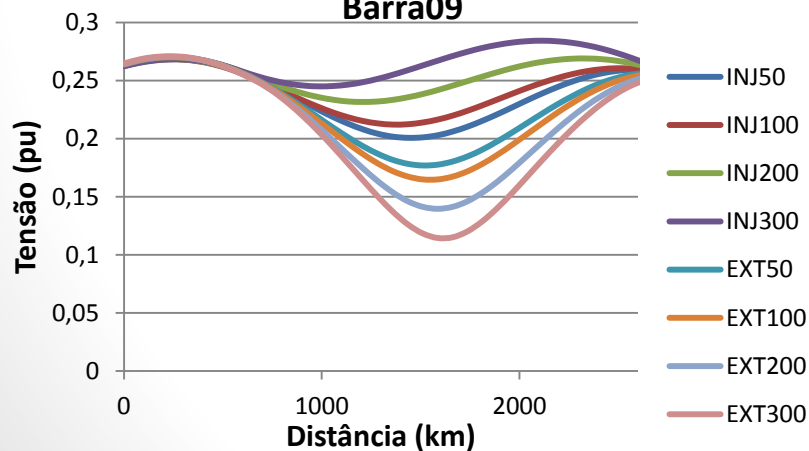
**Perfil de Corrente – 2x1000kV - CEN1 -
Barra18**



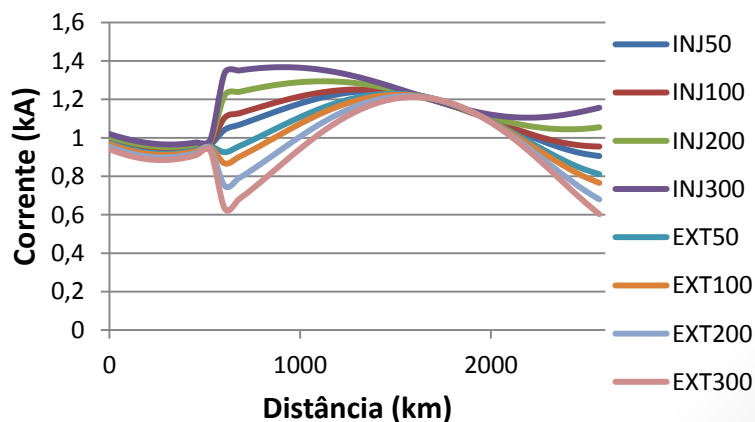
**Perfil de Corrente – 2x1000kV - CEN1 -
Barra27**



**Perfil de Tensão – 2x1000kV - CEN4 -
Barra09**



**Perfil de Corrente – 2x1000kV- CEN4 -
Barra09**



5 – Injeção e extração de potência em pontos intermediários

- Extração em apenas uma das linhas do tronco implica em maior dificuldade de convergência. Pode ser resolvido se cada linha for conectada em terminais receptores diferentes
 - Pior nos cenários de baixo carregamento do tronco: cenário 4 não converge para extração de mais de 200MW
- Cenários de baixo carregamento sofrem maior variação de tensão no centro da linha -> transformador de conexão nos pontos centrais necessita de ajustes constantes do tap
 - Variação é ainda maior quando conexão é feita em apenas uma linha

5 – Injeção e extração de potência em pontos intermediários

- Perdas se mantêm em valores próximos aos de base

Perdas 3x800kV - Extração em três linhas na barra 9									
	INJ50	INJ100	INJ200	INJ300	EXT50	EXT100	EXT200	EXT300	Base
CEN1	12,54%	12,51%	12,46%	12,40%	12,51%	12,45%	12,33%	12,21%	12,57%
CEN2	12,42%	12,40%	12,35%	12,30%	12,39%	12,33%	12,22%	12,10%	12,45%
CEN3	12,28%	12,08%	11,72%	11,37%	12,39%	12,33%	12,22%	12,16%	12,48%
CEN4	12,26%	12,01%	11,66%	11,48%	12,25%	11,94%	11,39%	11,96%	12,58%
CEN5	12,66%	12,57%	12,40%	12,23%	12,68%	12,62%	12,52%	12,42%	12,74%
CEN6	12,35%	12,32%	12,27%	12,22%	12,32%	12,27%	12,16%	12,05%	12,38%

Perdas 2x1000kV - Extração em duas linhas na barra 18									
	INJ50	INJ100	INJ200	INJ300	EXT50	EXT100	EXT200	EXT300	Base
CEN1	12,93%	12,80%	12,55%	12,32%	13,00%	12,95%	12,84%	12,73%	13,09%
CEN2	12,59%	12,48%	12,25%	12,04%	12,66%	12,61%	12,51%	12,41%	12,71%
CEN3	12,60%	12,11%	11,27%	10,57%	13,01%	12,90%	12,73%	12,59%	13,12%
CEN4	13,13%	13,00%	13,30%	14,14%	13,41%	13,43%	14,06%	14,84%	13,41%
CEN5	12,59%	12,35%	11,91%	11,49%	12,78%	12,73%	12,66%	12,68%	12,83%
CEN6	12,86%	12,75%	12,51%	12,28%	12,95%	12,90%	12,81%	12,71%	13,00%

Conclusões

- No caso de um tronco com larga variação de carregamento ao longo do ano é necessário o uso de método de controle das perdas. O controle da tensão operacional mostra-se eficiente
 - É necessária coordenação entre os transformadores nos dois terminais
 - Não foram levadas em conta dificuldades construtivas dos transformadores como chaveamento em carga, proteções específicas e tamanha variação dos tapes
 - Em cenários de mais longo prazo, com mais usinas em operação no subsistema Norte, a variação da geração ao longo do ano estima-se ser menor, exigindo menos mudanças no carregamento do tronco de meia onda

Conclusões

- A manipulação dos tapes dos transformadores pode ser usada para controle do fluxo de reativos, ainda que seja necessário estudo mais aprofundado no assunto
- O uso da defasagem dos PSTs conectados na barra de Assis mostra-se eficiente para controle do carregamento e como “ajuste fino” da eficiência
- As características construtivas não foram levadas em conta, mas pode-se pensá-lo como uma associação série de um transformador inversor de polaridade (já necessário) com um PST convencional de $\pm 30^\circ$
- Um tronco de duas linhas de 1000kV mostra-se mais vantajoso num cenário de longo prazo dada a maior capacidade de carregamento por linha

Conclusões

- A conexão de cargas e unidades geradoras no centro da linha pode ser realizada desde que trabalhe com potências abaixo de 200MW para cenários de baixo carregamento
 - Apresenta-se o mesmo problema de transformadores de larga variação do valor do tap
 - A conexão em todos os circuitos paralelos é mais estável, mas mais cara