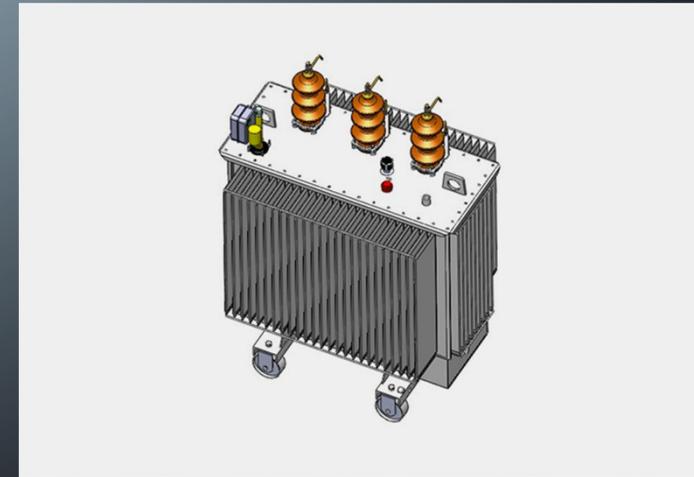




REATORES EM DERIVAÇÃO

POR QUE UTILIZA-SE REATORES EM DERIVAÇÃO?

- Linhas de transmissão em extra alta tensão de energia elétrica (linhas aéreas ou cabos isolados) são caracterizadas por elevadas capacitâncias próprias
- Durante períodos de baixas demandas das cargas elétricas, pode existir **excesso de potência reativa injetada no sistema**, logo, **o nível da tensão elétrica pode ser elevado!**
- A **estabilidade dinâmica** e o **controle do valor da tensão** do sistema elétrico são obtidos através do **controle da potência reativa** no sistema e são fundamentais para a segurança das instalações, equipamentos e fornecimento da energia elétrica



POR QUE UTILIZA-SE REATORES EM DERIVAÇÃO?



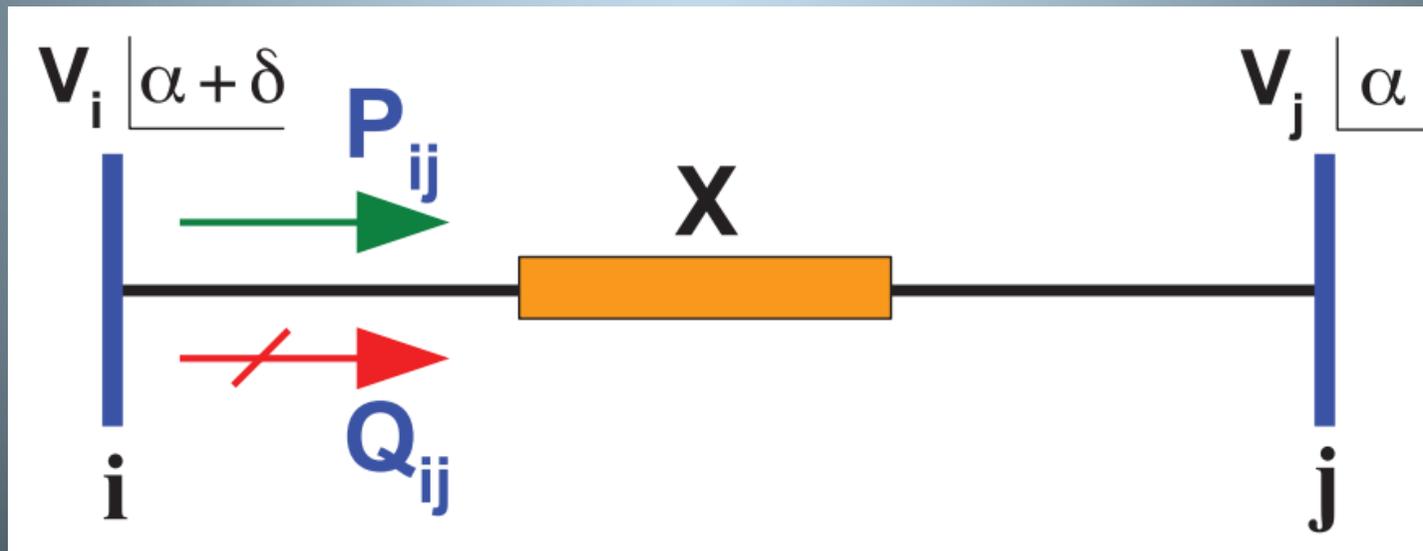
- Quando opera em vazio (ou carga leve), predomina o campo elétrico, e a linha se comporta como um capacitor, fornecendo energia reativa
- Em carga pesada (cuja situação extrema é a operação em curto-circuito) há predominância do campo magnético, e a linha absorve energia reativa

POR QUE UTILIZA-SE REATORES EM DERIVAÇÃO?



- Quando a linha opera em regime com a potência natural (equilíbrio entre a energia nos campos elétrico e magnético), o fator de potência é constante ao longo de todo o seu comprimento, e a linha não consome energia reativa do sistema alimentador

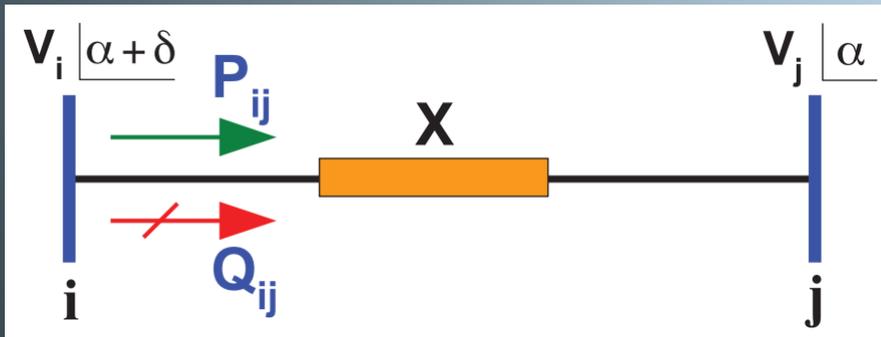
POR QUE UTILIZA-SE REATORES EM DERIVAÇÃO?



$$P_{ij} = \frac{|V_i| \cdot |V_j|}{X} \cdot \sin \delta$$

$$Q_{ij} = \frac{|V_j|}{X} \cdot (|V_i| \cdot \cos \delta - |V_j|)$$

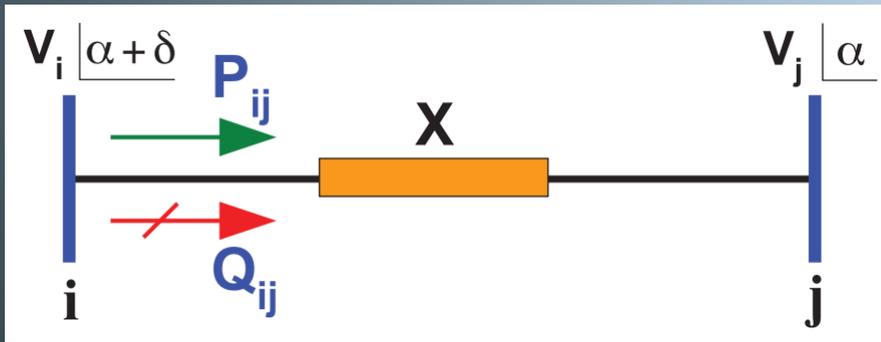
POR QUE UTILIZA-SE REATORES EM DERIVAÇÃO?



A alteração do ângulo de defasagem angular δ , entre as tensões das barras, causa uma alteração maior no fluxo da potência ativa P_{ij} entre as barras

$$P_{ij} = \frac{|V_i| \cdot |V_j|}{X} \cdot \text{sen} \delta$$

POR QUE UTILIZA-SE REATORES EM DERIVAÇÃO?

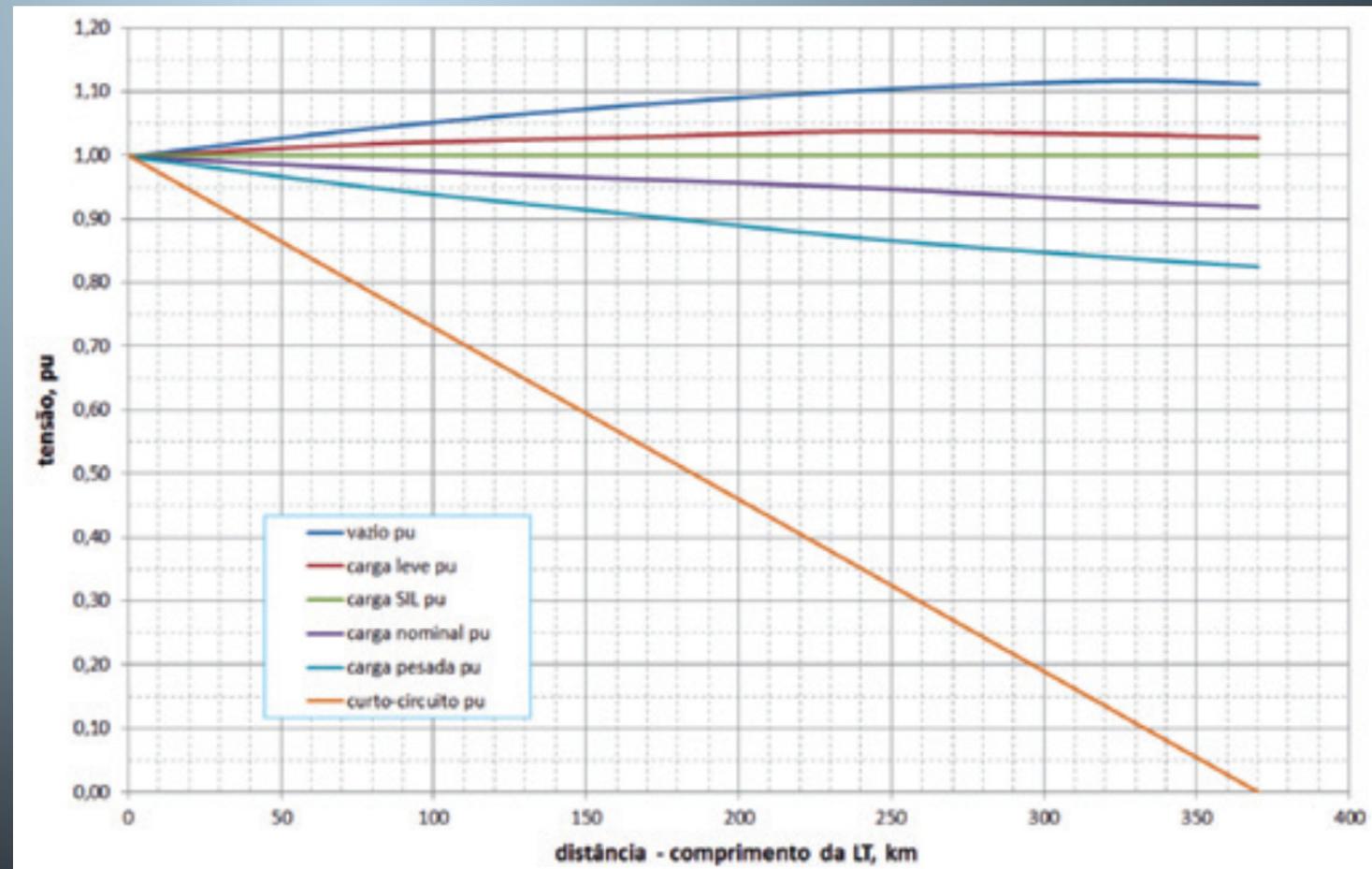


A alteração no fluxo da potência reativa Q_{ij} , entre as barras, causa uma alteração maior dos módulos das tensões nas barras

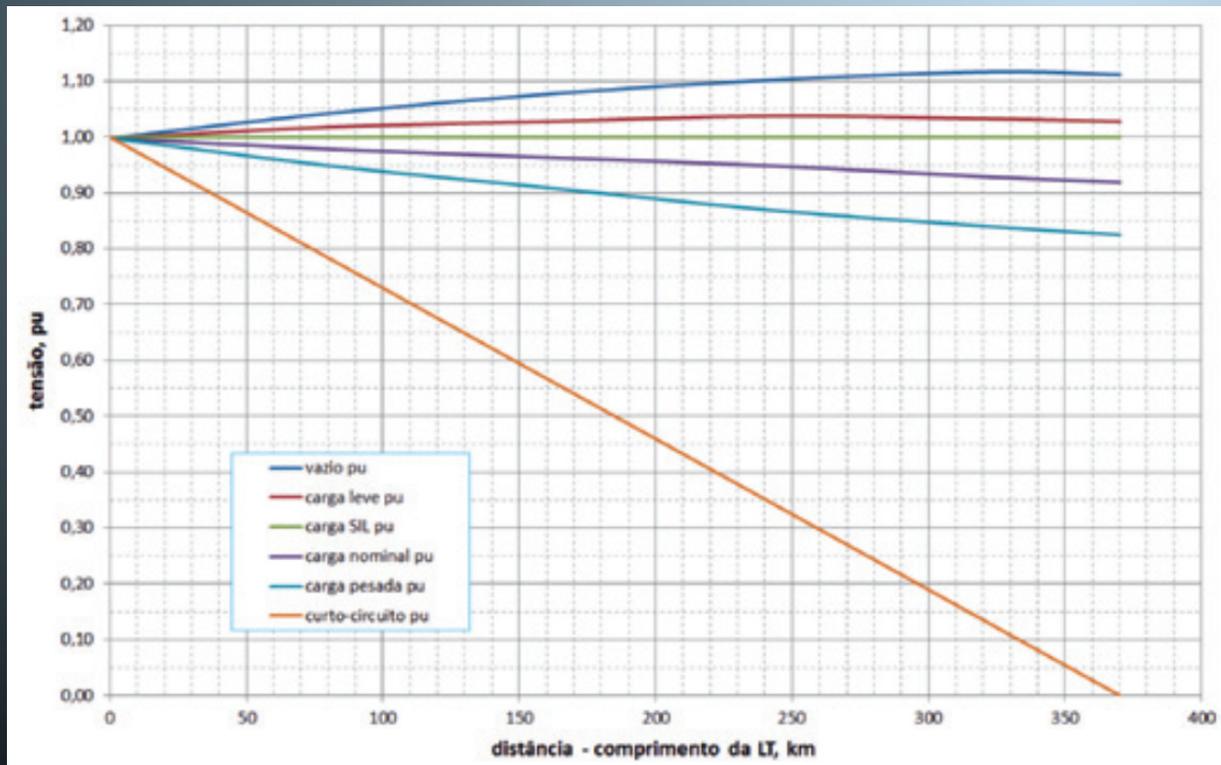
A alteração no fluxo da potência reativa Q_{ij} , entre as barras, causa uma alteração maior dos módulos das tensões nas barras

POR QUE UTILIZA-SE REATORES EM DERIVAÇÃO?

Os reatores têm a função de **reduzir** ou mesmo **anular** certos efeitos indesejáveis da operação da linha, tão mais acentuados quanto maior seu comprimento



POR QUE UTILIZA-SE REATORES EM DERIVAÇÃO?



* a queda de tensão em módulo é função da corrente na linha e do valor de sua resistência, e sua fase depende exclusivamente do fator de potência do receptor da linha

** a linha não necessita de energia reativa (exceto durante o transitório de energização)

- Compensando-se toda a reatância indutiva por meio de capacitores série e toda a reatância capacitiva por reatores indutivos em derivação, a linha se comporta como um circuito puramente resistivo, possuindo resistência série e resistência em derivação

POR QUE UTILIZA-SE REATORES EM DERIVAÇÃO?

- Não se visa à compensação total, contentando-se com compensação parcial, com o objetivo de assegurar condições ótimas de funcionamento, tanto sob o ponto de vista da estabilidade do sistema, como da regulação de tensões, como de potências reativas



- É possível alterar artificialmente o comprimento de uma linha em relação ao comprimento de onda por meio de duas soluções: seu encurtamento, pela compensação integral dos elementos reativos, sua reduzindo-se a um circuito resistivo, ou seu prolongamento no sentido de seu comprimento elétrico se tornar equivalente a uma linha de meia-onda

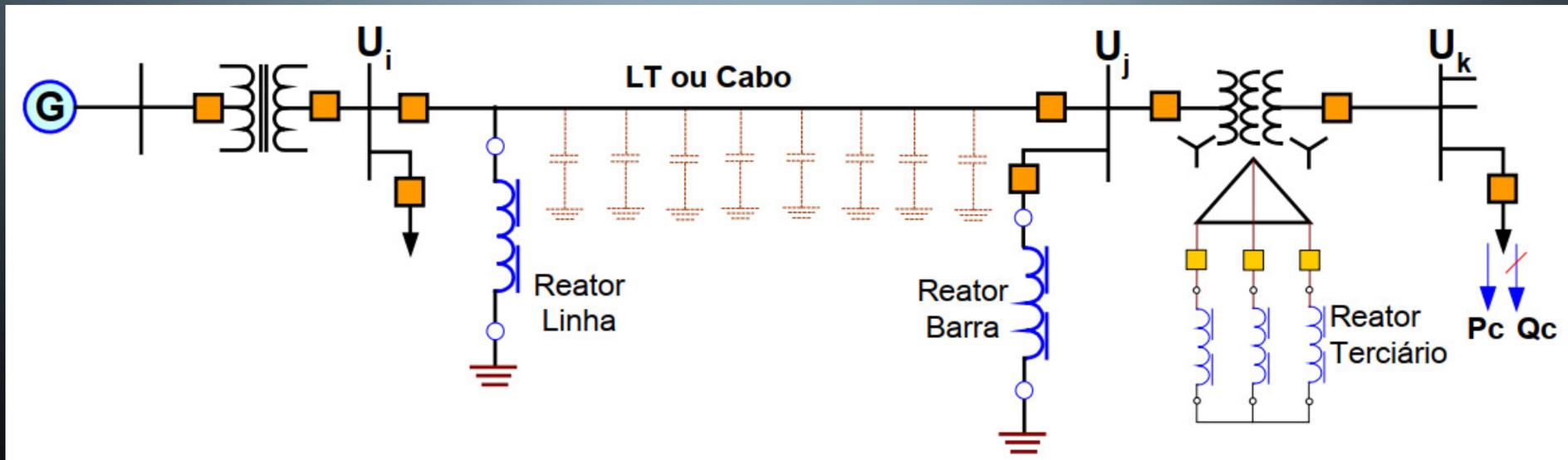
POR QUE UTILIZA-SE REATORES EM DERIVAÇÃO?

- Reatores em derivação indutivo são empregados para **compensar a reatância capacitiva natural de linhas**
- Com essa compensação procura-se a **neutralização do efeito Ferranti, ligando-se a ambas as extremidades das linhas** reatores indutivos de indutância variável
- As tensões nas extremidades da linha são mantidas no valor desejado
- O emprego dos reatores não elimina a elevação das tensões no meio da linha, atuando somente em suas extremidades
- Tem ainda a função de reduzir sobretensões nos surtos de manobra



POR QUE UTILIZA-SE REATORES EM DERIVAÇÃO?

- Os reatores são ligados diretamente ao barramento de saída das linhas, nos sistemas em tensões mais elevadas
- É comum ligar os reatores em enrolamentos terciários dos transformadores terminais em sistemas de tensões mais baixas
- As tensões em pontos intermediários podem também ser reduzidas ao nível da tensão no transmissor, em vazio, com a instalação de reatores em pontos intermediários



POR QUE UTILIZA-SE REATORES EM DERIVAÇÃO?

- Os reatores são ligados diretamente ao barramento de saída das linhas, nos sistemas em tensões mais elevadas, sendo comum empregar para esse fim enrolamentos terciários dos transformadores
- O emprego dos reatores não elimina a elevação das tensões no meio da linha, atuando somente em suas extremidades



SUBESTAÇÃO POR ONDE PASSA METADE DA ENERGIA DE ITAIPU RECEBE REFORÇO DE REATORES ESPECIAIS

POR QUE UTILIZA-SE REATORES EM DERIVAÇÃO?

- Utiliza-se reatores em derivação de **potência constante** (controle de tensão por degrau único de potência reativa) e de **potência variável** (VSR, controle de tensão por múltiplos degraus de potência reativa)
- A potência nominal de reatores em derivação monofásicos, relacionada à tensão nominal, é 27, 33, 40, 55, 60, 100, 110, 133 Mvar



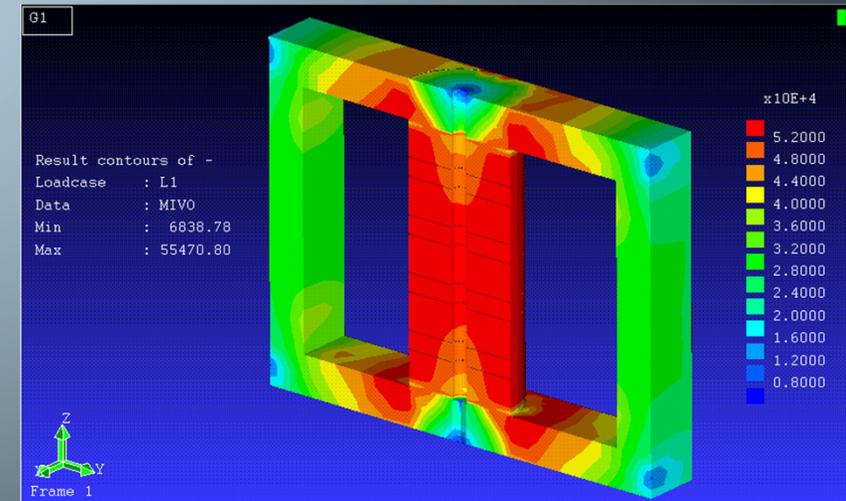
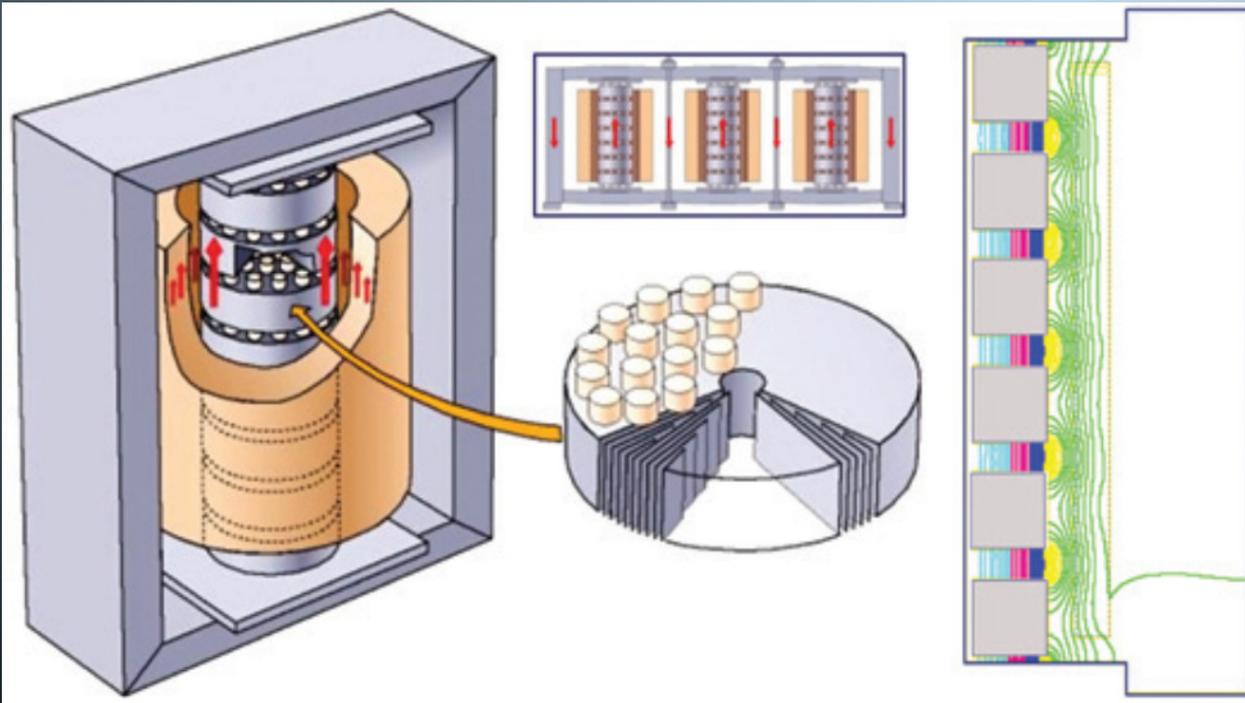
Reatores em derivação: 40 Mvar-525/ $\sqrt{3}$ kV e 133 Mvar-765/ $\sqrt{3}$ kV

FUNÇÕES DOS REATORES EM DERIVAÇÃO

1. Compensação reativa de linhas de transmissão
2. Variação artificial do comprimento de linhas
3. Redução de sobretensões em surtos de manobra



REATORES EM DERIVAÇÃO



$$\Phi_p = \frac{U_{\max}}{2\pi f \cdot N} = \frac{\sqrt{2} \cdot U_{\max}}{\sqrt{2} \cdot 2\pi f \cdot N} = \frac{U_{rms}}{2\pi f \cdot N / \sqrt{2}} = \frac{U_{rms}}{4,44 \cdot f \cdot N}$$

$$L = N \cdot \frac{\Phi_p}{I_{\max}}$$

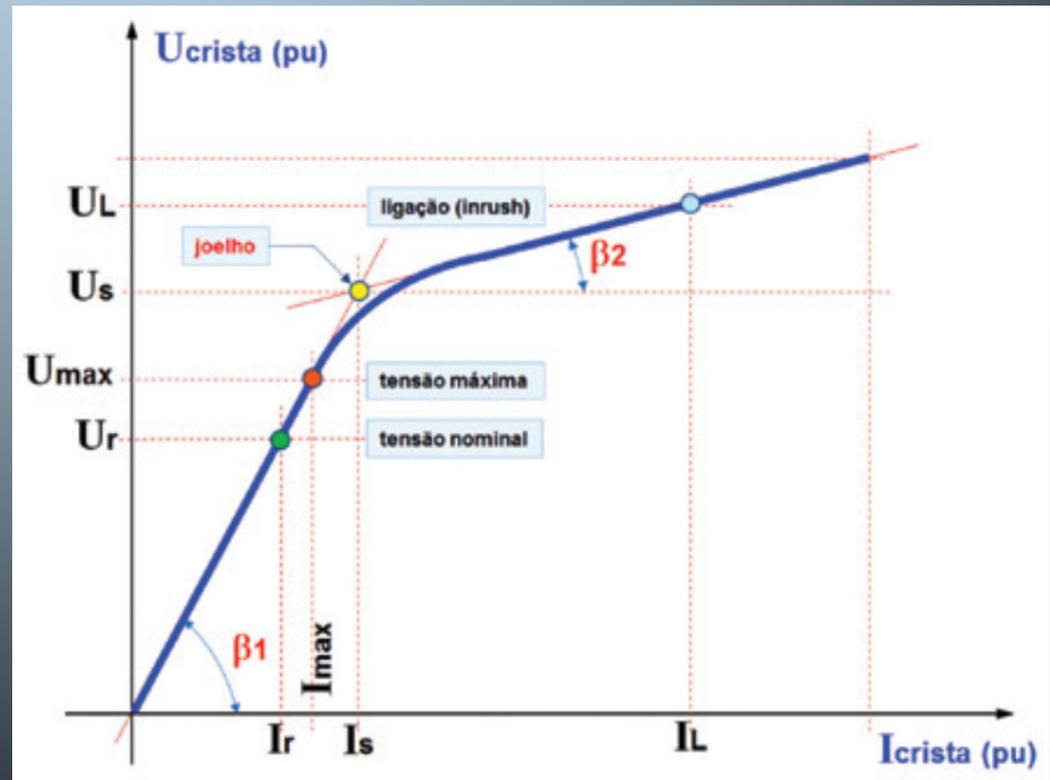
REATORES EM DERIVAÇÃO

Em circuitos não lineares contendo materiais ferromagnéticos (onde a permeabilidade magnética do núcleo do enrolamento não tem valor constante), o valor de pico Φ_p do fluxo magnético $\varphi(t)$ pode ser descrito por uma função não linear do valor de pico I_{max} da corrente instantânea $i(t)$

$$\Phi_p = f(i)$$

$$\Phi_p = \frac{N \cdot I_{max}}{\mathfrak{R}}$$

$$L = \frac{N^2}{\mathfrak{R}} = N^2 \cdot G$$



DADOS DE ESPECIFICAÇÃO

- Frequência nominal
- Número de fases
- Potência reativa nominal
- Tensão nominal
- Tensão máxima operativa
- Tipo de ligação
- Tipo de aterramento do neutro.
- Níveis de isolamento dos terminais do enrolamento (fase e neutro)
- Linearidade da curva de magnetização tensão versus corrente ($U \times I$)
- Perdas totais
- Fatores de otimização de perdas
- Limites de elevações de temperaturas do óleo e enrolamento
- Carregamento e expectativa de vida útil da isolação (reator)
- Tipo do sistema de resfriamento
- Limite de nível de ruído
- Limite da amplitude de vibração



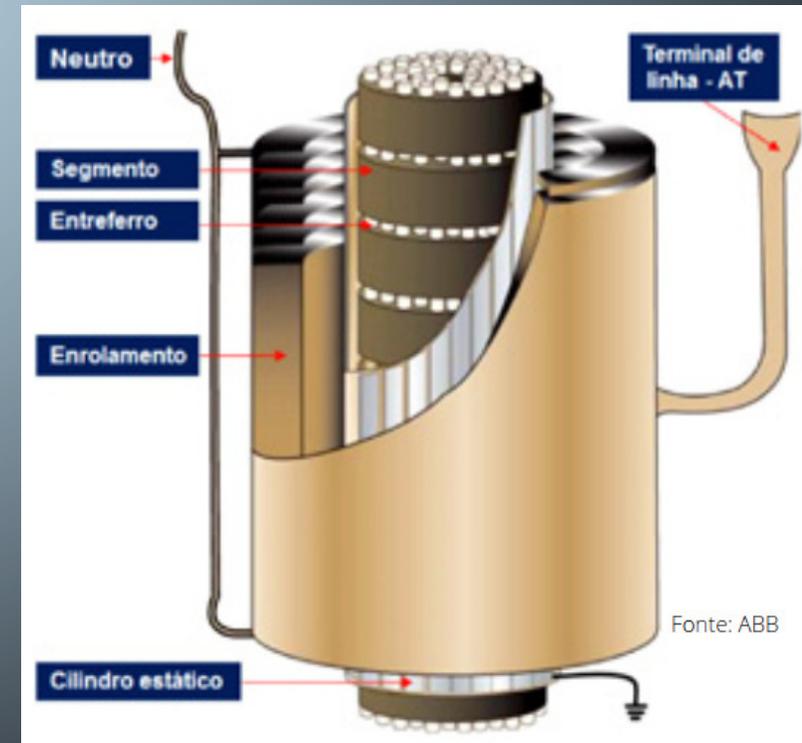
TIPOS DE REATORES EM DERIVAÇÃO

- De acordo com sua Localização
 - ✓ Reator de linha
 - ✓ Reator de barra
 - ✓ Reator de terciário
- De acordo com sua Ligação
 - ✓ Não Manobrável
 - ✓ Manobrável
- De acordo com seu Núcleo
 - ✓ Ar
 - ✓ Ferromagnético
- De acordo com sua Número de Fases
 - ✓ Monofásicos
 - ✓ Trifásicos



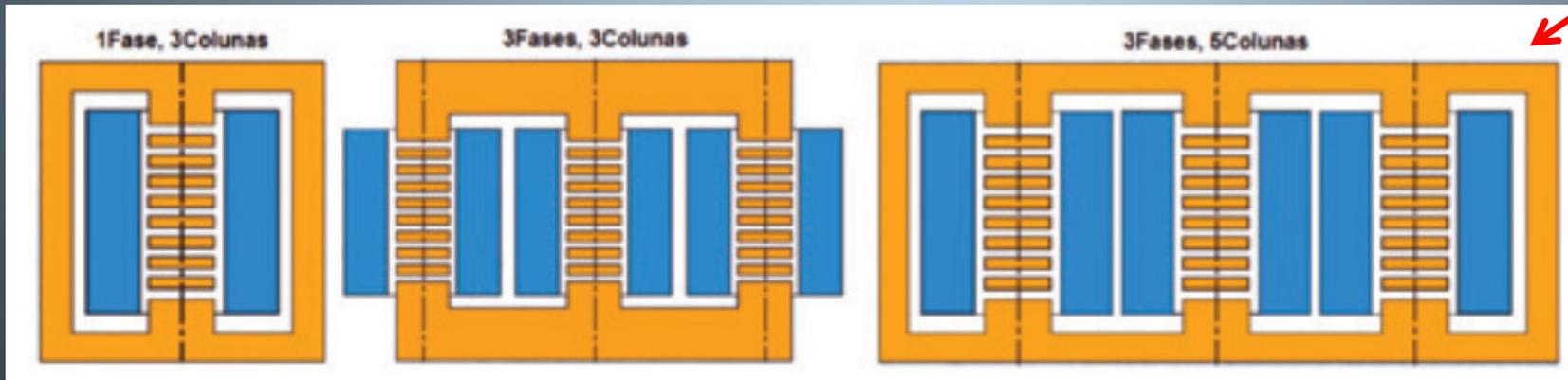
TIPOS DE REATORES EM DERIVAÇÃO

- Reator em derivação com núcleo de ar
 - ✓ Raramente utilizado no sistema elétrico no Brasil
 - ✓ Apresentam grandes dimensões quando comparados a reatores equivalentes com núcleo magnético
 - ✓ Na América do Norte, são largamente utilizados conectados ao enrolamento terciário de um autotransformador
- Reator em derivação com núcleo magnético
 - ✓ No Brasil, constitui a maioria dos reatores em derivação
 - ✓ A coluna principal (com enrolamento) do núcleo magnético é constituída de segmentos de material ferromagnético com entreferros (gaps de ar) entre os segmentos - denominado de núcleo com entreferros (ou *gapped core*)
 - ✓ Resulta em reator mais compacto, com perdas reduzidas e mais econômico



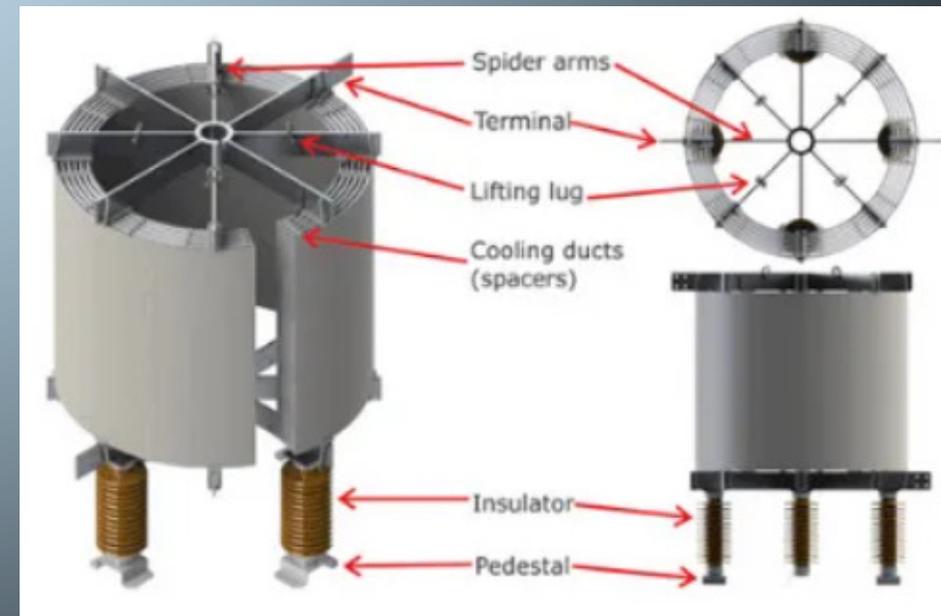
TIPOS DE REATORES EM DERIVAÇÃO

Caso seja necessário que a impedância de sequência zero seja igual à de sequência positiva



TIPOS DE REATORES EM DERIVAÇÃO

- De acordo com o Enrolamento
 - ✓ Disco contínuo
 - ✓ Disco contínuo com blindagens internas (*shielded disk*)
 - ✓ Disco em camada (*disk layer*)
 - ✓ Disco entrelaçado
 - ✓ Disco parcialmente entrelaçado
 - ✓ Camada



CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE REATORES EM DERIVAÇÃO

- Isolação

- ✓ Óleo e celulose (papel e *presspan*)
- ✓ Estrutura é semelhante à do isolamento dos transformadores
- ✓ O óleo tem, ainda, a função de resfriamento

- Esquema de Aterramento

- ✓ Estrela solidamente aterrada
- ✓ Estrela aterrada através de impedância

- Vida Útil

- ✓ 36 anos, conforme Resolução Normativa ANEEL nº 474/2012

- Perdas

Potência nominal - Pn (Mvar)	Perda máxima
$5 \leq Pn < 10$	0,70%
$10 \leq Pn < 15$	0,60%
$15 \leq Pn < 20$	0,50%
$20 \leq Pn < 30$	0,40%
$Pn < 30$	0,30%

- Suportabilidade a Sobretensões Dinâmicas

Duração	Unidade	Sobretensão dinâmica
2	segundos	1.43
10	segundos	1.35
20	segundos	1.25
60	segundos	1.20
8	minutos	1.15
1	hora	1.10

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE REATORES EM DERIVAÇÃO

- Limites de Elevações de Temperaturas

Sistema de preservação de óleo	Limites de elevação de temperatura (°C)					
	Dos enrolamentos				Das partes metálicas	
	Média, por medição da variação de resistência		Do ponto mais quente	Do topo do óleo	Em contato com a isolação sólida ou adjacente a elas	Não em contato com a isolação sólida ou adjacente a elas
Circulação do óleo natural ou forçada sem fluxo do óleo dirigido	Circulação forçada de óleo com fluxo dirigido					
Sem conservador e sem gás inerte sob pressão	55 ⁽¹⁾	60	65	50	Não devem atingir temperaturas superiores à classe térmica do material da isolação adjacente ou em contato com estas	A temperatura não deve atingir valores que venham danificar componentes ou materiais adjacentes
	95 ⁽³⁾	100	120	60		
Com conservador ou com gás inerte sob pressão	55 ⁽¹⁾	60	65	55		
	65 ⁽²⁾	70	80	65		
	95 ⁽³⁾	100	120	65		

Notas:
 (1) Papel isolante do tipo *kraft* não termoestabilizado.
 (2) Papel isolante do tipo *kraft* termoestabilizado.
 (3) Isolação sólida híbrida com papel isolante à base de aramida ou similares.

- Expectativa de Vida da Isolação

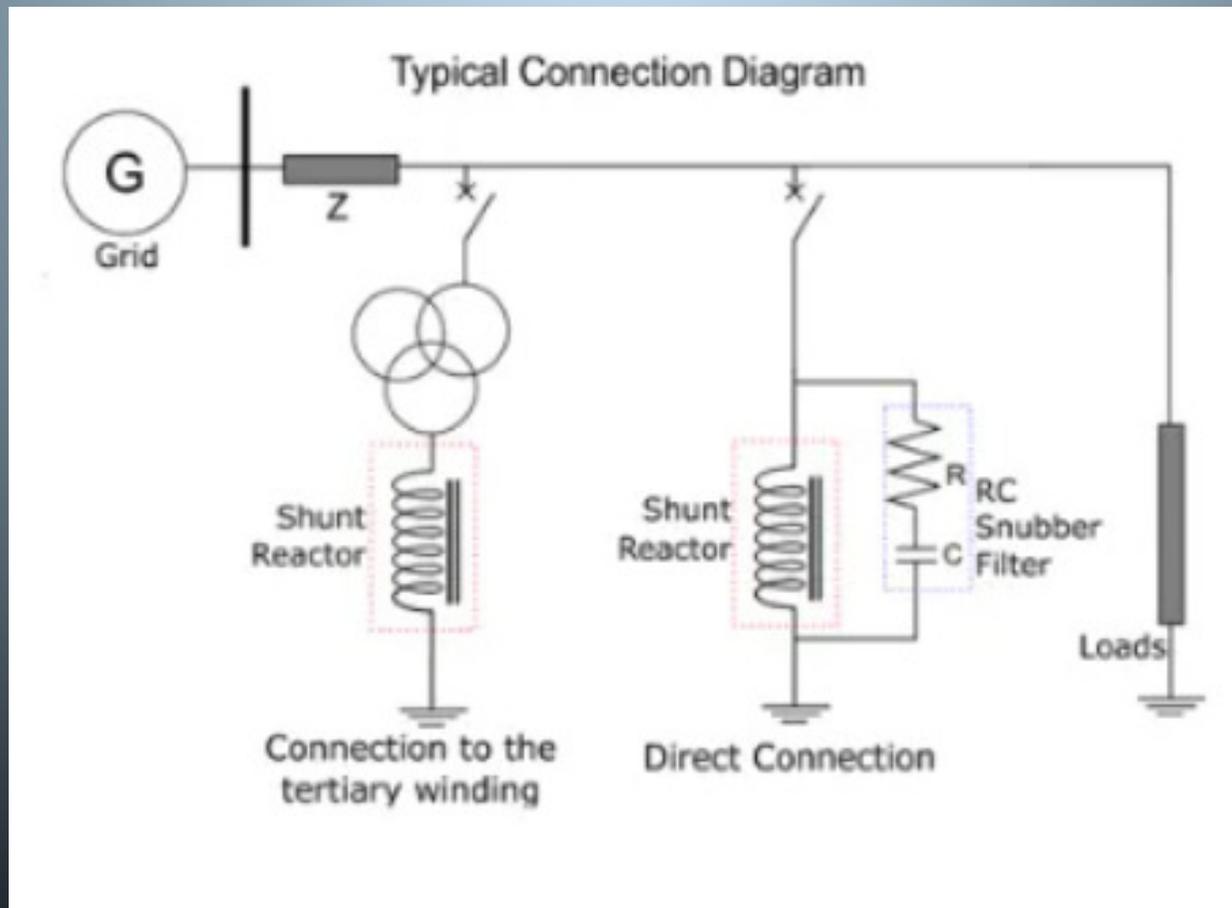
$$Vida = 10^{\left(A + \frac{B}{T_e}\right)} \quad [horas]$$

Temperatura do ponto mais quente do enrolamento [K]

Classe, °C	Isolação	A	B
55	papel <i>kraft</i>	-14,133	6972,15
65	papel termoestabilizado	-13,391	6972,15
95	papel aramida (<i>Nomex</i> ®)	-9,312	6511,72

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE REATORES EM DERIVAÇÃO

- Conexão



CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE REATORES EM DERIVAÇÃO

- Potência Nominal

$$Q_r = U_r \cdot I_r \quad [Mvar]$$

$$Q_{r\max} = \left(\frac{U_{\max}}{U_r} \right)^2 \cdot Q_r$$

$$I_{r\max} = \left(\frac{U_{\max}}{U_r} \right) \cdot I_r$$

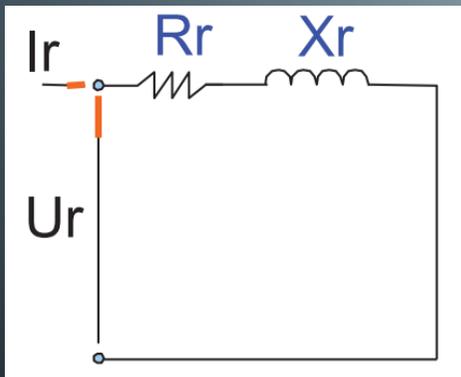
- Reatância e Indutância Nominal

$$X_r = \frac{U_r}{I_r} = \frac{U_r^2}{Q_r} \quad [\Omega / fase]$$

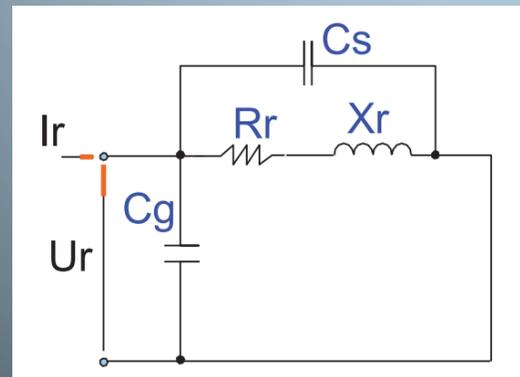
$$L_r = \frac{X_r}{2\pi f_r} = \frac{U_r^2}{2\pi f_r \cdot Q_r} \quad [H / fase]$$

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE REATORES EM DERIVAÇÃO

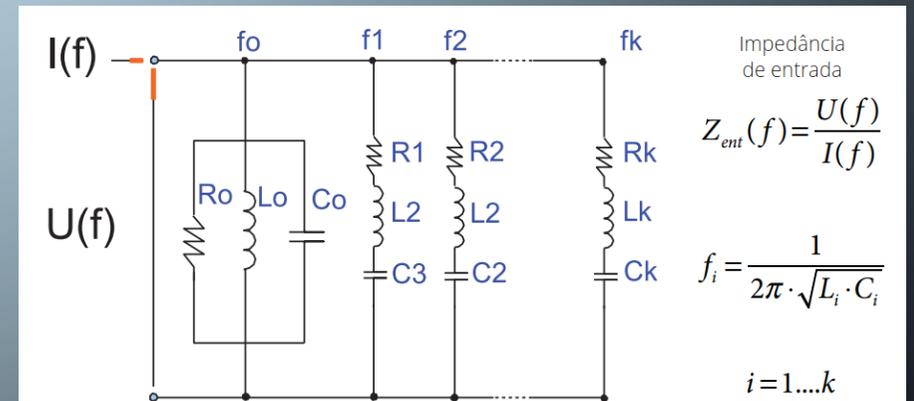
- Circuito Equivalente



Baixa frequência
(até 3kHz)



Média frequência
(60Hz até 20kHz)



Alta frequência
(10kHz até 2MHz)

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE REATORES EM DERIVAÇÃO

- Forças Eletromagnéticas

- ✓ A variação da energia magnética no entreferro (*gap* de ar), devido ao movimento diferencial da coluna do núcleo, estabelece a força eletromagnética axial pulsante (*pulling force*) na coluna principal de um reator

$$F_P = \hat{B}_G \cdot \frac{A_C}{2 \cdot \mu_0} \quad [N]$$

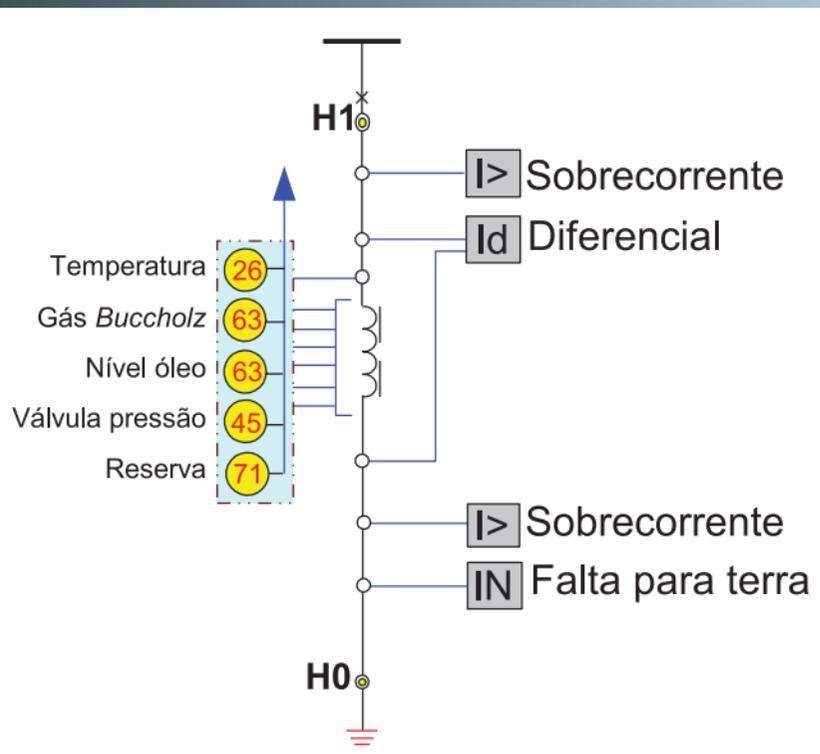
Núcleo magnético não saturado

$$F_{Ps} = F_P \cdot k_S^2 \cdot (1 + k_L) \quad [N]$$

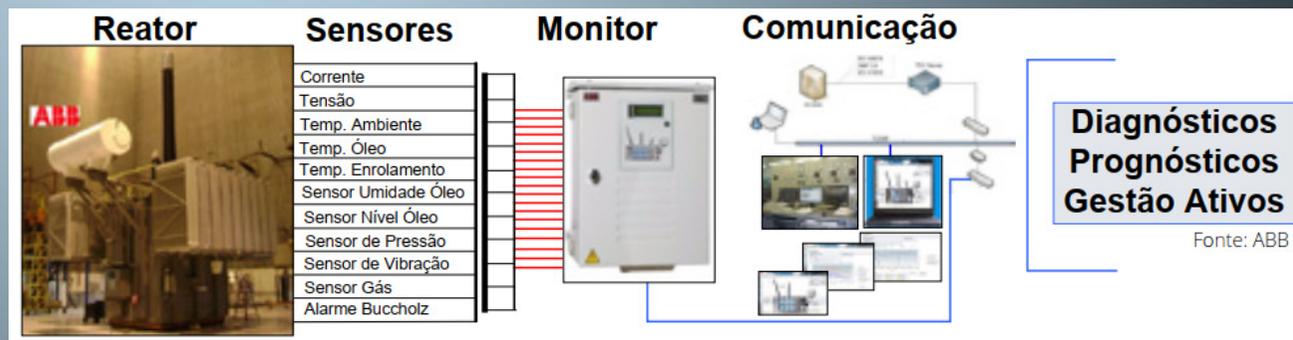
Núcleo magnético saturado

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE REATORES EM DERIVAÇÃO

- Proteção



- Monitoração, Estado e Diagnósticos de Reator em Operação



VSR (VARIABLE SHUNT REACTOR)



Reator em derivação de potência variável (VSR) trifásico, 120 Mvar a 200 Mvar, 400 kV

- Permite controlar o nível de tensão do sistema elétrico de interesse de uma forma mais eficiente e em degraus menores
- A variação da indutância é realizada por meio da alteração do número de espiras elétricas do enrolamento do reator

$$Q \approx \left(\frac{U}{N} \right)^2$$

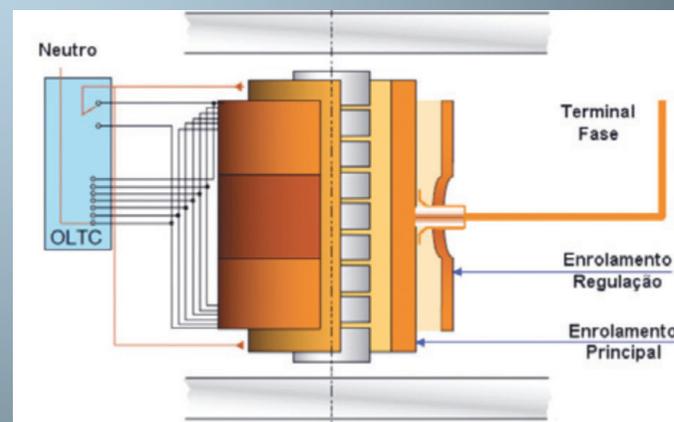
- Vantagens:
 - ✓ Flexibilidade e controle dinâmico do fluxo de potência reativa
 - ✓ Eliminação de preocupações ambientais nas vizinhanças de reator com núcleo de ar, relacionados a fluxo eletromagnético
 - ✓ Redução do custo de manutenção, por meio da redução do número de operações de manobra de disjuntores dos reatores

VSR (VARIABLE SHUNT REACTOR)



Reator em derivação de potência variável (VSR) trifásico, 120 Mvar a 200 Mvar, 400 kV

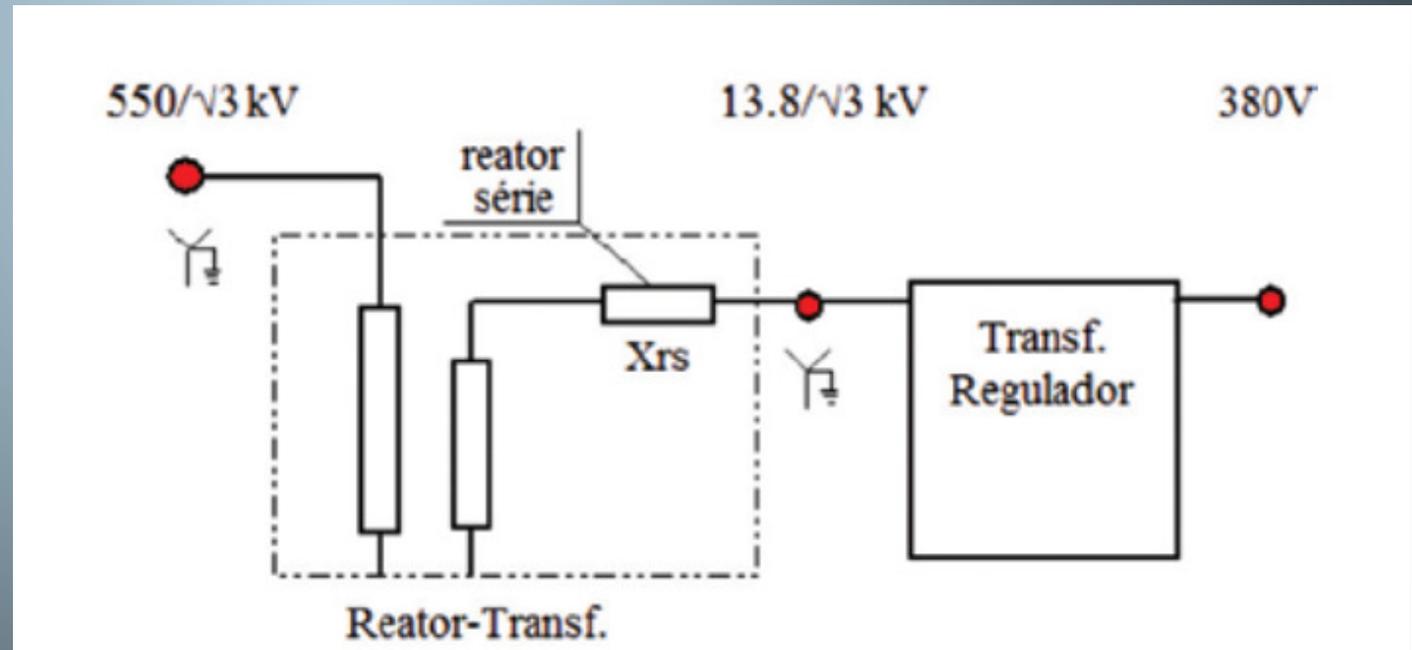
- Utiliza-se um enrolamento de regulação conectado a um comutador sob carga (OLTC) convencional



- Faixas típicas de potência reativa absorvidas por um VSR são:
 - Tensão de 138 kV: 010...300 Mvar
 - Tensão de 230 kV: 050...120 Mvar
 - Tensão de 345 kV: 090...200 Mvar
 - Tensão de 440 kV: 130...250 Mvar
 - Tensão de 525 kV: 180...300 Mvar

REATOR TRANSFORMADOR

- Economicamente interessante para alimentar cargas de serviços auxiliares e/ou cargas locais leves de baixa potência em subestações remotas



País	Empresa	Ano Fabric.	Freq. (Hz)	Nº de Fases	Primário		Secundário		Qtd. de Unid.
					Potência (Mvar)	Tensão (kV)	Potência (MVA)	Tensão (kV)	
EUA	AEP	1971	60	1	100	765/√3	24	69/√3	6
Argentina	TRANSENER	1971	50	1	50	500/√3	0,250	0,400/√3	24
Venezuela	EDELCA	1980	60	1	100	765/√3	0,525	2,525/√3	15