

Transformadores

1 INTRODUÇÃO

Transformador é um dispositivo que transfere potência através de bobinas acopladas indutivamente. Indução magnética descoberta em 1830 em trabalhos independentes por:



Joseph Henry (EUA) e Michael Faraday (Inglaterra)

- Transformadores são essenciais num sistema de transmissão em CA ou CC
- Fazem a adequação dos valores de corrente e de isolamento
- São parte integrante de retificadores e inversores
- São utilizados na proteção: medição de corrente em alta tensão (TC's)

História do Transformador

Primeiro transformador, 1885:

Miksa Déri (Hungria), Ottó Bláthy (Hungria), Károly Zipernowsky (Hungria)



<http://edisontechcenter.org/Transformers.html>

História do Transformador

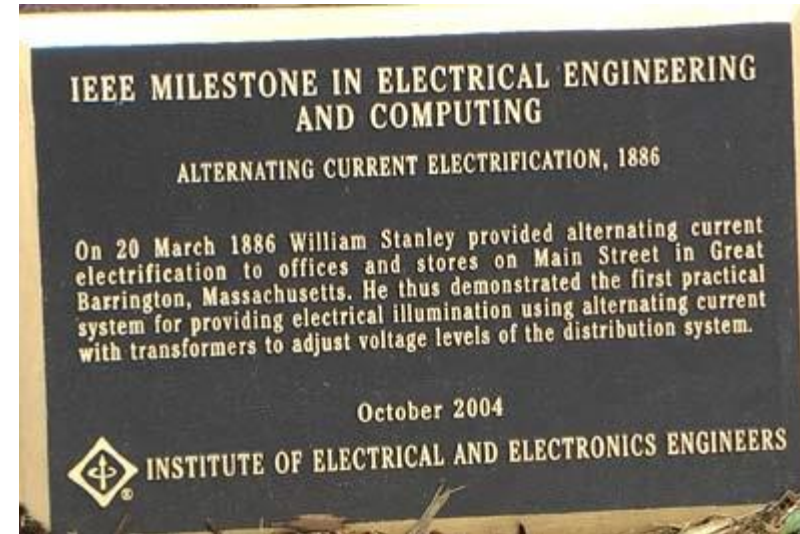
Primeiro transformador com eficiência suficiente para uso comercial: William Stanley (EUA)



Primeiro transformador eficiente construído, 1885, William Stanley (EUA), Westinghouse

<http://edisontechcenter.org/Transformers.html>

História do Transformador



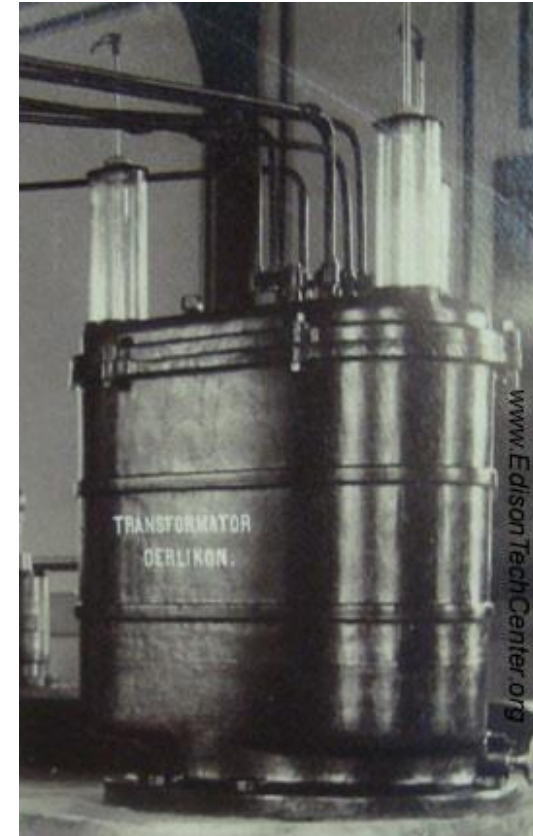
Primeiro transformador usado comercialmente, 1886, William Stanley (USA), Westinghouse
Eletrificação de Great Barrington, Massachusetts

<http://edisontechcenter.org/Transformers.html>

História do Transformador



1891, Transformador trifásico (núcleo circular)
Siemens and Halske company
5.7 kVA 1000/100 V



1891, Transformador trifásico, Oerlikon
8 kV e 25 kV transmissão de Lauffen am Neckar
a Frankfurt, na Alemanha, 175 km
<http://edisontechcenter.org/Transformers.html>

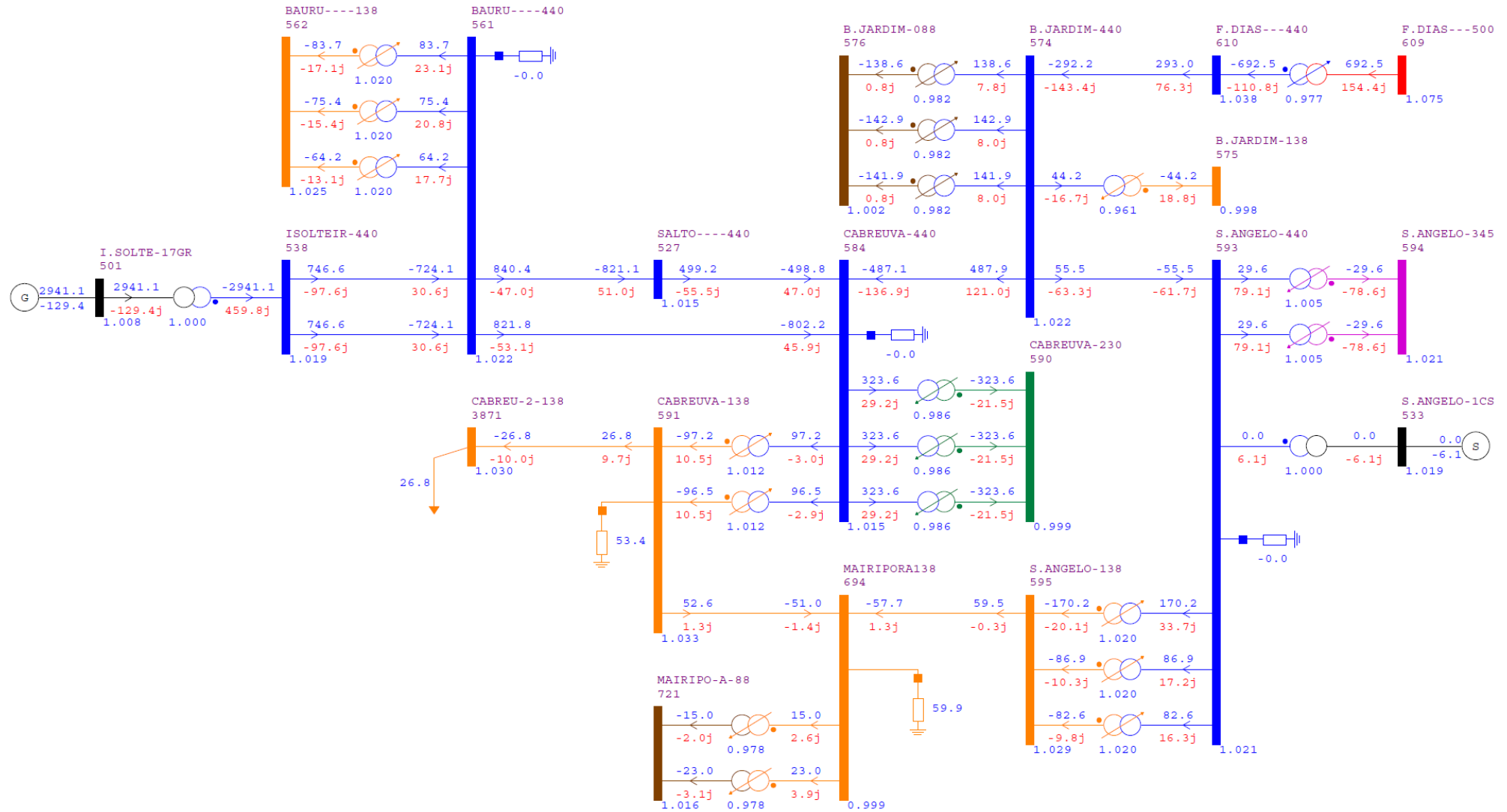
História do Transformador



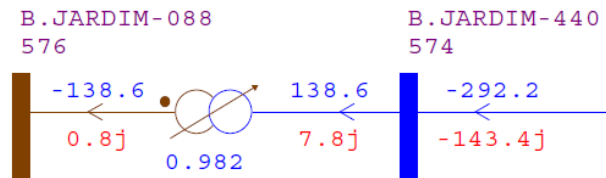
1917, Transformadores de grande porte, Westinghouse, planta de energia hidrelétrica em Folsom, Califórnia

<http://edisontechcenter.org/Transformers.html>

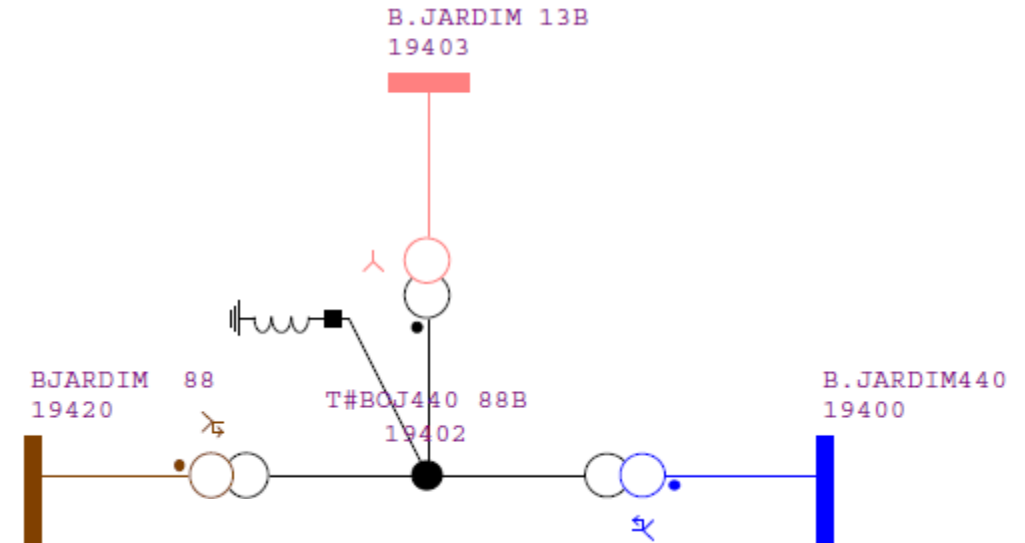
Transformadores numa rede real



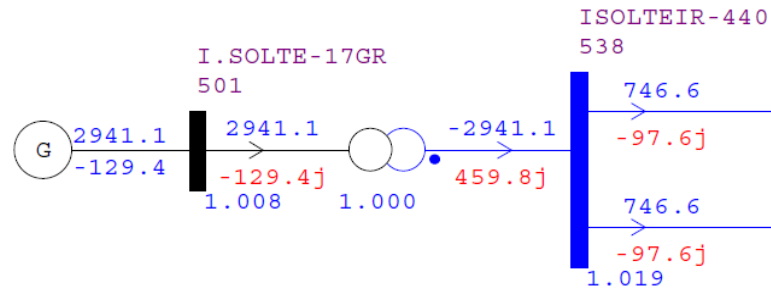
Comparação: Modelos de transformador para fluxo e curto



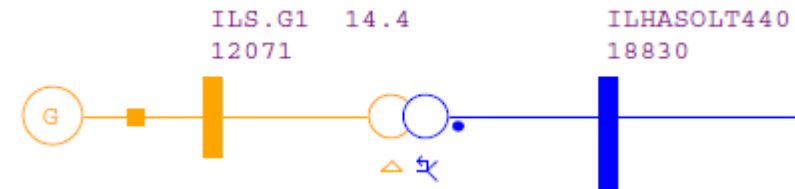
Bom Jardim - Anarede



Bom Jardim - Anafas



Ilha Solteira - Anarede



Ilha Solteira - Anafas

Comparação: Modelos de transformador para fluxo e curto

Dados de Circuito CA (DLIN)

Circuito
 Barra De: 538 Nome: ISOLTEIR-440 ☒ Ligado
 Barra Para: 501 Nome: I.SOLTE-17GR ☒ Ligado
 Número: 1 ☒ Circuitos existentes

Barra Proprietária
☒ De
☐ Para

Barra Controlada
☐ Direção De
☐ Direção Para
☒ Ligado

Capacidade
 Normal: 3560 MVA
 Emergência: 3560 MVA
 Equipamento: 3560 MVA

Resistência: %
 Reatância: 0,38706 %
 Susceptância: Mvar

Tap
 Especificado: 1.
 Mínimo:
 Máximo:
 Defasamento: graus
 Steps:
☐ Controle Congelado

Agregadores

Tensão Barra
 p.u.
 Tensão Especificada

Shunt Equivalente
 Injeção De: Mvar
 Injeção Para: Mvar

Shunt Individualizado (DBSH)
 Injeção De: Mvar
 Injeção Para: Mvar

Inserir Alterar Remover Limpar Fechar

Ilha Solteira - Anarede - 17 unidades

Dados de Transformador

Identificação
 Primário: 18830 Nome: ILHASOLT440
 Secundário: 12071 Nome: ILS.G1 14.4
 Número do Circuito: 1 Área: 55 ☒ Ligado

Sequência Positiva
 Resistência (R1 %): 0 Reatância (X1 %): 5.864

Sequência Zero
 Resistência (R0 %): 0 Reatância (X0 %): 4.985

Tipo de Conexão do Primário
☐ Delta
☐ Estrela não aterrado
☒ Estrela aterrado
 Resistência de Aterramento (Rn %): 0
 Reatância de Aterramento (Xn %): 0

Tipo de Conexão do Secundário
☒ Delta
☐ Estrela não aterrado
☐ Estrela aterrado
 Resistência de Aterramento (Rn %): 0
 Reatância de Aterramento (Xn %): 0

Defasamento (°) -30 ☒ ΔY
☐ Explícito: Tap (pu): 1

Obs: def. do secundário em relação ao primário.

Capacidade de Interrupção (kA)
 Terminal De: Terminal Para:

Inserir Alterar Remover Fechar

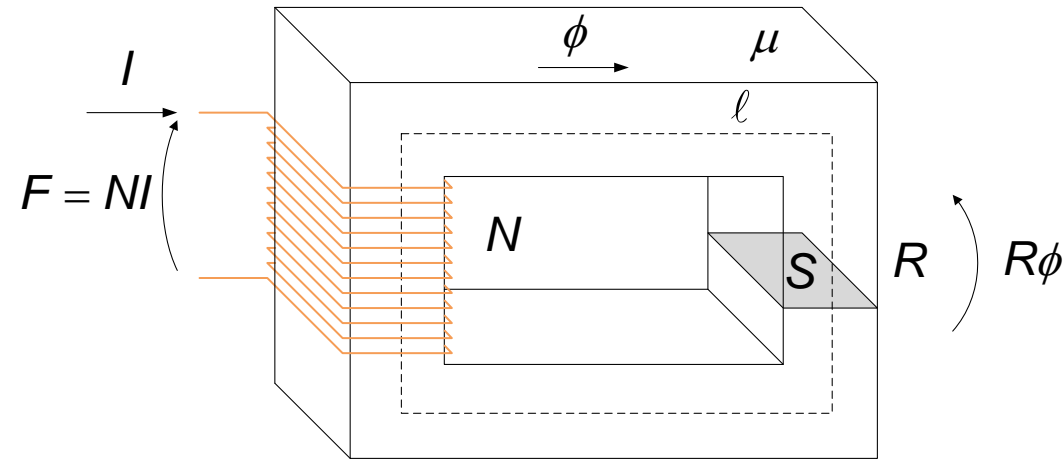
Ilha Solteira - Anafas - 1 unidade

$x1(\text{curto}) = 5,864\%$, $0,38706\% \times 17 = 6,58$ (valores diferentes)

2 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

2.1 Circuitos magnéticos

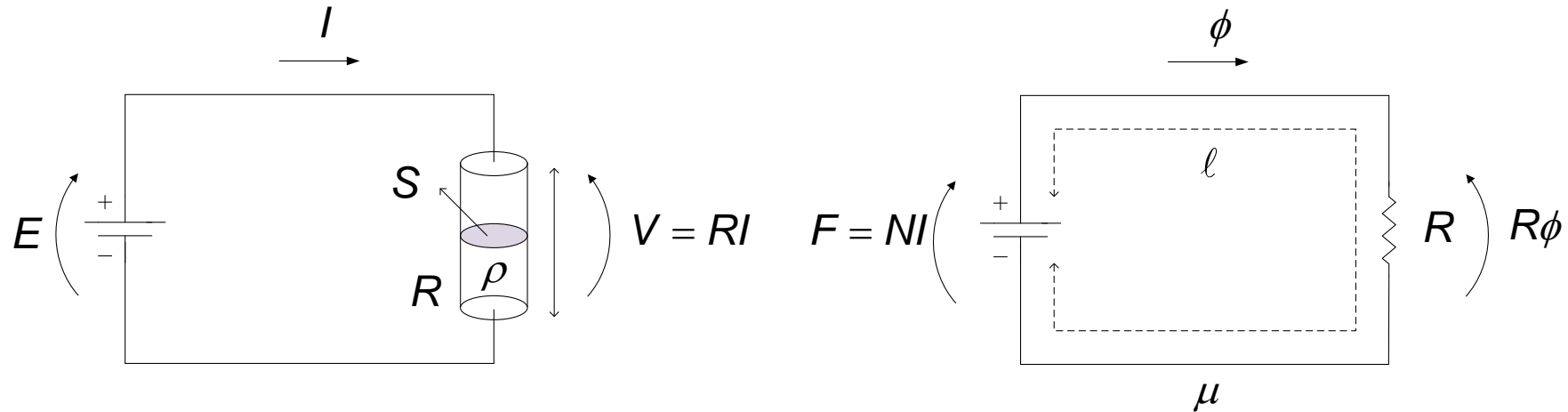
O transformador é um circuito magnético.



Exemplo mínimo de circuito magnético

Circuitos magnéticos são análogos a circuitos elétricos.

Comparação circuito magnético x circuito elétrico



E : Força eletromotriz ou tensão interna (V)

I : corrente (A)

R : resistência $R = \frac{\rho l}{S}$ (Ω)

ρ : resistividade (Ωm)

S : seção transversal (m^2)

l : comprimento (m)

$F = NI$: Força magnetomotriz (Aesp)

ϕ : fluxo magnético (Wb)

R : relutância $R = \frac{l}{\mu S}$ (Aesp/Wb)

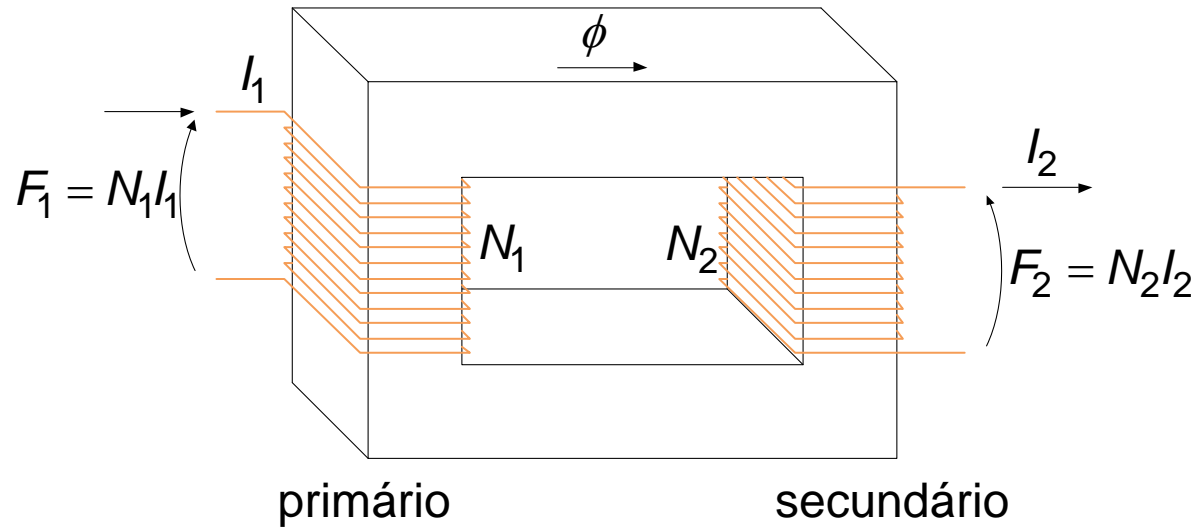
μ : permeabilidade magnética (H/m)

S : seção transversal (m^2)

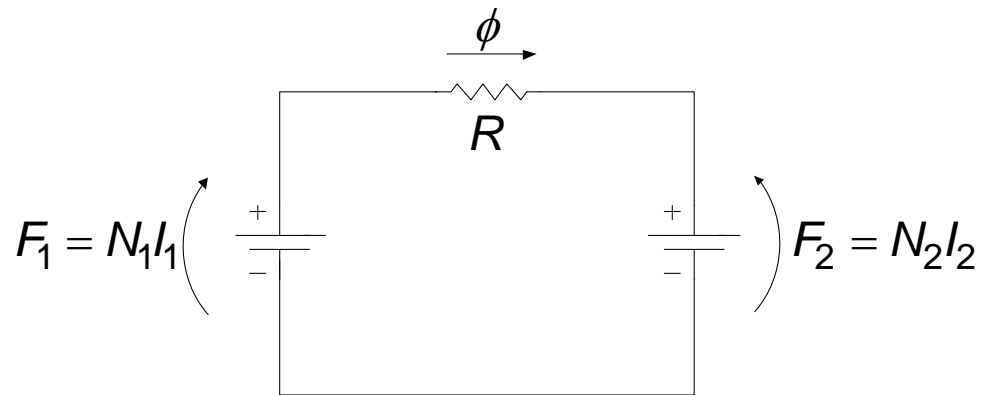
l : comprimento do circuito (m)

3 TRANSFORMADOR IDEAL

Construção básica:



Circuito magnético:



Equação:

$$N_1 I_1 - N_2 I_2 - R \phi = 0$$

Hipóteses:

- Núcleo com relutância nula ($\mu = \infty$)
- Bobinas com resistência nula ($\rho = 0$)

Equação do transformador ideal:

$$N_1 I_1 - N_2 I_2 = 0 \text{ ou } N_1 I_1 = N_2 I_2 \text{ ou } \frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1}$$

Pela lei de Faraday:

$$e_1 = -N_1 \frac{d\phi}{dt} : \text{tensão induzida no primário}$$

$$e_2 = -N_2 \frac{d\phi}{dt} : \text{tensão induzida no secundário}$$

Como a relutância é considerada nula, não há fluxo de dispersão pelo ar, então o fluxo ϕ é o mesmo no primário e no secundário.

Dividindo as duas tensões:

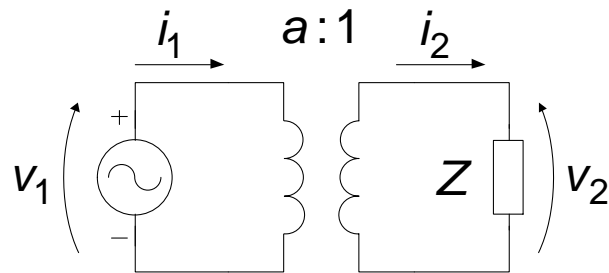
$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

$$\text{Relação de transformação: } a = \frac{N_1}{N_2}$$

A relação $\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1}$ pode ser obtida por conservação de potência:

$$P_1 = P_2, \quad V_1 I_1 = V_2 I_2, \quad \frac{I_1}{I_2} = \frac{V_2}{V_1}, \quad \frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1}$$

Transformador ideal em carga:



$$I_2 = \frac{V_2}{Z}, \quad V_2 = \frac{V_1}{a}, \quad I_2 = \frac{V_1}{aZ},$$

$$I_2 = aI_1, \quad aI_1 = \frac{V_1}{aZ}, \quad I_1 = \frac{V_1}{a^2Z}$$

Para o cálculo da corrente no primário pode ser usada a impedância: $Z' = a^2Z$

Usando conservação de potência chega-se à mesma relação:

$$\frac{V_1^2}{Z'} = \frac{V_2^2}{Z}, \quad V_2 = \frac{V_1}{a}, \quad \frac{V_1^2}{Z'} = \frac{V_1^2}{a^2Z}$$

4 TRANSFORMADOR REAL

O transformador real tem o núcleo ferro e bobinas de cobre:



Características:

Potência: 30000/37500 kVA

Norma de Fabricação: NBR 5356

Refrigeração: ONAN/ONAF - Óleo Natural, Ar Natural com segundo estágio com Óleo Natural, Ar Forçado imerso em óleo isolante mineral

Classe de Tensão (kV): 145 kV

Tensão Primária: 138,0 kV $\pm 2 \times 2,5\%$

Tensão Secundária: 13800/7967 V

Primário: Triângulo (delta)

Secundário: Estrela com neutro acessível

Deslocamento Angular: 30°

Frequência nominal: 60 Hz

Elevação de Temperatura: 65° C no ponto médio dos enrolamentos

NBI - Primário: 550kV

NBI Secundário: 110 kV

Pintura externa anticorrosiva com acabamento na cor cinza claro Munsell N6.5

Perdas em vazio (perdas no ferro): Sob Consulta

Perdas totais: Sob Consulta

Corrente de excitação: 0.5 %

Impedância a 75° C: 11 %


Comprimento (C) : 5100 mm

Largura (L) : 3900 mm

Altura (A) : 5250 mm

Peso: 44800 kg

http://ecatalog.weg.net/tec_cat/tech_transf_ficha.asp

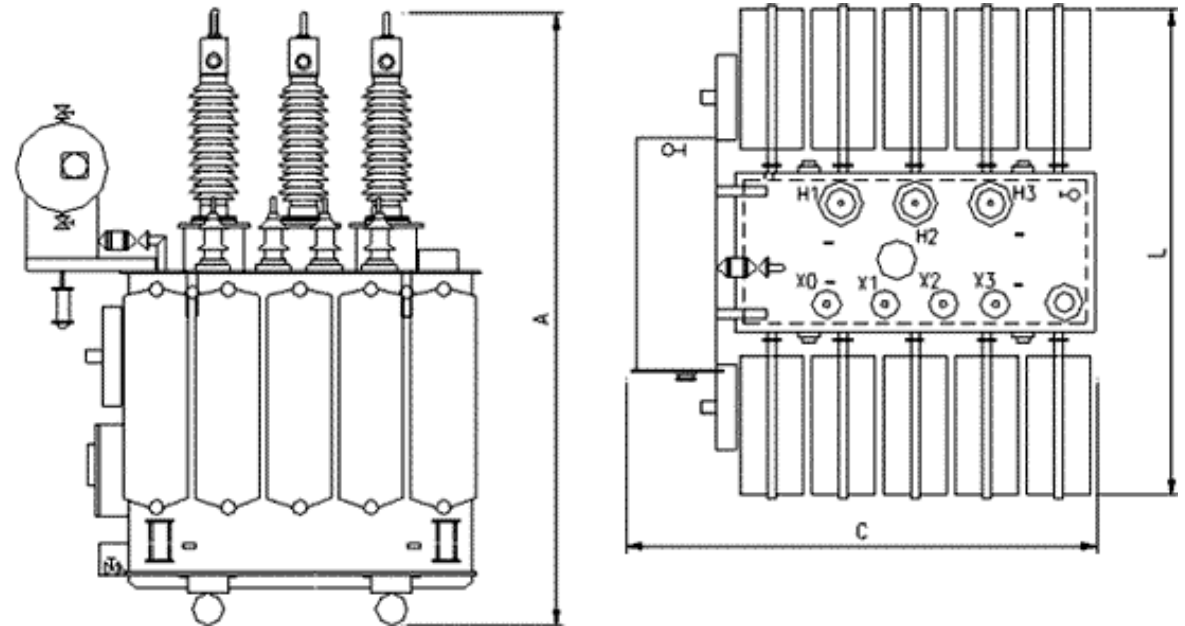
	FOLHA DE DADOS	Data : 16 / fev / 2014
Linha de Produto: Transformadores de Força		
Características		
<p> Potência: 30000/37500 kVA Norma de Fabricação: NBR 5356 Refrigeração: ONAN/ONAF - Óleo Natural, Ar Natural com segundo estágio com Óleo Natural, Ar Forçado imerso em óleo isolante mineral Classe de Tensão (kV): 145 kV Tensão Primária: 138,0 kV \pm 2 x 2,5% Tensão Secundária: 13800/7967 V </p> <p> Primário: Triângulo (delta) Secundário: Estrela com neutro acessível Deslocamento Angular: 30° </p>	<p> Frequência nominal: 60 Hz Elevação de Temperatura: 65° C no ponto médio dos enrolamentos NBI - Primário: 550kV NBI Secundário: 110 kV Pintura externa anticorrosiva com acabamento na cor cinza claro Munsell N6.5 Perdas em vazio (perdas no ferro): Sob Consulta Perdas totais: Sob Consulta Corrente de excitação: 0.5 % Impedância a 75° C: 11 % Comprimento (C) : 5100 mm Largura (L) : 3900 mm Altura (A) : 5250 mm Peso: 44800 kg </p> <p> Valores garantidos potência nominal no tap de maior tensão </p>	

Folha de dados - transformador de força 30/37,5 MVA - parte 1.

http://ecatalog.weg.net/tec_cat/tech_transf_ficha.asp

Acessórios Incluídos

Acionamento externo do comutador
 Conservador com bujão de drenagem e niple de enchimento
 Rodas bidirecionais lisas
 Placa de identificação e diagramática
 Apoio para macaco
 Olhal para suspensão do transformador montado
 Olhal para suspensão da tampa e da parte ativa
 Secador de ar com sílica gel
 Indicador magnético de nível de óleo com 2 contatos
 Niple para enchimento
 Válvula de drenagem, conexão para filtro-prensa e amostragem
 Dispositivo de alívio de pressão
 Caixa de terminais dos aparelhos auxiliares
 Relé detector de gás com 2 contatos
 Termômetro do óleo com 2 contatos
 Abertura para inspeção
 Bucha AT condensiva
 Bucha BT com terminal 10 a 70mm²
 Radiadores destacáveis com válvula inferior
 Terminal de aterramento para cabo de 50 a 120 mm²
 Indicador de temperatura do enrolamento com 3 contatos
 Moto-ventiladores para ventilação forçada



Folha de dados - transformador de força 30/37,5 MVA - parte 2, desenho.

http://ecatalog.weg.net/tec_cat/tech_transf_ficha.asp


Os transformadores de força (ou potência) costumam ter tanque de aço com sistemas de refrigeração a óleo, que também funcionam como isolante das espiras das bobinas.

Transformador a seco



Transformador a seco 3 MVA.

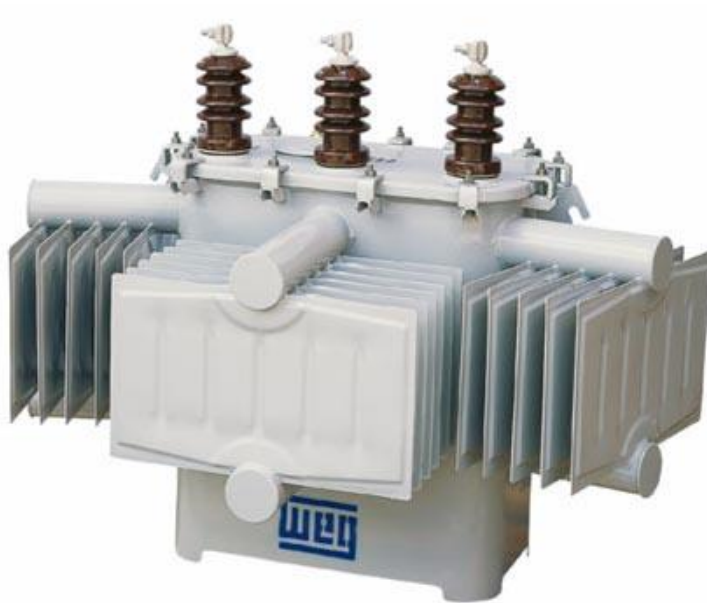
http://ecatalog.weg.net/tec_cat/tech_transf_ficha.asp

	FOLHA DE DADOS	Data : 16 / fev / 2014
Linha de Produto: Transformadores a Seco		
Características		
<p>Potência: 3000 kVA Norma de Fabricação: NBR 5356/93 Refrigeração: ANAN - Ar Natural, Ar Natural Atmosfera: Não é Agressiva Proteção: IP20 Classe do Material Isolante (155°C) F Classe de Tensão (kV): 15 kV Tensão Primária: 13,8/13,2/12,6/12,0/11,4 kV Tensão Secundária: 380/220 V</p> <p>Primário: Triângulo (delta) Secundário: Estrela com neutro acessível Deslocamento Angular: 30°</p>	<p>Frequência nominal: 60 Hz Perdas em vazio (perdas no ferro): Sob Consulta Perdas totais: Sob Consulta Corrente de excitação: 0,6 % Impedância a 75° C: 6 % Comprimento (C) : 2350 mm Largura (L) : 1400 mm Altura (A) : 2650 mm Peso: 6800 kg</p> <p>Valores garantidos potência nominal no tap de maior tensão, à temperatura de 115°C</p>	
Acessórios Incluídos	Acessórios Opcionais	
<p>Sistema de comutação a vazio (links) Ganchos de suspensão Olhais para tração Placa de identificação Rodas bidirecionais Base de apoio Conector de aterramento para cabo de 10 a 70 mm² Terminais AT e BT - Nema 4 furos (tipo Bandeira)</p>	<p>Monitor de temperatura sem indicador Monitor de temperatura com indicador Sensores de temperatura</p>	

Folha de dados - transformador a seco 3 MVA.


http://ecatalog.weg.net/tec_cat/tech_transf_ficha.asp

Transformador de distribuição



Transformador de distribuição 300 kVA.

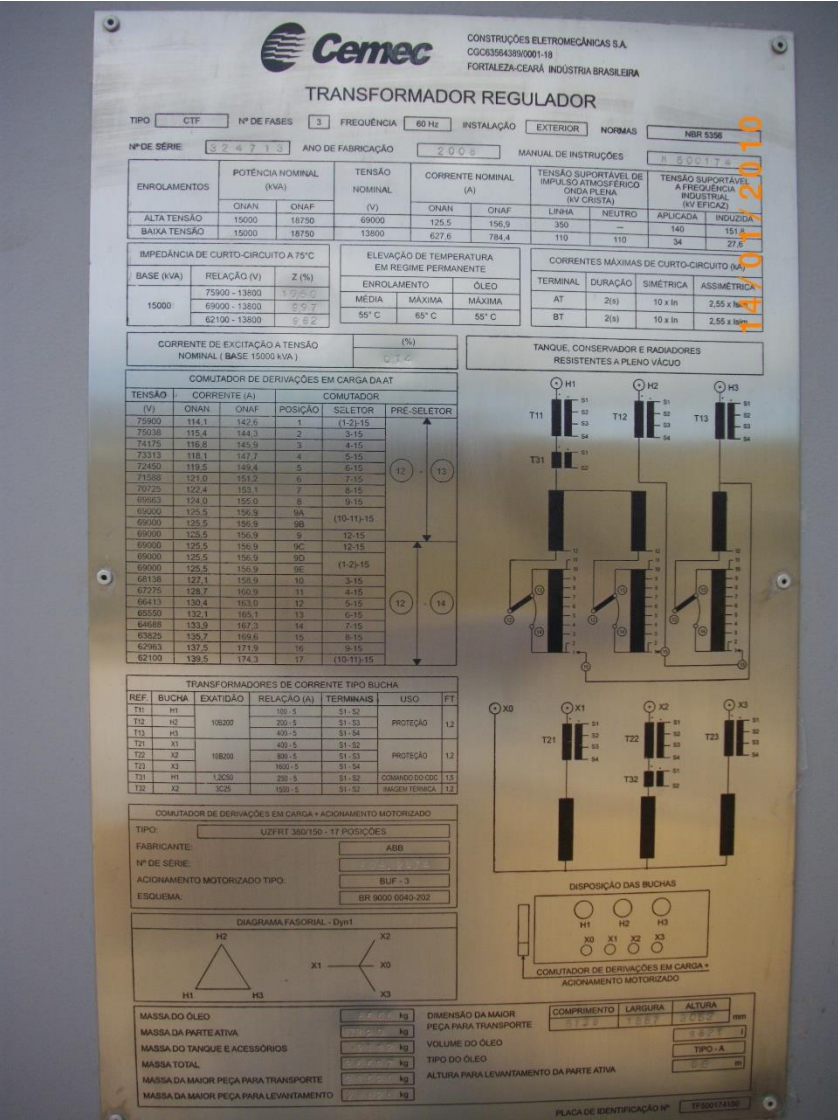
http://ecatalog.weg.net/tec_cat/tech_transf_ficha.asp

	FOLHA DE DADOS	Data : 16 / fev / 2014
Linha de Produto: Transformadores de Distribuição		
Características		
<p> Potência: 300 kVA Norma de Fabricação: NBR 5440 Refrigeração: ONAN - Óleo Natural, Ar Natural - Imerso em óleo isolante mineral Classe de Tensão (kV): 15 kV Tensão Primária: 13,8/13,2/12,6 kV Tensão Secundária: 220/127 V </p> <p> Primário: Triângulo (delta) Secundário: Estrela com neutro acessível Deslocamento Angular: 30° </p>	<p> Frequência nominal: 60 Hz Elevação de Temperatura: 65° C no ponto médio dos enrolamentos 60° C no topo do óleo Pintura externa anticorrosiva com acabamento na cor cinza claro Munsell N6.5 Perdas em vazio (perdas no ferro): 810 W Perdas totais: 4060 W Corrente de excitação: 1,9 % Impedância a 75° C: 4,5 % Comprimento (C) : Consultar Vendas T&D Largura (L) : Consultar Vendas T&D Altura (A) : Consultar Vendas T&D Peso: Consultar Vendas T&D </p> <p> Valores garantidos potência nominal no tap de maior tensão </p>	

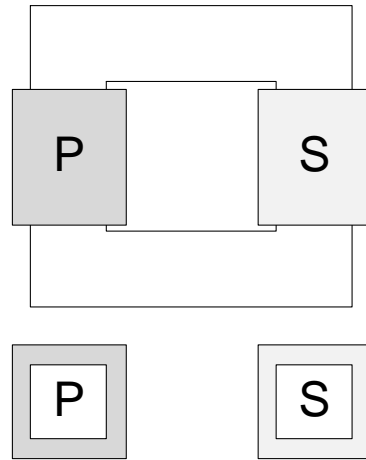
Folha de dados - transformador de distribuição 300 kVA.

http://ecatalog.weg.net/tec_cat/tech_transf_ficha.asp

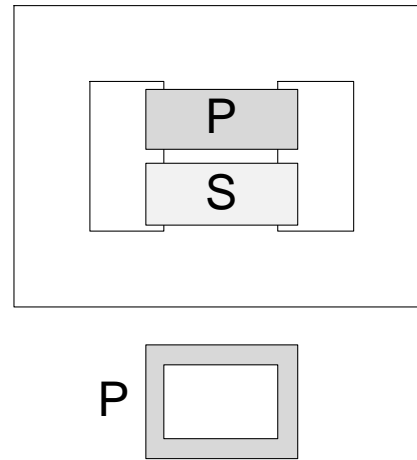
Dados de placa



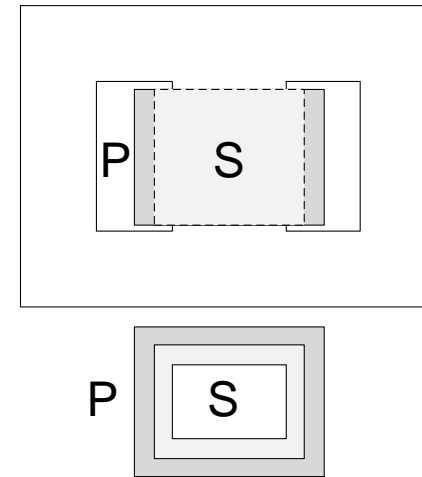
Tipos de núcleo e construção - transformadores monofásicos



Envolvido



Envolvente



Envolvente
(bobinas sobrepostas)

4.1 Perdas

O transformador real apresenta:

- Núcleo com relutância baixa mas não nula: permeabilidade $\mu \cong 6000\mu_0$ $\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{ H/m}$
- Limite de densidade de fluxo magnético no núcleo sem saturação (de 1,2 a 1,3 T ou Wb/m²)
- Fluxo de dispersão pelo ar
- Histerese
- Correntes parasitas no núcleo
- Perdas nos fios dos enrolamentos

Perdas Joule (cobre): Aquecimento dos enrolamentos de cobre devido à sua resistência

Perdas por histerese (ferro): Aquecimento devido à alternância do campo magnético do núcleo. Energia devolvida para o campo voltar a zero é menor que a necessária para gerar o campo.

$$P_h = K_1 V f B_{max}^n$$

k_1 : coeficiente dependente do material

V : volume do núcleo (m³)

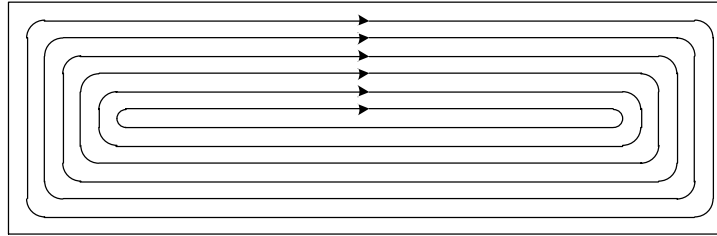
f : frequência (Hz)

B_{max} : campo máximo (T ou Wb/m²)

n : coeficiente dependente de B_{max} (1,6 para $B_{max} = 1,2 \text{ Wb/m}^2$)

Perdas

Perdas Foulcault (ferro): Campo magnético variável induz correntes no núcleo, quanto menor a espessura das chapas que formam o núcleo, menores são essas correntes.



$$P_{fh} = K_2 V (efB_{max})^2$$

k_2 : coeficiente dependente do material

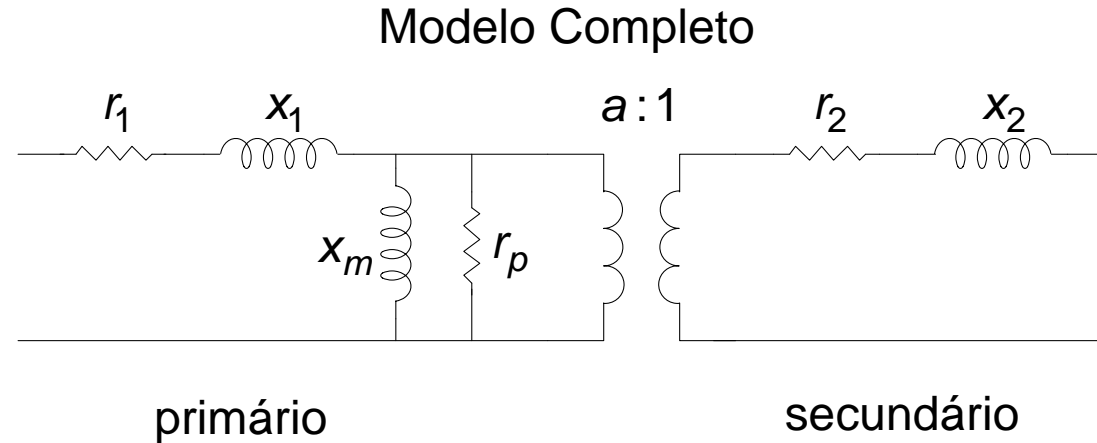
V : volume do núcleo (m^3)

e : espessura da chapa (m)

f : frequência (Hz)

B_{max} : campo máximo (T ou Wb/ m^2)

4.2 Modelo do transformador real



Perdas no cobre: r_1 e r_2

Reatância de dispersão: x_1 x_2

Perdas no ferro: r_p

r_1 , r_2 : resistências das bobinas do primário e do secundário

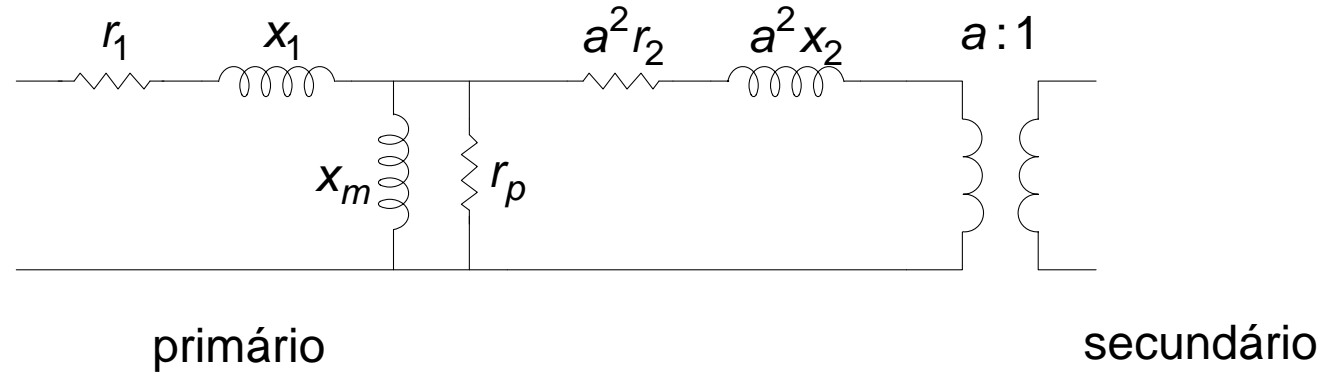
x_1 , x_2 : reatância de dispersão pelo ar, dividida entre o primário e o secundário

x_m : reatância de magnetização, não linear, devido a saturação e histerese, representa a relutância do núcleo

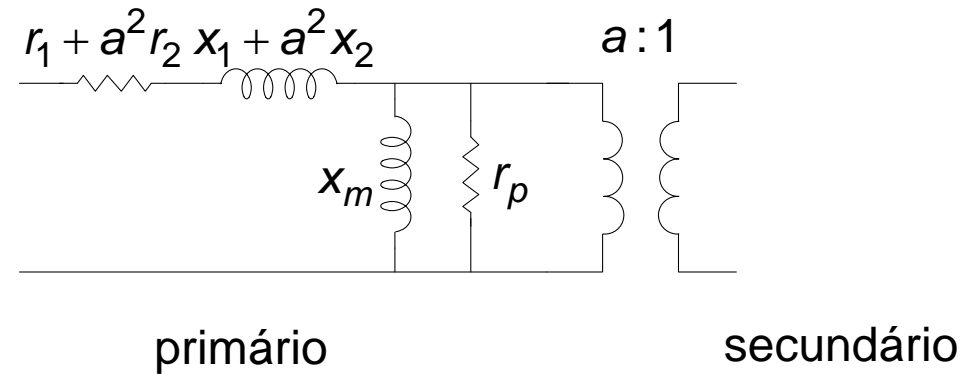
r_p : resistência para representação das perdas por histerese e Foulcault (correntes parasitas) do núcleo

Simplificações do modelo completo

1) Representação de r_2 e x_2 no primário (refletidos no primário)

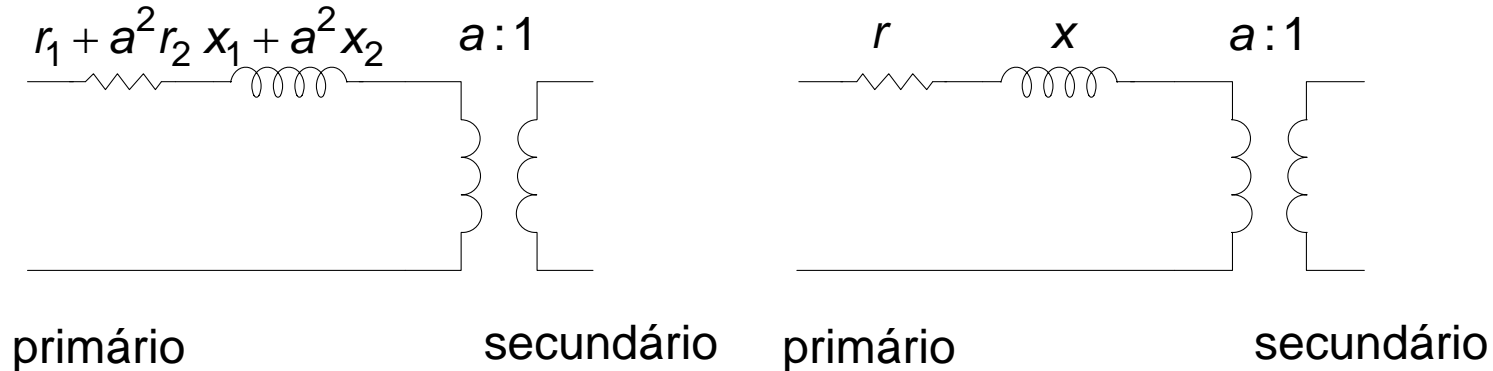


ou



Simplificações do modelo completo

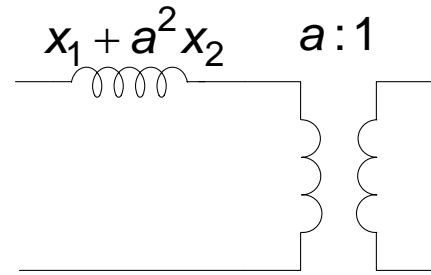
2) Desconsideração do ramo de magnetização



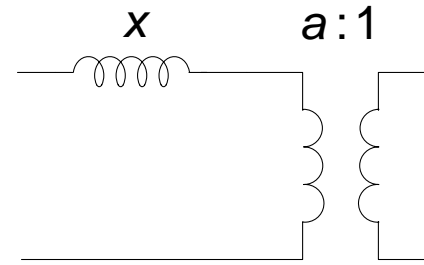
Como a reatância de magnetização x_m é grande assim como a resistência de perdas r_p , os mesmos podem ser desprezados em estudos que requerem menos detalhamento de modelos, como fluxo de potência e curto circuito, e também estudos de estabilidade e alguns estudos de transitórios em que não há saturação do transformador.

Simplificações do modelo completo

3) Desconsideração do ramo de magnetização e das perdas no cobre



primário secundário



primário secundário

Para transformadores comerciais, a relação entre a reatância de dispersão e a resistência da bobina é da ordem de 25 a 50, podendo, portanto, a resistência ser desprezada em estudos de fluxo de potência, estabilidade e curto circuito sem prejuízo considerável na precisão dos resultados.

Transformadores trifásicos

Nos sistemas de potência os transformadores são trifásicos, podendo ser constituídos por uma única unidade (transformador trifásico) ou por 3 unidades (banco de transformadores)



www.thedailysheep.com

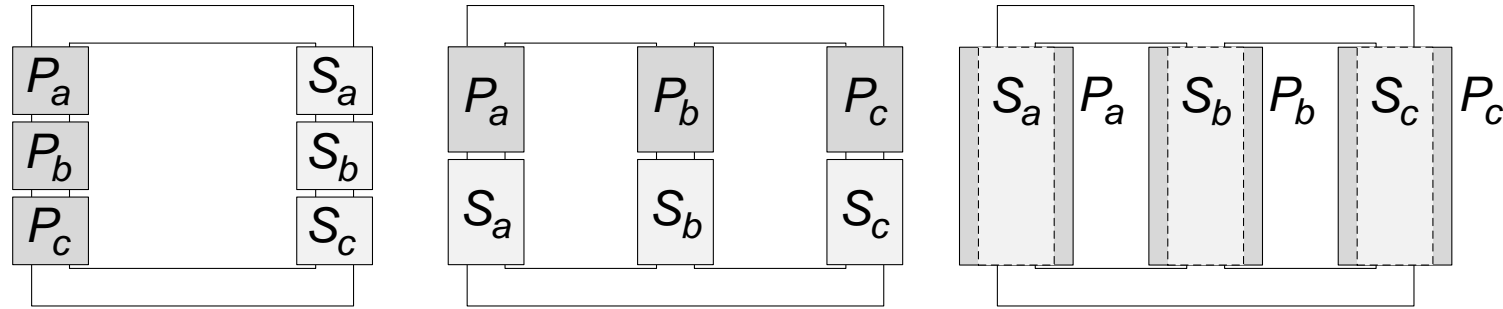


www.fotosdobrasil.fot.br Leonardo Daciole

Exemplos de bancos reais

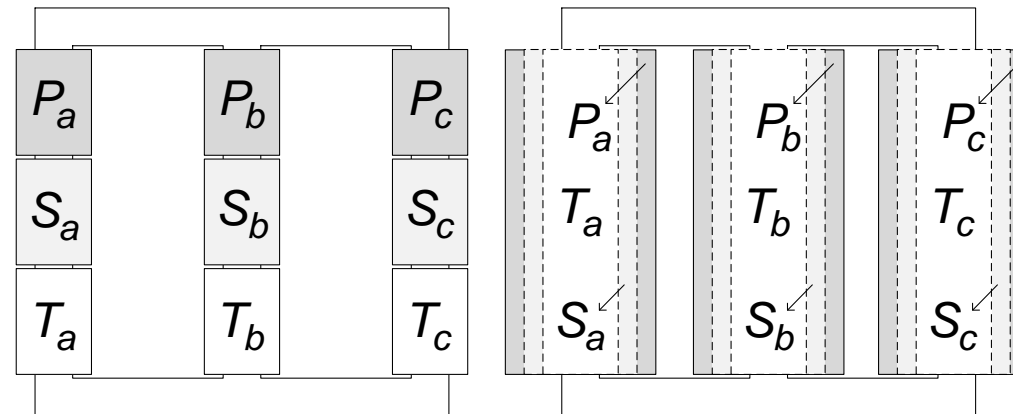
Formas de construção (Transformadores trifásicos)

Transformadores de 2 enrolamentos (primário e secundário)



bobinas justapostas bobinas justapostas bobinas sobrepostas

Transformadores de 3 enrolamentos (primário, secundário e terciário)



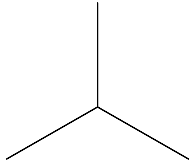
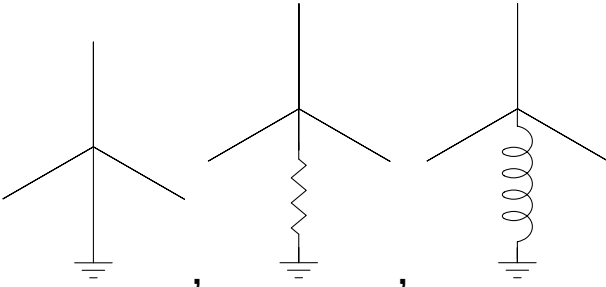
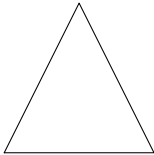
bobinas justapostas bobinas sobrepostas

Tipos de ligação

Os tipos de ligação nos terminais de um transformador trifásico ou de um banco trifásico de transformadores podem ser:

- Estrela não aterrada (pouco usado)
- Estrela solidamente aterrada, ou centro estrela aterrado diretamente (usado algumas vezes)
- Estrela aterrada, com impedância, normalmente resistência (usado na maioria das vezes)
- Triângulo ou delta (usado na maioria das vezes)

A tabela a seguir indica a simbologia usada normalmente e o código.

ligação	Estrela não aterrada	Estrela aterrada	Triângulo
símbolo			
código	Y ou y	YN ou yn	D ou d

OBS - Código em maiúsculo é para o primário (alta tensão)

5 VALORES POR UNIDADE (PU)

Assim como grande dos componentes dos sistemas de potência, o transformador costuma ter os parâmetros dados em porcentagem de um valor de referência (valor de base).

Vantagens ao se utilizar valores pu nos cálculos de redes com transformadores:

- Não é necessário fazer a correção da tensão do primário para o secundário
- Não é necessário refletir impedâncias do primário para o secundário e vice-versa
- Não é necessária preocupação com a defasagem em transformadores trifásicos
- Impedâncias em pu tem valores típicos definidos

Tensões de base:

primário: $V_{base}^{prim} = V_{nom}^{prim}$ (é a tensão nominal do primário)

secundário: $V_{base}^{sec} = V_{nom}^{sec}$ (é a tensão nominal do secundário)

OBS

A tensão nominal para transformador monofásico é fase-neutro.

A tensão nominal para transformador trifásico (e outros equipamentos trifásicos) é fase-fase (tensão de linha).

Potência de base:

É a potência nominal do transformador, ONAF (óleo natural ventilação forçada) ou ONAN (óleo natural ventilação natural)

$$S_{base} = S_{nom}$$

Correntes de base:

Para transformador monofásico

$$\text{primário: } I_{base}^{prim} = \frac{S_{base}}{V_{base}^{prim}}$$

$$\text{secundário: } I_{base}^{sec} = \frac{S_{base}}{V_{base}^{sec}}$$

Para transformador trifásico

$$\text{primário: } I_{base}^{prim} = \frac{S_{base}}{\sqrt{3}V_{base}^{prim}}$$

$$\text{secundário: } I_{base}^{sec} = \frac{S_{base}}{\sqrt{3}V_{base}^{sec}}$$

Impedância de base:

$$\text{primário: } Z_{base}^{prim} = \frac{(V_{base}^{prim})^2}{S_{base}}$$

$$\text{secundário: } Z_{base}^{sec} = \frac{(V_{base}^{sec})^2}{S_{base}}$$

5.1 Passagem de valores absolutos para valores pu

- Tensões

$V_{pu} = \frac{V_{kV}}{V_{base}}$, a tensão em pu é calculada como uma fração entre a tensão medida em kV (ou em V)

e a tensão de base (do primário ou do secundário).

Em programas de curto circuito normalmente se considera a tensão em todas as barras com 1 pu, ou seja, as tensões são nominais.

- Potência

$S_{pu} = \frac{S_{MVA}}{S_{base}}$, a potência em pu, que está passando pelo transformador (ou qualquer outro elemento)

é uma fração entre a potência (normalmente dada em MVA) e potência de base.

Não é usual calcular a potência em pu, a potência de base é utilizada normalmente para o cálculo da impedância em pu ou passagem de pu para valor absoluto.

- Correntes

$I_{pu} = \frac{I_{kA}}{I_{base}}$, a corrente no primário ou no secundário é relação entre a corrente medida (kA) e a

corrente de base (que é diferente no primário ou no secundário, se $a \neq 1$ $a = \frac{N_1}{N_2}$)

- Impedâncias

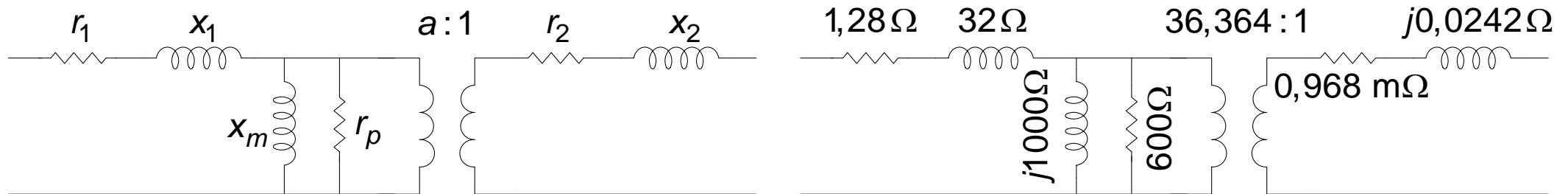
$Z_{pu} = \frac{Z_{\Omega}}{Z_{base}}$, a impedância no primário ou no secundário é relação entre a impedância absoluta (Ω) e a impedância de base (do primário ou do secundário)

Exemplo 1

Um transformador monofásico tem os seguintes valores nominais:

100 kVA, 8:0,22 kV

O modelo completo tem os seguintes parâmetros:



Pede-se calcular o modelo completo em pu.

Resolução

a) Definição dos valores de base adotados

$$V_b^1 = 8 \text{ kV}, \quad V_b^2 = 0,22 \text{ kV}, \quad S_b = 0,1 \text{ MVA}$$

b) Cálculo dos demais valores de base

$$Z_b^1 = \frac{(V_b^1)^2}{S_b} = \frac{8^2}{0,1} = 640 \Omega, Z_b^2 = \frac{(V_b^2)^2}{S_b} = \frac{0,22^2}{0,1} = 0,484 \Omega$$

As correntes de base não são necessárias nesse exemplo, mas tem os seguintes valores:

$$I_b^1 = \frac{S_b}{\sqrt{3}V_b^1} = \frac{0,1}{\sqrt{3} \cdot 8} = 7,217 \text{ A}, I_b^2 = \frac{S_b}{\sqrt{3}V_b^2} = \frac{0,1}{\sqrt{3} \cdot 0,22} = 262,43 \text{ A}$$

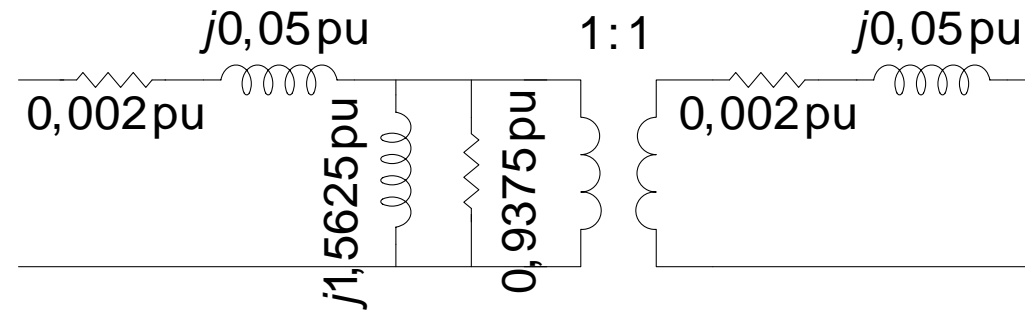
c) Cálculo das impedâncias em pu

$$r_1' = \frac{r_1}{Z_b^1} = \frac{1,28}{640} = 0,002 \text{ pu} \quad x_1' = \frac{x_1}{Z_b^1} = \frac{32}{640} = 0,05 \text{ pu}$$

$$r_2' = \frac{r_2}{Z_b^2} = \frac{0,00097}{0,484} = 0,002 \text{ pu} \quad x_2' = \frac{x_2}{Z_b^2} = \frac{0,0242}{0,484} = 0,05 \text{ pu}$$

$$r_p' = \frac{r_p}{Z_b^1} = \frac{600}{640} = 0,9375 \text{ pu} \quad x_m' = \frac{x_m}{Z_b^1} = \frac{1000}{640} = 1,5625 \text{ pu}$$

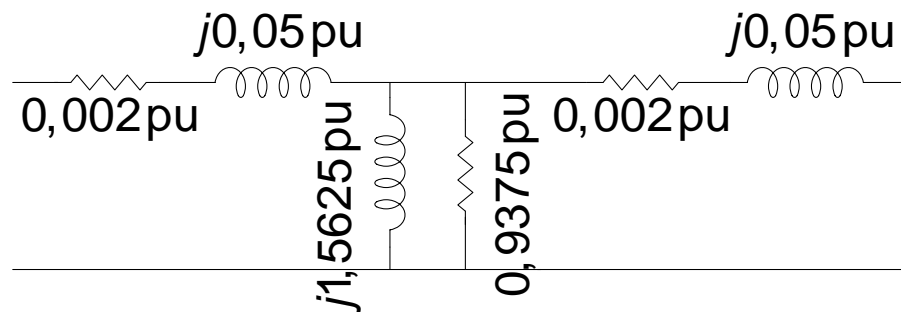
d) Modelo em pu



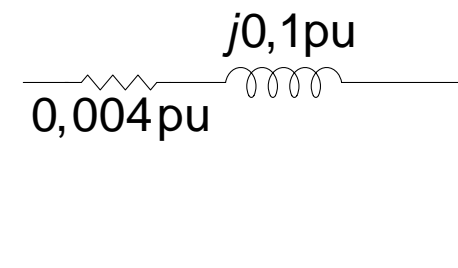
Em pu a relação de transformação é 1:1, e para refletir os valores do secundário para o primário não é necessário corrigir os valores:

O transformador ideal central não precisa ser representado.

O modelo simplificado fica da seguinte forma:



Com ramo de magnetização



Sem ramo de magnetização

5.2 Passagem de valores pu para valores absolutos

Exemplo 2

Um transformador monofásico tem os seguintes valores nominais:

100 kVA, 8:0,22 kV, $x=10\%$, $k=x/r=25$ (fator de qualidade)

Não será considerado o ramo de magnetização

Resolução

O transformador é o mesmo do exemplo 1, então os valores de impedância de base são:

$$Z_b^1 = 640 \Omega, Z_b^2 = 0,484 \Omega$$

A resistência é obtida a partir da reatância e do fator de qualidade.

$$x_{pu} = 10\% = 0,1pu, \quad r_{pu} = \frac{0,1}{25} = 0,004pu$$

A reatância e a resistência em pu podem ser distribuídas igualmente no primário e no secundário:

$$x' = 0,05pu, \quad r' = 0,002pu$$

As impedâncias em Ω são:

$$r_1 = r'Z_b^1 = 0,002 \times 640 = 1,28 \Omega \quad x_1 = x'Z_b^1 = 0,05 \times 640 = 32 \Omega$$

$$r_2 = r'Z_b^2 = 0,002 \times 0,484 = 0,000968 \Omega \quad x_2 = x'Z_b^2 = 0,05 \times 0,484 = 0,0242 \Omega$$

5.3 Mudança de base

Programas de fluxo de potência e curto-circuito trabalham com uma base fixa de potência para toda a rede, normalmente 100 MVA por padrão.

Sendo assim, todos os componentes da rede devem ter seus valores em pu (impedâncias) calculados para essa potência de base padrão:

- Mudança de base de potência

$$Z_{pu}^{S_1} = \frac{Z}{Z_b^{S_1}}, \quad Z_{pu}^{S_2} = \frac{Z}{Z_b^{S_2}}$$

$$Z_b^{S_1} = \frac{V_b^2}{S_1}, \quad Z_b^{S_2} = \frac{V_b^2}{S_2}$$

$$Z_{pu}^{S_1} = \frac{Z}{V_b^2} S_1, \quad Z_{pu}^{S_2} = \frac{Z}{V_b^2} S_2$$

$$\frac{Z_{pu}^{S_2}}{Z_{pu}^{S_1}} = \frac{\frac{Z}{V_b^2} S_2}{\frac{Z}{V_b^2} S_1} = \frac{S_2}{S_1} \quad \text{ou} \quad Z_{pu}^{S_2} = Z_{pu}^{S_1} \frac{S_2}{S_1}$$

Exemplo 3

Dado um transformador 138:440 kV, 300 MVA, $x=8\%$ e $k=50$, calcular sua impedância na base de 100 MVA.

Resolução

$$r = \frac{8}{50} = 0,16\% = 0,0016 \text{ pu}, \quad z(S_1) = 0,0016 + j0,08 \text{ pu},$$

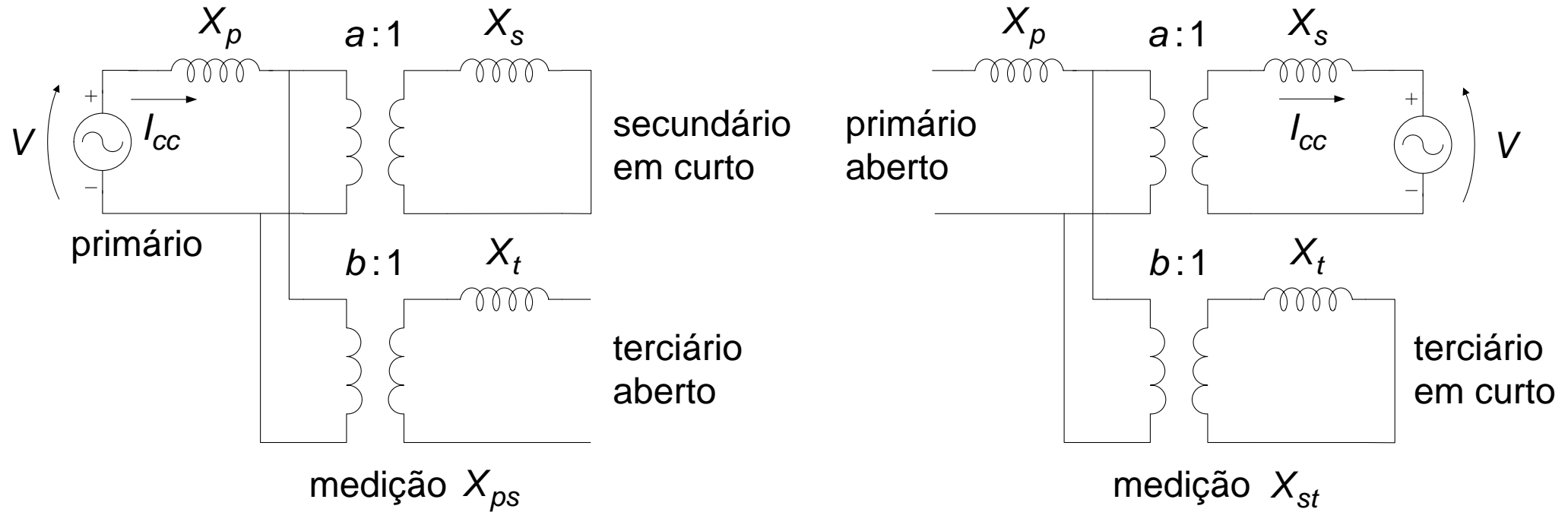
$$S_1 = 300 \text{ MVA}, \quad S_2 = 100 \text{ MVA}$$

$$z(S_2) = z(S_1) \frac{S_2}{S_1} = (0,0016 + j0,08) \frac{100}{300} = 0,0005333 + j0,0266 \text{ pu}$$

$$\text{ou } z' = 0,0533 + j2,6667\%$$

Mudança de base de tensão não é utilizada nesses casos.

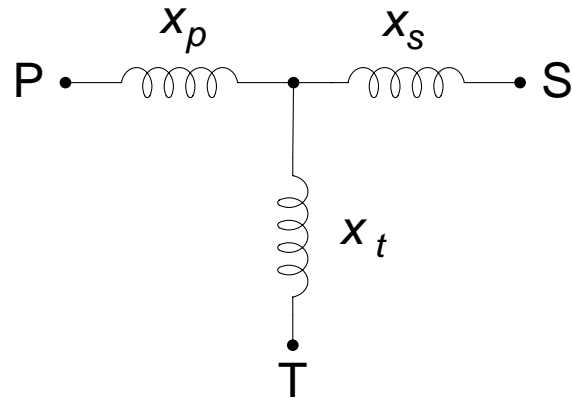
6 ENSAIO DE CURTO CIRCUITO PARA TRANSFORMADOR DE TRÊS ENROLAMENTOS



Medição X_{pt} , tensão no primário, secundário em vazio, terciário em curto.

Ensaio de curto circuito para transformador de três enrolamentos

O modelo em pu é o seguinte:



Medição 1: $x_{ps} = x_p + x_s$

Medição 2: $x_{pt} = x_p + x_t$

Medição 3: $x_{st} = x_s + x_t$

OBS - $x_{st} = x'_{st} S_p / S_s$ mudança de x'_{st} para S_{base} do primário

Na configuração para medição x_{ps} é medido o valor $X_p + x'_s$ em Ohms, onde $x'_s = a^2 x_s$.

Para se obter os valores x_p, x_s e x_t pode-se resolver esse sistema de 3 equações:

$$x_{st} - x_{ps} - x_{pt} = x_s + x_t - x_p - x_s - x_p - x_t = -2x_p \quad x_p = \frac{x_{ps} + x_{pt} - x_{st}}{2}$$

$$x_{pt} - x_{st} - x_{ps} = x_p + x_t - x_s - x_t - x_p - x_s = -2x_s \quad x_s = \frac{x_{ps} + x_{st} - x_{pt}}{2}$$

$$x_{ps} - x_{pt} - x_{st} = x_p + x_s - x_p - x_t - x_s - x_t = -2x_t \quad x_t = \frac{x_{pt} + x_{st} - x_{ps}}{2}$$

O que é semelhante a fazer a conversão estrela triângulo.

7 MODELOS SEQUENCIAIS

Para simplificação da representação e cálculo de redes o primeiro passo é a representação com diagrama unifilar.

O segundo passo é fazer os cálculos usando a representação trifásica, que diminui em 3 vezes a ordem dos sistemas de equação.

O terceiro passo é a representação de redes com diagramas sequenciais para cálculos com desequilíbrios.

- Importância

Facilitar os cálculos em redes elétricas trifásicas tanto para cálculos manuais quanto para cálculos computacionais.

7.1 Modelos de transformadores de 2 enrolamentos em componentes simétricas

- Sequência positiva

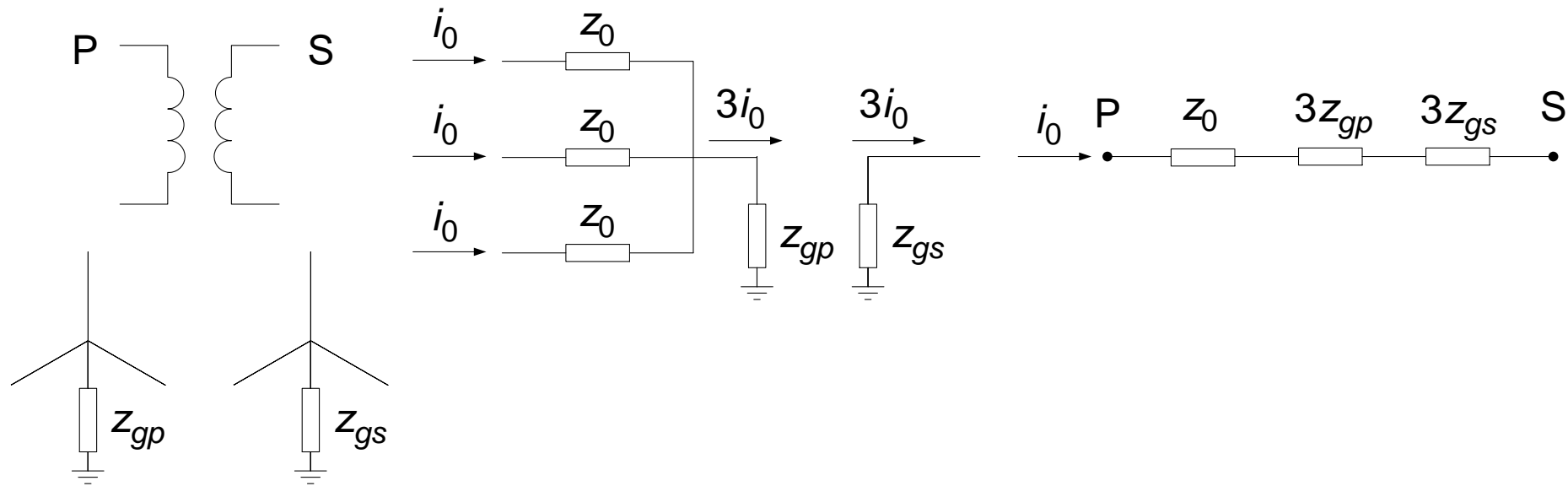
Para qualquer tipo de ligação, não flui corrente pelo neutro e toda a corrente vai do primário para o secundário sendo o modelo o seguinte:



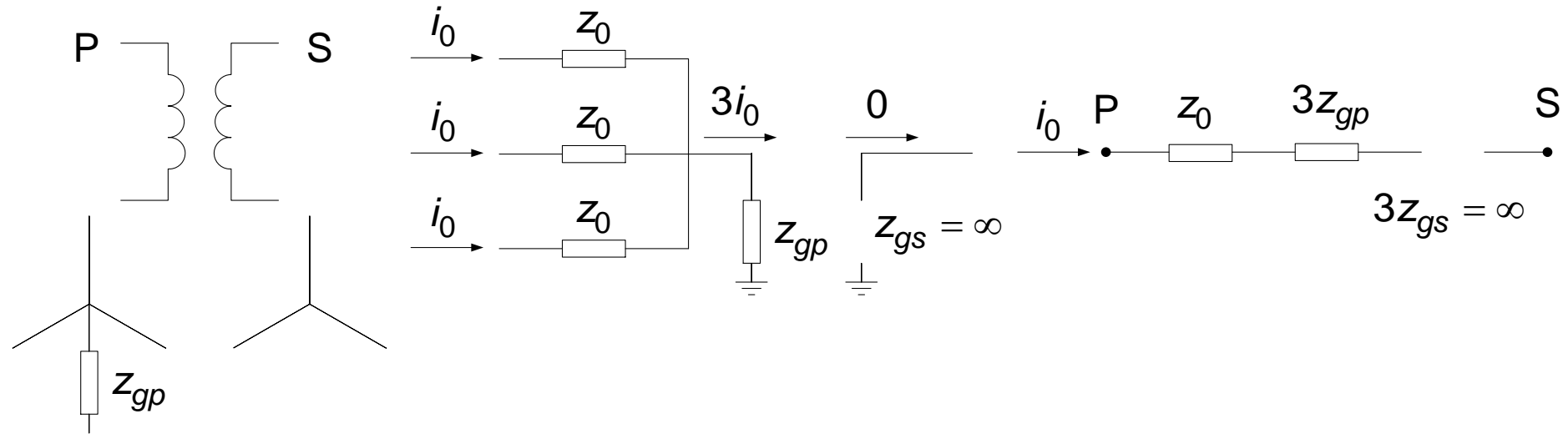
- Para a sequência zero o modelo depende do tipo de ligação

Exemplo: estrela aterrada - estrela aterrada (grupo vetorial) YNyn

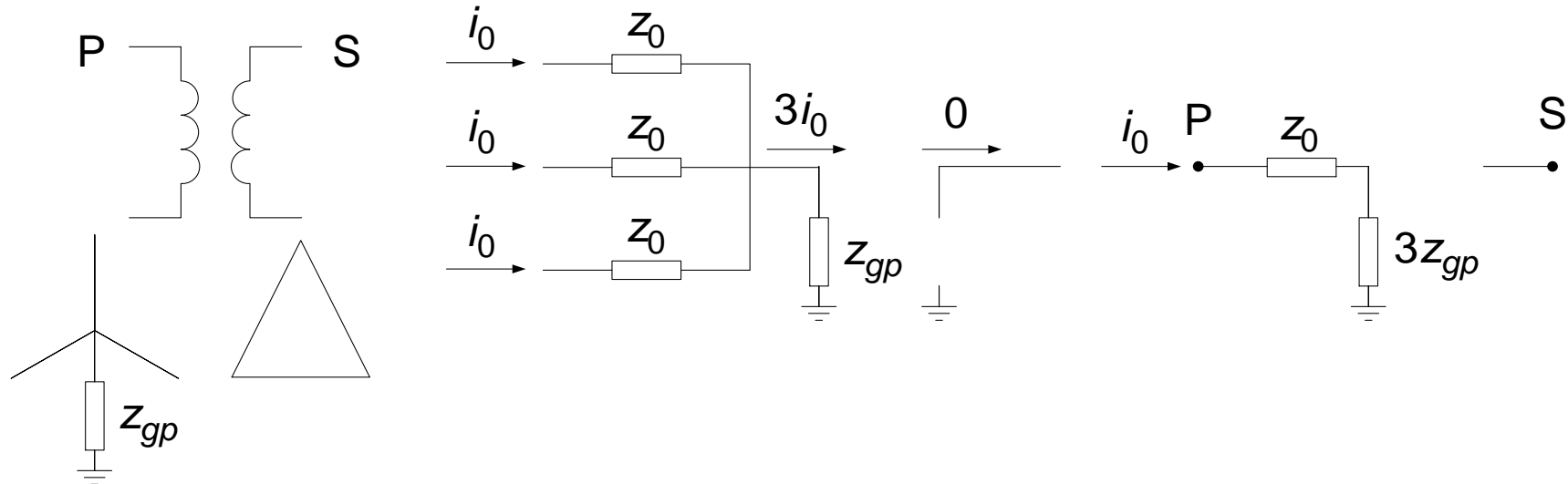
Injeta-se corrente de sequência zero no primário, com a impedância toda refletida no primário.



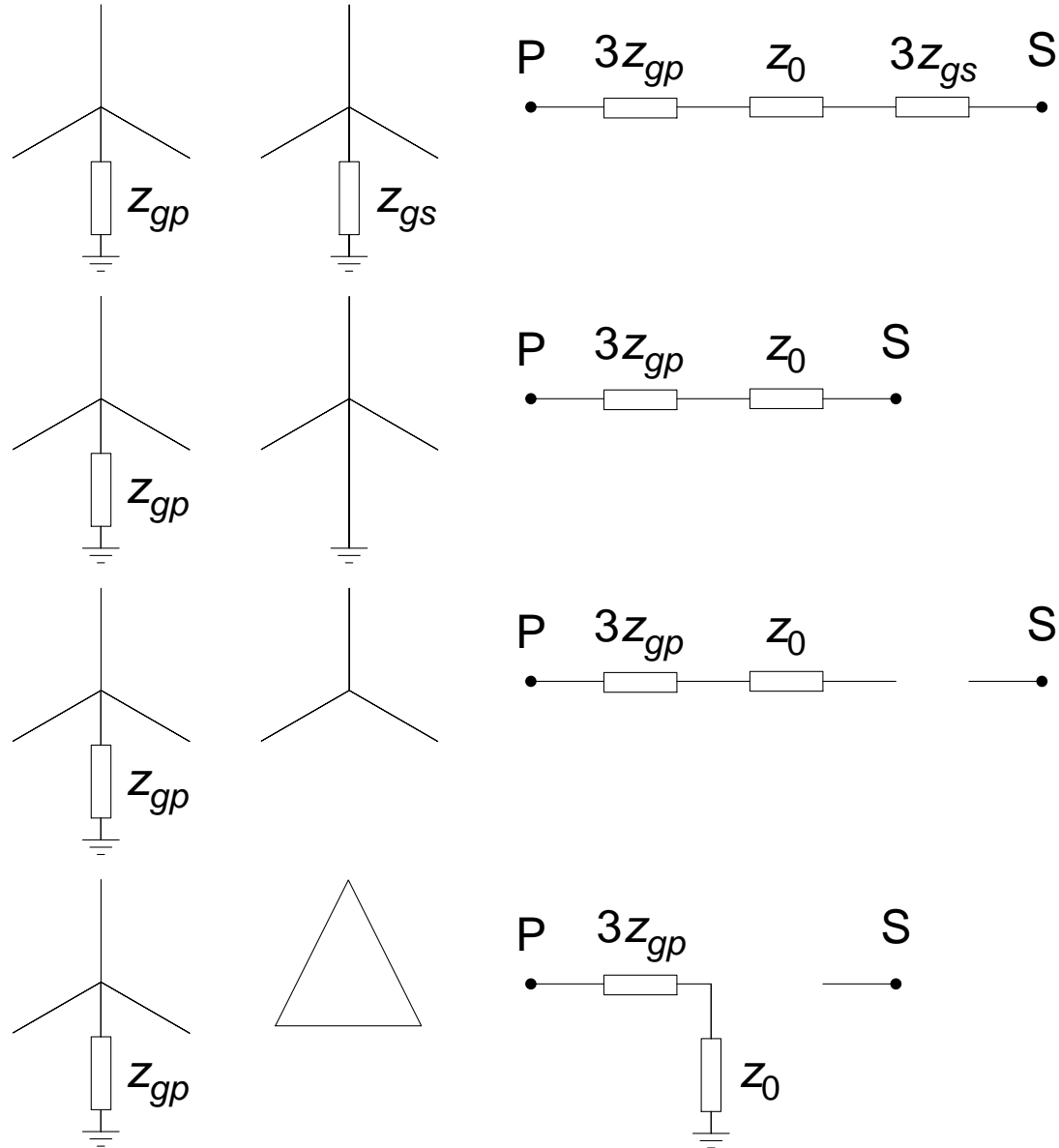
Exemplo: estrela aterrada - estrela não aterrada (grupo vetorial) YNy



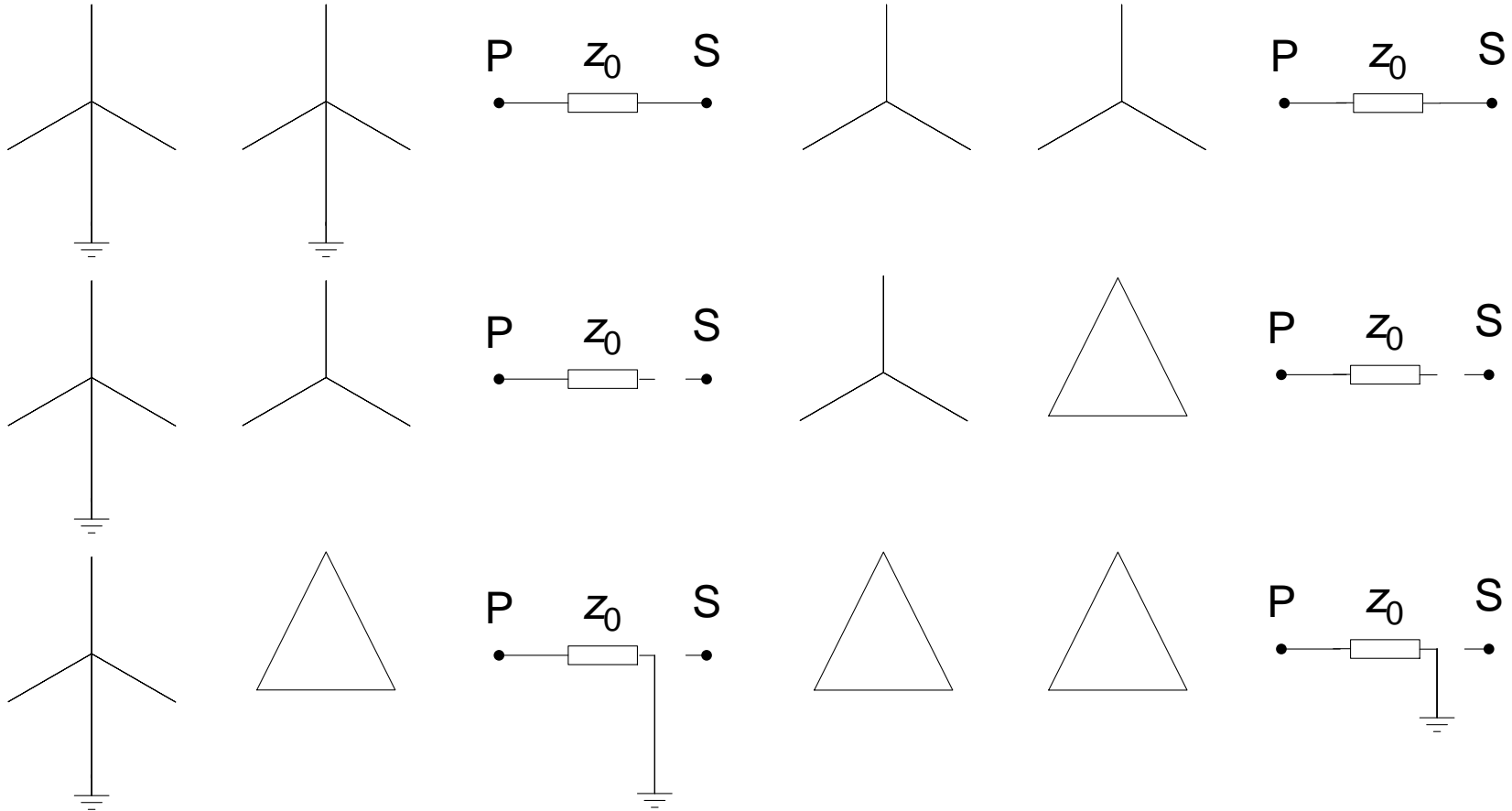
Exemplo: estrela aterrada - delta (grupo vetorial) YNd



Modelos de sequência zero de transformadores de 2 enrolamentos



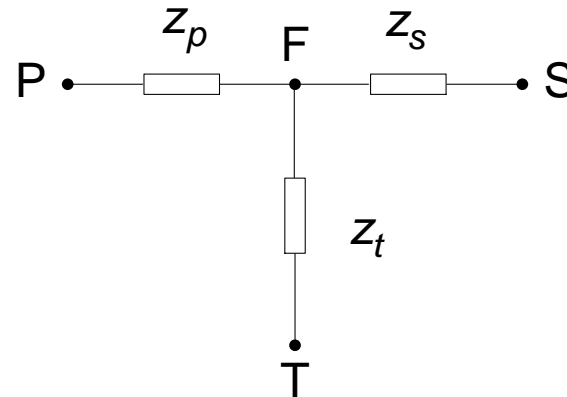
Modelos de sequência zero de transformadores de 2 enrolamentos



7.2 Modelo de sequência de transformadores de 3 enrolamentos

- Sequência positiva:

Para qualquer tipo de ligação o modelo o seguinte:



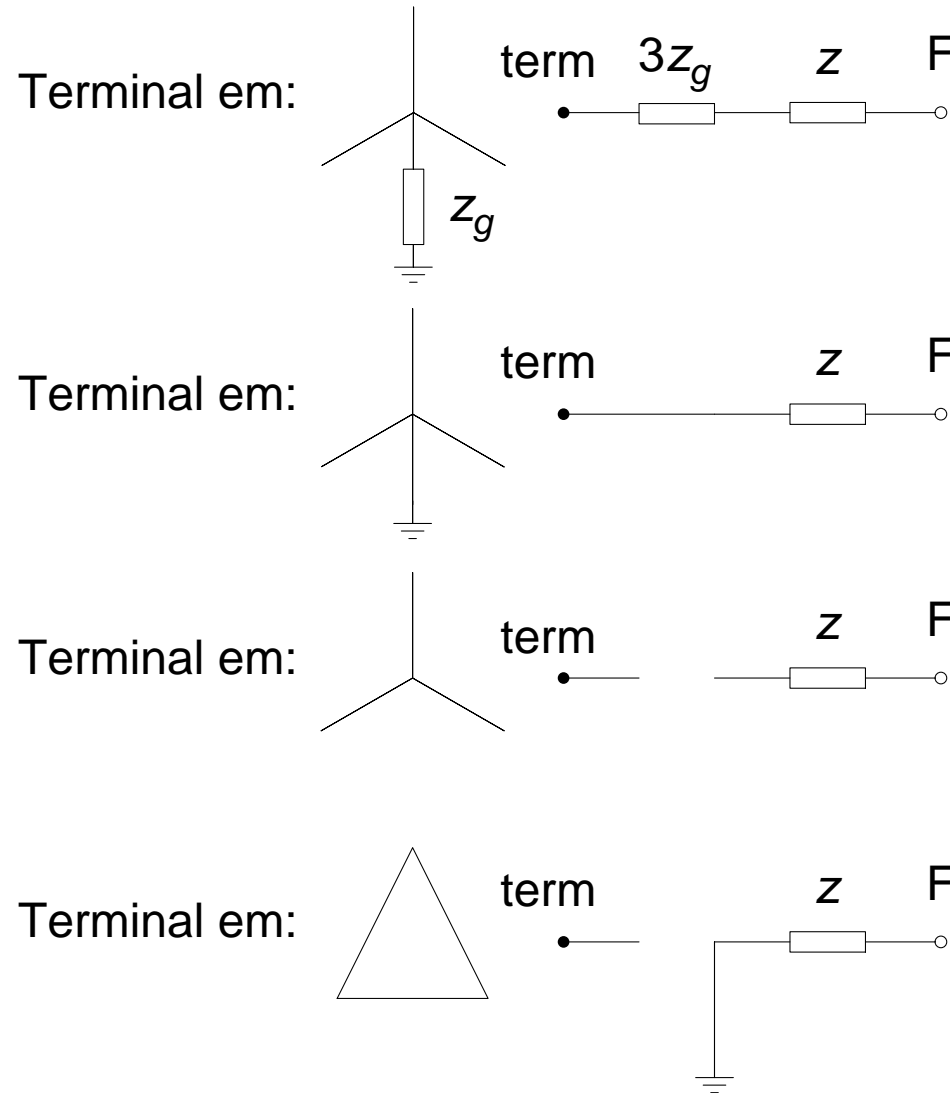
F é o nó fictício do transformador de 3 enrolamentos

- Para a sequência zero o modelo depende do tipo de ligação

Como o número de combinações é muito grande podem ser usadas regras conforme o tipo de ligação, essas regras também se aplicam ao transformador de 2 enrolamentos ao se fazer:

$$P \cdot \overset{Z = Z_{ps} = Z_0}{\boxed{}} \cdot S = P \cdot \overset{\frac{Z}{2}}{\boxed{}} \cdot \overset{F}{\bullet} \cdot \overset{\frac{Z}{2}}{\boxed{}} \cdot S$$

Regras para o modelo de sequência zero: 2 e 3 enrolamentos



- Transformador de 3 enrolamentos
term = P, S ou T

$$z = z_p \text{ e } z_g = z_{gp} \text{ para term=P}$$

$$z = z_s \text{ e } z_g = z_{gs} \text{ para term=S}$$

$$z = z_t \text{ e } z_g = z_{gt} \text{ para term=T}$$

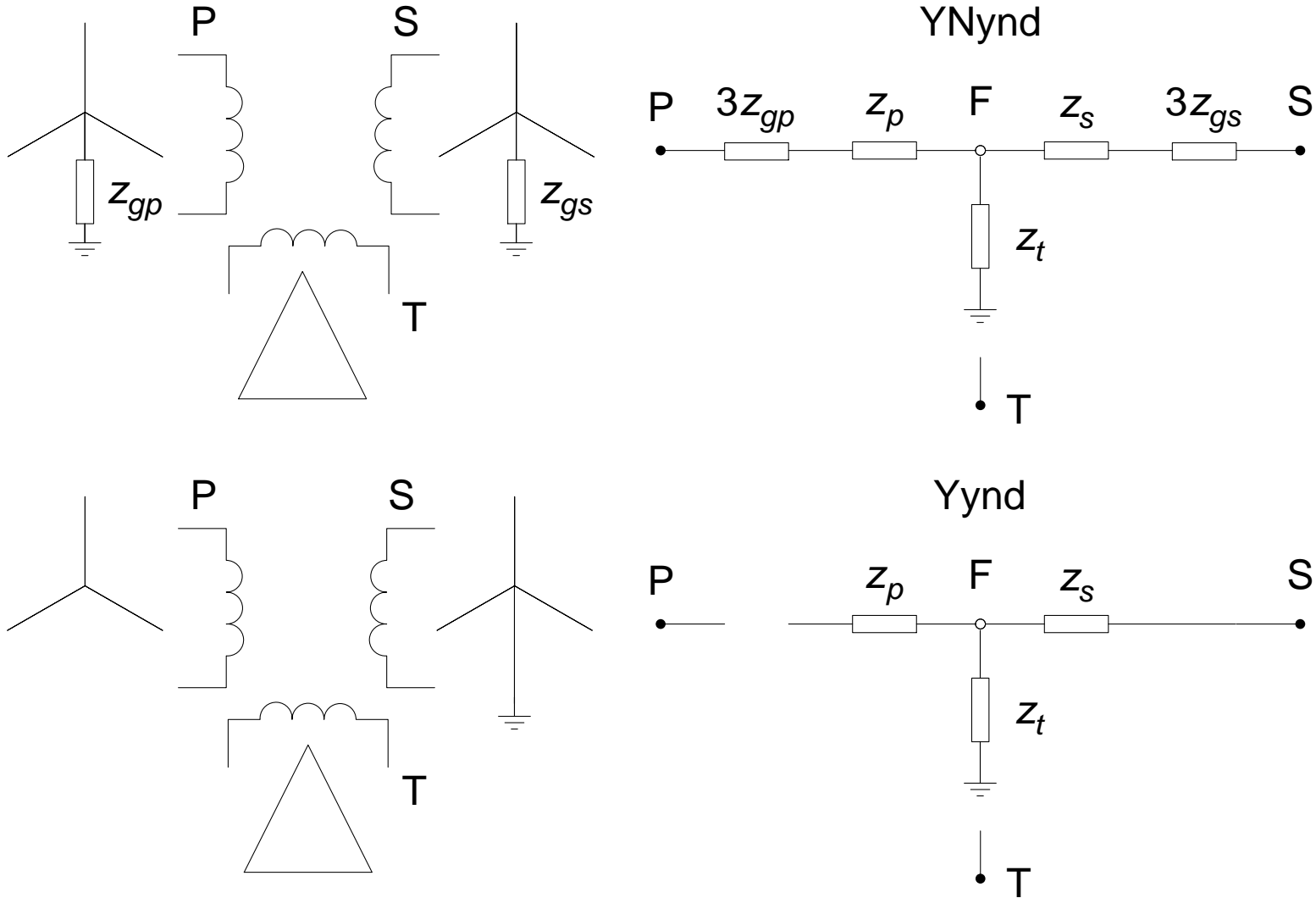
- Transformador de 2 enrolamentos
term = P ou S

$$z = \frac{z_{ps}}{2} \text{ e } z_g = z_{gp} \text{ para term=P}$$

$$z = \frac{z_{ps}}{2} \text{ e } z_g = z_{gs} \text{ para term=S}$$

onde $z_{ps} = z_0$ é a impedância de sequência zero do transformador, normalmente igual a de sequência positiva.

Exemplos de modelo de sequência zero de transformadores de 3 enrolamentos



8 MODELAMENTO PARA SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

8.1 Modelo para simulação de fluxo de potência

Programas de fluxo de potência costumam usar o modelamento da rede em valores pu, sendo assim os modelos serão mostrados em pu.

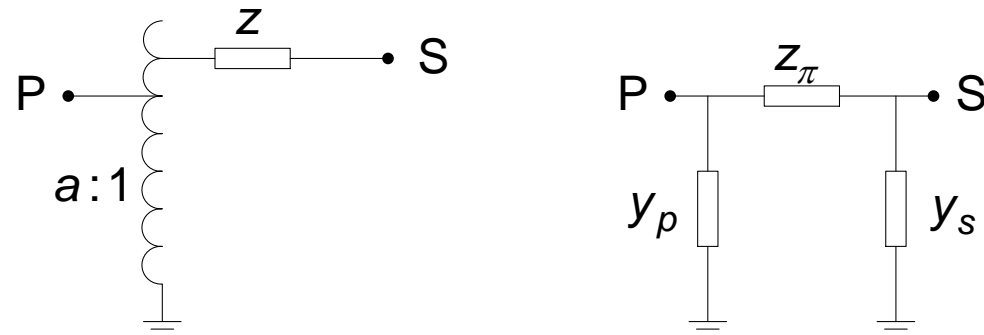
Para fluxo de potência considera-se somente a sequência positiva.

- Transformador de 2 enrolamentos com tap nominal



Normalmente é desprezada a resistência.

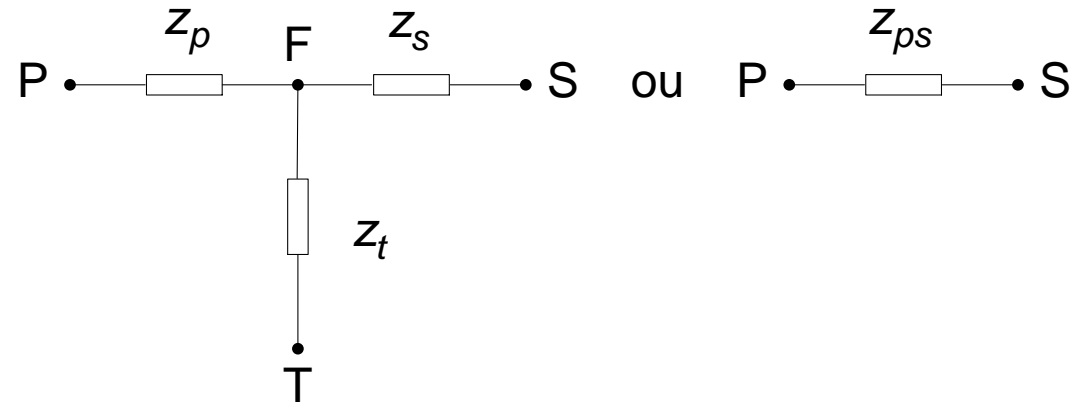
- Transformador de 2 enrolamentos com um terminal fora do tap nominal



$$z_\pi = az, \quad y_p = \frac{1}{a} \left(\frac{1}{a} - 1 \right) \frac{1}{z}, \quad y_s = \left(1 - \frac{1}{a} \right) \frac{1}{z}$$

Modelo para fluxo de potência - transformador de 3 enrolamentos

- Transformador de 3 enrolamentos com tap nominal



Também é usual desprezar a resistência e quando o terciário não é utilizado, o transformador é modelado como se fosse de 2 enrolamentos, com $Z_{ps} = Z_p + Z_s$.

Modelamento do transformador no programa Anarede

O programa normalmente usado em estudos de fluxo de potência que envolvem o SIN (sistema interligado nacional) Anarede do Cepel

Algumas características gerais são:

- Impedâncias série em % na base 100 MVA
- Capacitâncias ou reatâncias shunt em MVar ($Q > 0$ para elementos capacitivos e $Q < 0$ para elementos reativos)
- Capacidade de 20.000 barras e 40.000 circuitos
- Vários métodos de solução do fluxo
- Representação de elos CC, compensadores estáticos, compensação shunt e série
- Diversas funções auxiliares como fluxo de potência ótimo, fluxo de potência continuado, recomposição, análise de sensibilidade, análise de contingências.

Os arquivos de dados com modelamento do SIN estão disponíveis, com acesso livre, nos sites http://www.ons.com.br/plano_ampliacao/plano_ampliacao.aspx# para o ONS (Operador Nacional do Sistema) ou http://www.epe.gov.br/Transmissao/Paginas/Estudos_15.aspx para a EPE (Empresa de Pesquisa Energética).

Nessas bases a numeração de barras é diferente, alguns dados são discrepantes e também há diferenças de topologia, em alguns casos por simplificações como desconsiderar um nó intermediário sem carga em uma linha, um terciário sem carga ou falta de atualização de obras. O foco do ONS é o curto prazo (3 anos adiante) e da EPE o longo prazo (10 anos adiante).

Modelamento do transformador no programa Anarede

Antes de se criar um transformador devem ser criadas suas barras terminais:

Os dados de barra são:

- número (até 5 algarismos)
- nome (até 12 caracteres)
- tensão (pu): 1021=1,021 pu (1)
- ângulo (graus) (1)
- tipo de barra PQ, PV ou referência
- Vdef (pu) tensão nominal da carga
- Grupo limite de tensão (2)
- Grupo base de tensão (3)
- Área (4)
- Modo de visualização
- Carga (MW e MVar) (5)
- Geração (MW e MVar) (5)
- Geração reativa mínima e máxima
- Shunt equivalente (MVar) (6)

Dados de Barra CA (DBAR)

Número 561	Nome BAURU-----440	Tensão 1021 p.u.	Ângulo .019 graus
Tipo 0 - PQ	VDef 1000 p.u.	Grupo Limite de Tensão 4	Grupo Base de Tensão D 440 kV
Área 5	Barra Controlada [] Controle Local	Modo de Visualização 0 - Normal	<input checked="" type="checkbox"/> Ligado
Carga Ativa [] MW Reativa [] Mvar	Geração Ativa [] MW Reativa [] Mvar	Geração Reativa Mínima [] Mvar Máxima [] Mvar <input type="checkbox"/> Limites Abertos	Shunt Equivalente [] Mvar Individualizado (DBSH) 0 Mvar

Agregadores

Primeira Vizinhança

Número []	Nome []	Mostrar	Trocar
---------------	-------------	---------	--------

Inserir Alterar Remover Limpar Fechar

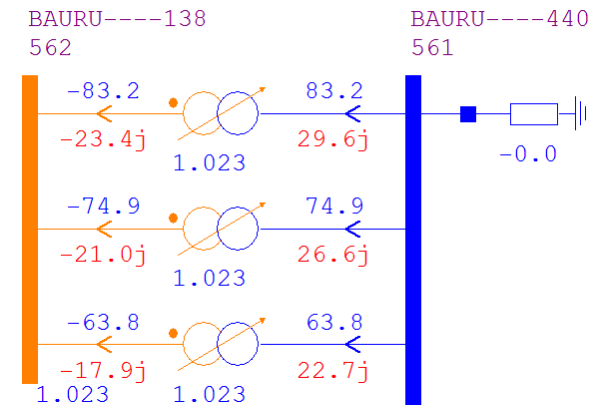
Modelamento do transformador no programa Anarede

- (1) A tensão deve ser fixada para barras PV e referência e para barras controladas por tap de transformador, para barras não controladas pode-se informar 1 pu pois a tensão será recalculada. O ângulo deve ser definido obrigatoriamente somente para a barra de referência, entretanto um ângulo qualquer nos outros casos pode gerar problemas de convergência.
- (2) Valor definido separadamente, exemplo, grupo 5, tensão de 0,95 a 1,05 pu em operação normal e 0,9 a 1,05 pu em emergência.
- (3) Valor definido separadamente, exemplo, grupo G, tensão nominal de 138 kV.
- (4) Valor definido separadamente, exemplo, 4, CTEEP - GRANDE SAO PAULO
- (5) Carga e geração com $Q > 0$ são indutivas
- (6) Surt de barra com $Q > 0$ é capacitivo, um reator de 5 MVar tem valor -5.

Modelamento do transformador no programa Anarede

Os dados do transformador são:

- número da barra de
- número da barra para
- número: identificação do circuito (1)
- capacidade normal, emergência e equipamento (MVA) (2)
- barra proprietária: barra para a qual é definida a área do transformador
- barra controlada (3)
- resistência em %: normalmente igual a zero
- reatância em % (4)
- susceptância (MVar): igual a zero
- tap especificado (pu): quando o tap for fixado pelo usuário (5)
- tap mínimo (pu) e tap máximo (pu): para transformador com comutador de tap automático
- steps: número de posições de tap (6)



Dados de Circuito CA (DLIN)

Circuito

Barra De: 562 Nome: BAURU----138 ☒ Ligado

Barra Para: 561 Nome: BAURU----440 ☒ Ligado

Número: 1 ☒ Circuitos existentes

Barra Proprietária

☒ De

☐ Para

Barra Controlada

562

☒ Direção De

☐ Direção Para

☒ Ligado

Capacidade

Normal: 143 MVA

Emergência: 160 MVA

Equipamento: 160 MVA

Resistência: %

Reatância: 8.27 %

Susceptância: Mvar

Tap

Especificado: 1.025

Mínimo: .86

Máximo: 1.189

Defasamento: graus

Steps: 17

☐ Controle Congelado

Modelamento do transformador no programa Anarede

- (1) Para identificação de circuitos paralelos, normalmente usa-se 1, 2, 3, etc.
 - (2) Podem ser usados os valores ONAN (refrigeração óleo natural, ar natural) e ONAF (refrigeração óleo natural, ar natural) ou somente ONAF, que pode ser o sistema padrão do transformador. A capacidade do equipamento pode ser ignorada mas indica algum outro elemento limitante com disjuntor ou barramento que limita a potência admissível.
 - (3) Caso não seja especificado, a barra controlada é a DE (Direção De), se for mudada para PARA o programa seleciona automaticamente (Direção Para).
 - (4) A reatância, caso não seja especificada a base de potência, deve ser calculada na base da potência $ONAF > ONAN$, para transformador de 3 enrolamentos usar $z_{ps} = z_p + z_s$ quando o terciário está em vazio.
 - (5) O valor do tap deve ser informado quando o tap for fixado pelo usuário devido ao controle estar congelado ou quando o transformador tem tap fixo (tap mínimo e máximo não estão preenchidos).
 - (6) Para trafos com $\pm 2 \times 2,5\%$, por exemplo, steps=5, para o número de steps ser levado em conta o método de solução do fluxo deve considerar a discretização de tap, caso contrário o tap variará de forma contínua entre tap mínimo e tap máximo.
- Pode-se desligar o transformador inteiro ou abrir uma barra terminal (campos Ligado ao lado do nome da barra).

Modelamento do transformador no programa Anarede

A criação e modificação de dados de transformadores podem ser feitas diretamente na interface gráfica ou podem ser feitos via arquivo de comandos txt.

Os dados das barras e dos 3 transformadores Bauru 440:138 em modo texto, (arquivo com extensão .pwf) é o seguinte:

```
DBAR
(Num)OETGb(   nome   )Gl( V)( A)( Pg)( Qg)( Qn)( Qm)(Bc  )( Pl)( Ql)( Sh)Are(Vf)M(1)(2)(3)(4)(5)(6)(7)(8)(9)
.
.
.
561 L   DBAURU----440 41007-30.                51000
562 L   GBAURU----138 21024-33.                51000
.
.
.
99999
DLIN
(De )d O d(Pa )NcEP  ( R% )( X% )(Mvar)(Tap)(Tmn)(Tmx)(Phs)(Bc  )(Cn)(Ce)Ns(Cq)(1)(2)(3)(4)(5)(6)(7)(8)(9)(10)
.
.
.
562      561 1      8.27      1.043   .861.189      562 143 16017 160
562      561 2      9.19      1.043   .861.187      562 143 16717 167
562      561 5     10.78      1.043   .861.187      562 150 18017 180
.
.
.
99999
```

Exemplo 1 de modelagem de transformador no Anarede

Dado um transformador elevador 13,8:230 kV, 100/120 MVA (ONAN/ONAF), $x=8\%$, YNd11, tap não automático $\pm 2 \times 2,5\%$ na alta, ajustado na posição 1,025 pu, escrever as linhas de arquivo para a modelagem das barras terminais e do transformador no programa Anarede.

Solução

Como não foi informado em qual base está a reatância, será adotada a base 120 MVA.

A reatância em por cento na base 100 MVA é: $x_t = 8 \times 100/120 = 6,6667\%$

O tap é fixo com valor 1,025, a capacidade normal e de emergência é 120 MVA.

A barra de alta será a barra 9021 e a de baixa será a barra 9022.

Os dados obrigatórios estão em vermelho (sem dado obrigatório ocorre erro).

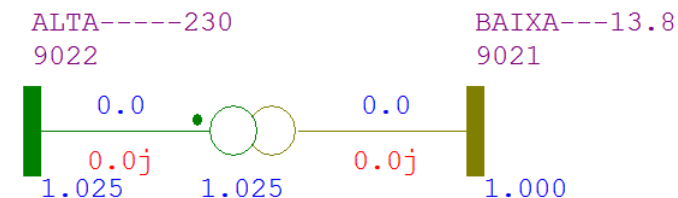
Para o programa Anarede primeiro devem ser definidos os dados de barra:

```
DBAR
(Num)OETGb( nome )Gl( V)( A)( Pg)( Qg)( Qn)( Qm)(Bc )( Pl)( Ql)( Sh)Are(Vf)M(1)(2)(3)(4)(5)(6)(7)(8)(9)
 9021 NBAIXA---13.8 51000 8
 9022 FALTA-----230 51000 8
99999
```

OBS - As barras são PQ nesse caso.

Em seguida os dados do transformador:

```
DLIN
(De )d O d(Pa )NcEP ( R% )( X% )(Mvar)(Tap)(Tmn)(Tmx)(Phs)(Bc )(Cn)(Ce)Ns(Cq)(1)(2)(3)(4)(5)(6)(7)(8)(9)(10)
 9022 9021 1 6.6667 1.025 9022 120 120
99999
```



Para a definição dos dados de barra devem ser informados:

1) Dados de área:

```
DARE
(Ar      (Xchg)      (      Identificacao da area      ) (Xmin) (Xmax)
  8        0.        *      Minha concessionária      *      0.  3000.
99999
```

2) Dados de grupo limite de tensão:

```
DGLT
(G (Vmn) (Vmx) (Vmne (Vmxe
  5   .95  1.05      .9  1.05
99999
```

3) Dados de grupo base de tensão:

```
DGBT
(G ( kV)
  F  230.
  N  13.8
99999
```

Nos dados de barra, caso não seja especificada a tensão o valor é 1 pu.

Campos numéricos não preenchidos tem valor 0.

Deve-se lembrar que caso não se especifique, a barra controlada é a **DE** (9022).

Caso não seja especificada a capacidade normal e de emergência em MVA o valor padrão é infinito.

Exemplo 2 de modelagem de transformador no Anarede

3 enrolamentos com LTC

Dado um transformador regulador 500:440:13,8 kV, 750/1000/1250 MVA (ONAN/ONAF1/ONAF2), $x_{ps} = 12\%$, $x_{pt} = 45,4\%$, $x_{st} = 42,9\%$, YNyn0d1, x_{ps} e x_{pt} na base 138,9 MVA, tap automático +/- 4x2,5% no 440 kV, escrever as linhas de arquivo para a modelagem das barras terminais e do transformador no programa Anarede.

Solução

Será adotada a base 1250 MVA.

Cálculo das reatâncias na base de 1250 MVA:

$$x_p = \frac{x_{ps} + x_{pt} - x_{st}}{2} = \frac{12\% + 45,4\% \times \frac{1250}{138,9} - 42,9\% \times \frac{1250}{138,9}}{2} = 17,249\%$$

$$x_s = \frac{x_{ps} + x_{st} - x_{pt}}{2} = \frac{12\% + 42,9\% \times \frac{1250}{138,9} - 45,4\% \times \frac{1250}{138,9}}{2} = -5,249\%$$

$$x_t = \frac{x_{pt} + x_{st} - x_{ps}}{2} = \frac{42,9\% \times \frac{1250}{138,9} + 45,4\% \times \frac{1250}{138,9} - 12\%}{2} = 391,32\%$$

Exemplo 2 - Transformador no Anarede - 3 enrolamento com LTC

Correção para a base 100 MVA:

$$x_p = 17,249 \frac{100}{1250} = 1,38\%, \quad x_s = -5,249 \frac{100}{1250} = -0,42\% \text{ e } x_t = 391,32 \frac{100}{1250} = 31,305\%$$

Considerando o terciário em vazio pode-se fazer:

$$x_{ps} = x_p + x_s = 1,38 - 0,42 = 0,96\% \text{ na base 100 MVA ou } 12\% \text{ na base 1250 MVA.}$$

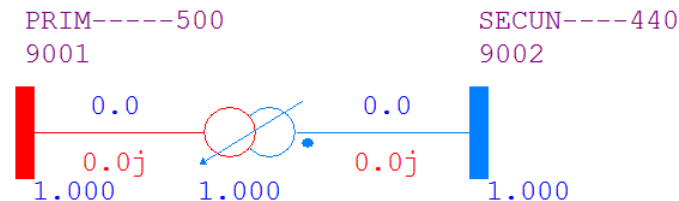
As barras de 500 kV, 440 kV, 13,8 kV e fictícia serão barra 9001, 9002, 9003 e 9004.

- Opção 1, sem terciário representado

```

DBAR
(Num)OETGb( nome )Gl( V)( A)( Pg)( Qg)( Qn)( Qm)(Bc ) ( Pl)( Ql)( Sh)Are(Vf)M(1)(2)(3)(4)(5)(6)(7)(8)(9)
 9001 CPRIM-----500 31000 1
 9002 DSECUN-----440 51000 1
99999
DLIN
(De )d O d(Pa )NcEP ( R% )( X% )(Mvar)(Tap)(Tmn)(Tmx)(Phs)(Bc ) (Cn)(Ce)Ns(Cq)(1)(2)(3)(4)(5)(6)(7)(8)(9)(10)
 9002 9001 1 .96 1. .9 1.1 12501250 9
99999
DGLT
(G (Vmn) (Vmx) (Vmne (Vmxe
 3 1. 1.1 .95 1.1
 5 .95 1.05 .9 1.05
99999
DGBT
(G ( kV)
 C 500.
 D 440.
99999

```



Exemplo 2 - Transformador no Anarede - 3 enrolamentos com LTC

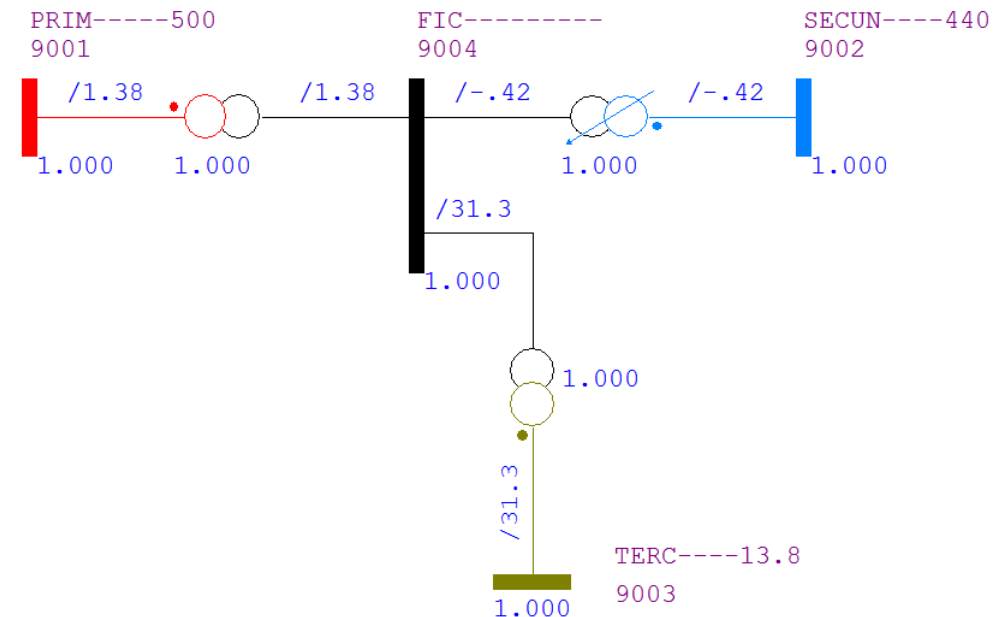
- Opção 2, com terciário representado

Os dados obrigatórios para o Anarede novamente estão em vermelho.

```

DBAR
(Num)OETGb(  nome  )Gl( V)( A)( Pg)( Qg)( Qn)( Qm)(Bc  )( Pl)( Ql)( Sh)Are(Vf)M(1)(2)(3)(4)(5)(6)(7)(8)(9)
9001    CPRIM-----500 31000                                1
9002    DSECUN----440 51000                                1
9003    NTERC----13.8 51000                                1
9004    FIC-----51000                                    1
99999
DLIN
(De )d O d(Pa )NcEP ( R% )( X% )(Mvar)(Tap)(Tmn)(Tmx)(Phs)(Bc  )(Cn)(Ce)Ns(Cq)(1)(2)(3)(4)(5)(6)(7)(8)(9)(10)
9001    9004 1          1.38          1.          12501250
9002    9004 1          -.42          1.    .9   1.1    12501250 9
9003    9004 1          31.3          1.          12501250
99999
DGLT
(G (Vmn) (Vmx) (Vmne (Vmxe
3    1.    1.1    .95    1.1
5    .95   1.05    .9    1.05
99999
DGBT
(G ( kV)
C    500.
D    440.
N    13.8
99999

```



OBS - Modo de visualização de R e X

8.2 Modelo para simulação de Curto circuito

Para simulação em programas de curto circuito devem ser obtidos os modelos sequenciais conforme descrito anteriormente.

Programas mais avançados permitem entrar os dados básicos de placa, tensões, impedâncias, ligação, aterramento, etc e internamente montam os diagramas sequenciais do transformador, incluindo barra fictícia como no caso do transformador de três enrolamentos.

O programa mais comumente usado para simulação de curto circuito que envolva o SIN (sistema interligado nacional) é o Anafas do Cepel, podendo ser usada sua interface gráfica Sapre.

Algumas características gerais são:

- Impedâncias série em % na base 100 MVA
- Capacitâncias ou reatâncias shunt em MVar ($Q > 0$ para elementos capacitivos e $Q < 0$ para elementos reativos)
- Capacidade de 20.000 barras e 40.000 circuitos
- Cálculo de faltas simultâneas e abertura monopolar ou tripolar
- Representação de elos CC, compensadores estáticos, compensação shunt e série
- Diversas funções auxiliares como estudo de faltas simultâneas, superação de disjuntores e cálculo de equivalentes.

Os arquivos de dados com modelamento do SIN para o Anafas do ONS e da EPE estão em:

http://www.ons.com.br/operacao/base_dados_curtoc_referencia.aspx

<http://www.epe.gov.br/Transmissao/Paginas/Basededadosparaestudosdecorto-circuito-PDE2022.aspx>

Modelamento do transformador no programa Anafas

Antes de se criar um transformador devem ser criadas suas barras terminais:

Os dados de barra são:

- número (até 5 algarismos)
- nome (até 12 caracteres)
- Área (1)
- Base de tensão (kV)
- Menor capacidade (kA) (2)
- Tensão pré-falta (pu) e ângulo (graus) (3)

(1) Valor definido separadamente, exemplo, 16, Furnas

(2) Capacidade disruptiva do menor disjuntor da SE, valor usado para estudo de superação de disjuntores.

(3) Normalmente 1 pu com fase 0 graus.

Dados de Barra CA

Identificação
Número: 18050 Nome: BAURU 440
Área: 9 ☒ Ligado

Base de Tensão (kV): 440 Menor Capacidade de Interrupção (kA): 31.5

Tipo
☒ Normal
☐ Fictícia de transformador
☐ Auxiliar

Tensão Pré-Falta
Módulo (pu): 1 Ângulo (°): 0

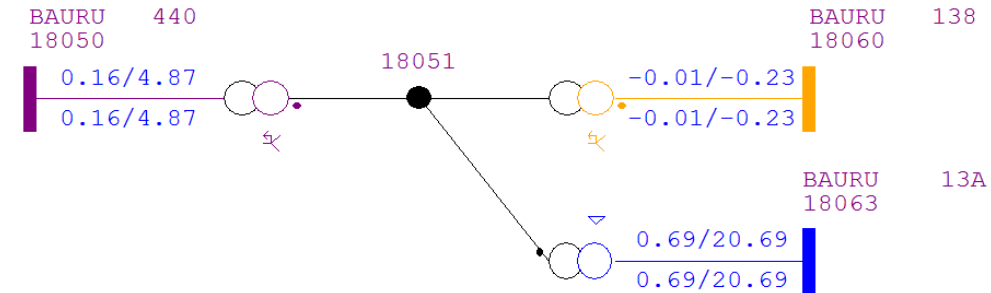
Barras Vizinhas
Número: Nome:

☒ Inserir ☐ Alterar ☐ Remover ☐ Fechar

Modelamento Anafas na interface gráfica Sapre

Os dados do transformador são:

- número das barras de e para
- número: identificação do circuito
- R1%, X1%, R0% e X0%
- Área barra proprietária: barra para a qual é definida a área do transformador
- Tipo de ligação do primário
- Tipo de ligação do secundário
- reatância e reatância de aterramento do primário e do secundário
- defasamento
- tap especificado (pu)



Dados de Transformador

Identificação

Primário: 18050 Nome: BAURU 440

Secundário: 18051 Nome: T#BAU440138A

Número do Circuito: 1 Área: 9 ☒ Ligado

Sequência Positiva

Resistência (R1 %): 0.16 Reatância (X1 %): 4.87

Sequência Zero

Resistência (R0 %): 0.16 Reatância (X0 %): 4.87

Tipo de Conexão do Primário

☐ Delta ☐ Estrela não aterrado ☒ Estrela aterrado

Resistência de Aterramento (Rn %): 0

Reatância de Aterramento (Xn %): 0

Tipo de Conexão do Secundário

☐ Delta ☐ Estrela não aterrado ☒ Estrela aterrado

Resistência de Aterramento (Rn %): 0

Reatância de Aterramento (Xn %): 0

Defasamento (°) 0 ☒ ΔY ☐ Explícito

Tap (pu): 1

Obs: def. do secundário em relação ao primário.

Modelamento do transformador no programa Anafas

Assim como no caso do Anarede, a criação e modificação de dados de transformadores podem ser feitas diretamente na interface gráfica ou via arquivo de comandos txt.

Na prática usa-se a interface gráfica basicamente para gerar os unifilares e visualizar resultados.

Os dados das barras e de um dos 3 transformadores Bauru 440:138:13.8 em modo texto, (arquivo com extensão .ana ou .alt de alteração) é o seguinte:

```
DBAR
(NB  CEM      BN          VBAS  DISJUN          DDMMAAAADDMMAAAA  IA  SA
(-----=  -----
...
18050      BAURU    440          440    31.5          9
18051  1  T#BAU440138A          9
18060      BAURU    138          138    20          9
18063      BAURU    13A          13.8          9
...
99999
DCIR
(BF  CE  BT    NCT  R1      X1      R0      X0      CN          TB  TCIA  DEF  KM  CD  RNDE  XNDE  CP  RNPA  XNPA
(-----=  -----
...
18050  18051  1T    16    487    16    487CTP          9          YN
18060  18051  1T    -1    -23    -1    -23CTP          9          YN
18051  18063  1T    69    2069    69    2069CTP          9          YN
...
99999
```

Exemplo 1 de modelagem de transformador no Anafas

2 enrolamentos YNd11

Dado um transformador elevador 13,8:230 kV, 100/120 MVA (ONAN/ONAF), $x=8\%$, YNd11, tap $\pm 2 \times 2,5\%$ na alta, $RAT=40\Omega$ (resistência de aterramento), escrever as linhas de arquivo para a modelagem das barras terminais e do transformador no programa Anafas.

Solução

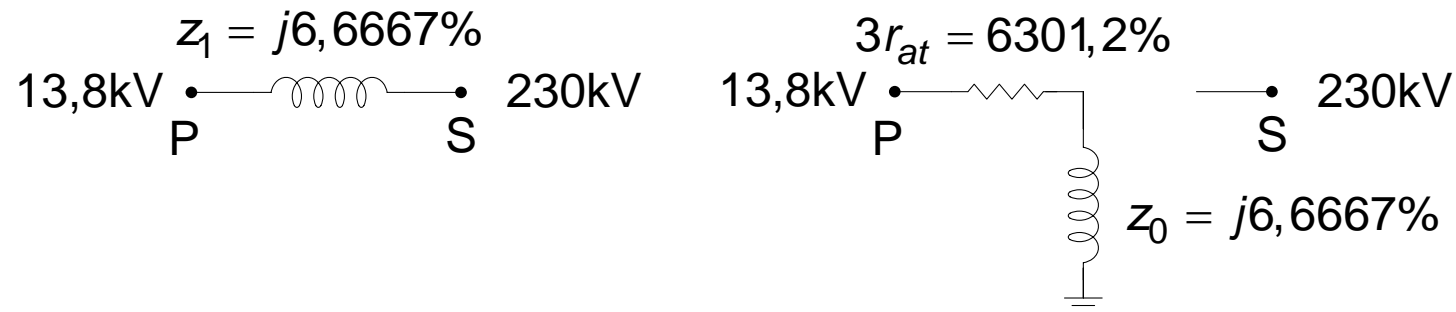
Como não foi informado em qual base está a reatância, será adotada a base 120 MVA

A reatância em por cento na base 100 MVA é: $z_1 = z_0 = x_t = 8\% \times 100/120 = 6,6667\%$.

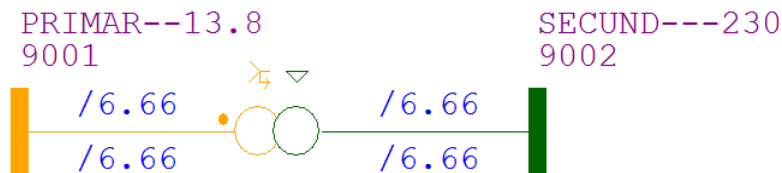
A impedância de base do primário na base 100 MVA é $Z_b^p = \frac{13,8^2}{100} = 1,9044\Omega$

A resistência de aterramento é: $r_{at} = \frac{40}{1,9044} = 2100,4\%$.

Os modelos de sequência positiva e zero são os seguintes:



Exemplo 1 de transformador no Anafas, 2 enrolamentos YNd11



A barra de baixa será a barra 9001 e a de alta será a barra 9002.

Os dados obrigatórios estão em vermelho (sem dado obrigatório ocorre erro de execução ou nos resultados).

Para o programa Anafas, como no Anarede, primeiro devem ser definidos os dados de barra:

```

DBAR
(NB  CEM      BN          VBAS  DISJUN          DDMMAAAADDMMAAAA  IA  SA
(-----=-----
  9001  PRIMAR--13.8      13.8    50                      1
  9002  SECUND---230     230    20                      1
99999
  
```

Em seguida os dados do transformador:

```

DCIR
(BF  CE  BT    NCT  R1    X1    R0    X0    CN          TB  TCIA  DEF  KM  CD  RNDE  XNDE  CP  RNPA  XNPA
(-----=-----
  9001  9002  1T    6.6667  6.6667  TRAF01          30  YN2100.4  d
99999
  
```

T: tipo de circuito (T=transformador), Def: defasagem sec:prim, graus.

CD e CP: ligação das barras DE(BF) e PARA(BT)

RNDE, XNDE, RNPA e XNPA: resistência e reatância de neutro em % nos terminais.

Exemplo 2 de modelagem de transformador no Anafas

2 enrolamentos YNd11 com barra fictícia

Em alguns casos encontram-se em arquivos de curto transformadores de 2 enrolamentos modelados com barra fictícia e metade da reatância no primário e metade no secundário.

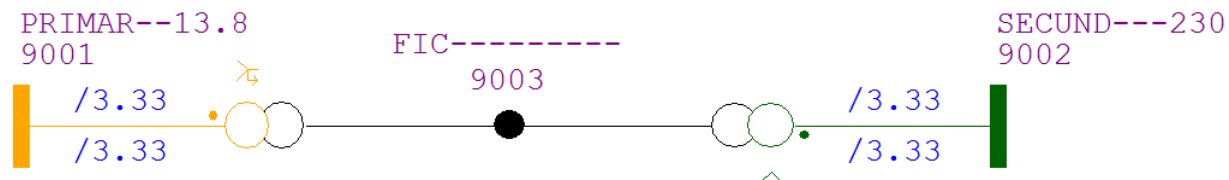
Esse tipo de modelagem não é necessária mas será mostrada somente para informação.

Para o mesmo transformador do Exemplo 1 o modelamento seria:

```

DBAR
(NB  CEM      BN              VBAS  DISJUN              DDMMAAAADDMMAAAA  IA  SA
(-----=  -----
9001      PRIMAR--13.8          13.8      50              -----
9002      SECUND---230          230      20              -----
9003      1  FIC-----
99999
DCIR
(BF  CE  BT      NCT  R1      X1      R0      X0      CN              TB  TCIA  DEF  KM  CD  RNDE  XNDE  CP  RNPA  XNPA
(-----=  -----
9001      9003      1T      3.3333      3.3333TRAFO1              30      YN2100.4
9002      9003      1T      3.3333      3.3333TRAFO1              30      d
99999

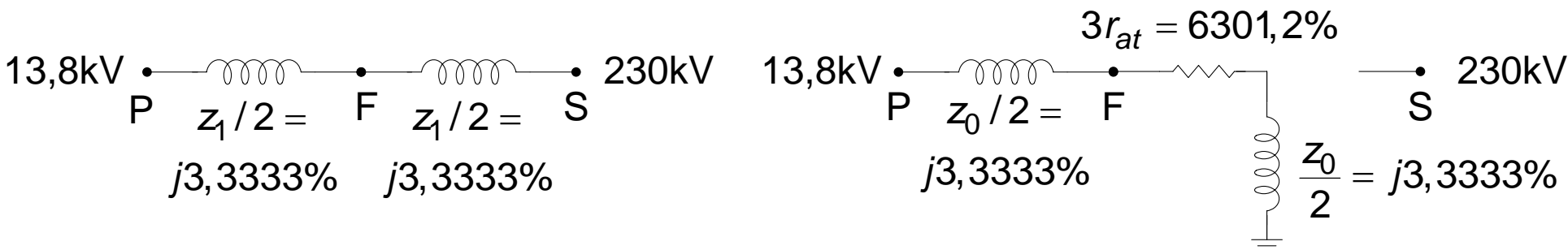
```



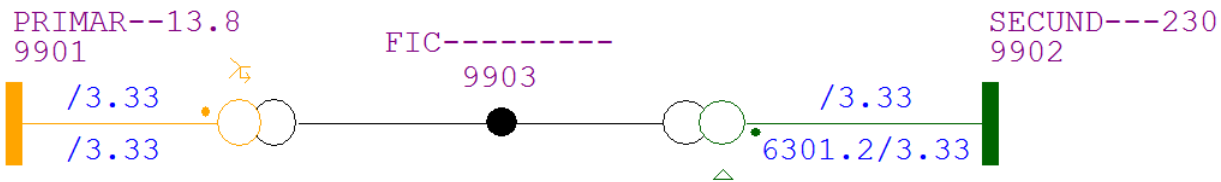
Exemplo 2 de modelagem de transformador no Anafas

2 enrolamentos YNd11 com barra fictícia

No caso de se usar a maneira antiga, com base no diagrama sequencial, o modelamento seria:



DCIR	(BF	CE	BT	NCT	R1	X1	R0	X0	CN		TB	TCIA	DEF	KM	CD	RNDE	XNDE	CP	RNPA	XNPA
(-----)	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----		-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
9901			9903	1T		3.3333		3.3333	TRAFO1											
9902			9903	1T		3.3333	9999999999999999	9999999999999999	TRAFO1											
0			9903	1T	9999999999999999	6301.23	3.3333	TRAFO1			9902									
99999																				



Exemplo 3 de modelagem de transformador no Anafas

3 enrolamentos YNYn0d1

Dado um transformador regulador 500:440:13,8 kV, 750/1000/1250 MVA (ONAN/ONAF1/ONAF2), $x_{ps} = 12\%$, $x_{pt} = 45,4\%$, $x_{st} = 42,9\%$, YNyn0d1, x_{ps} e x_{pt} na base 138,9 MVA, tap automático +/- 4x2,5% no 440 kV, escrever as linhas de arquivo para a modelagem das barras terminais e do transformador no programa Anafas. As resistências de aterramento do primário e do secundário são de 10 Ω . As resistências também serão desprezadas.

Solução

Esse transformador é o mesmo do exemplo 2 de Anarede e os valores de reatância na base 100 MVA eram:

$$x_p = 1,38\%, \quad x_s = -0,42\% \text{ e } x_t = 31,305\%$$

$$z_p^1 = z_p^0 = jx_p, \quad z_s^1 = z_s^0 = jx_s, \quad z_t^1 = z_t^0 = jx_t$$

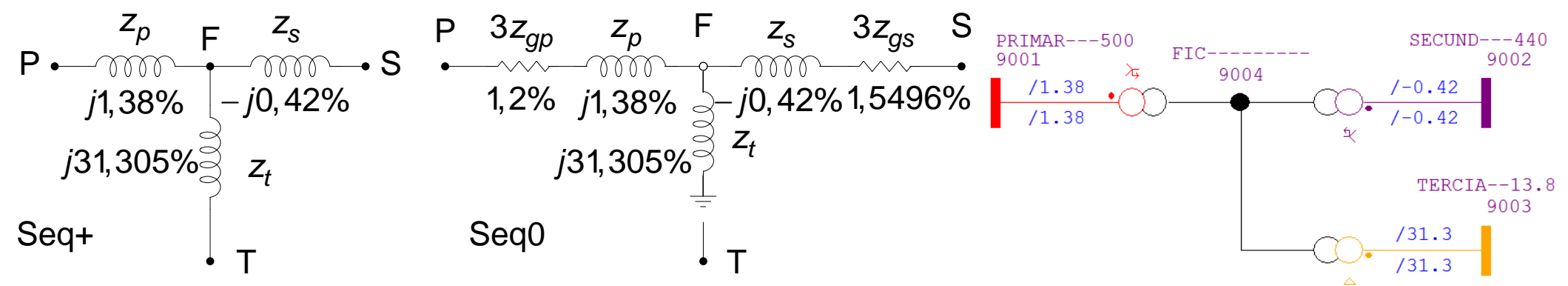
As resistências de aterramento na base 100 MVA são:

$$r_{at}^P = \frac{10}{500^2 / 100} = 0,4\%, \quad r_{at}^S = \frac{10}{440^2 / 100} = 0,51653\%, \quad z_{gp} = r_{at}^P, \quad z_{gs} = r_{at}^S$$

Nesse caso a barra fictícia F (9004) é necessária, lembrando que a numeração nesses exemplos foi escolhida, pois não está sendo considerada rede pré-existente, mas somente o transformador do exemplo.

Exemplo 4 de transformador no Anafas - 3 enrolamentos YNYn0d1

O modelo sequencial é o seguinte:



A seguir o modelamento no Anafas na forma mais nova, em que são informadas as ligações e as impedâncias de aterramento:

```

DBAR
(NB  CEM      BN      VBAS  DISJUN      DDMMAAAADDMMAAAA  IA  SA
(-----=  -----=  -----=  -----=  -----=
9001    PRIMAR---500      500      40      1
9002    SECUND---440      440      31      1
9003    TERCIA--13.8      13.8      1
9004    1  FIC-----      1
99999
DCIR
(BF  CE  BT      NCT  R1      X1      R0      X0      CN      TB  TCIA  DEF  KM  CD  RNDE  XNDE  CP  RNPA  XNPA
(-----=  -----=  -----=  -----=  -----=  -----=  -----=  -----=  -----=
9001    9004    1T      1.38      1.38TRAFO1      1  0      Yn      .4
9002    9004    1T      -.42      -.42TRAFO1      1  0      Yn.51653
9003    9004    1T      31.305      31.305TRAFO1      1  30      d
99999
  
```

Exemplo 4 de transformador no Anafas - 3 enrolamentos YNYn0d1

As telas para preenchimento de dados no Sapre (interface gráfica do Anafas) são as seguintes:

Dados de Transformador

Identificação

Primário:

9001

Nome:

PRIMAR---500

Secundário:

9004

Nome:

FIC-----

Número do Circuito:

1

Área:

1

☒ Ligado

Sequência Positiva

Resistência (R1 %):

0

Reatância (X1 %):

1.38

Sequência Zero

Resistência (R0 %):

0

Reatância (X0 %):

1.38

Tipo de Conexão do Primário

☐ Delta
☐ Estrela não aterrado
☒ Estrela aterrado

Resistência de Aterramento (Rn %):

0.4

Reatância de Aterramento (Xn %):

0

Tipo de Conexão do Secundário

☐ Delta
☐ Estrela não aterrado
☒ Estrela aterrado

Resistência de Aterramento (Rn %):

0

Reatância de Aterramento (Xn %):

0

Defasamento (°)

0

☒ ΔY
 ☐ Explícito:

Tap (pu):

1

Obs: def. do secundário em relação ao primário.

Dados de Transformador

Identificação

Primário:

9002

Nome:

SECUND---440

Secundário:

9004

Nome:

FIC-----

Número do Circuito:

1

Área:

1

☒ Ligado

Sequência Positiva

Resistência (R1 %):

0

Reatância (X1 %):

-0.42

Sequência Zero

Resistência (R0 %):

0

Reatância (X0 %):

-0.42

Tipo de Conexão do Primário

☐ Delta
☐ Estrela não aterrado
☒ Estrela aterrado

Resistência de Aterramento (Rn %):

0.51653

Reatância de Aterramento (Xn %):

0

Tipo de Conexão do Secundário

☐ Delta
☐ Estrela não aterrado
☒ Estrela aterrado

Resistência de Aterramento (Rn %):

0

Reatância de Aterramento (Xn %):

0

Defasamento (°)

0

☒ ΔY
 ☐ Explícito:

Tap (pu):

1

Obs: def. do secundário em relação ao primário.

Dados do terciário - 3 enrolamentos YNYn0d1

Dados de Transformador

Identificação

Primário:

9003

Nome:

TERCIA--13.8

Secundário:

9004

Nome:

FIC-----

Número do Circuito:

1

Área:

1

☒ Ligado

Sequência Positiva

Resistência (R1 %):

0

Reatância (X1 %):

31.305

Sequência Zero


Resistência (R0 %):


0


Reatância (X0 %):

31.305

Tipo de Conexão do Primário

☒ Delta 

☐ Estrela não aterrado 

☐ Estrela aterrado 


Resistência de Aterramento (Rn %):


0


Reatância de Aterramento (Xn %):

0

Tipo de Conexão do Secundário

☐ Delta 

☐ Estrela não aterrado 

☒ Estrela aterrado 

Resistência de Aterramento (Rn %):


0

Reatância de Aterramento (Xn %):

0

Defasamento (°)

30

☒  ☐ Explícito:

Tap (pu):





1

Obs: def. do secundário em relação ao primário.

Capacidade de Interrupção (kA)

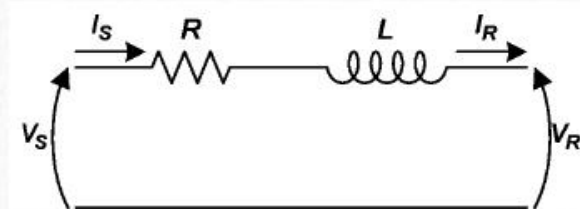
Terminal De:

Terminal Para:

 Inserir  Alterar  Remover  Fechar

Modelagem de Linhas de Transmissão

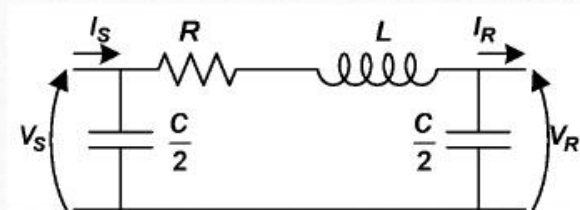
- Linhas com transposição
 - Linhas Curtas – parâmetros concentrados: < 80 km
 - Modelo mais simples: usa somente a impedância série multiplicada pelo comprimento da LT.



$$I_S = I_R$$

$$V_S = V_R + I_R Z$$

- Linhas Médias – parâmetros concentrados: entre 80 e 240 km
 - Além da impedância série, leva em consideração a capacitância da LT.

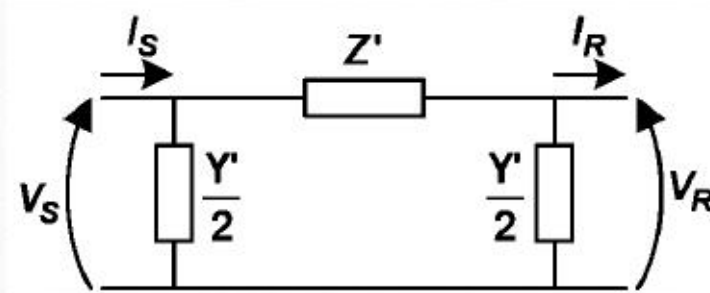


$$I_S = Y \left(1 + \frac{ZY}{4} \right) V_R + \left(\frac{ZY}{2} + 1 \right) I_R$$

$$V_S = \left(\frac{ZY}{2} + 1 \right) V_R + Z I_R$$

Onde: $Z = R + j\omega L$ e $Y = j\omega C$

- Modelo pi-corrigido:



- Relações importantes entre as constantes ABCD (quadripolo):

$$Z' = B$$

$$\frac{Y'}{2} = \frac{A-1}{B}$$

$$AD - BC = 1$$

$$Z' = Z_C \sinh \gamma l = Z_C \frac{\sinh \gamma l}{\gamma l} \rightarrow \text{Fator de correção}$$

$$\frac{Y'}{2} = \frac{1}{Z_C} \tanh \frac{\gamma l}{2} = \frac{Y}{2} \frac{\tanh(\gamma l/2)}{\gamma l/2} \rightarrow \text{Fator de correção}$$

Modelamento da linha no Anarede e no Anafas

Uma linha de 138 kV tem os seguintes parâmetros:

$$r_0 = 0,103532 \Omega/\text{km}; \quad x_0 = 0,757629 \Omega/\text{km}; \quad y_0 = 2,29466 \mu\text{S}/\text{km}$$

$$r_1 = 0,09355 \Omega/\text{km}; \quad x_1 = 0,330563 \Omega/\text{km}; \quad y_1 = 4,96285 \mu\text{S}/\text{km}$$

Os dados calculados em % na base 100 MVA e em MVar, para o modelo π nominal (linha curta) são os seguintes:

$$d = 50 \text{ km}; \quad I_{\max} = 0,530 \text{ kA}$$

$$V_b = 138 \text{ kV}; \quad S_b = 100 \text{ MVA}; \quad Z_b = V_b^2 / S_b = 190,44 \Omega$$

$$z_0 = \frac{(r_0 + jx_0)d}{Z_b} 100 = 2,7182 + j19,892 \%$$

$$\text{MVar}_0 = y_0 d V_b^2 = 2,185 \text{ MVar}$$

$$z_1 = \frac{(r_1 + jx_1)d}{Z_b} 100 = 2,4562 + j8,6789 \%$$

$$\text{MVar}_1 = y_1 d V_b^2 = 4,7256 \text{ MVar}$$

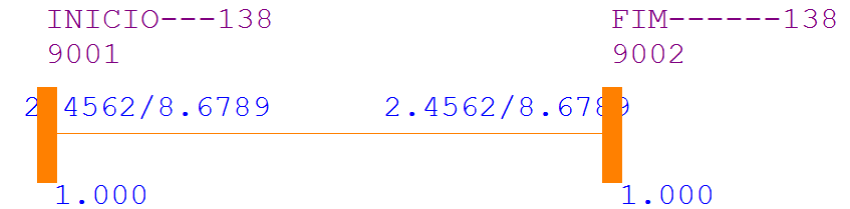
$$S_{\max} = \sqrt{3} V_b I_{\max} = 253,36 \text{ MVA}$$

Se a linha fosse longa deveria ser usado o modelo π corrigido (correções hiperbólicas).

Modelamento linha no Anarede

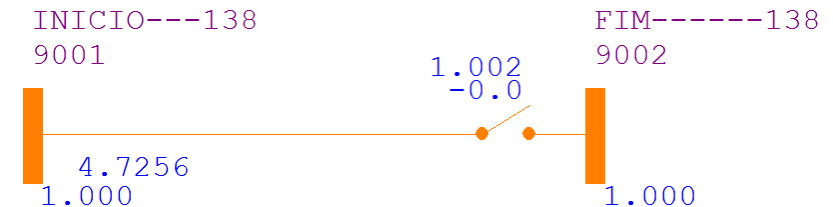
Para o programa Anarede a janela de dados dessa linha é a seguinte:

No modo de visualização de R/X tem-se:



As capacidades foram consideradas todas iguais (253 MVA).

Os terminais da linha podem ser desligados individualmente, conforme mostrado abaixo (modo de exibição de admitâncias):



O Anarede calcula automaticamente a tensão no terminal aberto.

Modelamento linha no Anarede

O trecho de arquivo texto (Anarede) para definição da linha e de seus dados terminais é o seguinte:

```
DBAR
(Num)OETGb(   nome   )Gl( V)( A)( Pg)( Qg)( Qn)( Qm)(Bc   )( Pl)( Ql)( Sh)Are(Vf)M(1)(2)(3)(4)(5)(6)(7)(8)(9)
 9001      GINICIO---138 51000                                     8
 9002      GFIM-----138 51000                                     8
99999
DLIN
(De )d O d(Pa )NcEP ( R% )( X% )(Mvar)(Tap)(Tmn)(Tmx)(Phs)(Bc   )(Cn)(Ce)Ns(Cq)(1)(2)(3)(4)(5)(6)(7)(8)(9)(10)
 9001      9002 1    2.45628.67894.7256                             253 253
99999
DARE
(Ar      (Xchg)      (      Identificacao da area      ) (Xmin) (Xmax)
 8        0.        *      Minha concessionária      *      0.  3000.
99999
DGLT
(G (Vmn) (Vmx) (Vmne (Vmxe
 5      .95  1.05      .9  1.05
99999
DGBT
(G ( kV)
 G 138.
99999
FIM
```

Modelamento linha no Anafas

Para o programa Anafas a janela de dados dessa linha é a seguinte:

Dados de Linha CA

Identificação

Barra De: 9001 Nome: INICIO---138

Barra Para: 9002 Nome: FIM-----138

Número do Circuito: 1 Área: 8 ☒ Ligado

Nome: LT138 Comprimento (km): 50

Sequência Positiva

Resistência (R1 %): 2.4562 Reatância (X1 %): 8.6789

Susceptância (S1 Mvar): 4.726

Sequência Zero

Resistência (R0 %): 2.7182 Reatância (X0 %): 19.892

Susceptância (S0 Mvar): 2.185

Capacidade de Interrupção (kA)

Terminal De: Terminal Para:

✓ Inserir ✎ Alterar ✕ Remover 🗑 Fechar

No modo de visualização de R/X tem-se:

INICIO---138	FIM-----138
9001	9002
2.45/8.67	2.45/8.67
2.71/19.89	2.71/19.89

Nos arquivos da EPE e do ONS a susceptância das linhas não está representada.

Modelamento linha no Anafas

O trecho de arquivo texto (Anafas) para definição da linha e de seus dados terminais é o seguinte:

```
DBAR
(NB  CEM      BN      VBAS  DISJUN      DDMMAAAADDMMAAAA  IA  SA
(-----=  -----
  9001      INICIO---138      138      30      8
  9002      FIM-----138      138      30      8
99999
DCIR
(-----Dados de Circuitos-----
(BF  CE  BT   NCT  R1    X1    R0    X0    CN   S1   S0   TAP  TB   TCIA  DEFE  KM  CD  RNDE   XNDE  CP  RNPA   XNPA  SA
(-----=
  9001      9002      1L2.45628.67892.718219.892LT138  4.7262.185      8      50.
99999
DARE
(NN  C
      NOME
(--- =
      8      MINHA CONCESSIONÁRIA
99999
```

Modelamento linha no Anafas - circuitos com mútuas

As impedâncias mútuas de sequência zero entre trechos de circuito duplo ou entre circuitos paralelos de outras linhas, mesmo de tensão diferente (faixa de passagem compartilhada) pode ser representada no Anafas.

No arquivos de Anafas da EPE e do ONS, mesmo para linhas que são paralelas somente em um trecho, a mútua é modelada como se as linhas fossem paralelas do início ao fim. O correto é inserir barras fictícias para separar trechos paralelos e trechos não paralelos.

Para essa linha, modificada para torre de circuito duplo a impedância mútuas de sequência zero é aproximadamente:

$$z_{0m} = 0,18 + j0,28 \Omega / \text{km}; \quad Z_{0m} = 4,7259 + j7,3514 \%$$

Os dados de mútua podem ser criados usando o ícone destacado em azul da barra de ferramentas desenho:



Modelamento linha no Anafas - circuitos com mútuas

Considerando uma linha com 2 circuitos iguais da linha anterior e com mútua de sequência zero a tela de dados de mútua é a seguinte.

Dados de Impedância Mútua

Trecho 1

Barra De: 9001 Nome: INICIO---138

Barra Para: 9002 Nome: FIM-----138

Número do Circuito: 1

Trechos: 0.00% - 100.00% Início (%): 0 Fim (%): 100

Trecho 2

Barra De: 9001 Nome: INICIO---138

Barra Para: 9002 Nome: FIM-----138

Número do Circuito: 2

Trechos: Início (%): 0 Fim (%): 100

Resistência (Rm %): 4.7259 Reatância (Xm %): 7.3514 Área: 8 ☒ Ligado

✓ Inserir ✎ Alterar ✕ Remover 🗑 Fechar

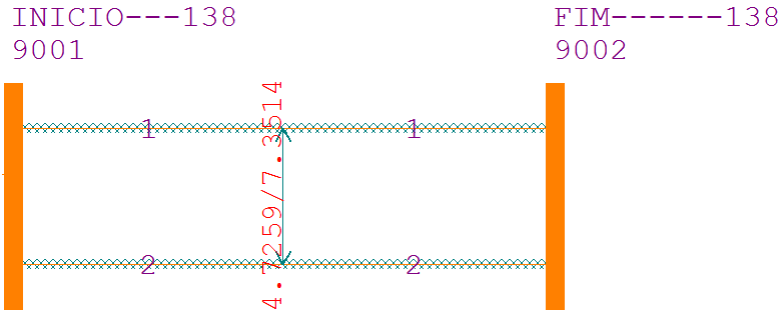
O uso da interface gráfica é indicado somente para visualização de mútuas.

Modelamento linha no Anafas - circuitos com mútuas

Para a definição das mútuas é indicado o modo de entrada por arquivo texto.
O arquivo de dados seria o seguinte, lembrando que os dois circuitos da linha saindo e chegando na mesma barra.

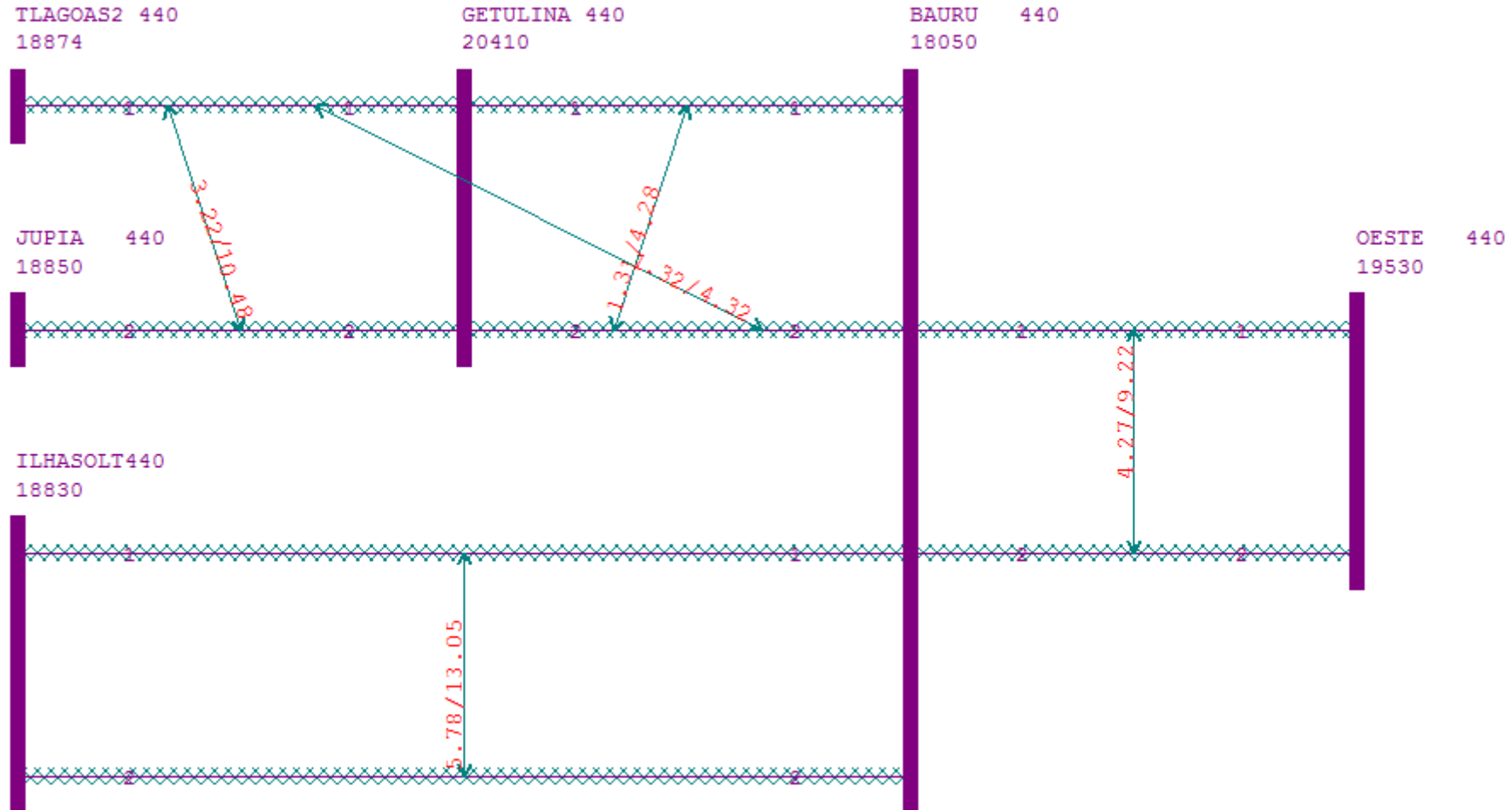
```
DBAR
(NB  CEM      BN      VBAS  DISJUN      DDMMAAAADDMMAAAA  IA  SA
(-----=  -----
 9001  INICIO---138      138    30      8
 9002  FIM-----138      138    30      8
99999
DCIR
(-----Dados de Circuitos-----
(BF  CE  BT   NCT  R1    X1    R0    X0    CN    S1    S0    TAP  TB    TCIA  DEFE  KM  CD  RNDE    XNDE  CP  RNPA    XNPA  SA
(-----=  =====
 9001  9002  1L2.45628.67892.718219.892LT138  4.7262.185      8    50.
 9001  9002  2L2.45628.67892.718219.892LT138  4.7262.185      8    50.
99999
DMUT
(-----Dados de Mutua -----
(BF1 CE BT1   N1 BF2    BT2   N2  RM    XM      I1    F1    I2    F2  IA  SA
(-----=  =====
 9001  9002   1 9001    9002   24.72597.3514      8
99999
DARE
(NN  C
(--- =
 8      MINHA CONCESSIONÁRIA
99999
```

- Modo de exibição linhas com mútuas



Modelamento linha no Anafas - circuitos com mútuas

As mútuas de sequência zero podem também ocorrer entre circuitos diferentes, como apresentado a seguir, envolvendo as linhas ligadas em Getulina, modo de exibição linhas com mútuas:



Reatores

Reatores são usados para compensação da capacitância de linhas de transmissão longas ou para limitação de curto circuito, interligando barras, aterrando neutro ou conectados em série com outros equipamentos como linhas ou transformadores.

A forma de construção é similar à do transformador.

- Formas de classificação

Quanto ao número de fases os reatores podem ser monofásicos ou trifásicos

Quanto ao tipo de núcleo podem ser com núcleo de ar ou núcleo de ferro

Quanto à forma de conexão podem ser "shunt" ou série

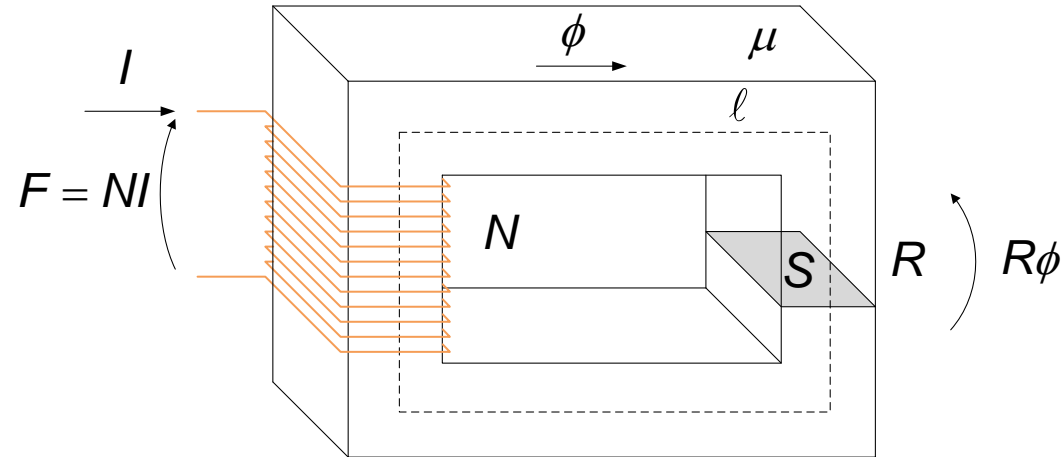
Quanto à refrigeração podem ser a ar ("dry type" / a seco) ou a óleo

- Fórmulas básicas:

$$X_L = j\omega L, \omega = 2\pi f, \text{ associação em série: } L_{eq} = \sum_{i=1}^N L_i, \text{ em paralelo: } L_{eq}^{-1} = \sum_{i=1}^N L_i^{-1}, V = L \frac{dI}{dt}$$

Para associação de reatores em série e paralelo valem as mesmas equações do caso de resistores.

Reatores - Cálculo da indutância



Pela Lei de Lenz e pela expressão da tensão em função da corrente tem-se:

$$V = N \frac{d\phi}{dt} (1) \quad V = L \frac{dI}{dt} (2) \quad \text{então} \quad N \frac{d\phi}{dt} = L \frac{dI}{dt} (3) \quad \text{ou} \quad N\phi = LI (4), \quad \text{onde se isola} \quad L = \frac{N\phi}{I} (5)$$

Do circuito magnético do exemplo de reator obtemos o fluxo:

$$NI = R\phi (6) \quad \text{ou} \quad \phi = \frac{NI}{R} (7) \quad \text{usando (7) em (5) tem-se:} \quad L = \frac{NNI}{IR} = \frac{N^2}{R} \quad \text{ou} \quad L = \frac{N^2 \mu_r \mu_0 S}{\ell}$$

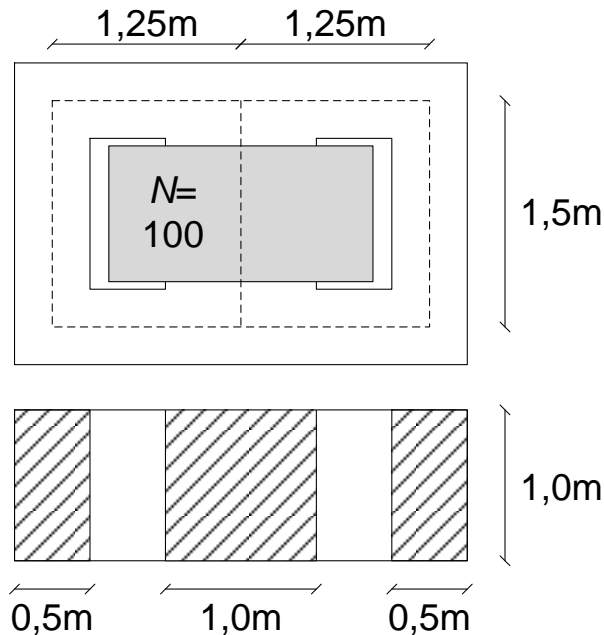
$$\text{Onde a relutância é: } R = \frac{1}{\mu_r \mu_0} \frac{\ell}{S}$$

No dimensionamento deve ser respeitada a temperatura de projeto do enrolamento, por volta de 70°C, definindo-se a bitola do condutor. O fluxo máximo no núcleo, para não haver saturação, deve ser por volta de 1,2 Wb/m², definindo-se a seção do núcleo.

Reatores - Cálculo da indutância

Exemplo:

Calcular a reatância e a potência de um banco trifásico de reatores composto por 3 unidades com as seguintes características e verifique se haveria saturação:

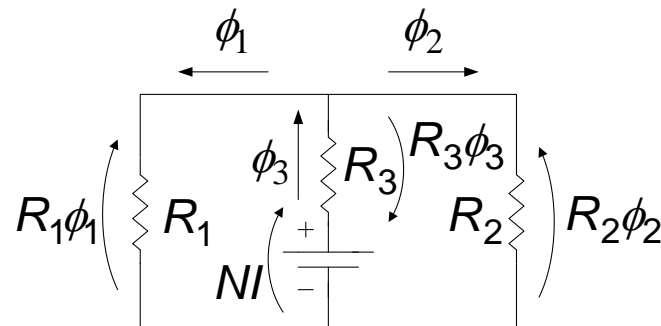


$\mu_r = 6000$ (chapas de ferro), $\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{ H/m}$

Bobina de fio de cobre com 100 espiras

Frequência nominal 60 Hz, Tensão nominal 440 kV

O circuito magnético é o seguinte (série/paralelo):



A relutância equivalente é R_3 em série com $R_1 // R_2$:

$$R_1 = R_2 = \frac{1}{\mu_r \mu_0} \frac{\ell_1}{S_1} = \frac{1}{6000 \times 4\pi 10^{-7}} \frac{1,25 + 1,5 + 1,25}{1 \times 0,5} = 1061 \frac{\text{A}}{\text{Wb}}$$

Reatores - Cálculo da indutância

$$R_3 = \frac{1}{\mu_r \mu_0} \frac{\ell_3}{S_3} = \frac{1}{6000 \times 4\pi 10^{-7}} \frac{1,5}{1 \times 1} = 198,94 \frac{\text{A}}{\text{Wb}}$$

$$R_{eq} = R_3 + \frac{R_1}{2} = 729,46 \frac{\text{A}}{\text{Wb}}$$

Indutância e reatância:

$$L = \frac{N^2}{R_{eq}} = \frac{100^2}{729,46} = 13,709 \text{ H} \quad x = 2\pi fL = 5161,8 \Omega$$

Potência nominal:

$$Q_n = \frac{V_n^2}{x} = \frac{440^2}{5161,8} = 37,461 \text{ MVar}$$

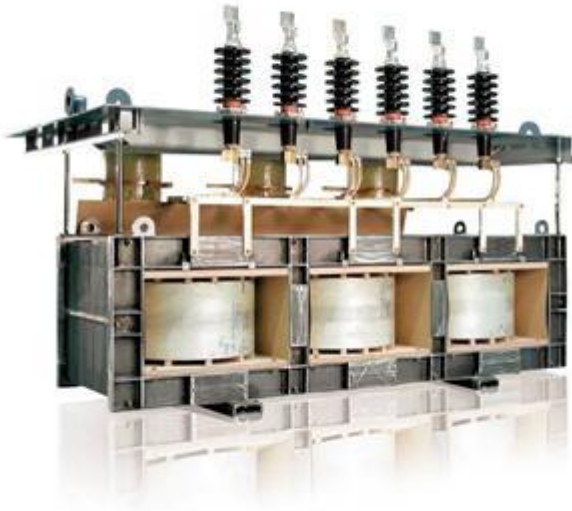
Densidade de fluxo magnético:

$$I_n = \frac{Q_n}{\sqrt{3}V_n} = 49,154 \text{ A}, \quad \phi_3 = \frac{NI_n}{R_{eq}} = 6,7385 \text{ Wb}, \quad B_3 = \frac{\phi_3}{S_3} = 6,7385 \frac{\text{Wb}}{\text{m}^2}$$

Essa densidade de fluxo é maior que o limite de 1,2 Wb/m², a solução mantendo a indutância poderia ser inserir um entreferro no núcleo e aumentar o número de espiras.

Com um entreferro de 2,9 cm na perna central e 570 espiras manteve-se a indutância praticamente igual (13,647 H) mas reduziu a densidade de fluxo para 1,1822 Wb/m² (ou 1,1822 T: Tesla).

Reatores - Exemplos



Reator série trifásico, núcleo de ferro, a seco

Fonte: www.abb.com.br



Reator shunt trifásico, núcleo de ferro, a óleo

Fonte: www.abb.com.br

Reatores - Exemplos



Reator shunt monofásico com núcleo de ar

Fonte: www.bpeg-usa.com



Reator shunt monofásico a óleo, 500 kV, 50 MVar


Fonte: <http://ztr.com.ua/>

Reatores - Valores nominais

Os valores nominais básicos de um reator são:

- Potência nominal (monofásica ou trifásica) em MVar
- Tensão nominal (fase-fase) em kV
- Fator de qualidade $Q=X/R$

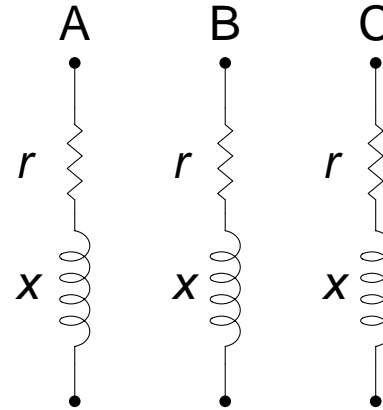
Para reatores com núcleo de ferro pode ser informada a curva de saturação.

 TRENCH BRASIL LTDA. REATOR COM NÚCLEO DE AR FABR. NO BRASIL			
TIPO	CLR	NORMA	NBR 5119/83
N° DE FABR.	102215-*	MANUAL	01 95 10
ANO DE FABR.	2002	PEDIDO	1022
CLASSE TEMP. ISOL.	B	INSTAL. [] INTERNA [X] EXTERNA	
RESFRIAMENTO	AN	ALTITUDE	1000 manm
INDUTÂNCIA NOM.	4.28 mH	TOLERÂNCIA	-0/+10 %
IMPEDÂNCIA NOM.	1.614 Ω	FREQ. NOMINAL	60 Hz
CORRENTE NOM.	75 Arms	TENSÃO NOMINAL	13.8 kVrms
I _{kN}	4.60 kArms	1 seg	NBI 110 kVp
I _{kD}	11.50 kAp	N° DE FASES	1
PESO TOTAL	105 kg	POTÊNCIA NOM.	9.08 kVA

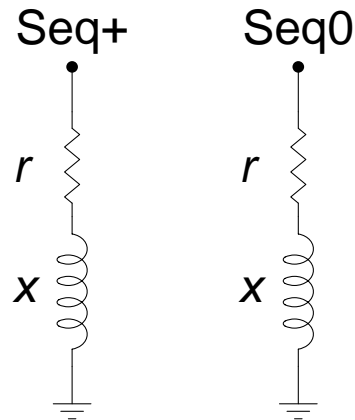
Exemplo de dados de placa de reator

Reatores - Modelamento

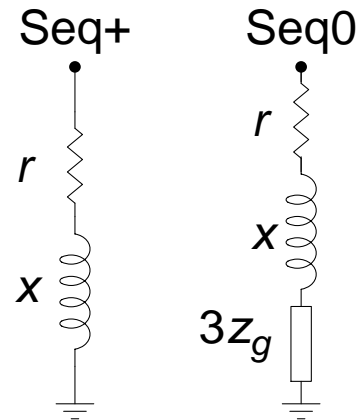
O modelo trifásico do reator é o seguinte:



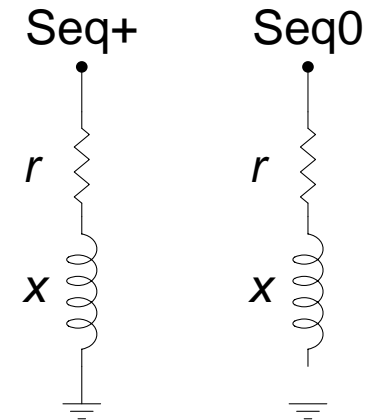
Os modelos de sequência positiva e zero são os seguintes:



ligação estrela solidamente
aterrada



ligação estrela aterrada



ligação estrela não aterrada ou
delta

Reatores - Modelamento

- Cálculo da reatância a partir da potência nominal e da tensão nominal:

$$x = \frac{V_n^2}{Q_n} (\Omega), \quad V_n: \text{tensão eficaz nominal fase-fase (kV)}, \quad Q_n: \text{potência reativa nominal (MVAr)}$$

Cálculo da resistência a partir do fator de qualidade Q ou das perdas em tensão nominal:

$$r = \frac{x}{Q} (\Omega) \quad P = 3rI_n^2 \quad I_n = \frac{Q_n}{\sqrt{3}V_n} \quad P = 3r \left(\frac{Q_n}{\sqrt{3}V_n} \right)^2 \quad r = \frac{V_n^2 P}{Q_n^2}, \quad P: \text{perdas (MW)}$$

- Cálculo da reatância em pu em outra base de potência:

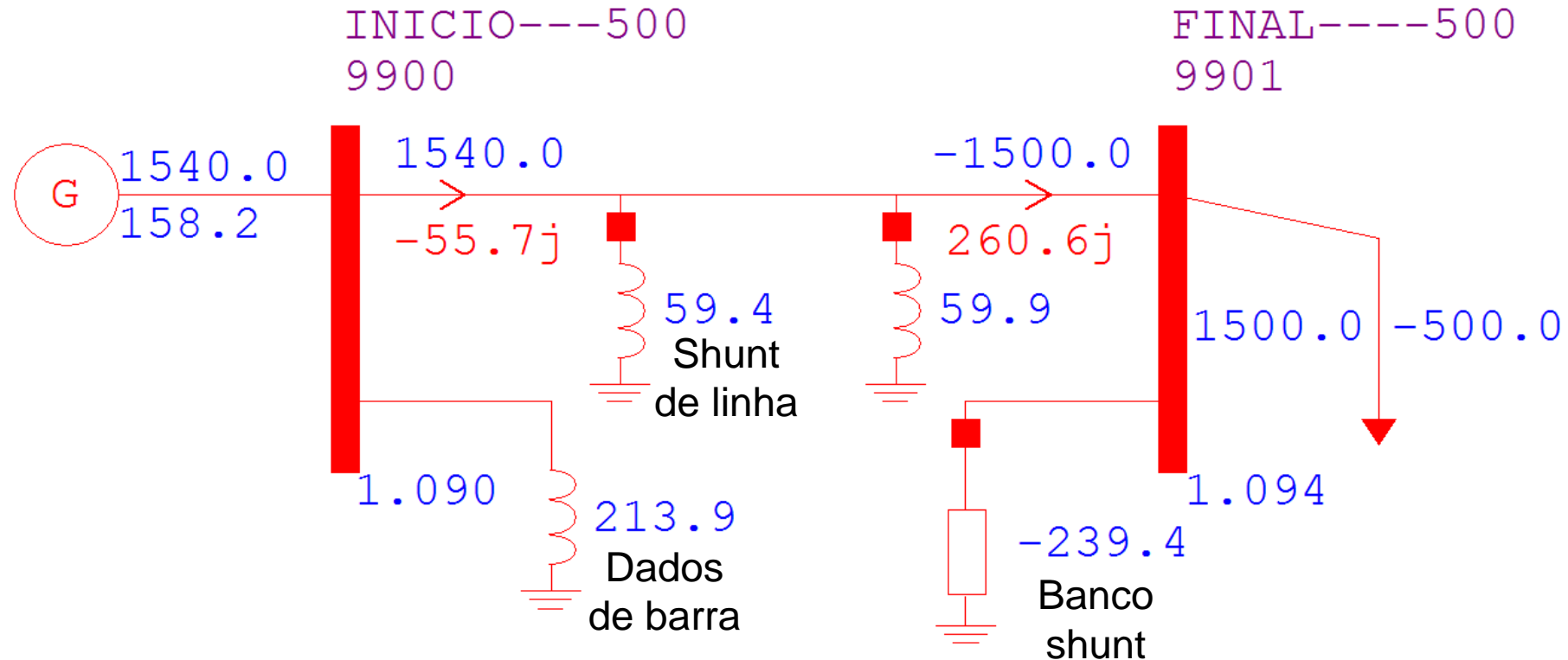
A partir da impedância de base e dos parâmetros em Ω passa-se para pu ou passa para pu diretamente a partir da potência nominal:

$$x = \frac{V_n^2}{Q_n} (\Omega), \quad Z_b = \frac{V_n^2}{100\text{MVA}}, \quad x_{100\text{MVA}} = \frac{100\text{MVA}}{Q_n} (\text{pu})$$

OBS - Na base própria a reatância é 1 pu e a resistência é $1/Q$ pu.

Reatores - Modelamento no Anarede

No programa Anarede o reator pode ser modelado diretamente nos dados de barra, como shunt de linha ou banco shunt.



- Nos dados de barra  (valor negativo reator, valor positivo capacitor)

DBAR

```
(Num)OETGb( nome )Gl( V)( A)( Pg)( Qg)( Qn)( Qm)(Bc ) ( Pl)( Ql)( Sh)Are(Vf)M
9900 L2 CINIPIO---500 31090 0.1540.158.2-999999999 -180. 81000
9901 L CFINAL----500 31094-16. 1500.-500. 81000
99999
```

- Banco shunt  (valor negativo reator, valor positivo capacitor)

DBSH

(NFr) O (NTo) Nc C (Vmn (Vmx Bctrl (Qini) T A (Extr

9901 D 1000 1100 9901 -200. L

(G O E (U) UOp (Sht)

1 4 2 -100.

FBAN

99999

Banco com controle discreto D do tipo limite (coloca a tensão na barra dentro dos limites informados de 1 a 1,1 pu), grupo com 4 reatores de 100 MVar, com 2 ligados (automaticamente)

Dados de Bancos de Capacitores/Reatores Individualizada (DBSH)

Barra De: 9901 Nome: FINAL----500

Barra Para: Nome:

Circuito: Extremidade: ☐ Barra De ☐ Barra Para

Modo de Controle: Discreto Tipo de Controle: Limite

Barra Controlada

Número: 9901 Nome: FINAL----500

Tensão Mínima: 1000 p.u. Tensão Máxima: 1100 p.u.

Injeção Inicial: -200. Mvar ☐ Apagar Dados de Barra

Bancos Shunt

Grupo	Estado	Unidades	Unidades Oper	Injeção
01	L	004	002	-100.

Inserir

Dados de Bancos

Grupo: 01 ☒ Ligado

Unidades: 004 Unidades Operação: 002

Injeção: -100. Mvar

OK Cancelar

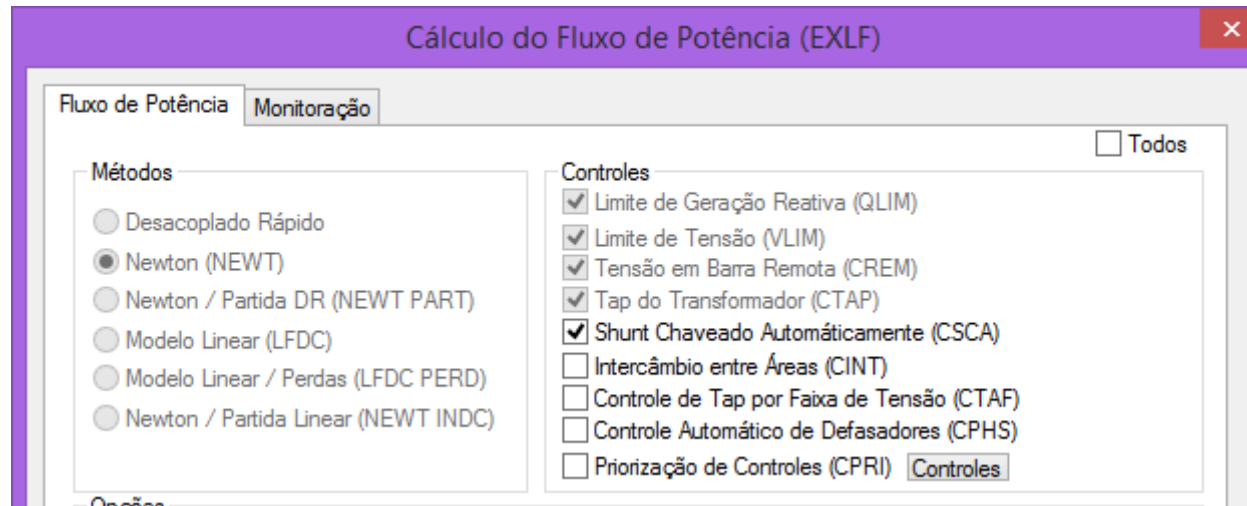
Para que o controle automático do número de unidades ligadas funcione é necessário escolher o modo de controle contínuo ou discreto e ajustar o tipo de cálculo de fluxo de potência para permitir shunt chaveado automaticamente, opção CSCA.

DOPC IMPR

(Op) E (Op) E (Op) E (Op) E (Op) E (Op) E (Op) E (Op) E (Op) E (Op) E (Op) E

QLIM L VLIM L CREM L CTAP L NEWT L **CSCA L**

99999



- Shunt de linha  (negativo reator, positivo capacitor)

DSHL

(De) O (Pa) Nc (Shde) (Shpa) ED EP

9900 9901 1 -50. -50. L L

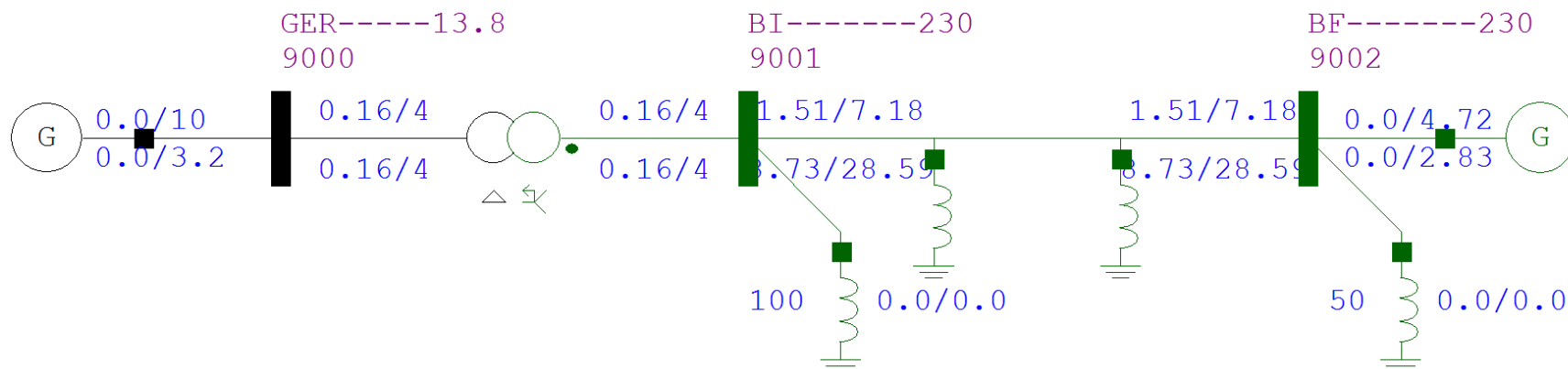
99999

São definidos a potência reativa no início e/ou fim da linha



Reatores - Modelamento no Anafas

Para a inclusão de um reator na rede pela interface gráfica, o mesmo pode ser de barra ou linha.



Dados de Shunt de Barra

Identificação

Barra: 9001 Nome: BI-----230

Grupo: 1 Área: 1 ☐ Equivalente ☒ Ligado

Reatância (X %): 100

Tipo de Conexão

☐ Delta ☐ Estrela não-aterado ☒ Estrela aterado

Resistência de Aterramento (Rn %): 0

Reatância de Aterramento (Xn %): 0

Número de Unidades: 1 Número de Unidades em Operação: 1

Capacidade de Interrupção do Disjuntor (kA):

Inserir Alterar Remover Fechar

Dados de Shunt de Linha

Barra De: 9001 Nome De: BI-----230

Barra Para: 9002 Nome Para: BF-----230

Número do Circuito: 1 Lado: ☒ De ☐ Para

Grupo: 1 Área: 1 ☐ Equivalente

Potência Reativa (Mvar): -50 ☒ Ligado

☐ Delta ☐ Estrela não aterado ☒ Estrela aterado

Resistência de Aterramento (%): 0

Reatância de Aterramento (%): 0

☐ Bypass (Aterramento)

Número de Unidades: 1 Número de Unidades em Operação: 1

Inserir Alterar Remover Fechar

Reatores - Modelamento no Anafas

No programa Anafas os reatores na realidade são uma impedância para a terra com parte imaginária positiva.

```
DCIR
(BF CE BT NCT R1 X1 R0 X0 CN S1 S0 TAP TB TCIA DEF KM CD RNDE XNDE CP RNPA XNPA
(-----
(trafo 13.8:230 kV Dyn11, x=12%, rat=10 Ohm, 300 MVA
 9001 9000 1T .16 4. .16 4.TRAFO 1 30 YN1.8904 d
(linha
 9001 9002 1L1.51867.18118.7357 28.59LT230 22.91714.838 1
(
(Equivalente fim da linha x1=15 Ohm, x0=25 Ohm, 230 kV
 9002 1G 4.7259 2.8355EQUIV 1
(Gerador 250MVA x"d=25%, x0=8% 13.8 kV
 9000 1G 10. 3.2GERAD 1
(Shunts
 9001 0 1H999999999999 10000 1 YN
 9002 0 1H999999999999 5000 1 YN
99999
DSHL
(-----Dados de Shunt de Linha-----
(BF E BT NCLNG Qpos L Rn Xn E Nome NunNop AAA
(==== =====
 9001 L 9002 1D 1 -50 Y 1 1 1
 9001 L 9002 1P 1 -50 Y 1 1 1
99999
```

Para o reator deve ser informado o tipo de ligação para que o Anafas modele corretamente a sequência zero. Deve-se também corrigir a sequência positiva que está como infinito. Deve-se lembrar que arquivo .ana gerado pelo Sapre tem o ponto "invisível" na segunda casa.

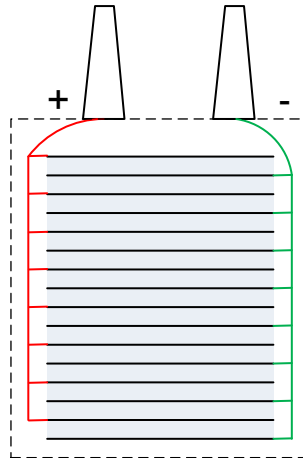
Bancos de capacitores

Bancos de capacitores podem ser usados para elevação de tensão em barras com problema de subtensão, correção de fator de potência, proteção contra surtos atmosféricos ou para compensação da reatância de linhas longas.

Em muitos casos o banco de capacitores é parte integrante de filtros de harmônicas. Em 60 Hz, a função é somente correção de fator de potência, para harmônicas, como o banco está associado a outros elementos, o conjunto pode ser um filtro sintonizado, passa alta ou de outro tipo.

A forma de construção básica é na forma de placas paralelas separadas por um material com alta permissividade relativa (isolante).

Exemplo com 16 placas
em paralelo montadas em
forma de pilha



- Formas de classificação

Quanto ao número de fases os capacitores podem ser monofásicos ou trifásicos

Quanto à forma de conexão podem ser "shunt" ou série

Quanto a ligação, podem ser em estrela ou triângulo

Bancos de capacitores - Valores nominais

Os valores nominais básicos de um banco de capacitores são:

- Potência nominal (monofásica ou trifásica) em MVar
- Tensão nominal (fase-fase) em kV
- Perdas (kW)
- Tipo de ligação

Caso o banco seja parte integrante de um filtro de harmônicas deve ser informada a topologia e os dados dos demais componentes (resistores, reatores, etc).

BANCO DE CAPACITORES EM DERIVAÇÃO			
1,8 Mvar NOMINAL	15,9 kV NOMINAL	LIGAÇÃO Y-Y	60 Hz
1,35 Mvar EFETIVO	13,8 kV EFETIVO	N.I. 34 / 110 kV	03 FASES
GRUPOS EM SÉRIE POR FASE 01		UNIDADES EM PARALELO POR GRUPO 03	
QUANTIDADE TOTAL DE UNIDADES 18		FUSÍVEL TIPO EXPULSÃO 15T	
TEMPO MÍNIMO ENTRE DESLIGAMENTO E RELIGAMENTO 10 MINUTOS			
TEMPO PARA TENSÃO RESIDUAL ATINGIR 50 VOLTS 5 MINUTOS			
CAT. DE TEMP. -5/C	NBR 5282 / 98		MANUAL INSTR. MPA4099
2200 kg	DATA		NÚMERO DE SÉRIE PA4099
NUMERO EQUIPAMENTO: 4-90-10-0-61-46			TAG: BC-02-01
		AV. EMÍLIO MARCONATO, 815 JAGUARIÚNA - SÃO PAULO CNPJ 03.071.946/0001-37 INDÚSTRIA BRASILEIRA	
LAELC Reativos Ltda			

Exemplo de dados de placa de banco de capacitores

Capacitância - cálculo

- Fórmulas básicas:

$$X_C = \frac{1}{j\omega C}, \omega = 2\pi f, \text{ associação em série: } C_{eq}^{-1} = \sum_{i=1}^N C_i^{-1}, \text{ em paralelo: } C_{eq} = \sum_{i=1}^N C_i, I = C \frac{dV}{dt}$$

Para um capacitor com 2 placas paralelas, a capacitância em Farad (F) é dada por:

$$C = \varepsilon_r \varepsilon_0 \frac{A}{d}, \text{ onde:}$$

ε_r é a permissividade relativa do material que separa as placas,

$\varepsilon_0 = 8,85419 \times 10^{-12} \frac{F}{m}$ é a permissividade relativa do vácuo (igual a do ar),

A é a área de cada placa e d é a separação entre as placas.

Para capacitores com N placas empilhadas separadas por dielétricos iguais (como o da pag. 16):

$$C = \varepsilon_r \varepsilon_0 \frac{A}{d} (N-1), \text{ o número de capacitores em paralelo é o número de dielétricos.}$$

Para capacitores em paralelo, é como se as placas fossem maiores, devendo ser somadas as capacitâncias.

Há uma relação entre a velocidade da luz no vácuo e as constantes de permissividade e permeabilidade no vácuo: $\mu_0 \varepsilon_0 c^2 = 1$

Capacitor de alta tensão - Exemplo de cálculo

Calcular a capacitância e a potência de um banco de capacitores de 138 kV, ligado em estrela, onde cada fase é composta por 20 unidades em paralelo. Cada unidade é composta por 51 placas montados em forma de pilha, cada placa tem 0,3 m por 0,65 m e é separada da próxima com um isolante de permissividade relativa 5 e espessura de 1 cm.

- Capacitância de 1 unidade

$$C = \varepsilon_r \varepsilon_0 \frac{A}{d} (N - 1) = 5 \times 8,85419 \times 10^{-12} \times \frac{0,3 \times 0,65}{0,01} \times 50 = 43,164 \text{ nF}$$

- Capacitância total

$$C_{tot} = 20 \times 43,164 \times 10^{-9} = 0,86328 \text{ } \mu\text{F}$$

- Potência reativa

$$Q_{nom} = YV_n^2 = \omega C_{tot} V_n^2 = 2\pi 60 \times 0,86328 \times 10^{-6} \times 138^2 = 6,1979 \text{ MVar}$$

Deve ser verificada a elevação de temperatura e a suportabilidade do isolamento, dado em kV/m e que depende do tipo de isolante que separa as placas.

Para esse capacitor, a rigidez dielétrica do isolante deve ser maior que 138 kV/cm, sem contar a margem de segurança.

Capacitores - Exemplos

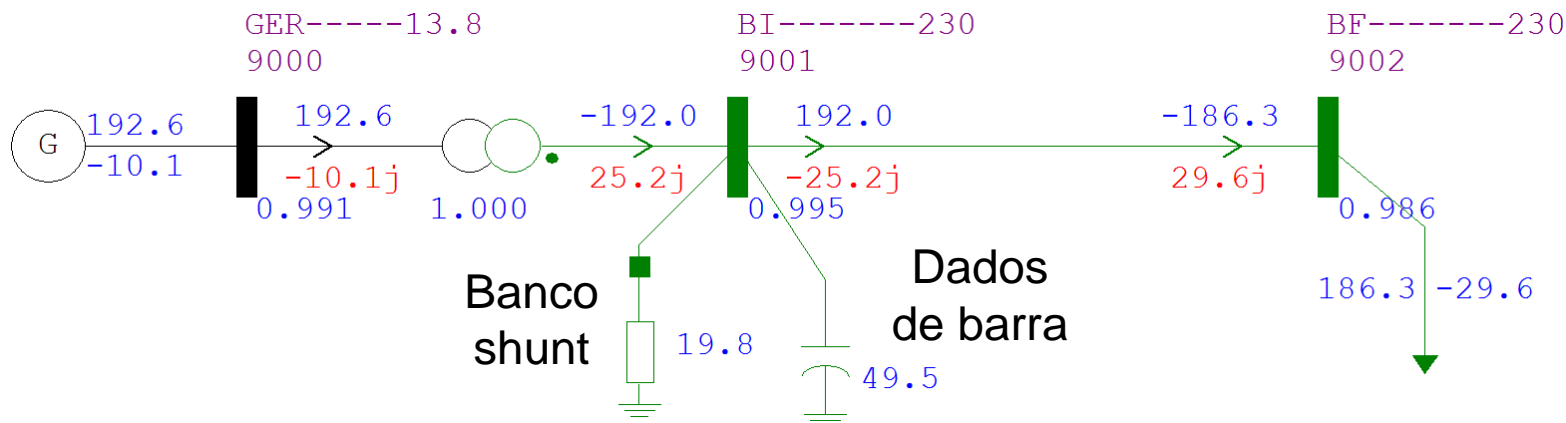


Banco de capacitores de alta tensão com 36 unidades em paralelo por fase

fonte: <http://en.wikipedia.org/>

Capacitores - Modelamento no Anarede

No programa Anarede o capacitor pode ser modelado diretamente nos dados de barra, como shunt de linha ou capacitor série.



• Nos dados de barra (50 MVar)

DBAR

```
(Num)OETGb( nome )Gl( V)( A)( Pg)( Qg)( Qn)( Qm)(Bc ) ( P1)( Q1)( Sh)Are(Vf)M(1)(2)(3)(4)(5)(6)(7)(8)
9000 L2 NGER-----13.8 5 99118.8192.6-10.1-999999999 81000
9001 L FBI-----230 5 99514.3 50. 81000
9002 L FBF-----230 5 9866.11 186.3-29.6 8 986
99999
```

• Banco shunt (2x20 MVar, 1 ligado)

DBSH

```
(NFr) O (NTo) Nc C (Vmn (Vmx Bctrl (Qini) T A (Extr
9001 D 0950 1050 9001 20. L
(G O E (U) UOp (Sht )
1 2 1 20.
```

FBAN

99999

Capacitores - Modelamento no Anarede

Banco com controle discreto D do tipo limite (coloca a tensão na barra dentro dos limites informados de 0,95 a 1,05 pu), grupo com 2 capacitores de 20 MVar, com 1 ligado (automaticamente)

Dados de Bancos de Capacitores/Reatores Individualizada (DBSH)

Barra De: 9001 Nome: BI-----230

Barra Para: Nome:

Circuito: Extremidade: ☐ Barra De ☐ Barra Para

Modo de Controle: Discreto Tipo de Controle: Limite

Barra Controlada

Número: 9001 Nome: BI-----230

Tensão Mínima: 0950 p.u. Tensão Máxima: 1050 p.u.

Injeção Inicial: 20. Mvar ☐ Apagar Dados de Barra

Bancos Shunt

Grupo	Estado	Unidades	Unidades Oper	Injeção
01	L	002	001	20.

Inserir Alterar Remover

Inserir Alterar Remover Limpar Fechar

Dados de Bancos

Grupo: 01 ☒ Ligado

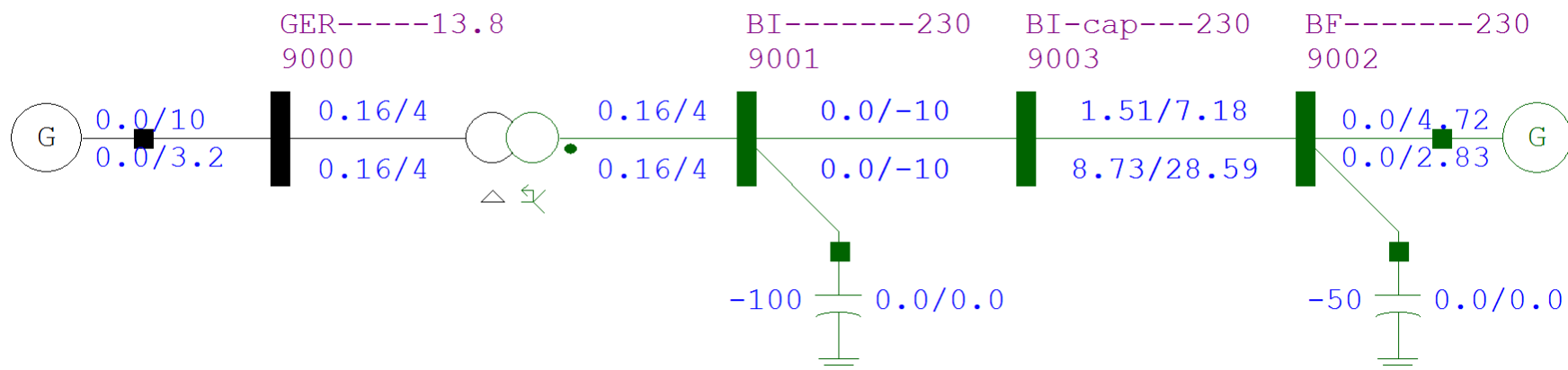
Unidades: 002 Unidades Operação: 001

Injeção: 20. Mvar

OK Cancelar

Capacitores - Modelamento no Anafas

Na inclusão de um capacitor pela interface gráfica, o mesmo pode ser de barra ou em série.



Dados de Shunt de Barra

Identificação

Barra: 9001 Nome: BI-----230

Grupo: 1 Área: 1 ☐ Equivalente ☒ Ligado

Reatância (X %): -100

Tipo de Conexão

☐ Delta ☐ Estrela não-aterrado ☒ Estrela aterrado

Resistência de Aterramento (Rn %): 0

Reatância de Aterramento (Xn %): 0

Número de Unidades: 1 Número de Unidades em Operação: 1

Capacidade de Interrupção do Disjuntor (kA):

Inserir Alterar Remover Fechar

Dados de Linha CA

Identificação

Barra De: 9001 Nome: BI-----230

Barra Para: 9003 Nome: BI-cap---230

Número do Circuito: 1 Área: 1 ☒ Ligado

Nome: Comprimento (km): 0

Sequência Positiva

Resistência (R1 %): 0 Reatância (X1 %): -10

Susceptância (S1 Mvar): 0

Sequência Zero

Resistência (R0 %): 0 Reatância (X0 %): -10

Susceptância (S0 Mvar): 0

Capacidade de Interrupção (kA)

Terminal De: Terminal Para:

Inserir Alterar Remover Fechar

Capacitores - Modelamento no Anafas

No programa Anafas os capacitores na realidade são uma impedância para a terra com parte imaginária positiva.

```

DBAR
(-----Dados de Barra-----)
(NB   CEM       BN       VPRE ANG  VBAS  DISJUN              DDMMAAAADDMMAAAA  IA   SA
(-----=
9000    GER-----13.8          13.8    50              1
9001    BI-----230          230    20              1
9002    BF-----230          230    20              1
9003    BI-cap---230          230    20              1
99999
DCIR
(-----Dados de Circuitos-----)
(BF   CE   BT    NCT   R1     X1     R0     X0     CN    S1    S0     TAP   TB    TCIA  DEFE  KM  CD  RNDE   XNDE  CP  RNPA   XNPA  SA
(-----=
9001    9003    1L      -1000          -1000              1
9001      0    1H999999999999          -10000              1          YN
9002      0    1H999999999999          -5000              1          YN
99999

```

Disjuntores

Disjuntores são equipamentos que interrompem a passagem de corrente por um equipamento em carga ou em caso de curto circuito, após receber a informação de um relé.

Os disjuntores de alta tensão, em muitos casos tem a câmara de extinção com gás SF₆ para garantir a eliminação do arco elétrico que se forma durante a abertura.



Exemplo de disjuntor de alta tensão - Fonte <http://en.wikipedia.org/>

Disjuntores - Valores Nominais

Os valores nominais principais do disjuntor são (valores eficazes):

- Classe de tensão (kV)
- Corrente nominal (A)
- Corrente de curto simétrica (capacidade disruptiva) (kA)

Exemplo (fonte ABB):

Dados Técnicos

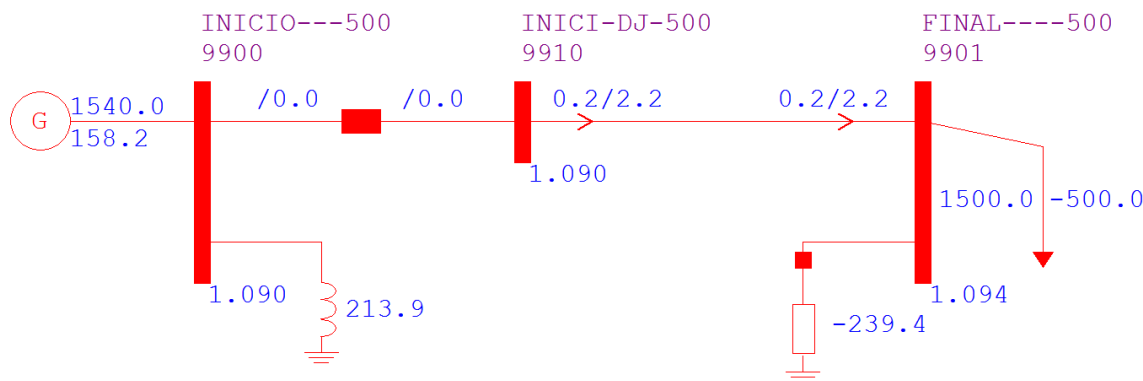
Classe de Tensão (kV)	15
Tensão de Impulso BIL (kVp)	95
Corrente Nominal até 40° C (A)	até 2000
Corrente de curto circuito simétrica (kA)	25
Peso (kg)	600



Disjuntores no Anarede e no Anafas

Nos programas Anarede e Anafas o disjuntor ou uma chave devem ser modelados somente para casos específicos, como por exemplo, para facilitar estudos como fluxo de potência em barramentos ou redução de corrente de curto com seccionamento de barramento.

O valor da impedância do circuito, para uma correta representação gráfica no Anarede (retângulo cheio), deve ser $X=0,001\%$.



Disjuntor no Anarede

Dados de Circuito CA (T)

Circuito

Barra De: 9900 Nome: INICIO---500

Barra Para: 9910 Nome: INICI-DJ-500

Número: 1 ☒ Circuitos existentes

Barra Proprietária

☐ De

☒ Para

Barra Controlada

☐ Direção De

☐ Direção Para

☒ Ligado

Capacidade

Normal: 9999 MVA

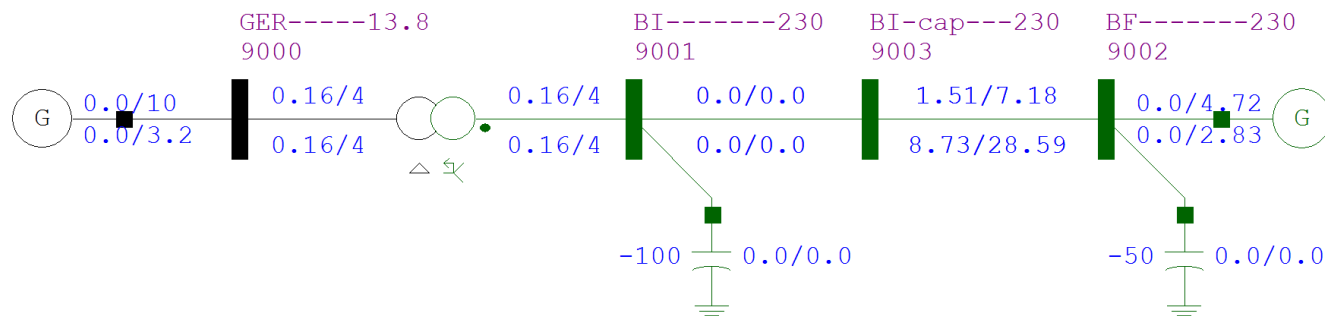
Emergência: 9999 MVA

Equipamento: 315 MVA

Resistência: %

Reatância: .001 %

Susceptância: Mvar



Disjuntor no Anafas

Chaves seccionadoras

Chaves seccionadoras são usadas para manobras sem carga (em vazio).



Chave seccionadora de 72,5 kV - fonte ABB.

O modelamento nos programas é o mesmo que o do disjuntor exceto no caso de fechamento estatístico SW_stat que se aplica somente a disjuntores.

Cargas

As cargas são mais importantes para estudos de fluxo de potência.

Em estudos de curto circuito as cargas praticamente não alteram os valores da corrente de curto por terem uma impedância alta.

Em estudos de transitórios eletromagnéticos as cargas geralmente não são representadas por deixarem os resultados mais conservadores.

- Cargas atenuam transitórios por serem predominantemente resistivas
- Cargas especiais devem ter modelamento específico:
 - Fornos a arco
 - Cargas industriais com retificadores

Os valores nominais de uma carga são:

- Tensão nominal (kV)
- Potência ativa nominal (MW)
- Potência reativa nominal (MVar)

Também pode ser informado o valor da potência aparente nominal (MVA) e o fator de potência.

Atualmente o ONS informa que o fator de potência de uma carga específica deve ser 0,95 indutivo.

Cargas - tipos

Os tipos básicos de carga são os seguintes:

- Potência constante (tipo padrão para estudos de fluxo de potência)
- Corrente constante
- Impedância constante (normalmente usados no Anafas, se for considerada a carga e no programa ATP)

O programa Anarede permite cargas com parcelas variáveis de cada modelo.

- Fórmulas básicas:

$$Z_C = \frac{V_n^2}{P - jQ}, R \text{ e } X \text{ em série} \quad R_C = \frac{V_n^2}{P}, X_C = \frac{V_n^2}{Q}, R \text{ e } X \text{ em paralelo.}$$

Se a carga for informada para uma tensão diferente da nominal do sistema a correção depende do tipo de modelo.

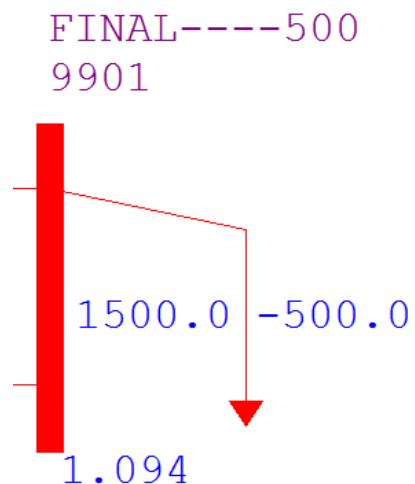
Modelo P constante: $P_2 + jQ_2 = P_1 + jQ_1$

Modelo I constante: $P_2 + jQ_2 = (P_1 + jQ_1) \frac{V_2}{V_1}$

Modelo Z constante: $P_2 + jQ_2 = (P_1 + jQ_1) \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^2$

Modelamento da carga no Anarede

A maneira tradicional é modelar a carga nos dados de barra, como no exemplo a seguir:



Carga com $P=1500$ MW e $Q=-500$ MVar (carga capacitiva),
Definida para a tensão de 500 kV (1 pu)

A carga nos dados de barra está indicada em vermelho:

DBAR

```
(Num)OETGb(  nome  )Gl( V)( A)( Pg)( Qg)( Qn)( Qm)(Bc  )( P1)( Q1)( Sh)Are(Vf)M
 9900 L2 CINICIO---500 31090  0.1540.158.2-999999999          -180.  81000
 9901 L  CFINAL---500 31094-16.                1500.-500.      81000
99999
```

Modelamento da carga no Anarede

A carga pode ter a parcela de cada tipo definida ao se clicar na seta que a representa:

Dados de Carga (DCAR)

Barra

Número: 9901

Nome: FINAL----500

Carga Ativa

Carga: 1500. MW

A: 30 %

B: 20 %

Tensão Limite: 70. %

Carga Reativa

Carga: -500. Mvar

C: 35 %

D: 25 %

VDef: 1000 p.u.

A, B, C e D = 0, carga P constante:

A: parcela l constante de P

B: parcela Z constante de P

C: parcela l constante de Q

D: parcela Z constante de Q

$$\begin{aligned} \text{Carga ativa} &= (100-A-B + A * V/V_{\text{def}} + B * V^2/V_{\text{def}}^2) * P/100 && \text{se } V \geq V_{\text{fld}} \\ &= ((100-A-B) * V^2/V_{\text{fld}}^2 + A * V^2 / (V_{\text{def}} * V_{\text{fld}}) + B * V^2/V_{\text{def}}^2) * P/100 && \text{se } V < V_{\text{fld}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Carga reactiva} &= (100 - C - D + C * V/V_{\text{def}} + D * V^2/V_{\text{def}}^2) * Q/100 \quad \text{se } V \geq V_{\text{fld}} \\ &= ((100 - C - D) * V^2/V_{\text{fld}}^2 + C * V^2 / (V_{\text{def}} * V_{\text{fld}}) + D * V^2/V_{\text{def}}^2) * Q/100 \quad \text{se } V < V_{\text{fld}} \end{aligned}$$

O trecho de arquivo texto é o seguinte (Para $V < V_{fl}$ % a carga fica 100% Z constante):

DCAR																		
(tp)	(no)	C	(tp)	(no)	C	(tp)	(no)	C	(tp)	(no)	O	(A)	(B)	(C)	(D)	(Vf1)		
barr	9901										A	30	20	35	25	70.		
99999																		

Modelamento da carga no Anafas

No programa Anafas a carga deve ser modelada como impedância para a terra (R e X em série ou paralelo).

A sequência zero deve ser igual à sequência positiva.

Dados de placa do gerador

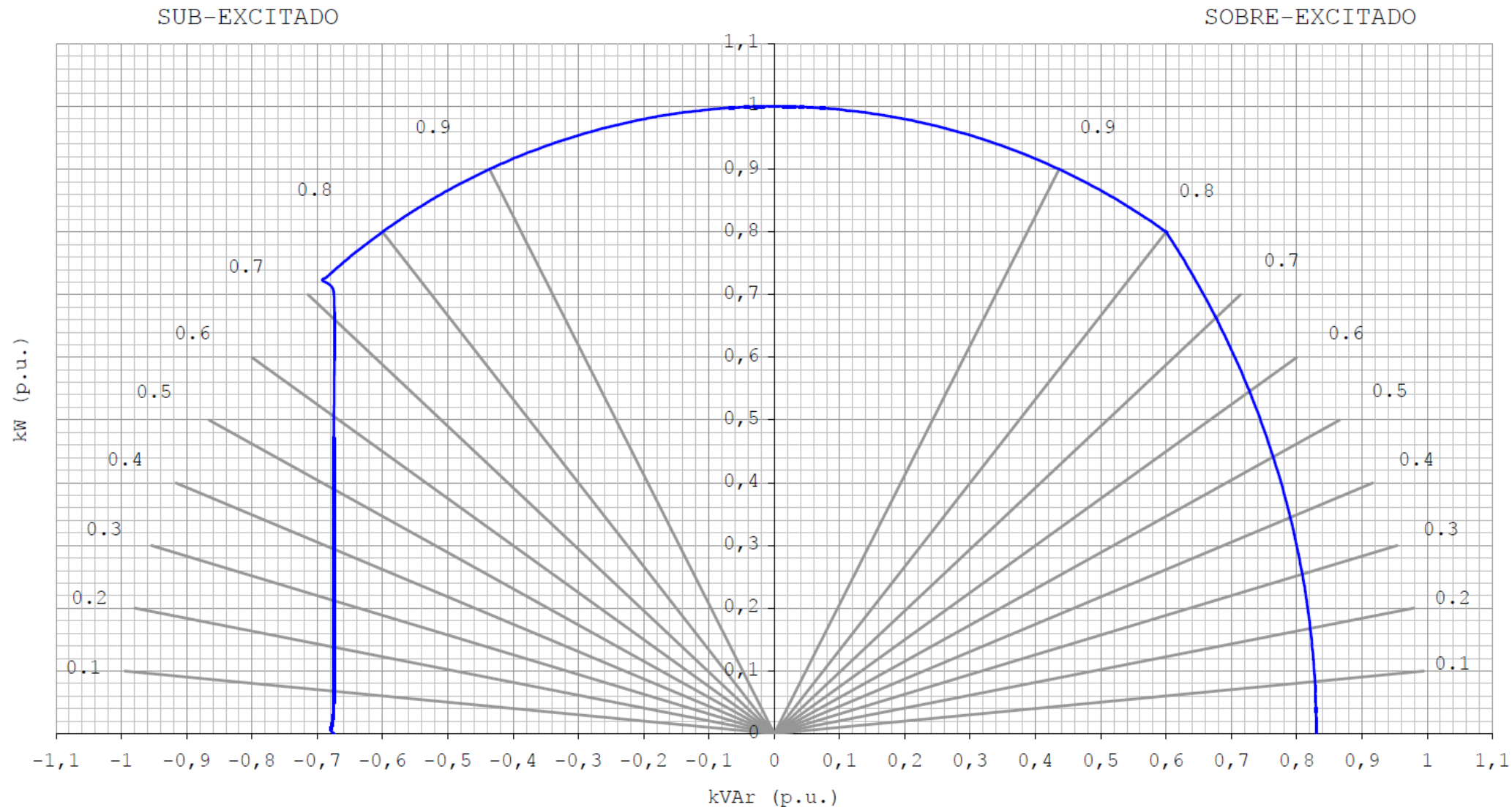
Carcaça	: 1250	Forma construtiva	: D6
Potência	: 43750 KVA	Grau de proteção	: IP54
Tensão Nominal	: 13800 V	Refrigeração	: IC81W
Tipo de Ligação	: Y	Massa aproximada	: 70000 kg
Corrente nominal	: 1830 A	Inércia do Rotor (J=GD²/4)	: 2500 kgm²
Número de pólos	: 04	Inércia do Volante (J=GD²/4)	:
Frequência	: 60 Hz	Sobrecarga	: 1.1 x In por 1 h cada 6h
Rotação nominal	: 1800 rpm	Sobrecarga Momentânea	: 1.5 x In por 30 s
Regime de serviço	: S1	Corrente curto circuito eficaz	: 9631.6 A
Fator de potência	: 0.8	Corr. Curto Circ. pico assimétrica	: 24518.1 A
Excitação	: BRUSHLESS PMG	Distorção Harmônica ff	: 5 %
Enrolamento amortecedor	: SIM	Fator Interferência Telef. ff	: 3 %
Classe de Isolamento do Estator	: F	Nível de ruído	:
Elevação de temp. do estator	: 80 °C	Vibração	: NORMAL 2.8 mm/s rms
Classe de Isolamento do Rotor	: F	Sobrevelocidade	: 1.2 x n por 120 s
Elevação de temp. do Rotor	: 80 °C	Acoplamento	: DIRETO
Temperatura ambiente	: 40 °C	Máquina Acionante	: TURBINA A VAPOR
Altitude	: 1000 m	Sentido de rotação	: HORARIO
(Olhando ponta de eixo dianteira da máquina)			

Características de Desempenho									
Carga	0%	25%		50%		75%		100%	
Fator de potência	-	1	0.8	1	0.8	1	0.8	1	0.8
Rendimento (%)	-	95.88	94.73	97.7	97	98.3	97.7	98.5	98
Tensão Excitação (V)	19.7	32.3	37.7	38.0	47.5	45.8	58.1	55.0	69.1
Corrente excitação (A)	4.33	6.0	7.0	7.05	8.8	8.5	10.8	10.3	13.0

Reatâncias (p.u.) e Constantes de Tempo (s) - Saturada / Não Saturada							
Xd 1.48 /1.66	Xd" 0.19 / 0.19	Xq" 0.26 /0.27	X2 0.22 /0.23	Td' 0.5283/0.5332	Tdo' 3.2218/3.6028		
Xd' 0.24 /0.25	Xq 1.46 / 1.63	X0 0.06 /0.06	Td" 0.028 /0.0296	Tdo" 0.0361/0.0379	Ta 0.3089/0.3157		

Gerador de 43,75MVA da WEG

Curva de capacidade do gerador



Gerador de 43,75MVA da WEG

Modelagem de geradores no programa Anarede

No programa Anarede na maioria dos casos o gerador é modelado como de geração (PV, tipo 1), onde a potência reativa varia para tentar manter a tensão especificada, mas pode ser uma barra de referência ($V\theta$, tipo 2), para a qual se define a tensão e o ângulo ou mesmo uma barra de carga com potência constante injetada (PQ, tipo 0), ou seja, com geração de reativos fixa, sem controle de tensão.

No trecho indicado de arquivo pwf estão os dados de barras com as três possibilidades citadas:

```
DBAR
(Num)OETGb(  nome  )Gl( V)( A)( Pg)( Qg)( Qn)( Qm)(Bc  )( P1)( Q1)( Sh)Are(Vf)M(1)(2)(3)(4)(5)(6)(7)(8)(9)(10)
(barras dos geradores, 50 MVA, fp 0,8, 13.8 kV
9011 L2 NB1-2GER-13.8 51000 0 -60. 60. 81000
9012 L1 NB2-3GER-13.8 51020 0 120. -90. 90. 81000
9013 L0 NB3-1GER-13.8 51000 0 40. 15.
(barras de carga 81000
9001 L FBARRA1---230 51000 0 40. 20. 81000
9002 L FBARRA2---230 51000 0 60. 30. 8 981
9003 L FBARRA3---230 51000 0 130. 65. 8 981
99999
```

```
DLIN
(De )d O d(Pa )NcEP ( R% )( X% )(Mvar)(Tap)(Tmn)(Tmx)(Phs)(Bc  )(Cn)(Ce)Ns(Cq)(1)(2)(3)(4)(5)(6)(7)(8)(9)(10)
(trafos elevadores 50 MVA
9001 9011 1 20. 1. 50 50
....
(linhas 230 kV 100 km
9001 9002 1 1.519 7.181 22.917 400 400
....
99999
```

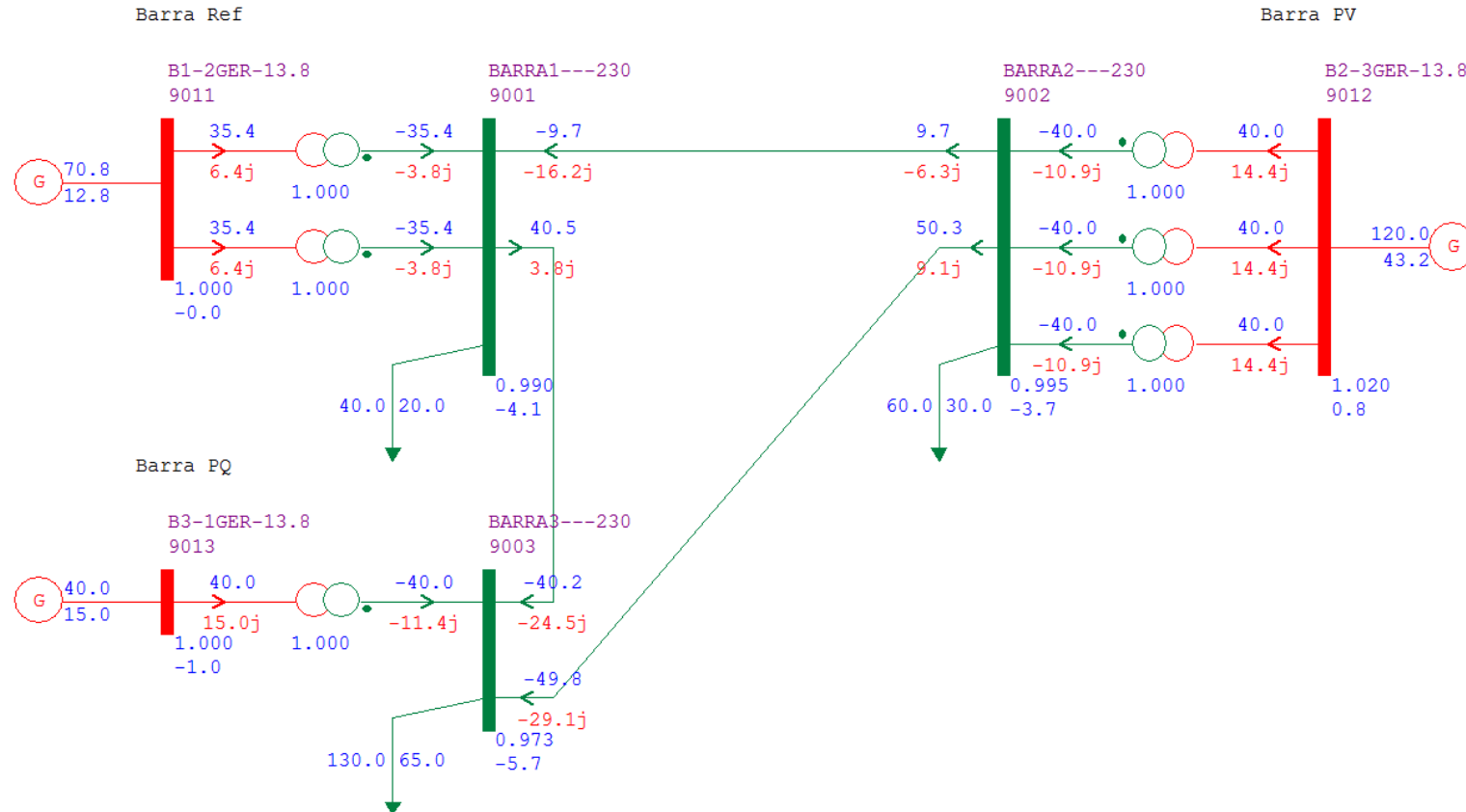
Exemplo de geradores no programa Anarede

Todos os geradores são de 50 MVA, 13,8 kV, fp 0,8. Q definido como 15 MVAr na barra 9013.

Como o fator de potência é 0,8, considera-se potência máxima por máquina de 40 MW (50x0,8).

Os limites de reativo serão: $Q_{max} = -Q_{min} = S_{nom} \sin(\arccos(fp)) = 50 \times 0,6 = 30 \text{ MVAr}$ por gerador.

Foi considerado 1 trafo elevador de 50 MVA, 13.8:230 kV, x=10% por gerador. Fp carga = 0,89443.



Exemplo de geradores no programa Anarede

Dos resultados pode-se verificar que a potência ativa na barra de referência é de 70,8 MW.

A carga total é de 230 MW, a geração máxima possível é de 240 MW.

Caso não houvessem perdas ativas a geração da barra de referência seria de 70 MW, sendo assim as perdas são de 0,8 MW, nas 3 linhas de 100 km.

***** CASO 3 GERADORES ***** PEA 5732 - maio 2014
RELATORIO DE TOTAIS DE AREA

AREA	GERACAO	INJ EQV	CARGA	ELO CC	SHUNT	EXPORT	IMPORT	PERDAS
NUM.	MW/ Mvar	MW/ Mvar	MW/ Mvar	MW/ Mvar	Mvar/ EQUIV	MW/ Mvar	MW/ Mvar	MW/ Mvar
8	230.8 71.0	0.0 0.0	230.0 115.0	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	0.8 -44.0
TOTAL	230.8 71.0	0.0 0.0	230.0 115.0	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	0.8 -44.0

***** CASO 3 GERADORES ***** PEA 5732 - maio 2014
RELATORIO COMPLETO DO SISTEMA * AREA 8 * * Minha concessionária *

D A D O S - B A R R A										F L U X O S - C I R C U I T O S										P E R D A S				T E N S A O	
DA BARRA		TENSAO	GERACAO	INJ EQV	CARGA	ELO CC	SHUNT	MOTOR		PARA BARRA		FLUXOS		MVA/V_d		TAP	DEFAS	TIE	ATIVA	REATIVA	CIR. ABERTO				
NUM.	KV TIPO	MOD/ ANG	MW/ Mvar	MW/ Mvar	MW/ Mvar	MW/ Mvar	Mvar/ EQUIV	Mvar		NUM.	NOME	NC	MW	Mvar					MW	Mvar	MOD	ANG			
NOME			MVA NOM	MVA EMR		FLUXO %	SHUNT L																		
X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X			
9001	230	0	0.990	0.0	0.0	40.0	0.0	0.0	0.0																
BARRA1	---	230	-4.1	0.0	0.0	20.0	0.0	0.0	0.0																
				400.0	400.0		4.8%			9002	BARRA2	---	230	1	-9.7	-16.2	19.1		0.02	-22.48					
				400.0	400.0		10.3%			9003	BARRA3	---	230	1	40.5	3.8	41.1		0.29	-20.71					
.....																									
9002	230	0	0.995	0.0	0.0	60.0	0.0	0.0	0.0																
BARRA2	---	230	-3.7	0.0	0.0	30.0	0.0	0.0	0.0																
				400.0	400.0		12.8%			9003	BARRA3	---	230	1	50.3	9.1	51.4		0.45	-20.05					

Modelagem de geradores no programa Anafas

No programa Anafas o gerador é modelado informando-se as reatâncias sub-transitória de eixo direto, x_d'' e de sequência zero x_0 .

Para o gerador da WEG de 43,75 MVA, os dados são os seguintes, com correção para 100 MVA.

Dados de Gerador

Identificação

Barra: 9000 Nome: GER-----13.8 Nome:

Grupo: 1 Área: 1 ☐ Eólico (*) ☐ Equivalente ☒ Ligado
(*) tipo síncrono com conversor de frequência

Sequência Positiva

Resistência (R1 %): 0 Reatância Subtransitória (x_d'' %): 43.429

Reatância de Regime (x_d %): 9999.99 Reatância Transitória (x_d' %):

Sequência Zero

Resistência (R0 %): 0 Reatância (x_0 %): 13.71

Tipo de Conexão

☐ Delta ☐ Estrela não aterrado ☒ Estrela aterrado

Resistência de Aterramento (Rn %): 0

Reatância de Aterramento (x_n %): 0

Eólico

Corrente Máxima de Seq. Positiva (Imá Arms): 0 Fator de Potência de Operação (FP_pré): 1

Tensão Mínima para Injetar (Vmin pu): 0 Potência Ativa Pré-Falta (Pinic MW): 0

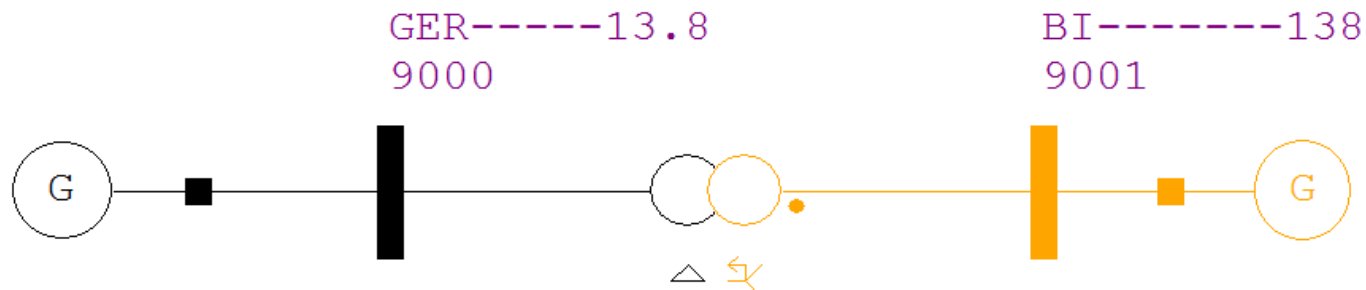
Fator de Potência de Curto (FP_CC): 1

Número de Unidades: 1 Número de Unidades em Operação: 1

Número Mínimo de Unidades: 1

Capacidade de Interrupção do Disjuntor (kA):

Exemplo de gerador no programa Anafas



```

DBAR
(-----Dados de Barra-----
(NB  CEM      BN      VPRE ANG  VBAS DISJUN      DDMMAAAADDMMAAAA  IA  SA      V_estendido_dupl
(=====
9000  GER-----13.8      13.8      50      1
9001  BI-----138      138      20      1
99999

DCIR
(-----Dados de Circuitos-----
(BF  CE  BT  NCT  R1    X1    R0    X0    CN  S1  S0  TAP  TB  TCIA  DEFE  KM  CD  RNDE  XNDE  CP
(=====
9000  0    1G    43.429      13.71GERAD      1      YN
9001  0    10G    5.251      7.8765EQUIV      1      YN
9001  9000  1T    .16  4.00  .16  4.00TRAFO      1 30      YN1.8904      D
99999
  
```

OBS - O equivalente na barra 9001 (é modelado da mesma forma que o gerador)

$x_1 = 10\Omega$, $x_0 = 15\Omega$, 138kV, 100MVA

Modelagem de geradores no programa de transitórios eletromecânicos Anatem

Para o programa Anatem o modelamento do gerador utiliza os dados de placa do gerador, a curva de saturação em vazio e os modelos de regulador de tensão e velocidade e estabilizador.

Os parâmetros eletromecânicos do gerador são informados em arquivos texto com extensão .blt.

A seguir um trecho de arquivo .blt obtido do site do ONS mostrando geradores de turbina hidráulica e de usinas térmicas (http://www.ons.com.br/avaliacao_condicao/casos_eletromecanicos.aspx).

```
(=====
(  DADOS DE MODELOS DE MAQUINAS SINCRONAS
(=====
(
(** modelos de maquinas c/ rotor liso (usinas termicas) **
DMDG MD03
(..... UNE Angra I
(No)   (CS) (Xd ) (Xq ) (X'd) (X'q) (X''d) (Xl ) (T'd) (T'q) (T''d) (T''q)
0100   100 172.0167.948.8080.0033.70 26.6 5.300.6250.0480.066
(No)   (Ra ) ( H ) ( D ) (MVA) Fr C
0100           3.859       760.0    N
...
999999
(
(** modelos de maquinas c/ polos salientes (usinas hidroelétricas)**
DMDG MD02
...
(..... UHE Agua Vermelha ( J. E. Moraes )
(No)   (CS) (Xd ) (Xq ) (X'd)   (X''d) (Xl ) (T'd)   (T''d) (T''q)
0500   0500 91.0057.0026.00     21.0015.00 6.20       .043 .074
(No)   (Ra ) ( H ) ( D ) (MVA) Fr C
0500           4.030       250.0    N
...
999999
```

Exemplo de modelagem de gerador no Anatem

Para o gerador de 43,75MVA da WEG, com os dados de placa indicados anteriormente, o arquivo .blt é o seguinte:

```
DMDG MD03
(UTE Porto das Águas
(G1 e G2 WEG
      *           *           *           *
(No)   (CS) (Xd ) (Xq ) (X'd) (X'q) (X''d) (Xl ) (T'd) (T'q) (T''d) (T''q)
9050   9050 166. 163.   25. 27.5  19. 15.  3.603 .72 .0379 .076
(No)   (Ra ) ( H ) ( D ) (MVA) Fr C
9050           1.015   43.75   N
999999
(
( dados de curvas de saturação
DCST
(No)   T ( Y1 ) ( Y2 ) ( X1 )
9050   2   0.0245  7.9174   0.8
(
999999
(
FIM
```

Os dados indicados em verde foram obtidos diretamente dos dados de placa, considerando os valores não saturados e as constantes de tempo de circuito aberto $T'q_0$, $T''d_0$, etc.

Os dados em vermelho foram estimados e a constante de inércia H e os parâmetros da curva de saturação foram calculados.

Exemplo de modelagem de gerador no Anatem

Conforme a referência Kundur, Power System Dynamics and Stability, EPRI tem-se:

$$x_d \geq x_q \geq x'_q \geq x'_d \geq x''_q \geq x''_d$$

Os parâmetros não fornecidos podem ser estimados conforme as sugestões a seguir, sendo também indicadas as faixas típicas apresentadas na mesma referência (Kundur):

$$x'_q : [0,3;1,0] \quad x'_q = 1,1 \times x'_d$$

$$x_l : [0,1;0,2] \quad x_l = 0,15$$

$$T'_{q0} : [0,5;2,0] \quad T'_{q0} = T'_{d0} / 5$$

$$T''_{q0} : [0,02;0,05] \quad T''_{q0} = T''_{d0} \times 2$$

A curva de saturação é ajustada pela expressão: $\Delta V = Ae^{B(v_s - 0,8)}$

Onde ΔV é a diferença entre a tensão saturada e não saturada do gerador.

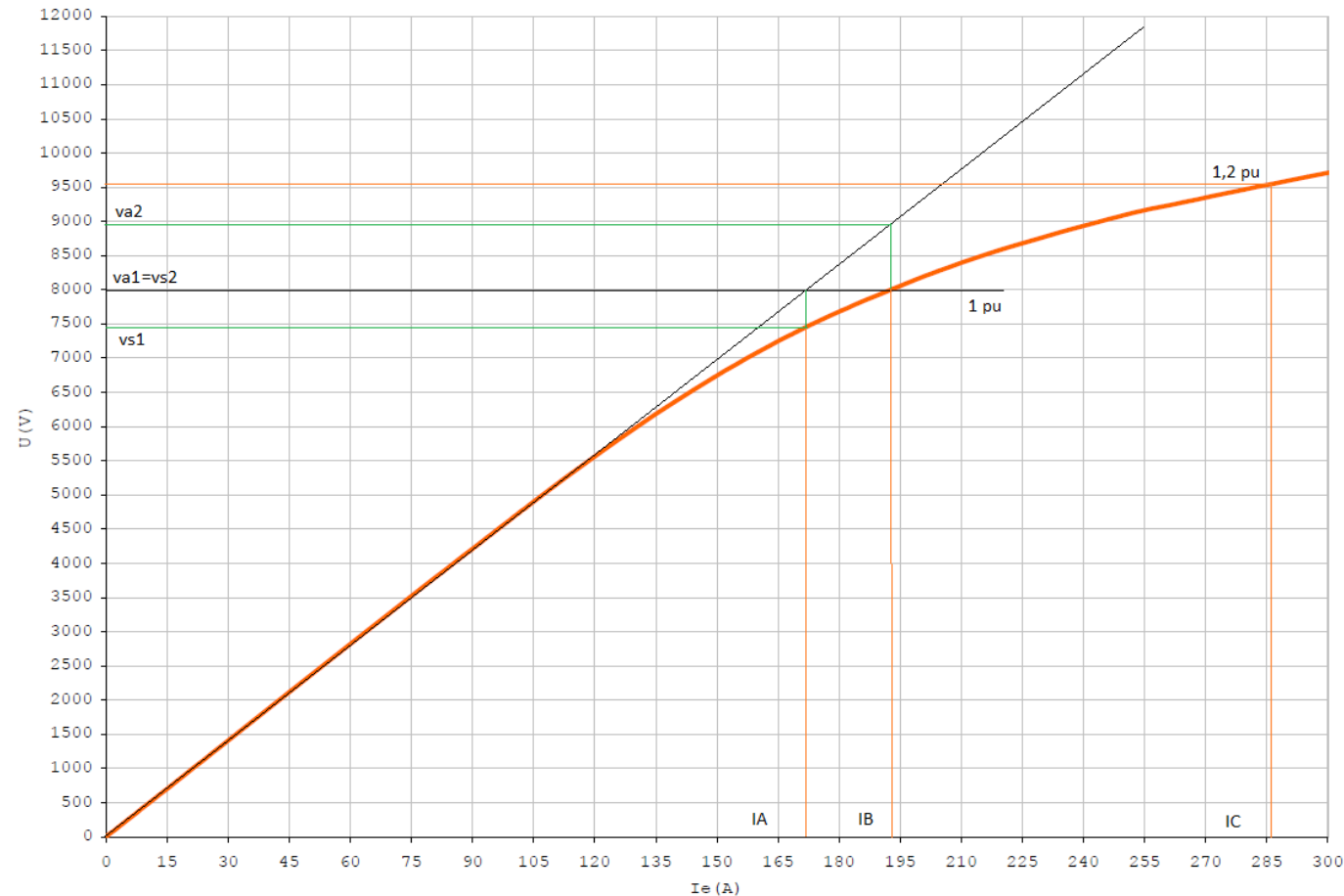
Para obter os valores de A e B deve-se consultar os valores em pu da tensão não saturada em 2 pontos de corrente onde as tensões valem v_{a1}, v_{s1} e v_{a2}, v_{s2} .

$$\Delta V_1 = v_{a1} - v_{s1} \quad \Delta V_2 = v_{a2} - v_{s2}$$

$$\frac{\Delta V_1}{\Delta V_2} = \frac{Ae^{B(v_{s1}-0,8)}}{Ae^{B(v_{s2}-0,8)}} \quad \frac{\Delta V_1}{\Delta V_2} = e^{B(v_{s1}-v_{s2})} \quad B = \frac{\ln\left(\frac{\Delta V_1}{\Delta V_2}\right)}{v_{s1} - v_{s2}} \quad A = \frac{\Delta V_1}{e^{B(v_{s1}-0,8)}}$$

Exemplo de modelagem de gerador no Anatem

Os pontos indicados podem ser correspondentes a IA, onde a tensão é v_{a1} (1 pu) ou v_{s1} e IB onde a tensão é v_{a2} ou v_{s2} (1 pu). A curva de saturação é a da WEG (43,75 MVA).



Para esse caso tem-se: $v_{a1} = 1$, $v_{s1} = 0,931$, $v_{a2} = 1,119$, $v_{s2} = 1$, $A = 0,0245$ e $B = 7,9174$

Exemplo de modelagem de gerador no Anatem

O cálculo da constante de inércia pode incluir o momento de inércia da turbina no caso de hidrogeradores. No caso de usinas térmicas pode-se considerar somente o momento de inércia do gerador.

A constante de inércia H é obtida a partir da rotação nominal, da sua potência aparente e do momento de inércia:

$$H = \frac{1}{2} \frac{J\omega^2}{S_n} \text{ onde } \omega = 2\pi f \quad f = \frac{60\text{Hz}}{p}, p \text{ é o número de pares de pólos.}$$

Para o gerador da WEG:

$$J = 2500 \text{ kg} \times \text{m}^2 \quad np = \frac{p}{2} = 2 \quad \omega = 2\pi \frac{60}{2} \quad S_n = 43,75 \text{ MVA} \quad H = 1,015 \text{ s}$$

Além dos dados eletromecânicos do gerador devem ser modelados seus reguladores de tensão e excitatriz, estabilizador e regulador de velocidade.