

REPRESENTAÇÃO DE TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS EM DIAGRAMAS SEQUENCIAIS

Objetivo: Determinação dos modelos de seqüência positiva, negativa e zero dos transformadores trifásicos (ou banco de 3 monofásicos) nas diversas ligações.

1 – TRANSFORMADOR TRIFÁSICO

O transformador monofásico será representado pelo modelo da figura 1:

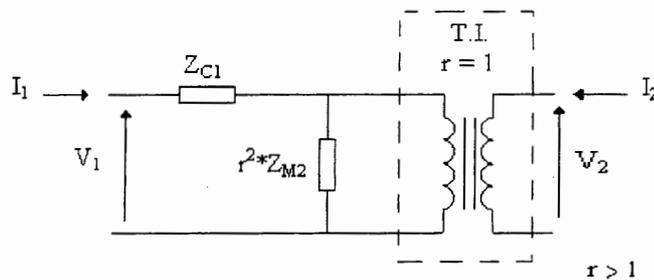


Figura 1

Onde: r – relação de transformação;
 Z_{c1} – impedância de curto circuito, trafo alimentado pelo primário (secundário em curto);
 Z_{M2} – impedância de circuito aberto, trafo alimentado pelo secundário (primário em vazio).

Como no laboratório iremos trabalhar com transformadores de $r = 1$ o modelo fica (Figura 2):

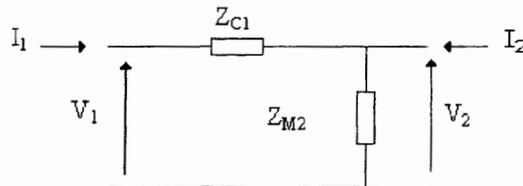


Figura 2

Quando $r \neq 1$ passamos todos os valores de impedâncias para p.u. e o transformador ideal desaparece. Então caímos no caso anterior.

Resumindo: dado um transformador monofásico entre 2 barras P e Q (Figura 3) ele será representado pelo modelo da Figura 4, quando todos os valores estiverem em p.u., ou pelo modelo da Figura 5 quando desprezamos o Z_M , impedância de magnetização (por ter valor muito elevado). Z_C

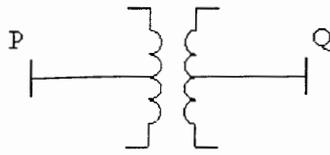


Figura 3

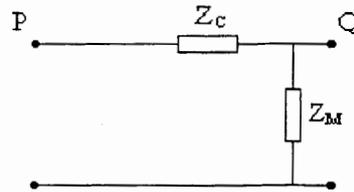


Figura 4

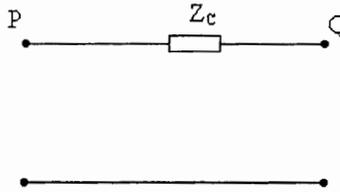


Figura 5

1.1 – DETERMINAÇÃO DE Z_C E Z_M

Para determinar Z_C colocamos o secundário em curto e aplicamos tensão no primário (o valor desta tensão deve ser reduzido para que a corrente não ultrapasse o valor nominal).

Temos:

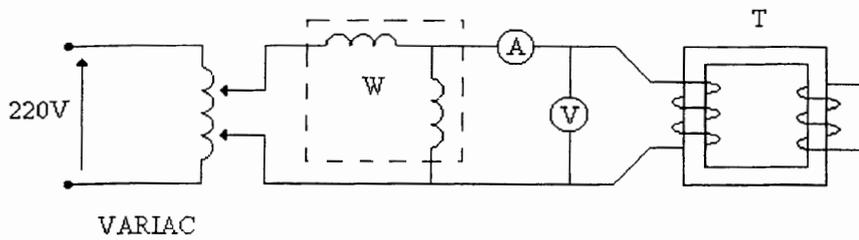


Figura 6

Medimos V_C , I_C e W_C

O módulo de \hat{Z}_C vale: $Z_C = \frac{V_C}{I_C}$

A fase vale φ_c , obtida de $\cos \varphi_c = \frac{W_C}{V_C \cdot I_C}$

$\therefore Z_C = Z_C \angle \varphi_c$

Para determinar Z_M deixamos o primário em vazio e aplicamos tensão no secundário .

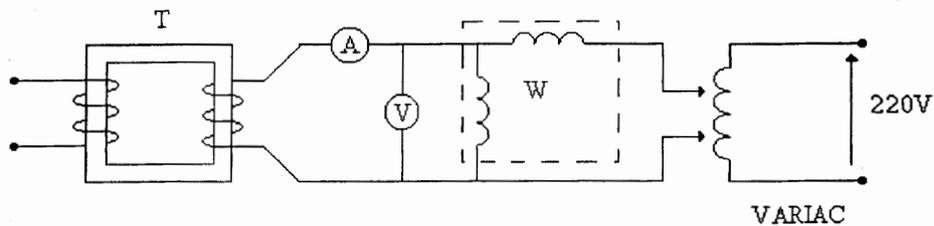


Figura 7

Medimos V_V , I_V e W_V

O módulo de \hat{Z}_M vale $\rightarrow Z_M = \frac{V_V}{I_V}$

A fase vale φ_m , obtida de $\cos \varphi_m = \frac{W_V}{V_V \cdot I_V}$

$\therefore Z_m = Z_m \angle \varphi_m$

Este valor de \hat{Z}_M (impedância de magnetização vista do secundário) deve ser então referida ao primário (multiplicando por r^2) para poder entrar no modelo da Figura 1.

OBS: em geral \hat{Z}_M é muito grande e será desprezada. Z_C será calculada em p.u. e ficaremos com o circuito da Figura 5 que é o modelo do transformador monofásico.

2 – TRANSFORMADOR TRIFÁSICO – SEQUÊNCIA POSITIVA

Vamos agora determinar o modelo de seqüência positiva para transformadores trifásicos. Devemos considerar 2 casos: banco de 3 transformadores monofásicos e um transformador trifásico propriamente dito, com núcleos magneticamente acoplados.

2.1 – TRIFÁSICO PROPRIAMENTE DITO

Dado um transformador trifásico, para determinarmos a impedância de curto, por fase, da seqüência positiva, devemos colocar o secundário em curto e aterrar, e aplicar uma tensão de seqüência positiva no primário.

OBS: o procedimento é o mesmo com qualquer tipo de ligação: YY, ΔΔ, YΔ, ΔY, etc

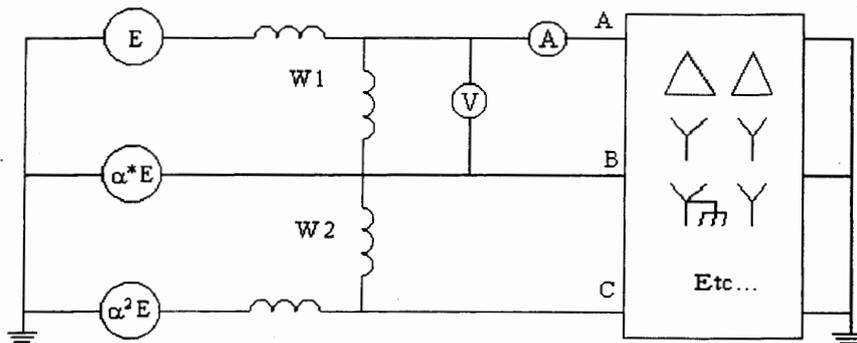


Figura 8

Medimos V_L , I_L e $W_T = W_1 + W_2$

A impedância equivalente no caso do trifásico pode ser calculada em Δ ou em Y. Como queremos a impedância por fase (para fazer o modelo) vamos calcular Z_{CY} .

$$\text{Então: } Z_{CY} = \frac{V_f}{I_f} = \frac{V_L}{\sqrt{3} \cdot I_L}$$

$$W_T = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_L \cdot \cos\phi \therefore \cos\phi = \frac{W_T}{\sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_L}$$

Z_M deve ser calculada como nos monofásicos, isto é, aplicamos tensão de seqüência positiva no secundário e deixamos o primário em vazio.

Medindo V_L , I_L e W_T podemos calcular Z_M .

Notar que aqui também deve ser calculado Z_{MY} , pois o modelo representa uma fase do trifásico.

Passando os valores para p.u. e tomando por base os valores nominais, teremos o seguinte modelo:

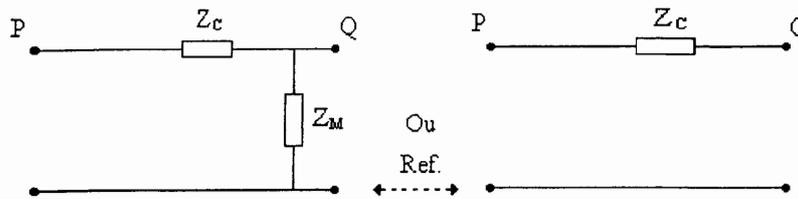


Figura 9

Este é o modelo de sequência positiva do transformador trifásico. As impedâncias são os valores por fase.

2.2 – BANCO DE 3 MONOFÁSICOS

Para o banco determinamos a impedância de um monofásico e calculamos seu valor nas bases dos valores nominais do transformador.

Teremos V_{N1} , V_{N2} , S_N , Z_C e Z_M (para 1 monofásico).

Em geral desprezamos Z_M e fazemos $Z_C = Z$.

Assim teremos somente V_{N1} , V_{N2} , S_N e Z .

Onde: V_{N1} – tensão nominal no primário

V_{N2} – tensão nominal no secundário

S_N – potência nominal

Z_M – impedância de curto na base nominal ($Z_{base} = \frac{V_{N1}^2}{S_N}$)

Para o modelo do banco o valor da impedância será o mesmo Z do monofásico se usarmos para V_{banco} o valor do V_{linha} e para S_{banco} o valor $3.S_N$ com qualquer tipo de ligação.

Por exemplo: seja dado um banco de 3 monofásicos $Y\Delta$

Para 1 monofásico temos: V_{N1} , V_{N2} , S_N e Z .

Para o banco fazemos:

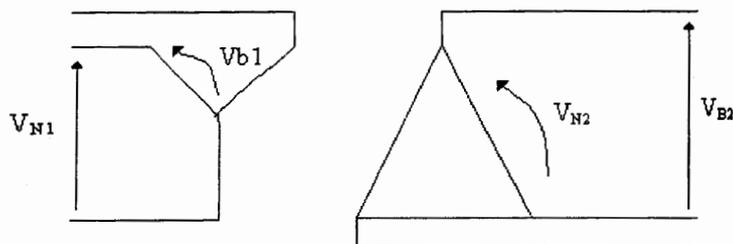


Figura 10

E o modelo do banco fica:

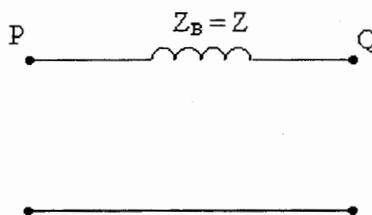


Figura 11

3 – TRANSFORMADOR TRIFÁSICO – SEQÜÊNCIA NEGATIVA

Para determinar os modelos de seqüência negativa basta fazer o mesmo estudo aplicando tensões de seqüência negativa.

Os valores obtidos serão os mesmos e portanto os modelos de seqüência negativa serão os de seqüência positiva.

4 – TRANSFORMADOR TRIFÁSICO – SEQÜÊNCIA ZERO

A obtenção dos diagramas de seqüência zero dos transformadores trifásicos deve ser feita aplicando-se tensões de seqüência zero.

Aqui o modelo do transformador vai depender do tipo de ligação. Vamos então considerar cada ligação separadamente. Além disso, estudaremos apenas a determinação da impedância de curto-circuito, notando que esse ensaio deve ser feito tanto pelo primário quanto pelo secundário.

4.1 - LIGACÃO $\begin{matrix} Y \\ // \end{matrix} Z_M \triangle$

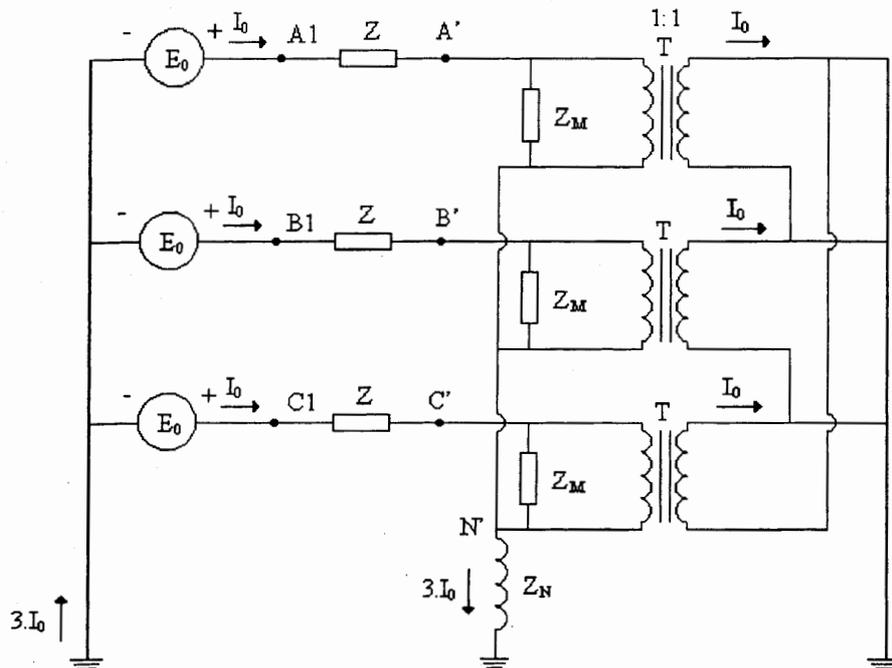


Figura 12

Aplicando E_0 no primário vemos que pode circular I_0 , porque se isto ocorrer aparecerá I_0 no secundário que ficará circulando dentro do triângulo.

Calculemos agora o valor da impedância vista pela fonte.

Inicialmente convém notar que $V_{A'N'} = 0$, pois o secundário está em curto circuito.

$$\therefore E_0 = I_0 \cdot Z + 3 \cdot I_0 \cdot Z_N = (Z + 3 \cdot Z_N) \cdot I_0$$

$$\therefore \frac{E_0}{I_0} = Z + 3 \cdot Z_N = Z_0$$

Logo, do lado primário temos:

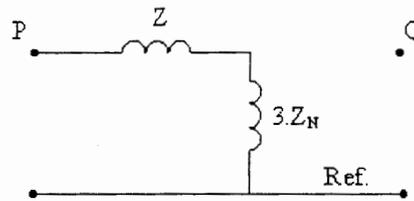


Figura 13

Agora vamos alimentar pelo secundário, estando o primário em curto.

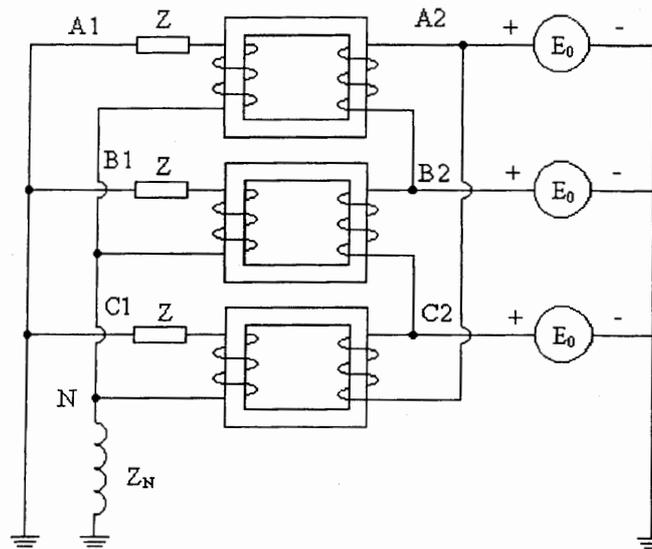
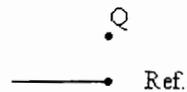


Figura 14

Como o secundário é ligado em Δ , e estamos aplicando tensão de seqüência zero, a tensão em cada enrolamento vale zero ($V_{A_2B_2} = 0$) e não tendo tensão aplicada não existe corrente e portanto $I_0 = 0$.

Isto é, a impedância de curto vista do secundário é infinita (circuito aberto).

Para o secundário vale



Portanto o modelo completo de seqüência zero do transformador trifásico é:

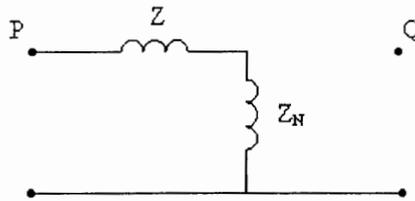
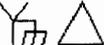


Figura 15

4.2 - **LIGACÃO** 

É o caso anterior com $Z_N = 0$

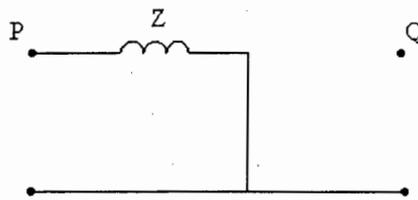


Figura 16

4.3 - **LIGACÃO** 

É o caso 4.1 com $Z_N = \infty$ (circuito aberto)

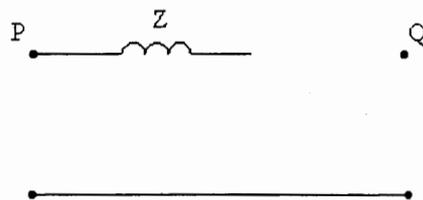


Figura 17

4.4 - LIGACÃO

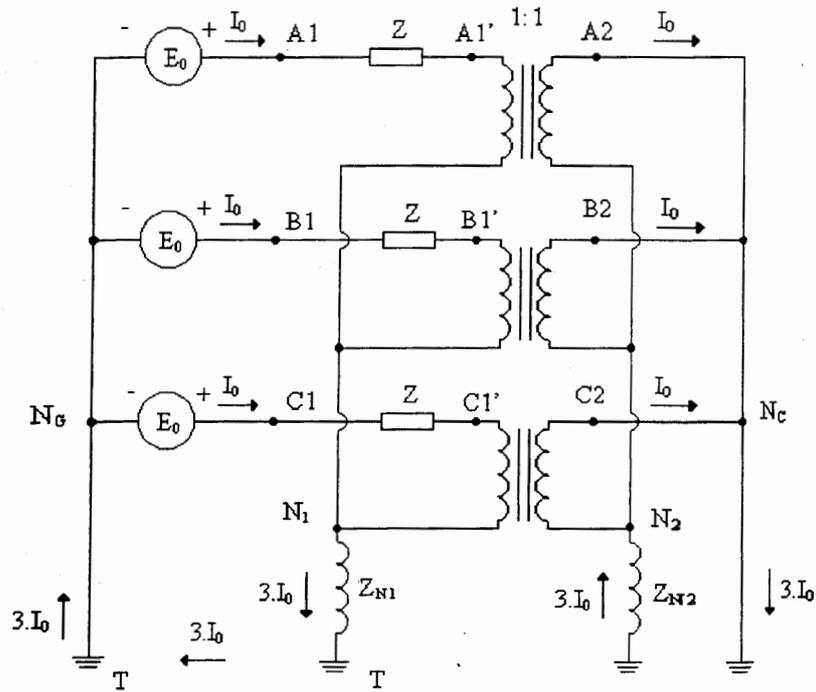
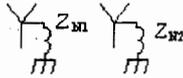


Figura 18

O processo é sempre o mesmo.

Aplicamos tensão de seqüência zero no primário, colocamos o secundário em curto e aterrmos.

Supomos I_0 entrando em cada fase do primário e verificamos se há possibilidade de I_0 ser não nulo.

Admitindo que exista I_0 no primário, devido à indução, teremos I_0 no secundário ($r = 1$). Portanto vai sair I_0 de A_2 , B_2 e C_2 .

No nó N_c , estas correntes se somarão e irá para a terra a corrente $3 \cdot I_0$. O retorno será através da impedância Z_{N2} .

No lado do primário, as 3 correntes se somarão no nó N_1 e descerão para terra através de Z_{N1} . O retorno será pelo centro-estrela do gerador, N_G .

Vamos equacionar a malha $A_1A_1'N_1TN_GA_1$.
A soma das tensões deve valer zero, isto é:

$$V_{A_1A_1'} + V_{A_1'N_1} + V_{N_1T} + V_{TN_G} + V_{N_GA_1} = 0$$

$$V_{A_1A_1'} = I_0 \cdot Z$$

$$V_{A_1'N_1} = V_{A_2N_2} (r = 1) = 3 \cdot I_0 \cdot Z_{N_2}$$

$$V_{N_1T} = 3 \cdot I_0 \cdot Z_{N_1}$$

$$V_{TN_G} = 0$$

$$V_{N_GA_1} = -E_0$$

$$\therefore E_0 = Z \cdot I_0 + 3 \cdot Z_{N_2} \cdot I_0 + 3 \cdot Z_{N_1} \cdot I_0$$

$$\text{Donde } Z_0 = \frac{E_0}{I_0} = Z + 3 \cdot Z_{N_1} + 3 \cdot Z_{N_2}$$

que é a impedância vista pelo gerador aplicado ao primário com o secundário em curto.

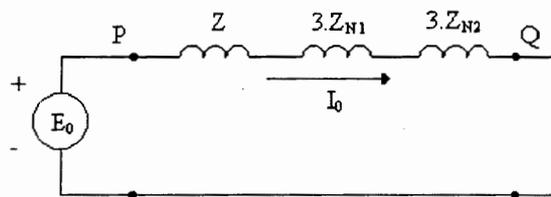


Figura 19

Vamos agora alimentar pelo secundário com o primário em curto.

$$\text{Também neste caso } Z_0 = \frac{E_0}{I_0} = Z + 3 \cdot Z_{N_1} + 3 \cdot Z_{N_2}$$

Isto é:

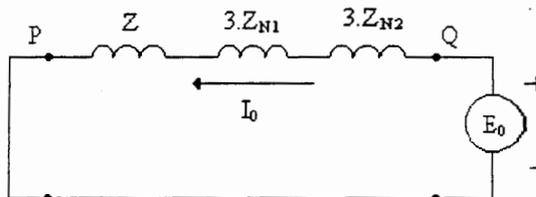


Figura 20

Logo o diagrama de seqüência zero para este tipo de ligação será:

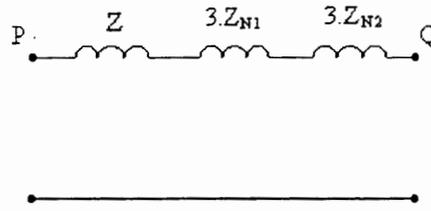


Figura 21

4.5 - **LIGACÃO**

É a 4.4 com $Z_{N2} = 0$

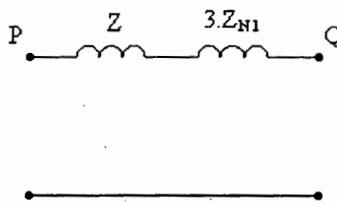


Figura 22

4.6 - **LIGACÃO**

É a 4.4 com $Z_{N1} = Z_{N2} = 0$

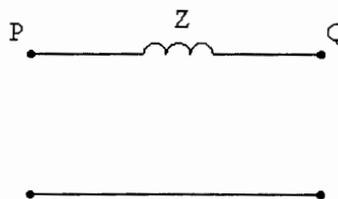
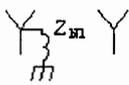


Figura 23

4.7 - **LIGACÃO** 

É a 4.4 com $Z_{N2} = \infty$ (circuito aberto)

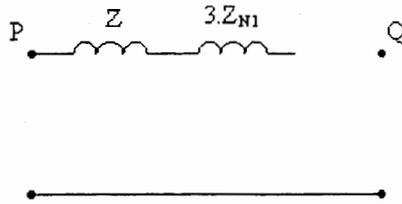


Figura 24

4.8 - **LIGACÃO** 

$Z_{N1} = Z_{N2} = \infty$

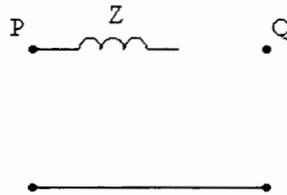


Fig 25

4.9 - **LIGACÃO** 

Aplicando tensão de seqüência zero, tanto no primário quanto no secundário, não há circulação de corrente, logo a impedância é ∞ (circuito aberto) e o modelo fica:

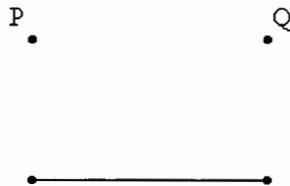


Figura 26

5 – RAMO MAGNETIZANTE NA SEQÜÊNCIA ZERO

Para estudar o ramo magnetizante vamos considerar inicialmente a ligação de forma esquemática.

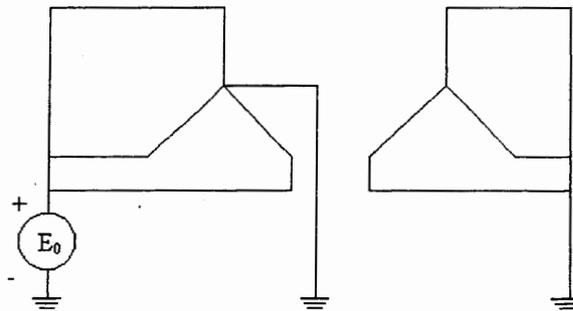
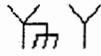


Figura 27

Aplicando tensão de seqüência zero nas 3 fases de acordo com a figura 27 (ensaio com o secundário em curto) podemos observar que:

-O secundário está em curto, mas como o centro-estrela não está aterrado e as tensões induzidas são de seqüência zero, as fases do secundário estão em circuito aberto (corrente é nula);

-Se o secundário está em aberto, o ensaio equivale ao ensaio em vazio. Então basta estudar o primário.

5.1 - Estamos aplicando E_0 em cada fase (cada monofásico do banco). Como os monofásicos estão em vazio, vai passar uma corrente pelo ramo de magnetização. Logo o circuito de seqüência zero para a ligação  deve ser:

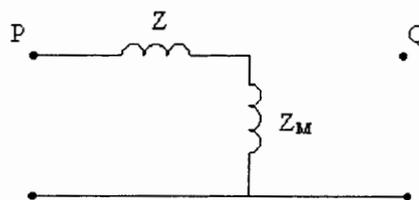


Figura 28

5.2 - No caso em que temos Z_{N1} e Z_{N2} ficamos com (Figura 29):

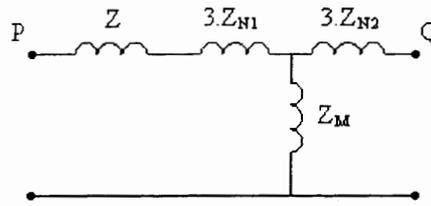


Figura 29

Note-se que a localização do ramo magnetizante é arbitrária, pois o erro cometido é desprezível, podendo ser, por exemplo, colocado da seguinte forma (Figura 30):

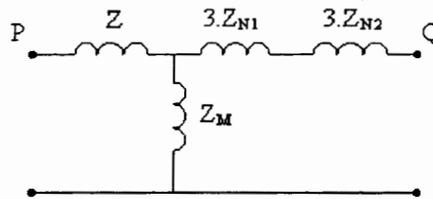
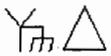


Figura 30

O importante é saber que existe o ramo magnetizante, porque o aterramento do centro-estrela do primário permite que a corrente circule para a terra e porque as fases do secundário estão em aberto.

5.3 - No caso da ligação , já estudada na figura 14, com $Z_N = 0$, também existe caminho para a corrente aplicada ao primário, mas como o secundário está em curto, cada fase do transformador fica em curto e portanto cada fase do primário também fica em curto, e portanto vale o circuito equivalente da figura 28.

5.4 - LIGACÃO

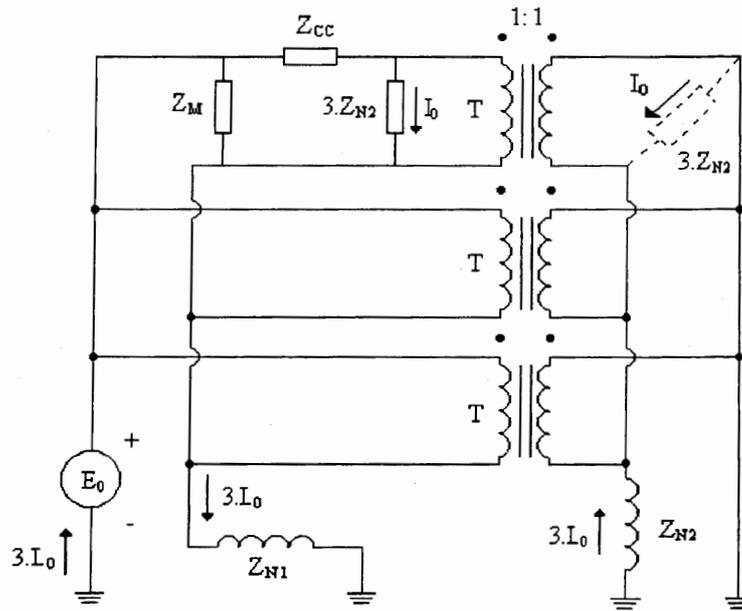
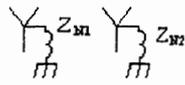


Figura 31 (ver figura 18)

O circuito equivalente representado nas figuras 32 e 33 pode ser associado à figura 21.

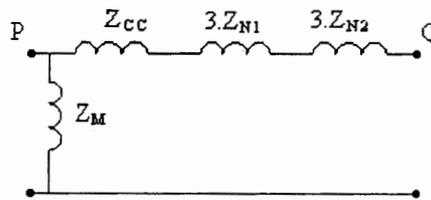


Figura 32

ou, melhor:

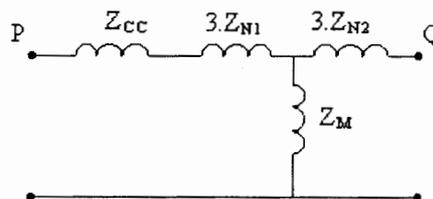


Figura 33

Podemos então resumir todos os tipos de ligação em 3 tipos básicos. Os demais são obtidos fazendo $Z_N = 0$ ou ∞ .

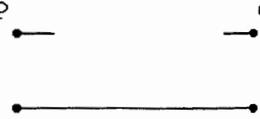
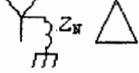
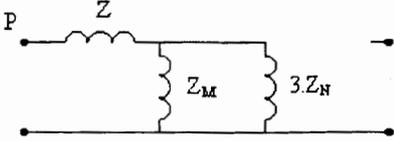
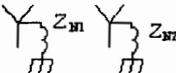
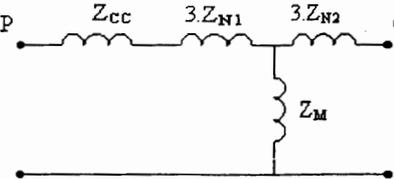
Tipo de ligação	Diagrama de seqüência zero
	
	
	

Figura 34

OBS: Z_M geralmente tem valor muito elevado, daí não ser representado, em geral, nos diagramas.