

# Aplicações do Elo CA em sistemas multiterminais

Antonio Carlos Siqueira de Lima

# Estrutura da Apresentação

- Considerações iniciais
- Configuração de rede considerada
- Tap CA
  - Identificação de pontos “ótimos” para drenar ou injetar energia
  - Uso de FACTS
- Dreno sem FACTS
- Conclusões

# Considerações Iniciais

- Abordagem de sistemas de MO+ ( $L > 2500\text{km}$ )
- Tornar uma conexão ponto a ponto em configuração multi-terminal
  - Pontos de injeção/dreno de potência
  - $(\lambda/2)^+$  se torna um “hub” de transmissão
  - Uso ou não de conversores eletrônicos

# Considerações Iniciais

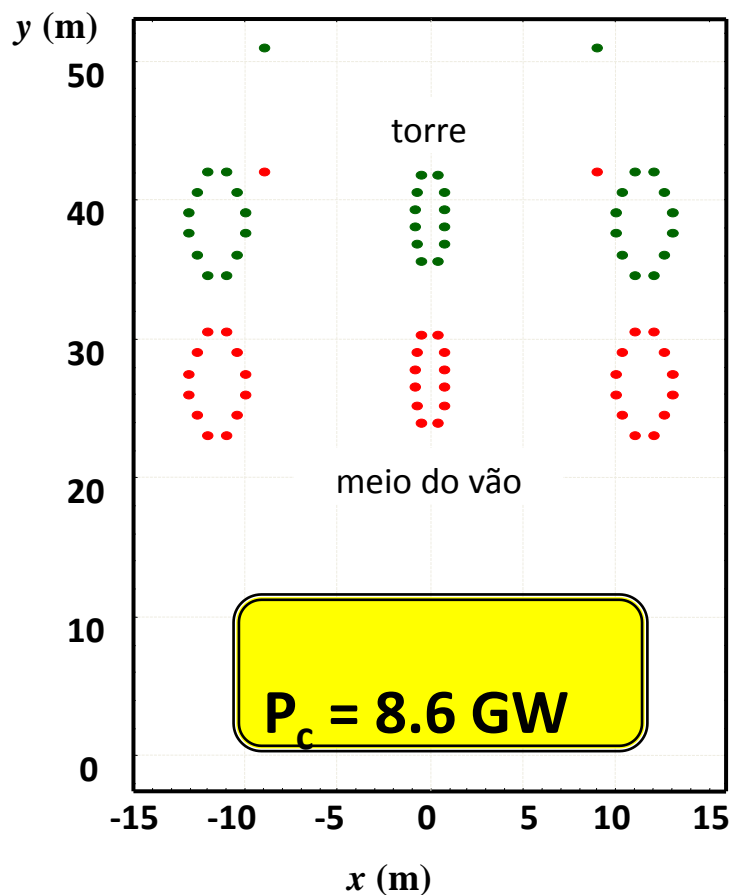
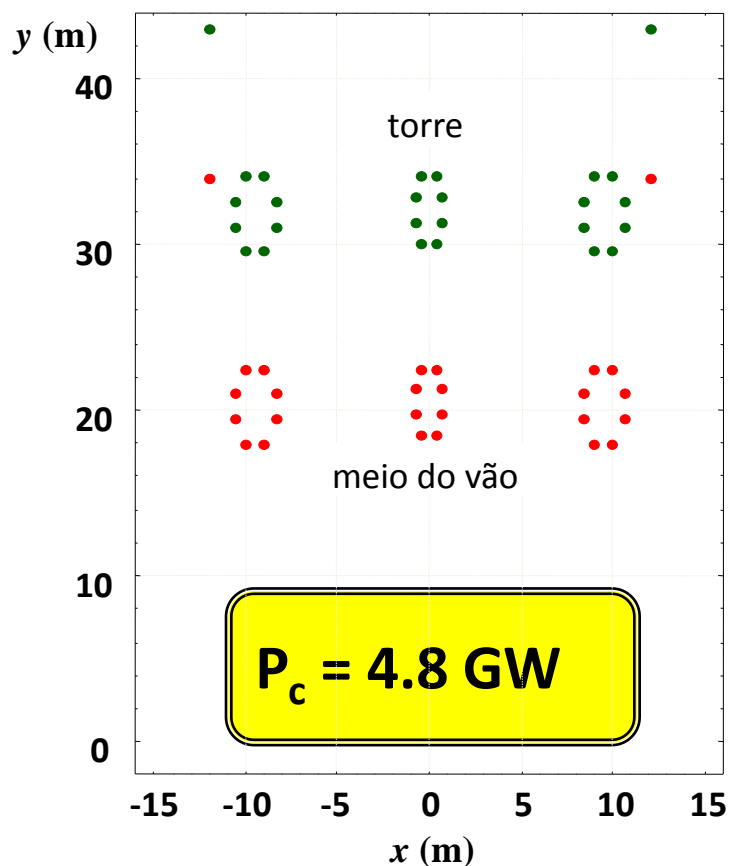
- Pesquisa iniciada na UFRJ no início dos anos 2000
- Abordagem de sistemas de MO+ ( $L > 2500\text{km}$ )
- Diferentes configurações de linhas de MO+ desenvolvidas: 800 kV, 1100 kV
- Parte dos resultados apresentados em P&D ANEEL

# Configurações de Meia Onda +

- 1000 kV
  - 12 condutores feixe elípticos – 8,6 GW
  - 12 condutores feixes elípticos e circular – 8 GW
  - 8 condutores feixe circular – 6,3 GW
- 800 kV
  - 6 condutores feixe circular – 3,3 GW
  - 8 condutores feixe elíptico – 4,8 GW
- Campo no solo abaixo de 9 kV/m em todas as configurações

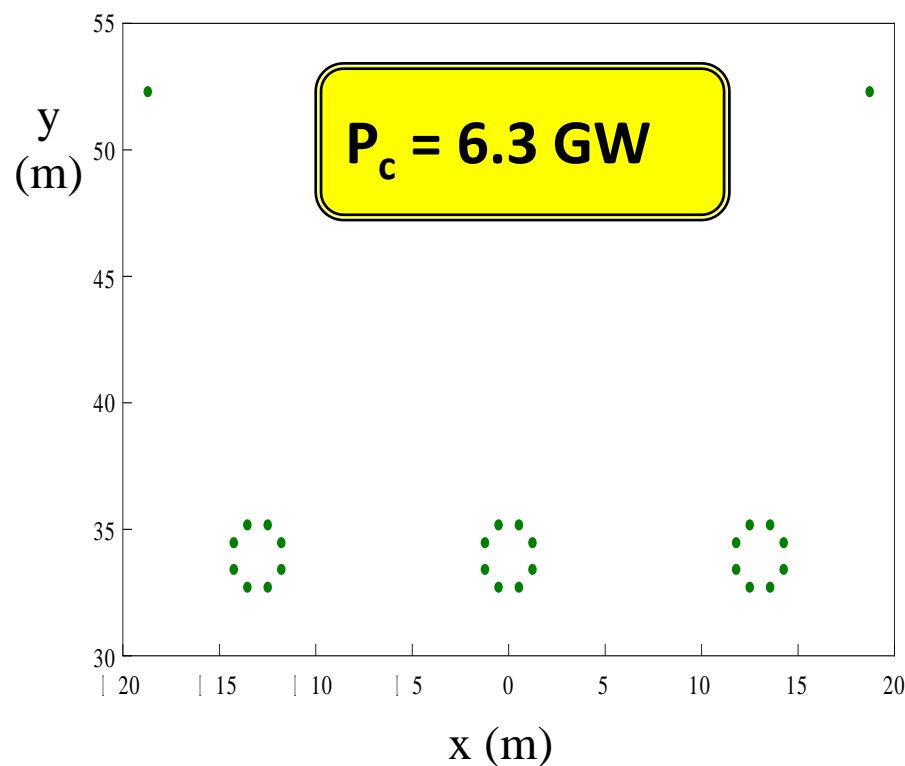
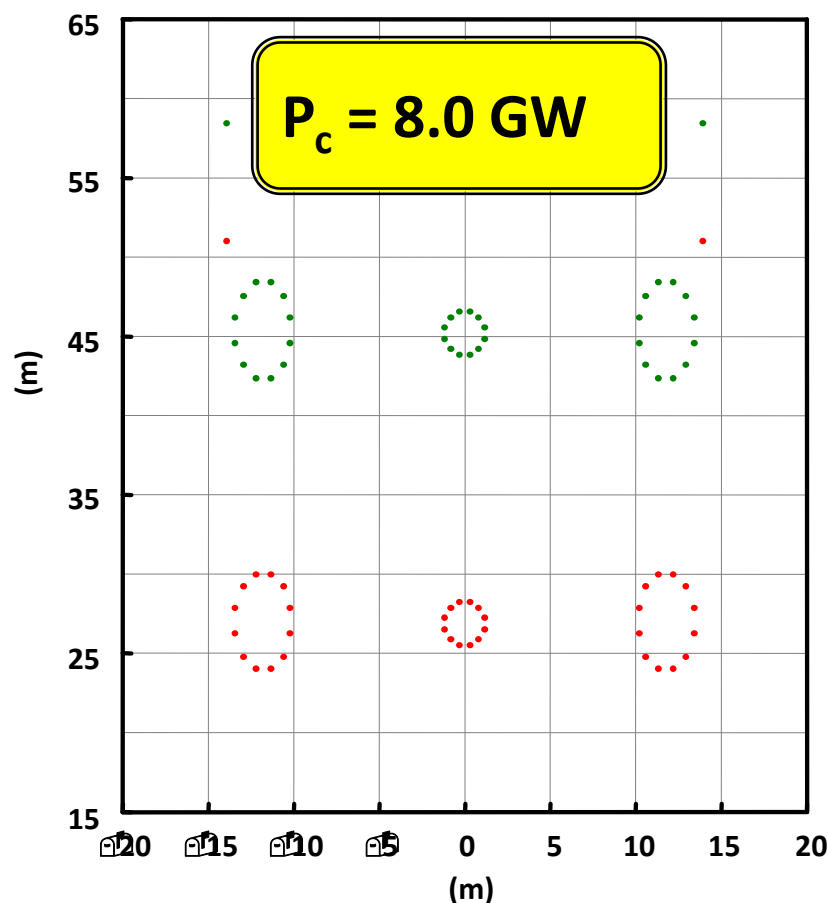
# Configurações de Meia Onda +

- Feixes Elípticos – 800 e 1000 kV



# Configurações de Meia Onda +

- 1000 kV com feixes circulares e elípticos

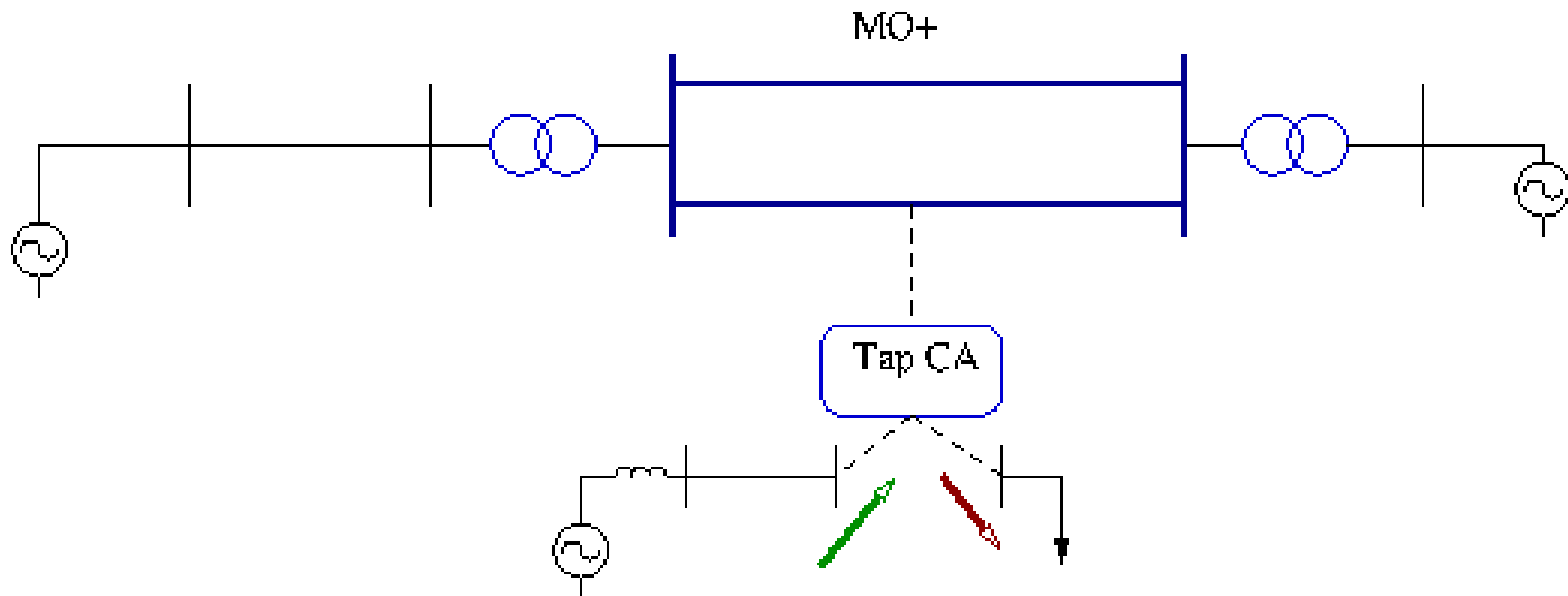


# Comparações entre as configurações

- Desempenho elétrico similar do ponto de vista de transitórios e regime permanente
- Quanto maior a potência nominal maior a flexibilidade entre dreno e injeção de potência
  - “Autobahn” de energia
- Potência característica versus custo do circuito



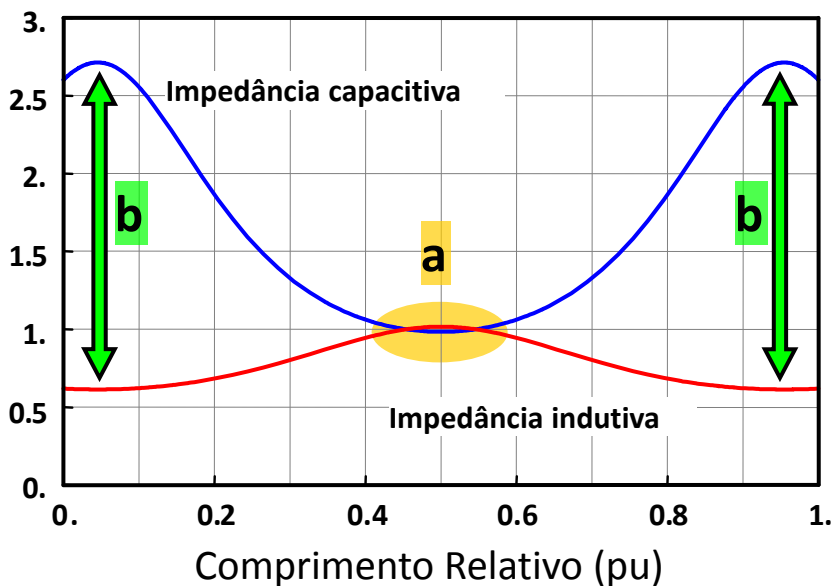
# Rede Considerada



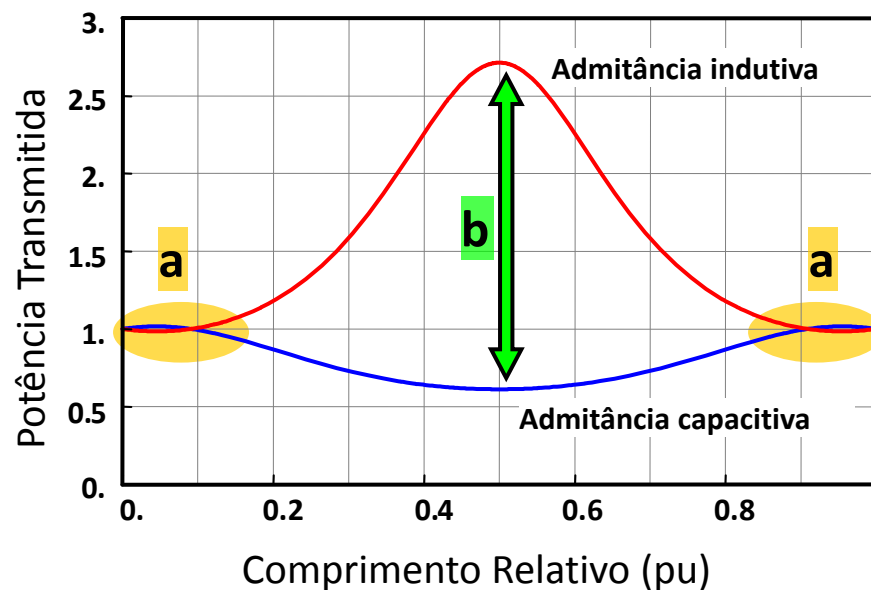
- Tap CA pode ser série ou shunt
- Comprimento do MOM de 2550 a 2700 km

# Definições da “Posição” do Tap CA

## Conexão Série



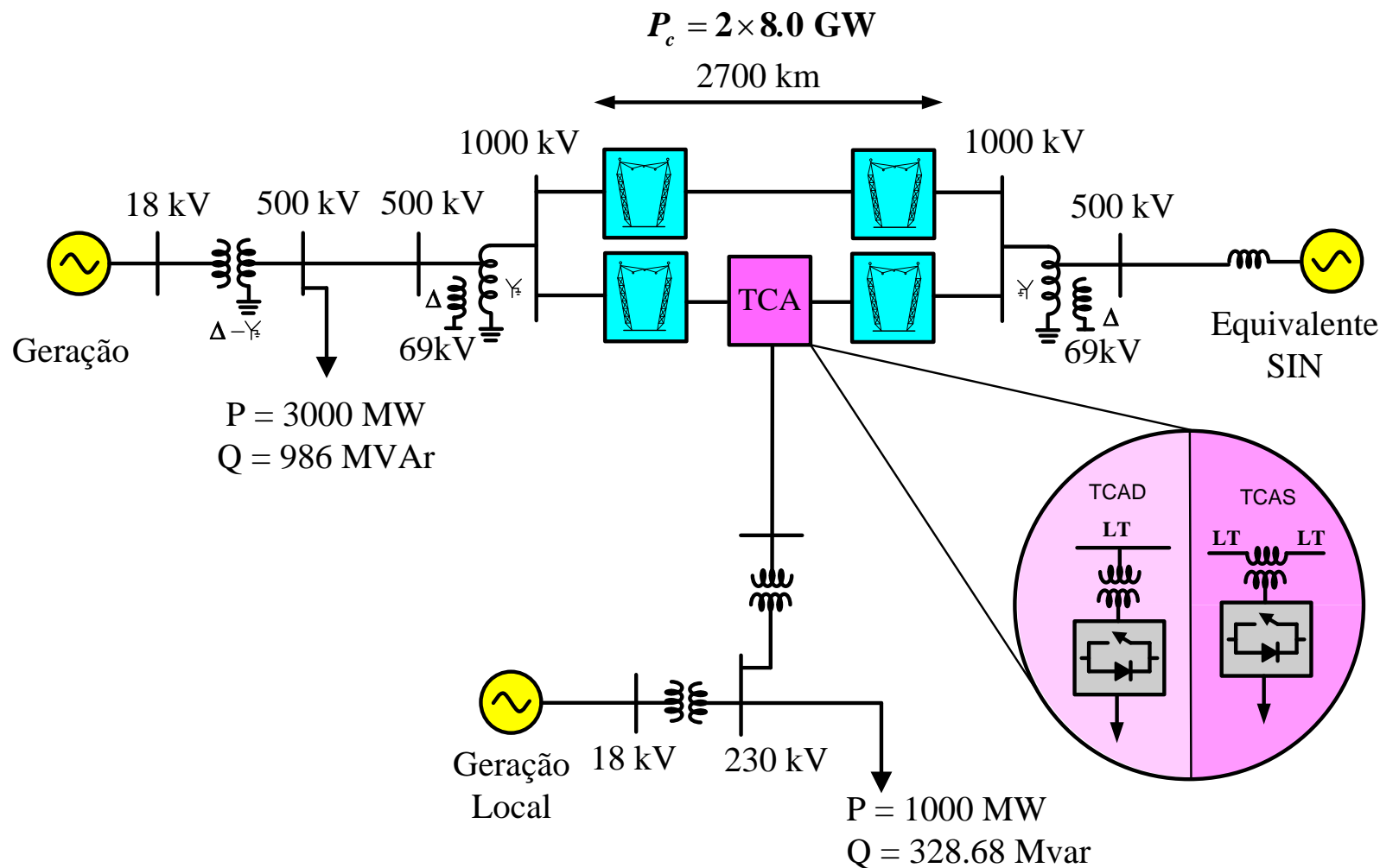
## Conexão em Derivação



**a – pouca influência sobre a potência transmitida**

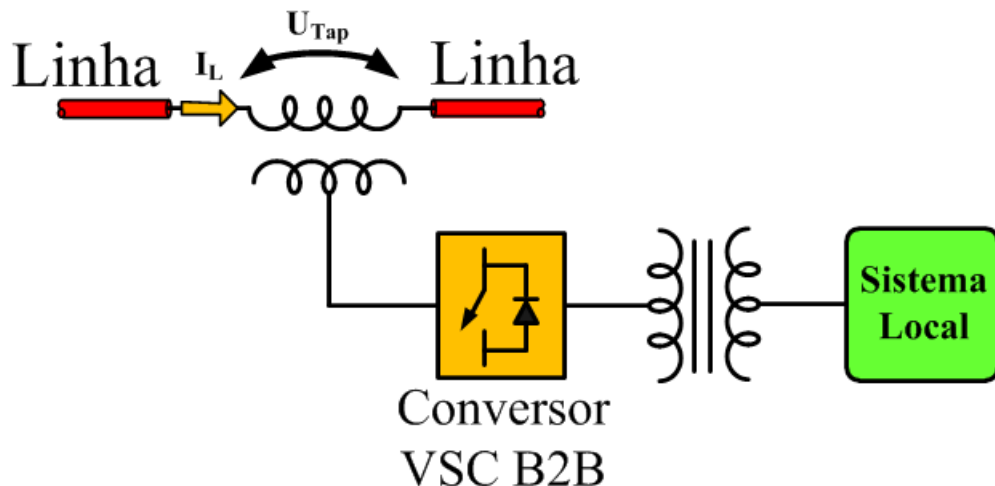
**b – grande influência sobre a potência transmitida**

# Configurações do Tap CA

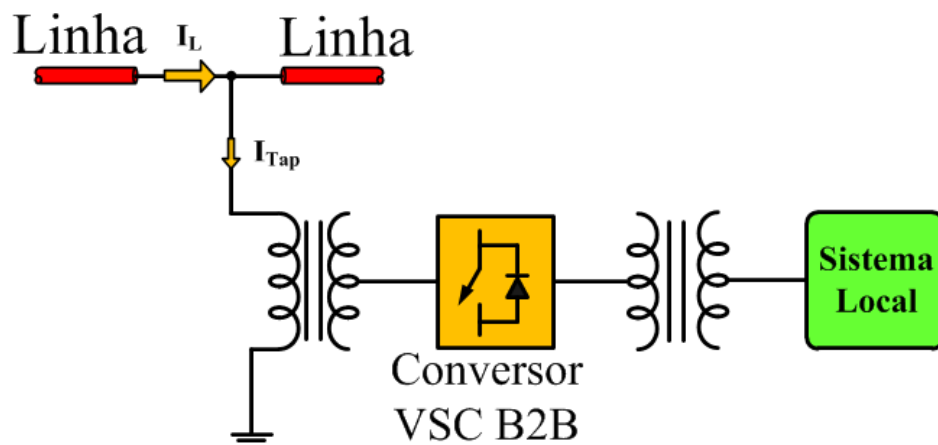


# Transmissão Multi-terminal

## Tap Série



## Tap em Derivação



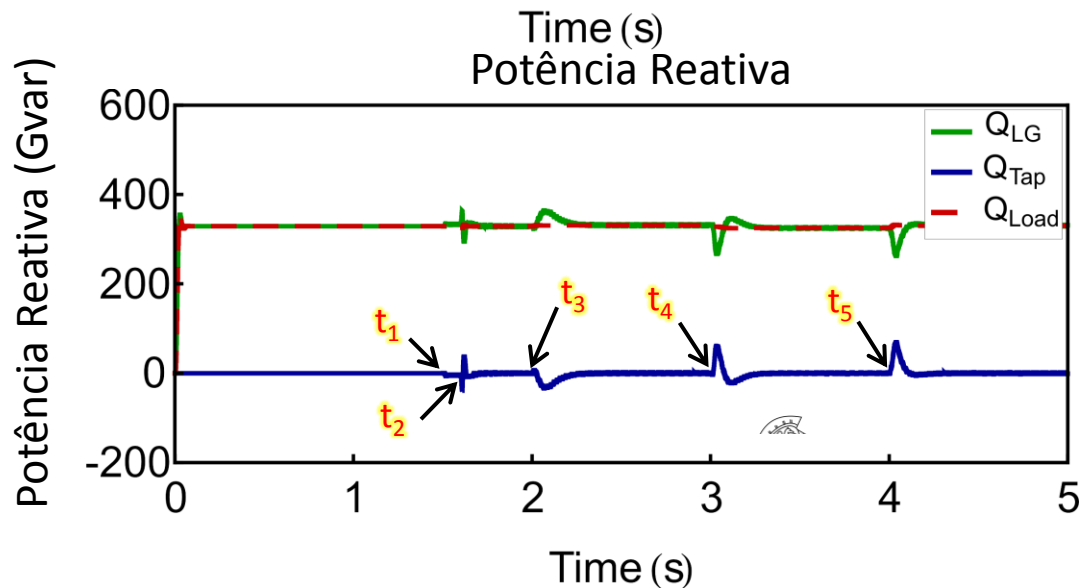
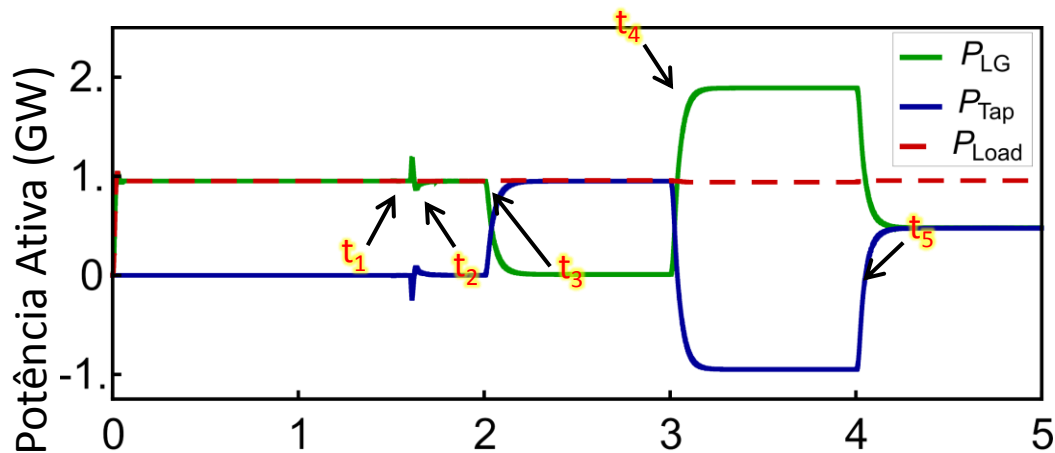
# Alguns Comentários

- Simulações indicam um limite teórico para dreno/injeção é de  $1/8$  de  $P_c$ 
  - No caso de injeção, geração de  $7/8$  de  $P_c$
  - Tap shunt até  $1/6$  do comprimento do circuito
  - Tap série deve evitar o meio da LT devido a sobretensão
    - Preferencialmente a  $\approx 200\text{km}$  do meio do circuito
- Aumento  $P_c \times \$\$$

# Exemplo LT 8,6GW

Time	Event
$t_1 = 1.4s$	Tap é conectado à linha
$t_2 = 1.7s$	O Tap é conectado ao sistema local ( $P=0$ )
$t_3 = 2.0s$	Tap começa a drenar 1,08 GW da linha
$t_4 = 3.0s$	Reversão do fluxo, 1GW injetado na LT
$t_5 = 4.0s$	Nova ordem de potência para drenar 0,5GW

Intercâmbio de Potência



# Dreno de energia pelos cabos PR

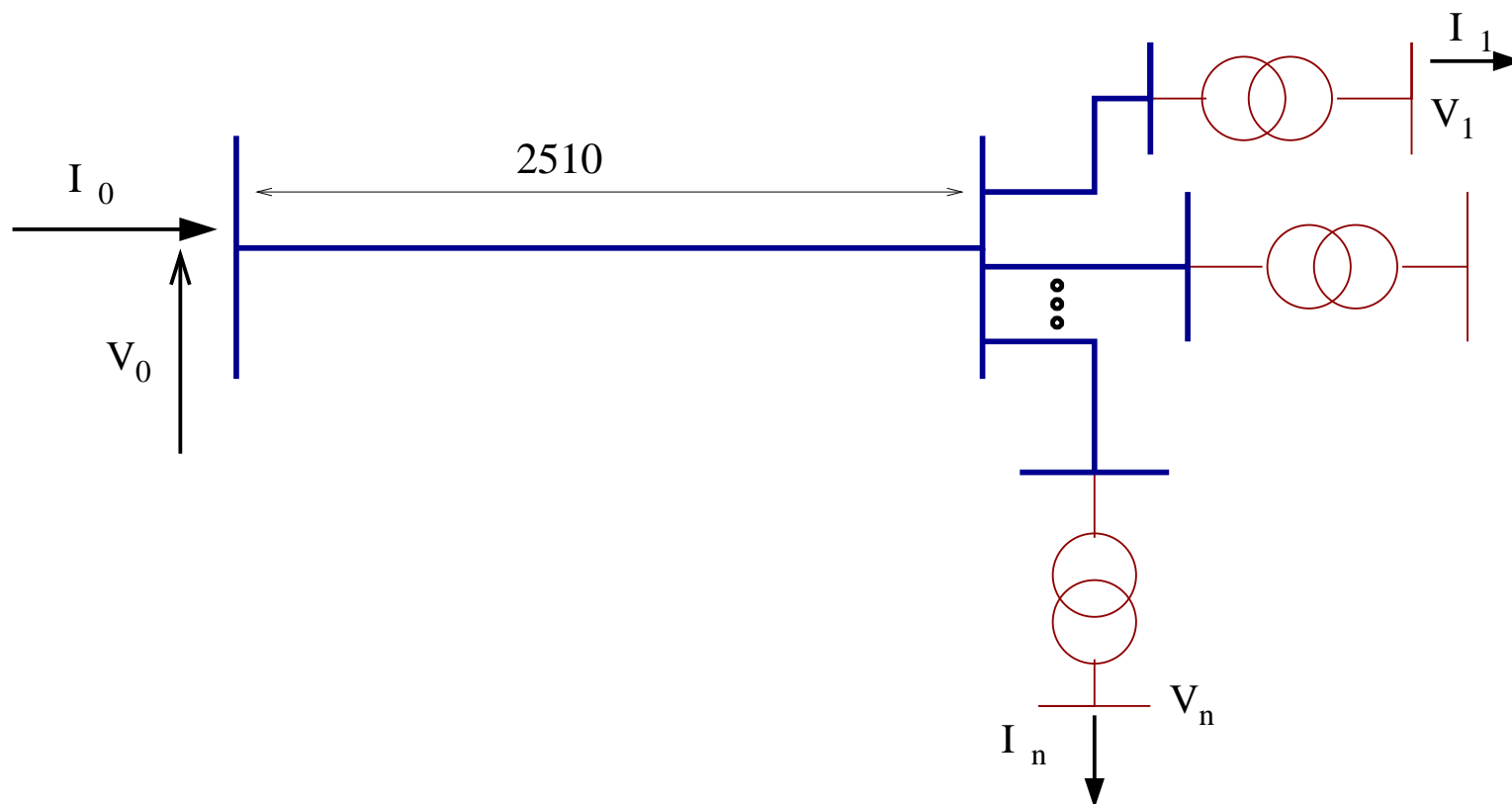
- Limite de 8% de  $P_c$
- Demanda SE para gerar tensão trifásica
  - Com a presença ou não de conversor
  - Com conversor similar ao Tap shunt

# MO+ com Múltiplas Terminações

- Como se trata de rede CA garantindo que entre os pontos principais comprimento acima de 2500km é possível conectar outros pontos
- É possível também usar múltiplas entradas e múltiplas saídas
  - $(\lambda/2)^+$  se torna um “hub” de transmissão
- É uma alternativa ao uso de conversores de eletrônica de potência para operação multi-terminal



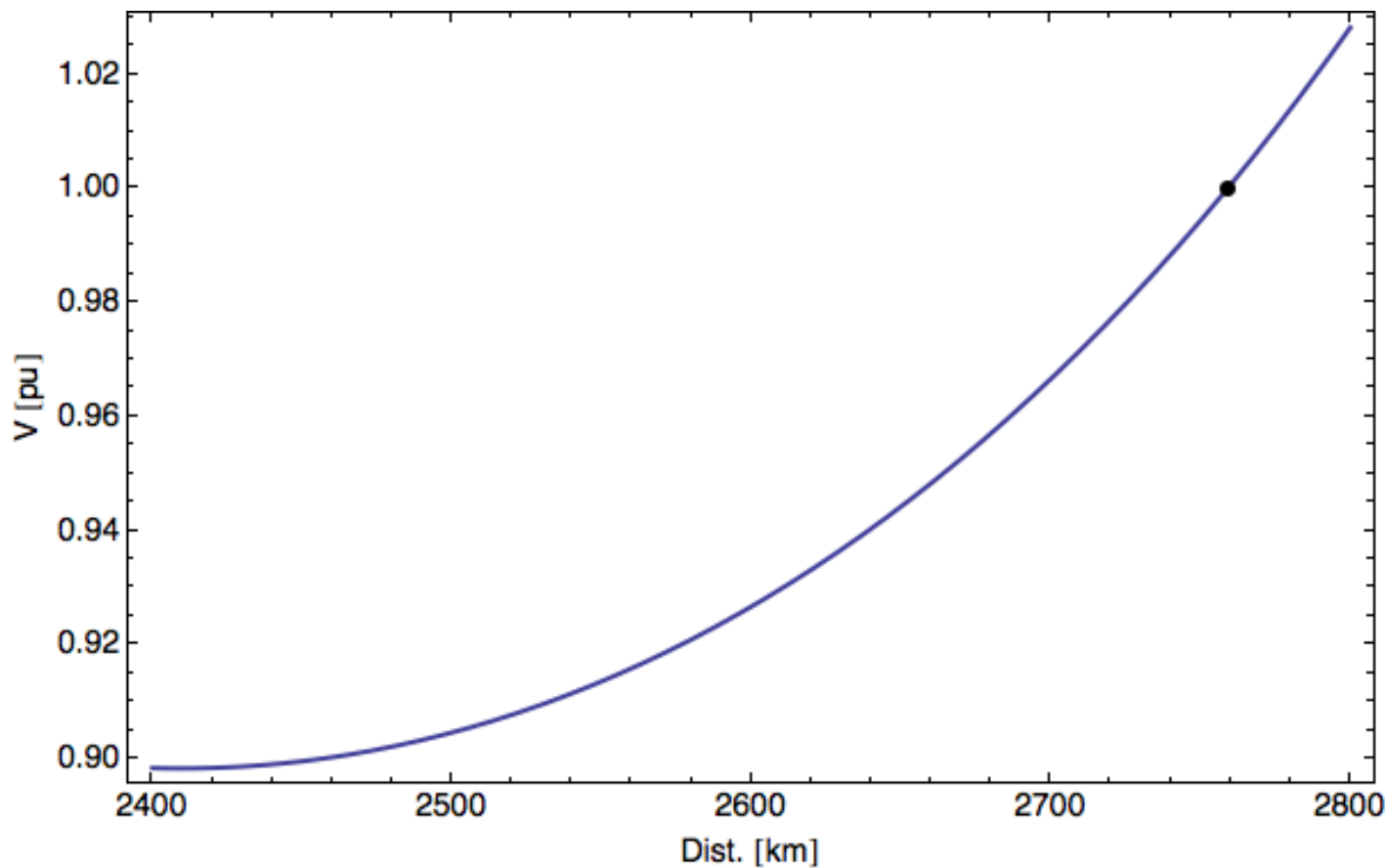
- Como definir o fracionamento?
  - Quais as distâncias e como defini-las?
- Utilizar a mesma configuração de rede?



# Comprimento dos Ramos

- $\Delta L$  teórico próximo a 250km para
- Tensões menores ramos mais longos

$$V_0 = 0.9 \text{ pu}$$



- Determinação do # de Ramos
- Circuito suposto ideal
- Todas as tensões terminais são iguais em amplitude

$$\begin{bmatrix} \mathbf{V}_0 \\ \mathbf{I}_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_0 & B_0 \\ C_0 & A_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{V}}_0 \\ \bar{\mathbf{I}}_0 \end{bmatrix}$$

$$|\mathbf{V}_0| = |\mathbf{V}_1| = |\mathbf{V}_2|$$

$$\begin{bmatrix} \bar{\mathbf{V}}_0 \\ \bar{\mathbf{I}}_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & A_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V}_1 \\ \mathbf{I}_1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \bar{\mathbf{V}}_0 \\ \bar{\mathbf{I}}_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & A_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V}_2 \\ \mathbf{I}_2 \end{bmatrix}$$

- Determinação do número de ramos
- Solução do sistema via QR
- Empilhamento eq. de tensão e corrente
  - Estima comprimento e obtem # de ramos
  - Acima de 4 ramos – sistema mal condicionado
  - $\Delta L$  teórico próximo a 250km para

$$\bar{\mathbf{V}}_0 \begin{bmatrix} 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & A_2 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & A_n & B_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V}_1 \\ \mathbf{I}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{V}_n \\ \mathbf{I}_n \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{V}_0 = 0.9 \text{ pu}$$

# Configuração # 1

- Testes com It 800 kV, feixe elíptico entregando Pc
- Circuito principal de 2510 km para garantir  $\lambda/2+$
- Análise em regime e transitório implementado no EMTP
- Estudos de transitórios indicam a necessidade de fixar alguns procedimentos

# Configuração # 1

- Duas possíveis estratégias de energização
- Circuito principal + um dos ramos
  - Maiores sobretensões e resistor de pré em cada ramo “auxiliar”
- Circuito principal
  - ZnO convencional nos ramos e alta capacidade no circuito principal
  - Resistor de pré-inserção apenas no circuito principal
- Projeto do Transformador em conjunto da LT

- Topologias consideradas
  - Equivalentes no terminal emissor e no terminal receptor de cada ramo (modelado no EMTP)
  - $P_{nom}$  – potência de entrada -Perdas

# 1.a		#1.b		#1.c		#1.d	
$\Delta L$	% $P_{nom}$	$\Delta L$	% $P_{nom}$	$\Delta L$	% $P_{nom}$	$\Delta L$	% $P_{nom}$
200	33	200	25	250	35	250	33
200	33	250	50	250	35	250	33
200	33	200	25	200	30	250	33

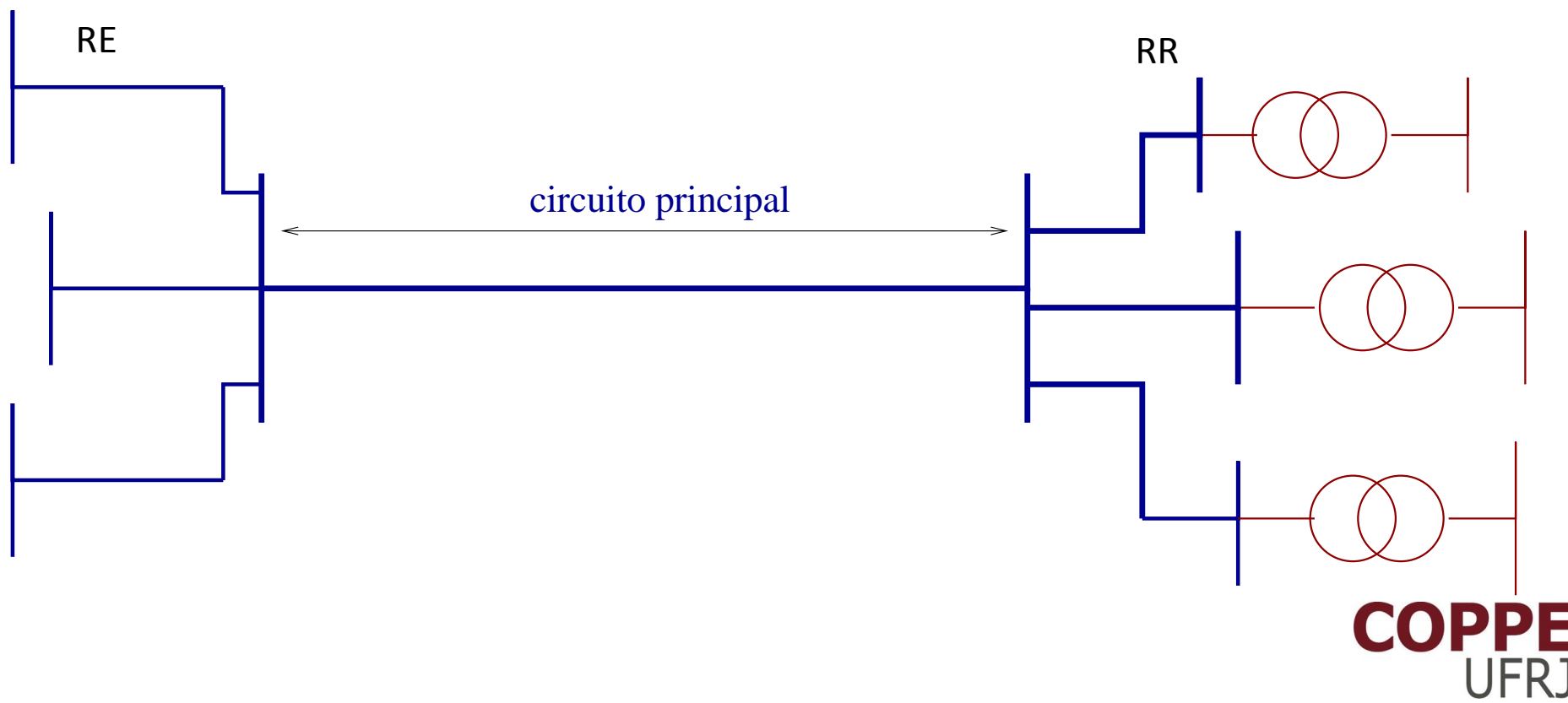
# Configuração # 1

- Transformadores menores podendo até incluir a defasagem de 180 graus no caso de interligação com o SIN no terminal emissor
- Esquema fixo de energização
  - Ramo #1 – trafo do ramo #1 – tomada de carga e depois energização do ramo #2



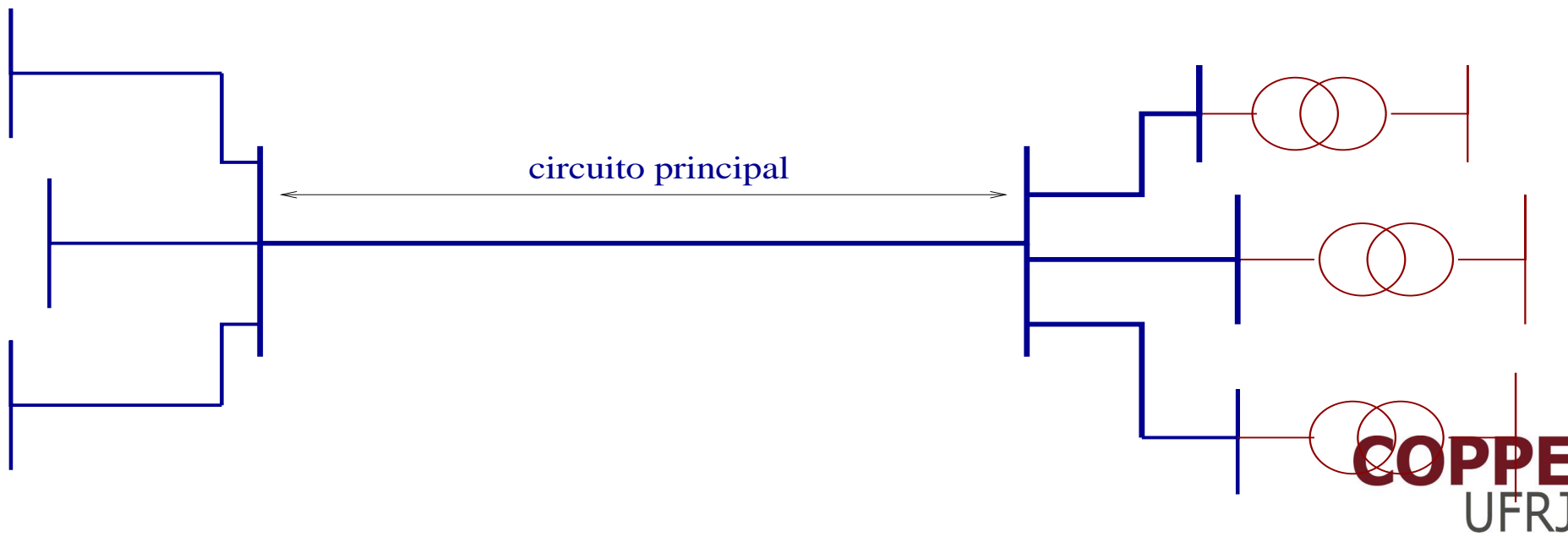
# Configuração # 2

- “Hub” de transmissão de potência
- Circuito principal > 2400km



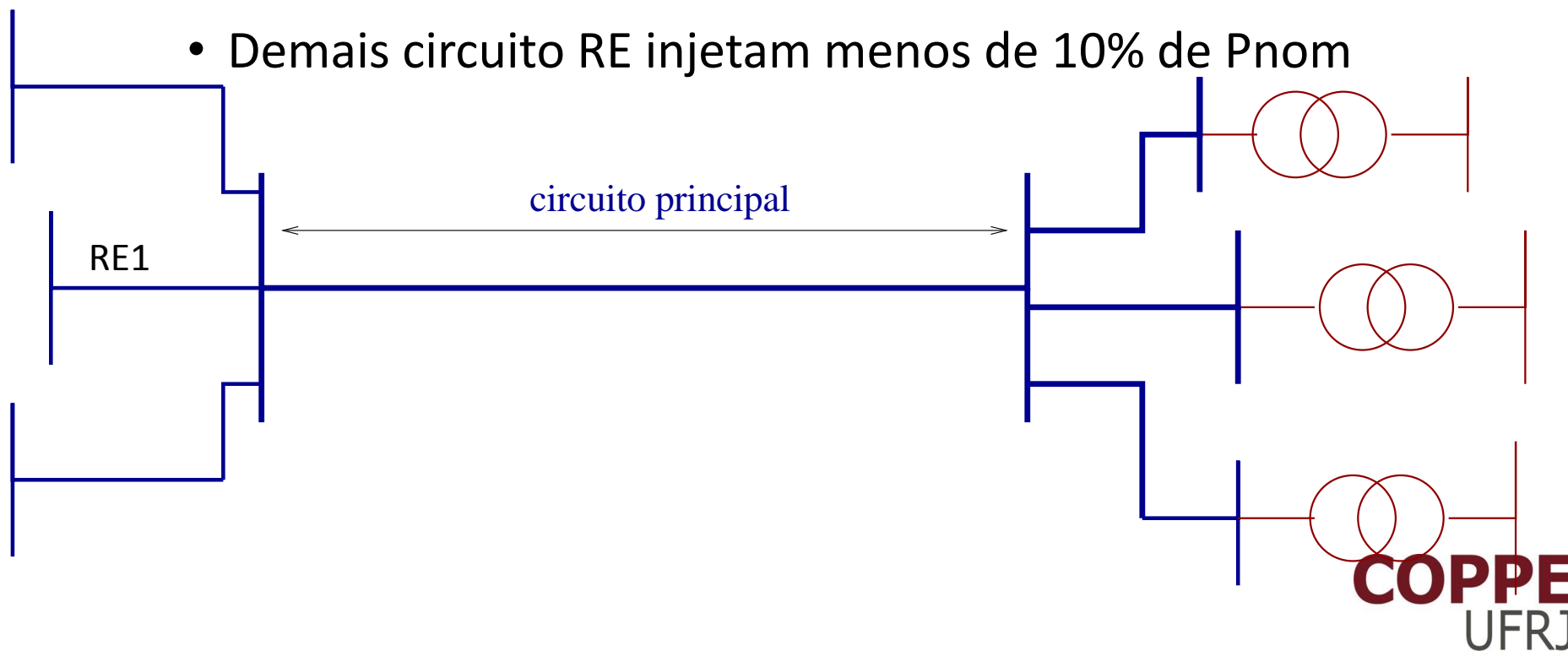
# Configuração # 2

- Circ. principal 2510km RE (RR) < 125 km
- Circuito RE de outras configurações entregando  $P_c$  no terminal emissor
  - RR de até 250 km



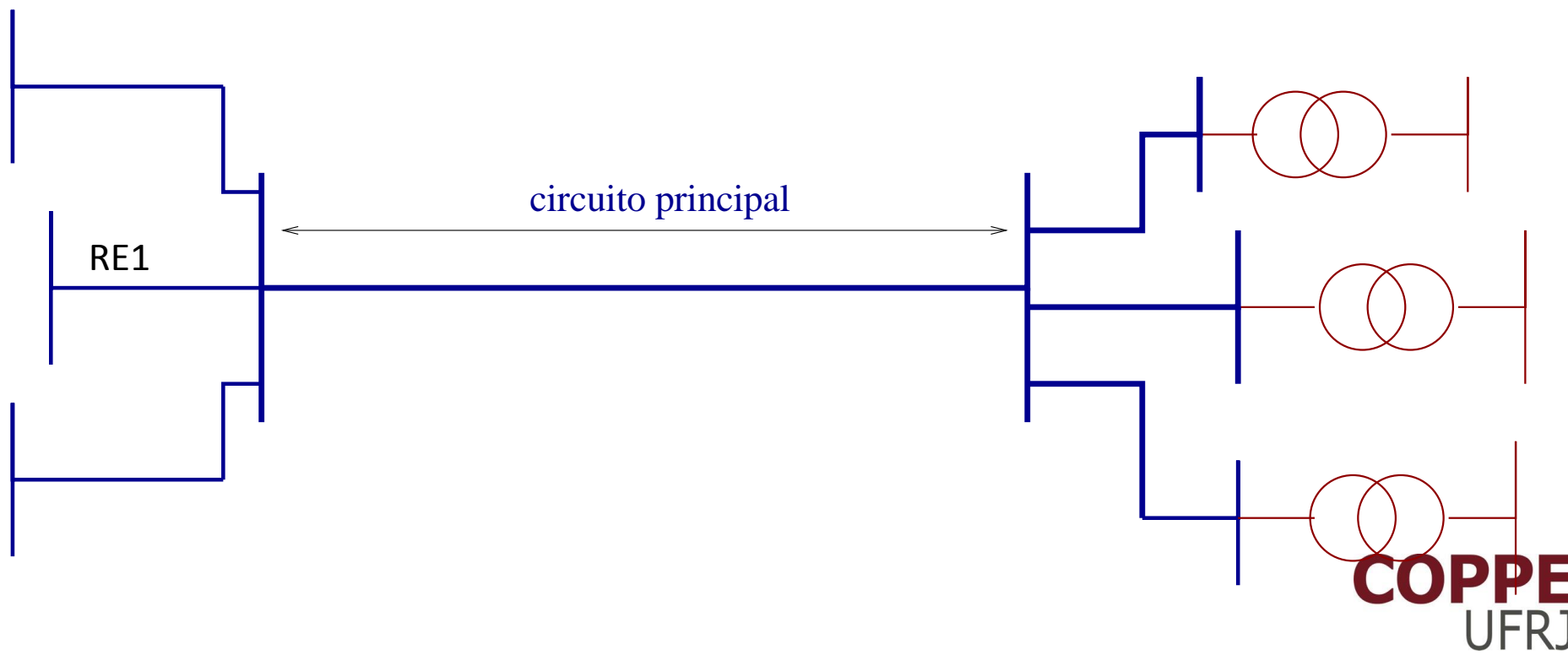
## Configuração # 2

- Um dos RE é “fixo” tal que  $Ref+CP= 2510$ 
  - Idéia similar a injeção de potência via TAP Shunt
  - CP pode ser igual a 2400km com RE1=150km
  - Demais circuito RE injetam menos de 10% de  $P_{nom}$



## Configuração # 2

- Ordenação das manobras de energização
- Energizar todos RE1 depois circ. Principal
- Mesmo condicionantes de equip. da conf. #1



# Viabilidade Econômica

- Considerando Conf. #1
- Custo dos ramos (basicamente linha)
  - C1 – custo  $\lambda/2+$
  - C2 – Custo dos reforços
  - C3 – Custo do transformador
  - Conf. #1 com três ramos de 2500km
  - Custo equivalente de uma  $\lambda/2+$  de 3250

$$\frac{C_1}{2500} 3250 + k_2 C_2 + k_3 C_3 \leq C_1 + C_2 + C_3$$

# Conclusões

- Diversas alternativas a MO+ ponto-a-ponto
- Permite uma maior distribuição do impacto de novas transmissões
- Tap CA podem ajudar também no controle do fluxo de potência na MO+
- Multi-terminal é possível através de conversores VSC B2B
  - Tap série idela para conexões próximas à região central
  - Tap em derivação para conexões próximas aos extremos do circuito

# Conclusões

- Soluções sem conversores não demandam novos desenvolvimentos tecnológicos do que aqueles da MO+
- Conexões via PR seria apenas de valor limitado
- Hub de MO+ demanda um controle coordenado entre as cargas
- É possível trabalhar com a MO+ “centralizando” a interligação entre áreas
- Há um aumento de custo em relação a MO+

# Agradecimentos

- Diversos colegas colaboraram ou ainda estudam o tema
- Maurício Aredes, Edson Watanabe, Robson Dias, apenas para citar alguns
- **Ao Prof. Carlos Portela o nosso apreço pelo eterno mestre**