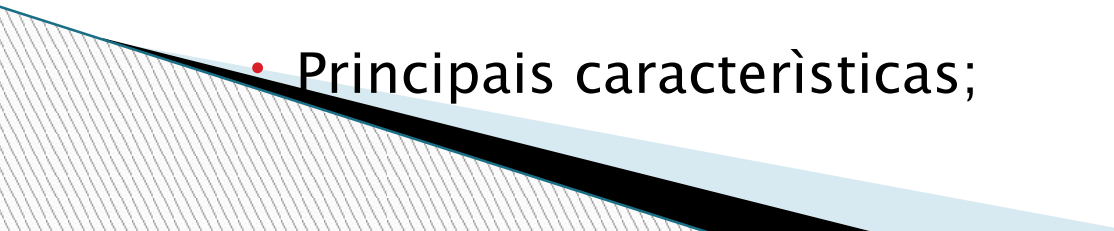


# Sistemas Hexafásicos

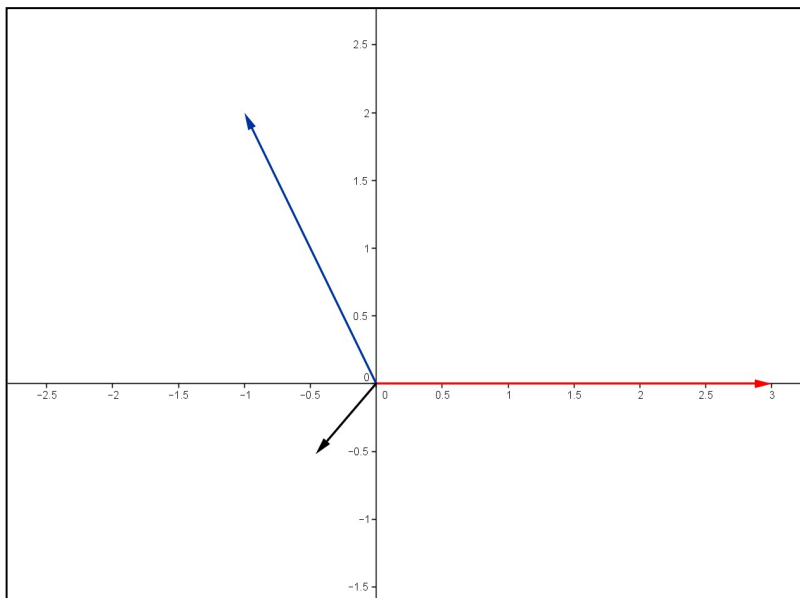
**Componentes: Hellen Rigo  
Gabriel**

# Sistemas Hexafásicos

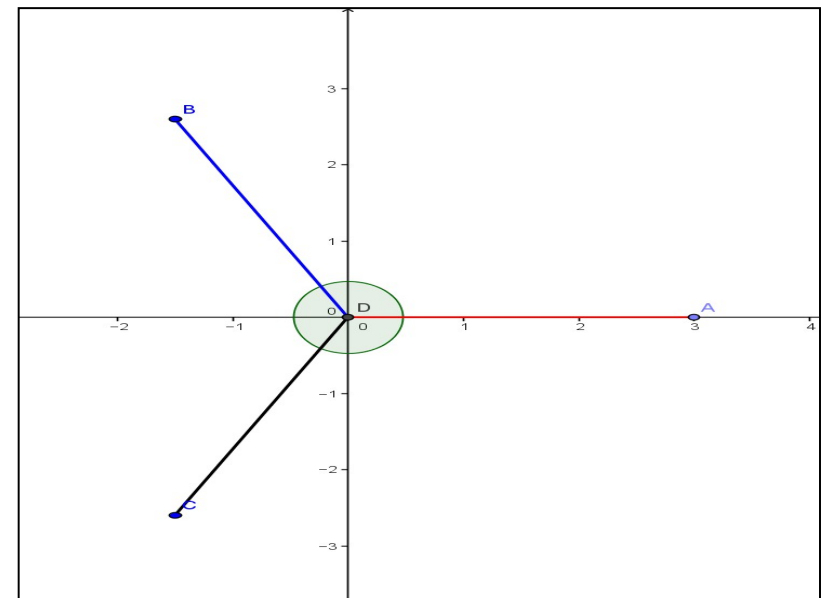
- ▶ Estudo de sistemas assimétricos;
    - Componentes simétricas;
  - ▶ Sistemas polifásicos;
    - Sistemas Tetrafásicos;
      - Componentes simétricas;
      - Matriz transferência;
      - Principais características;
- 

# Estudo de sistemas assimétricos

- ▶ Sistema Assimétrico– Sistema no qual as grandezas(tensão ou corrente) possuem módulos e/ou ângulos fasoriais diferentes.



Sistema Assimétrico



Sistema Simétrico

# Estudo de sistemas assimétricos – Componentes Simétricas

- ▶ Muitas vezes quando nos deparamos com um estudo de um caso assimétrico precisamos utilizar uma representação de Componentes Simétricos para a resolução.

- ▶ O que são Componentes Simétricas?

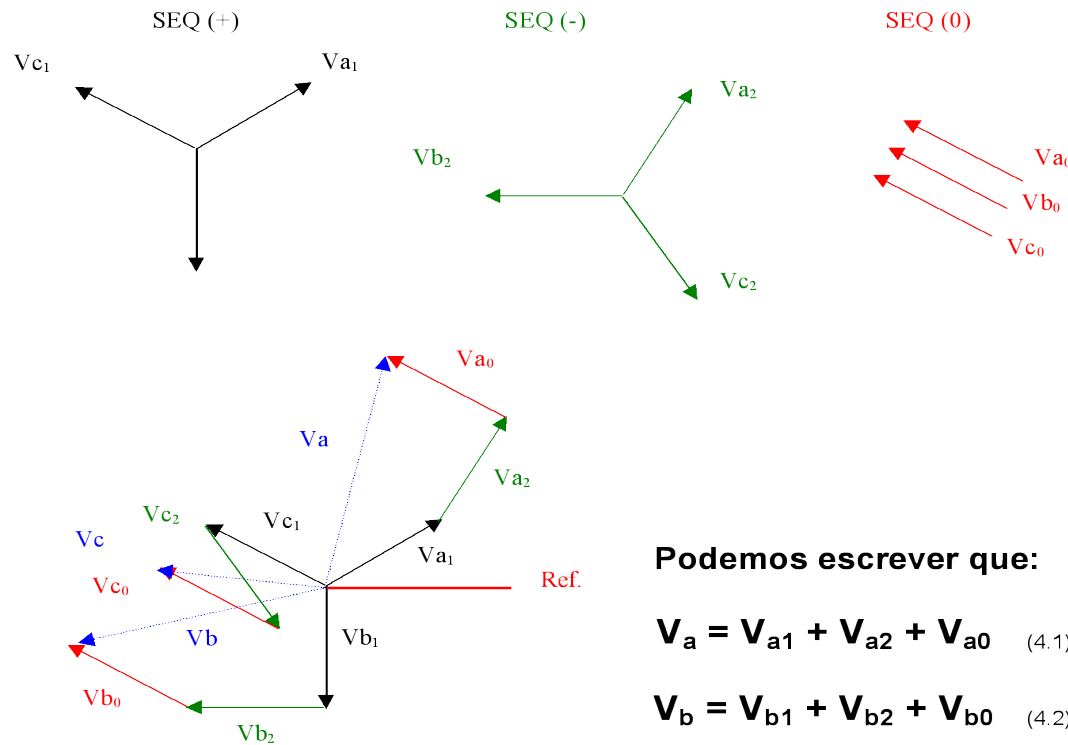
Nada mais é que a decomposição de um sistema  $n$ -fásico assimétrico em uma soma de  $n$  sistemas simétricos.

# Estudo de sistemas assimétricos – Componentes Simétricas

- ▶ Para um sistema trifásico assimétrico temos três componentes simétricas o definindo.
- ▶ Essas três componentes de sequência são:
  - Positiva – De natureza direta, com os vetores na mesma direção que os do sistema original.
  - Negativa – De natureza inversa, com os vetores em oposição a direção do sistema original.
  - Zero – De natureza Homopolar, ou seja, todos os

# Estudo de sistemas assimétricos – Componentes Simétricas

- ▶ Abaixo temos exemplos de componentes de sequência:



Podemos escrever que:

$$V_a = V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} \quad (4.1)$$

$$V_b = V_{b1} + V_{b2} + V_{b0} \quad (4.2)$$

$$V_c = V_{c1} + V_{c2} + V_{c0} \quad (4.3)$$

# Estudo de sistemas assimétricos – Componentes Simétricas

- ▶ Para equacionarmos as componentes vamos definir um fator de defasagem chamado de “a”, onde:



- ▶ A defasagem imposta por “a” será, para um sistema n-fásico, de  $\theta = (360^\circ/n)$ .
- ▶ Para este caso teremos  $\theta = 120^\circ$
- ▶ Assim podemos escrever as grandezas de corrente do circuito da seguinte forma matricial:

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} I_0 \\ I_+ \\ I_- \end{bmatrix}$$

# Estudo de sistemas assimétricos – Componentes Simétricas

- ▶ Ou da forma inversa as componentes de sequencia da seriam seguinte forma matricial:

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_+ \\ I_- \end{bmatrix} = \frac{1}{3} * \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}$$

- ▶ Podemos chamar a matriz:  $\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}$  de operador T

# Estudo de sistemas assimétricos – Componentes Simétricas

- ▶ Ficamos então com duas equações matriciais:

$$I_L = T * I_s \qquad I_s = \frac{1}{3} * T^{-1} * I_L$$

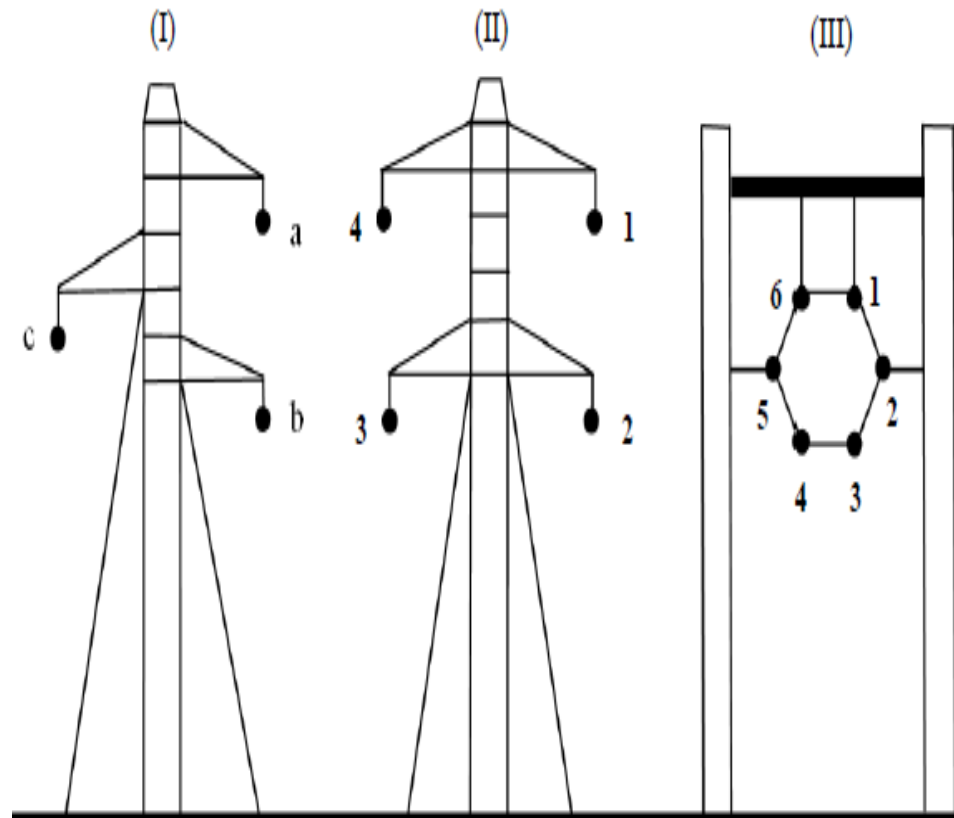
# Estudo de sistemas assimétricos polifásicos

- ▶ O sistema polifásico é considerado uma alternativa à elevação de tensão, bem como aumento de potência transferida de uma dada LT para uma mesma faixa de segurança.
- ▶ Os sistemas tetrafásicos geram um maior impacto nas configurações já existentes uma vez que se fazem necessárias instalações de transformadores Scott ou Le Blanc para sua implementação.
- ▶ Já o sistema hexafásico se torna uma alternativa boa, pois a maioria das linhas urbanas são de circuito duplo, assim tornando as condições para este tipo de configurações mais facilitado.

# Estudo de sistemas assimétricos polifásicos

- ▶ Temos outros tipos de sistemas com número superior a 3 de fases, como:

- Sistema tetrafásico (II);
- Sistema hexafásico(III);
- Entre outros...



# Estudo de sistemas assimétricos polifásicos

## Sistema Tetrafásico

### ▶ Sistema tetrafásico assimétrico:

- Será composto por 4 sistemas simétricos tetrafásicos, sendo:
  - Um sistema homopolar (Sequência zero), defasagem de  $0 \cdot \pi/2 = 0^\circ$ ;
  - Um sistema tetrafásico direto (Sequência um), defasagem de  $1 \cdot \pi/2 = 90^\circ$ ;
  - Um sistema difásicos homopolares em oposição de fase (Sequência dois), defasagem de  $2 \cdot \pi/2 = 180^\circ$ ;

# Estudo de sistemas assimétricos polifásicos

## Sistema Tetrafásico

- ▶ Diagramas de sequencia do Sistema tetrafásico assimétrico:

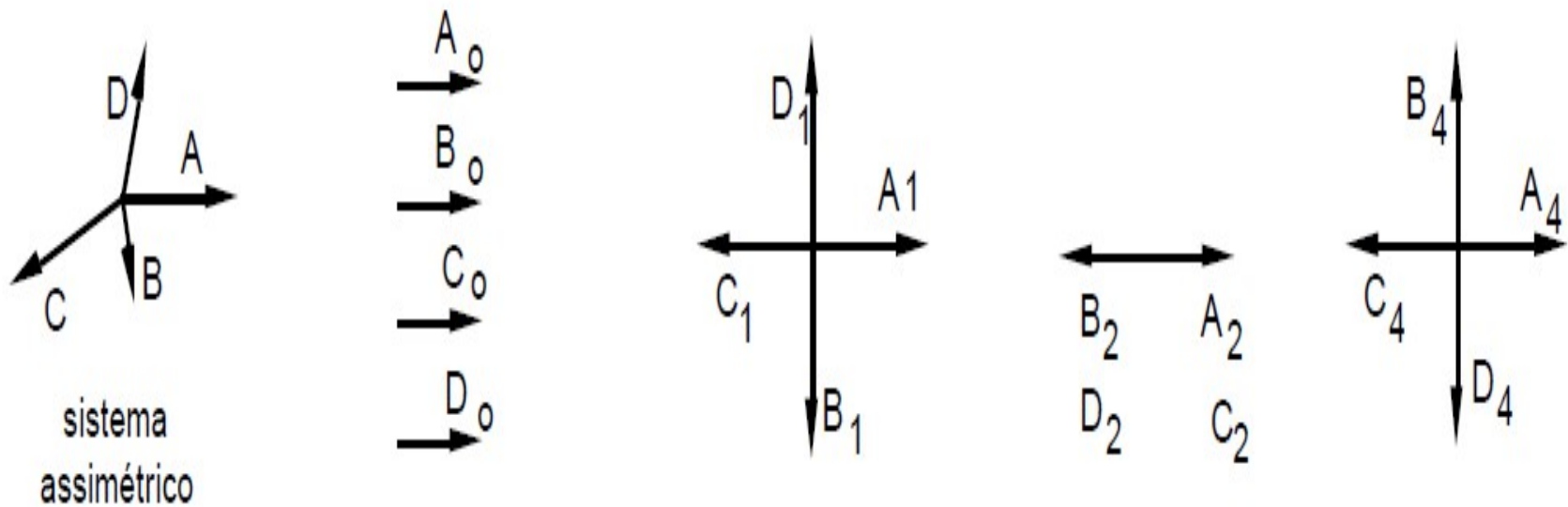


Fig. 1.7 — Sistema tetrafásico assimétrico e os quatro sistemas componentes simétricos

# Estudo de sistemas assimétricos polifásicos

## Sistema Tetrafásico

- ▶ Através do operador “a” utilizado no estudo de sistemas trifásicos podemos modelar a matriz T de transferência seguindo os mesmos moldes:
- ▶ Sistema tetrafásico:

$$T = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^3 & a^2 & a \\ 1 & a^2 & 1 & a^2 \\ 1 & a & a^2 & a^3 \end{pmatrix} \quad T^{-1} = \frac{1}{4} * \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 & a^3 \\ 1 & a^2 & 1 & a^2 \\ 1 & a^3 & a^2 & a \end{pmatrix}$$

- ▶ Onde “a” será  $360^\circ/4 = 1 \angle 90^\circ = j$

# Estudo de sistemas assimétricos polifásicos

## Sistema Tetrafásico

- ▶ O sistema tetrafásico é utilizado através de uma transformação trifásico equilibrado-tetrafásico – trifásico equilibrado.



- ▶ Essa configuração é obtida através de uma ligação Scott ou Le Blanc.

# Estudo de sistemas assimétricos polifásicos

## Sistema Tetrafásico

### ► Principais características do sistema tetrafásico:

- As disposições dos condutores de fases das LT's tetrafásicas formam dois sistemas  $2\phi$  independentes simétricos, onde as fases de corrente e tensão são opostas para cada sistema
- No STT quando ocorrem falhas  $1\phi$  ou  $2\phi$ , os dois condutores adjacentes que apresentarem defeitos ou possíveis falhas do próprio condutor são desligados, e os condutores restantes permanecem operando normalmente;
- Confiabilidade da transmissão no caso de falhas  $1\phi$ , reduzindo o risco de ocorrer blackouts (estatísticas comprovam que grandes blackouts acontecem em sistemas de transmissão a partir de

# Estudo de sistemas assimétricos polifásicos

## Sistema Tetrafásico

- ▶ A principal desvantagem :
  - Complexidade para instalação do equipamento  $3\phi-4\phi-3\phi$  na extremidade da LT;
  - Elevação dos custos do sistema  $4\phi$  em detrimento ao sistema  $3\phi$ .

# Estudo de sistemas assimétricos polifásicos

## Sistema Tetrafásico

### ► Conclusões:

- A instalação de um sistema  $4\phi$  é custosa dada a instalação dos trafos especiais;
- No quesito de transmissão a longas distâncias o sistema  $4\phi$  é bastante competitivo em relação ao  $3\phi$ , fazendo-se assim essa escolha quando o custo do trafo é recuperado no comprimento total da linha;

# Estudo de sistemas assimétricos polifásicos

## Sistema Hexafásico

- ▶ Assim como vimos no sistema 4φ o sistema 6φ terá 6 componentes simétricas, que são:
  - Um sistema 6φ homopolar (Sequência zero), defasagem de  $0 \cdot \pi/3 = 0^\circ$ ;
  - Um sistema 6φ direto (Sequência um) , defasagem de  $1 \cdot \pi/3 = 60^\circ$ ;
  - Dois sistemas 3φ diretos sobrepostos (Sequencia dois), defasagem de  $2 \cdot \pi/3 = 120^\circ$ ;
  - Um sistema 3φ homopolares em oposição de fase (Sequencia três), defasagem de  $3 \cdot \pi/3 = 180^\circ$ ;

# Estudo de sistemas assimétricos polifásicos

## Sistema Hexafásico

- ▶ Diagramas de sequencia do Sistema 6 $\phi$  assimétrico:

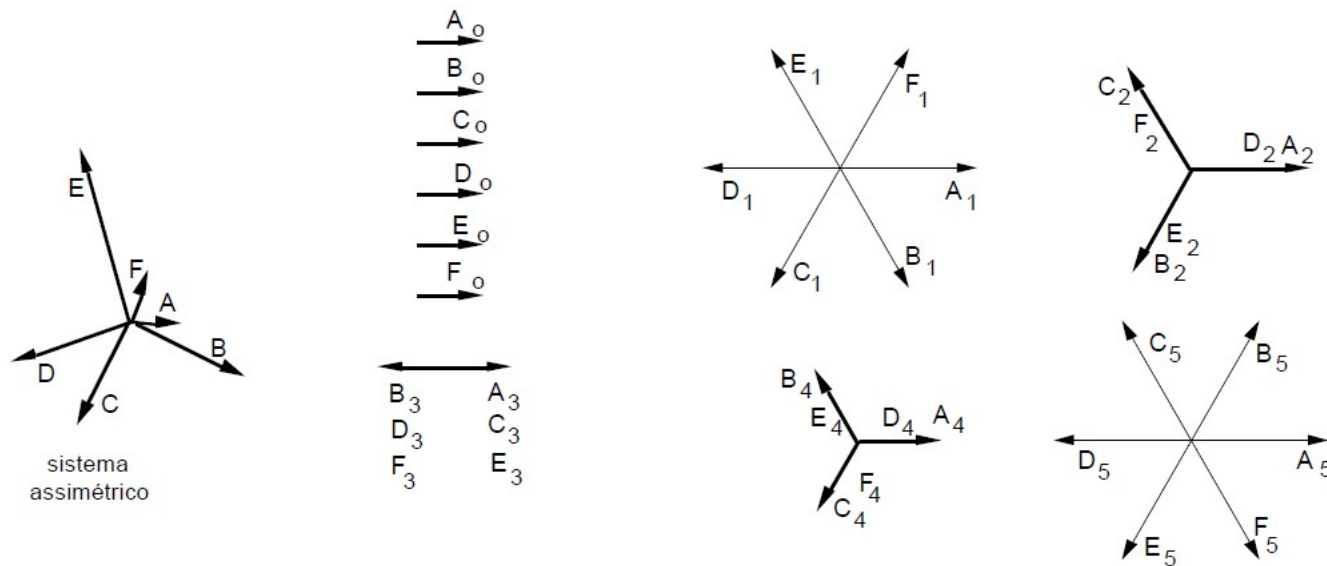


Fig. 1.7 — Sistema hexafásico assimétrico e os seis sistemas componentes simétricos

# Estudo de sistemas assimétricos polifásicos

## Sistema Hexafásico

- ▶ Através do operador “a” utilizado no estudo de sistemas trifásicos podemos modelar a matriz T de transferência seguindo os mesmos moldes:

- ▶ Sistema Hexafásico:

$$T = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^5 & a^4 & a^3 & a^2 & a \\ 1 & a^4 & a^2 & 1 & a^4 & a^2 \\ 1 & a^3 & 1 & a^3 & 1 & a^3 \\ 1 & a^2 & a^4 & 1 & a^2 & a^4 \\ 1 & a & a^2 & a^3 & a^4 & a^5 \end{pmatrix} \quad T^{-1} = \frac{1}{6} * \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 & a^3 & a^4 & a^5 \\ 1 & a^2 & a^4 & 1 & a^2 & a^4 \\ 1 & a^3 & 1 & a^3 & 1 & a^3 \\ 1 & a^4 & a^2 & 1 & a^4 & a^2 \\ 1 & a^5 & a^4 & a^3 & a^2 & a \end{pmatrix}$$

- ▶ Onde “a” será  $360^\circ/6 = 1 \angle 60^\circ$

# Tipos de configuração 6φ

- ▶ Até que se chegássemos a uma disposição ótima dos condutores foram feitos cálculos práticos a fim de visualizar os efeitos da disposição geométrica nas características da LT.

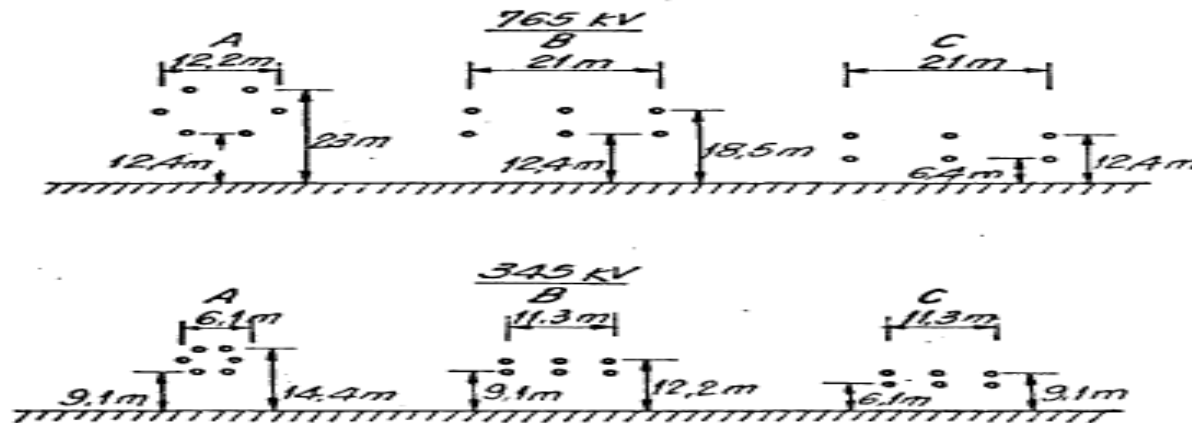


FIGURA 6 - Configurações A, B e C<sup>(9)</sup>

- ▶ Foram utilizadas as configurações acima para a análise:
  - A - Configuração hexagonal
  - B - Introdução das três fases sobre as existentes
  - C - Introdução das três fases sob as existentes

# Tipos de configuração 6φ

- Para cada uma das configurações do slide anterior foram feitos os cálculos de Gradiente e Reatância de sequência positiva e Impedância de surto, abaixo seguem os resultados:

| Tensão do Sistema | Config. | Gradiente do Condutor |      | Gradiente do Solo |      |
|-------------------|---------|-----------------------|------|-------------------|------|
|                   |         | kV/cm                 | P.U. | kV/cm             | P.U. |
| 345 kV            | A       | 20,7                  | 1    | 66                | 1    |
| 345 kV            | B       | 23,4                  | 1,13 | 57                | 0,86 |
| 345 kV            | C       | 23,4                  | 1,13 | 105               | 1,59 |
| 765 kV            | A       | 25                    | 1,00 | 141               | 1    |
| 765 kV            | B       | 27,7                  | 1,11 | 120               | 0,85 |
| 765 kV            | C       | 28,9                  | 1,16 | 312               | 2,21 |

| Tensão do Sistema | Config. | X+ ( $\Omega$ /km) | Zs  |
|-------------------|---------|--------------------|-----|
| 345 kV            | A       | 0,308              | 245 |
| 345 kV            | B       | 0,334              | 265 |
| 345 kV            | C       | 0,331              | 263 |
| 765 kV            | A       | 0,284              | 226 |
| 765 kV            | B       | 0,308              | 245 |
| 765 kV            | C       | 0,308              | 245 |

# Tipos de configuração 6 $\phi$

- ▶ Verificamos que o gradiente na superfície do condutor é sempre menor para o caso da linha hexafásica com a configuração A.
- ▶ Verificamos também que o Gradiente para o solo segue a linha contrária tendo seu maior valor na configuração A.
- ▶ No caso da Zs podemos ver que ele sempre tem seus menores valores na configuração A gerando assim uma carga de surto elevada.
- ▶ Essas informações práticas nos levam a considerar a alternativa de transformação do circuito duplo para o sistema hexafásico.

# Matriz de Impedância Série

Dada na notação matricial por:

$$\begin{bmatrix} \frac{d\bar{V}_1}{dx} \\ \frac{d\bar{V}_2}{dx} \\ \vdots \\ \frac{d\bar{V}_i}{dx} \\ \vdots \\ \frac{d\bar{V}_n}{dx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} & z_{1i} & \dots & z_{1n} \\ z_{21} & z_{22} & z_{2i} & \dots & z_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ z_{i1} & z_{i2} & z_{ii} & \dots & z_{in} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ z_{n1} & z_{n2} & z_{ni} & \dots & z_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{I}_1 \\ \bar{I}_2 \\ \vdots \\ \bar{I}_i \\ \vdots \\ \bar{I}_n \end{bmatrix}$$

onde:  $\bar{V}_i$  = fasor tensão do condutor  $i$  à terra

$\bar{I}_i$  = fasor corrente no condutor  $i$

Ou, em notação compacta:

$$-\frac{d\bar{V}}{dx} = [Z] [\bar{I}]$$

# Matriz de Impedância Série

- ▶  $Z_{ij} = R_{ij} + j\omega L_{ij}$  representa a impedância própria série por unidade de comprimento do loop formado pelo condutor  $i$  e o retorno pelo solo.

- ▶  $Z_{ij} = R_{ij} + j\omega L_{ij}$  é a impedância mútua série por unidade de comprimento, entre os condutores  $i$  e  $j$  que determina a tensão induzida no condutor  $j$  quando flui uma corrente no condutor  $i$ .

$$\begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{1i} & \dots & Z_{1n} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{2i} & \dots & Z_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{i1} & Z_{i2} & Z_{ii} & \dots & Z_{in} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{n1} & Z_{n2} & Z_{ni} & \dots & Z_{nn} \end{bmatrix}$$

# Matriz de Admitância Shunt

As tensões em cada condutor de uma LT são funções das cargas existentes e sua relação vale:

$$|V| = |P| |Q| \quad |Q| = |P|^{-1} |V|$$

$|P|$  é a matriz de coeficiente de potencial de maxwell, real e simétrica.

# Componentes simétricas

No que diz respeito as linhas hexafasicas o teorema de Fortescue estabelece que seis fasores desequilibrados (corrente ou tensao), podem ser transformados em um sistema de seis fasores equilibrados de acordo com as

- |    |                                             |
|----|---------------------------------------------|
| 1) | Componente de sequência primeira (positiva) |
| 2) | " " " segunda                               |
| 3) | " " " terceira                              |
| 4) | " " " quarta                                |
| 5) | " " " quinta (negativa)                     |
| 6) | " " " sexta (zero)                          |

# Componentes simétricas

Portanto, sendo  $V_a$ ,  $V_b$ ,  $V_c$ ,  $V_d$ ,  $V_e$ ,  $V_f$ , tensões desequilibradas, pode-se expressar em termos de suas componentes, através das seguintes

$$V_a = V_{a1} + V_{a2} + V_{a3} + V_{a4} + V_{a5} + V_{a0}$$

$$V_b = V_{b1} + V_{b2} + V_{b3} + V_{b4} + V_{b5} + V_{b0}$$

$$V_c = V_{c1} + V_{c2} + V_{c3} + V_{c4} + V_{c5} + V_{c0}$$

$$V_d = V_{d1} + V_{d2} + V_{d3} + V_{d4} + V_{d5} + V_{d0}$$

$$V_e = V_{e1} + V_{e2} + V_{e3} + V_{e4} + V_{e5} + V_{e0}$$

$$V_f = V_{f1} + V_{f2} + V_{f3} + V_{f4} + V_{f5} + V_{f0}$$

# Componentes simétricas

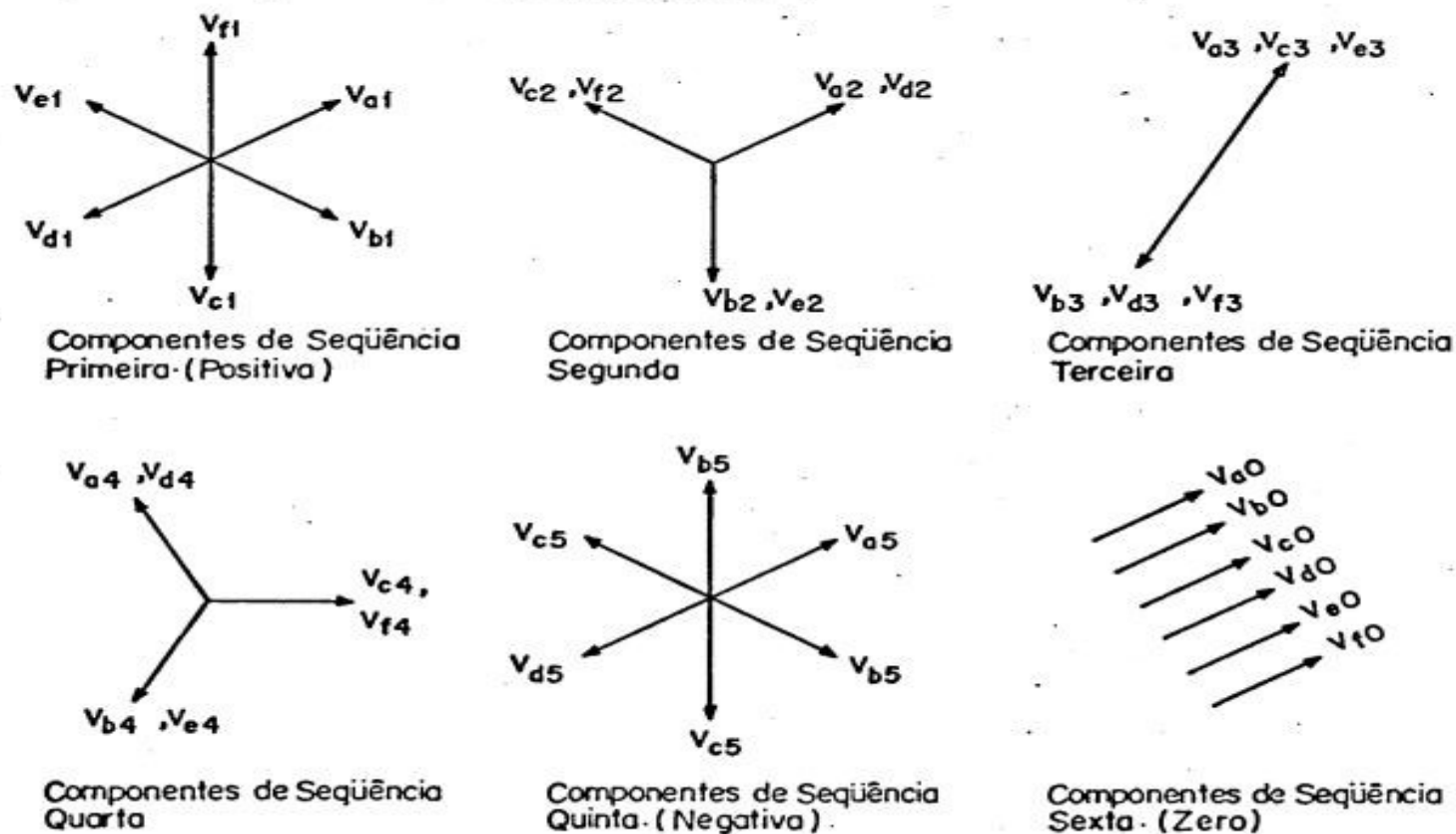


FIGURA 8 - Conjuntos de Fasores Equilibrados (<sup>14</sup>)

# Componentes simétricas

Por definição  $b = e^{j\frac{\pi}{3}}$

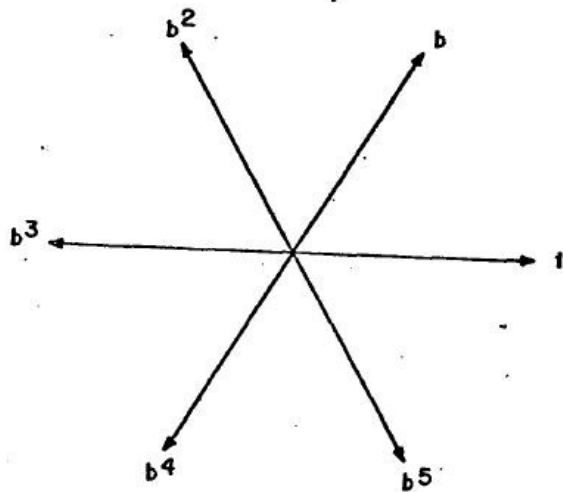


FIGURA 9 - Fasores das Potências do Operador "b"

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \\ V_d \\ V_e \\ V_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & b^5 & b^4 & b^3 & b^2 & b \\ 1 & b^4 & b^2 & 1 & b^4 & b^2 \\ 1 & b^3 & 1 & b^3 & 1 & b^3 \\ 1 & b^2 & b^4 & 1 & b^2 & b^4 \\ 1 & b & b^2 & b^3 & b^4 & b^5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \\ V_{a3} \\ V_{a4} \\ V_{a5} \end{bmatrix}$$

ou na forma matricial compacta  $\bar{V}_f = |T6| \bar{V}_s$

# Análise de curto circuito

TABELA 4 - Tipos de Curto-Circuitos e Combinações de Número de Fases e/ou Neutro em Sistemas Hexafásicos -

| Tipo de Curto          | Nº Total de Combinações | Nº Significativo de Combinações | Fases em curto p/as Combinações significativas - |
|------------------------|-------------------------|---------------------------------|--------------------------------------------------|
| Seis fases             | 1                       | 1                               | a-b-c-d-e-f                                      |
| Seis fases ao Neutro   | 1                       | 1                               | a-b-c-d-e-f-n                                    |
| Cinco fases            | 6                       | 1                               | a-b-c-d-e                                        |
| Cinco fases ao Neutro  | 6                       | 1                               | a-b-c-d-e-n                                      |
| Quatro fases           | 15                      | 3                               | a-b-c-d<br>a-b-d-f<br>b-c-e-f                    |
| Quatro fases ao Neutro | 15                      | 3                               | a-b-c-d-n<br>a-b-d-f-n<br>b-c-e-f-n              |
| Três fases             | 20                      | 3                               | a-b-c<br>a-b-d<br>b-d-f                          |
| Três fases ao Neutro   | 20                      | 3                               | a-b-c-n<br>a-b-d-n<br>b-d-f-n                    |
| Duas fases             | 15                      | 3                               | b-c<br>a-d<br>b-f                                |
| Duas fases ao Neutro   | 15                      | 3                               | b-c-n<br>a-d-n<br>b-f-n                          |
| Fase ao Neutro         | 6                       | 1                               | a - n                                            |
| <b>TOTAL</b>           | <b>120</b>              | <b>23</b>                       |                                                  |

TABELA 5 - Tipos de Curto-Circuitos e Combinações de Número de Fases e/ou Neutro em Sistemas Trifásicos -

| Tipo de Curto        | Nº Total de Combinações | Nº Significativo de Combinações | Fases em curto p/as Combinações significativas - |
|----------------------|-------------------------|---------------------------------|--------------------------------------------------|
| Três fases           | 1                       | 1                               | a-b-c                                            |
| Três fases ao Neutro | 1                       | 1                               | a-b-c-n                                          |
| Duas fases           | 3                       | 1                               | b-c                                              |
| Duas fases ao Neutro | 3                       | 1                               | b-c-n                                            |
| Fase ao Neutro       | 3                       | 1                               | a - n                                            |
| <b>TOTAL</b>         | <b>11</b>               | <b>5</b>                        |                                                  |

# Análise de Alguns tipos de Curto

- ▶ Curto circuito Hexafásico:

Pouca probabilidade de ocorrência, análise simples, pois se trata de um curto simétrico, assim como no caso do trifásico, somente a rede de sequência positiva faz parte do cálculo

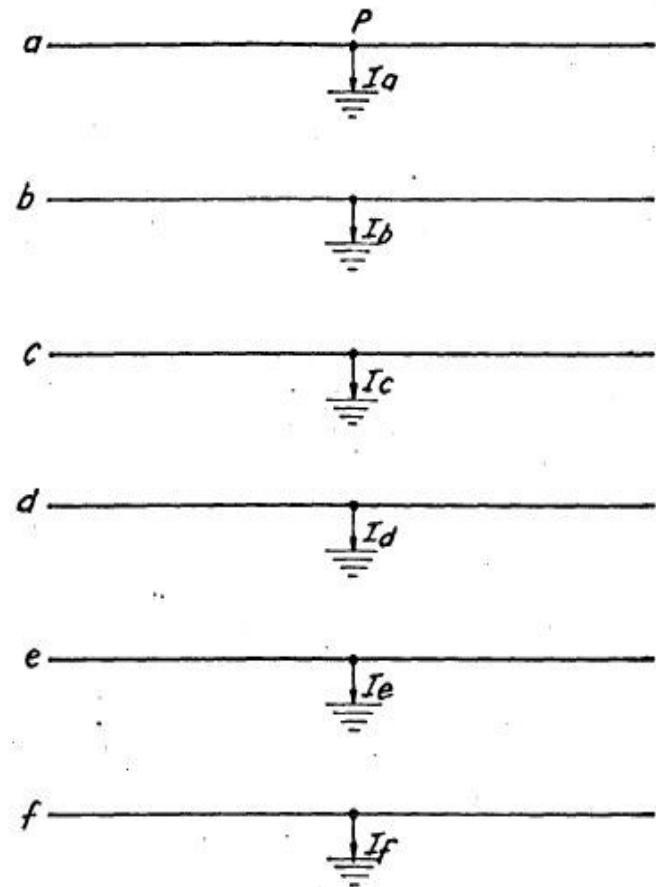


FIGURA 12- Diagrama Esquemático do Curto Hexafásico para a Terra, de uma Linha Hexafásica

# Análise de Alguns tipos de Curto

- ▶ Curto-circuito fase-terra

Mais provável de ocorrer num sistema de potência, natureza assimétrica, usar a teoria das componentes simétricas para analisá-lo.

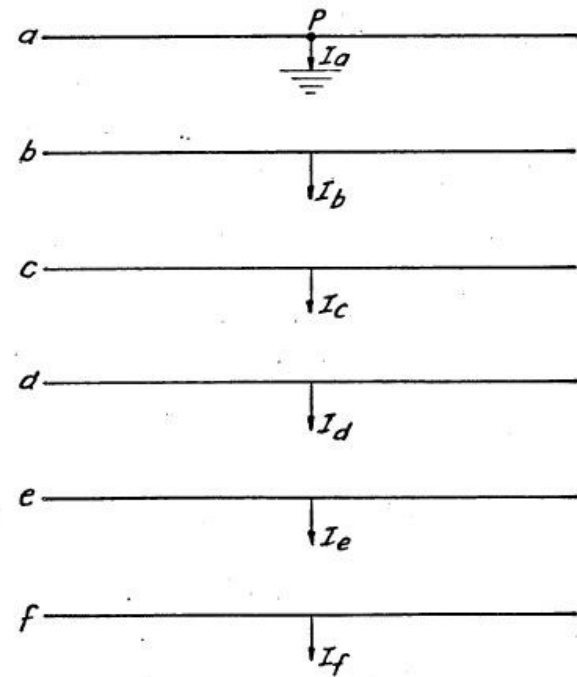


FIGURA 13- Diagrama Esquemático do Curto Fase-Terra de uma Linha Hexafásica

# Análise de Alguns tipos de Curto

## ▶ Curto-circuito fase-terra

As condições de falta são dadas pelas seguintes relações:

$$V_a = 0 \quad \text{e} \quad I_b = I_c = I_d = I_e = I_f = 0$$

Aplicando a teoria de componentes simétricas temos:

$$\begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \\ I_{a3} \\ I_{a4} \\ I_{a5} \end{bmatrix} = \frac{1}{6} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & b & b^2 & b^3 & b^4 & b^5 \\ 1 & b^2 & b^4 & 1 & b^2 & b^4 \\ 1 & b^2 & 1 & b^3 & 1 & b^3 \\ 1 & b^4 & b^2 & 1 & b^4 & b^2 \\ 1 & b^5 & b^4 & b^3 & b^2 & b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$I_{a0} = I_{a1} = I_{a2} = I_{a3} = I_{a4} = I_{a5} = \frac{I_a}{6}$$

# Análise de Alguns tipos de Curto

## ▶ Curto-circuito fase-terra

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \\ V_{a3} \\ V_{a4} \\ V_{a5} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ V'_{a1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} z_0 & & & & & \\ & z_1 & & & & \\ & & z_2 & & & \\ & & & z_3 & & \\ & & & & z_4 & \\ & & & & & z_5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a1} = I_a/6 \\ I_{a1} = I_a/6 \\ I_{a1} = I_a/6 \\ I_{a1} = I_a/6 \\ I_{a1} = I_a/6 \\ I_{a1} = I_a/6 \end{bmatrix}$$

Desenvolvendo e observando que :

$$V_a = V_{a0} + V_{a1} + V_{a2} + V_{a3} + V_{a4} + V_{a5} = \frac{I_a}{6}$$

Teremos:

$$I_{a1} = \frac{V'_{a1}}{z_0 + z_1 + z_2 + z_3 + z_4 + z_5}$$

# Análise de Alguns tipos de

## Curto-circuito fase-terra

As e  
de s

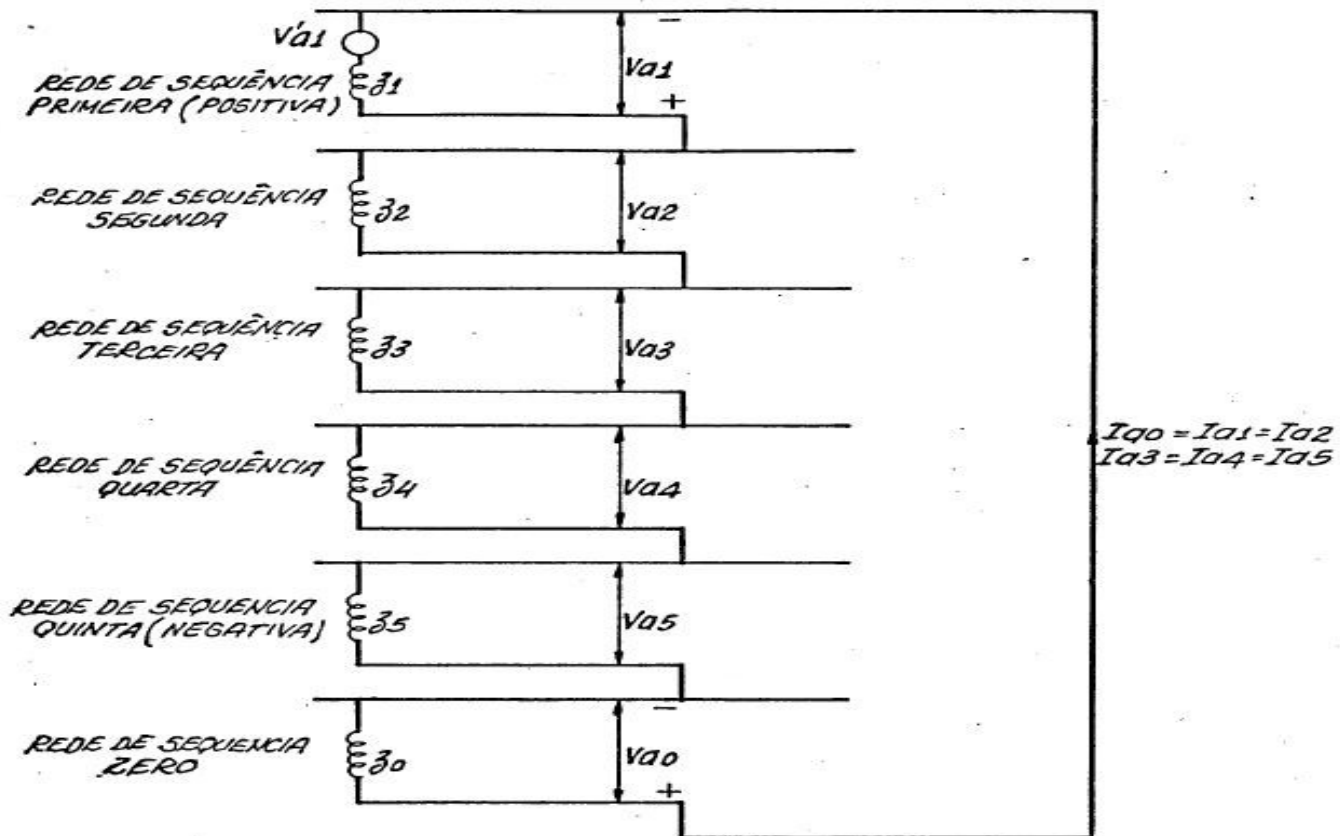
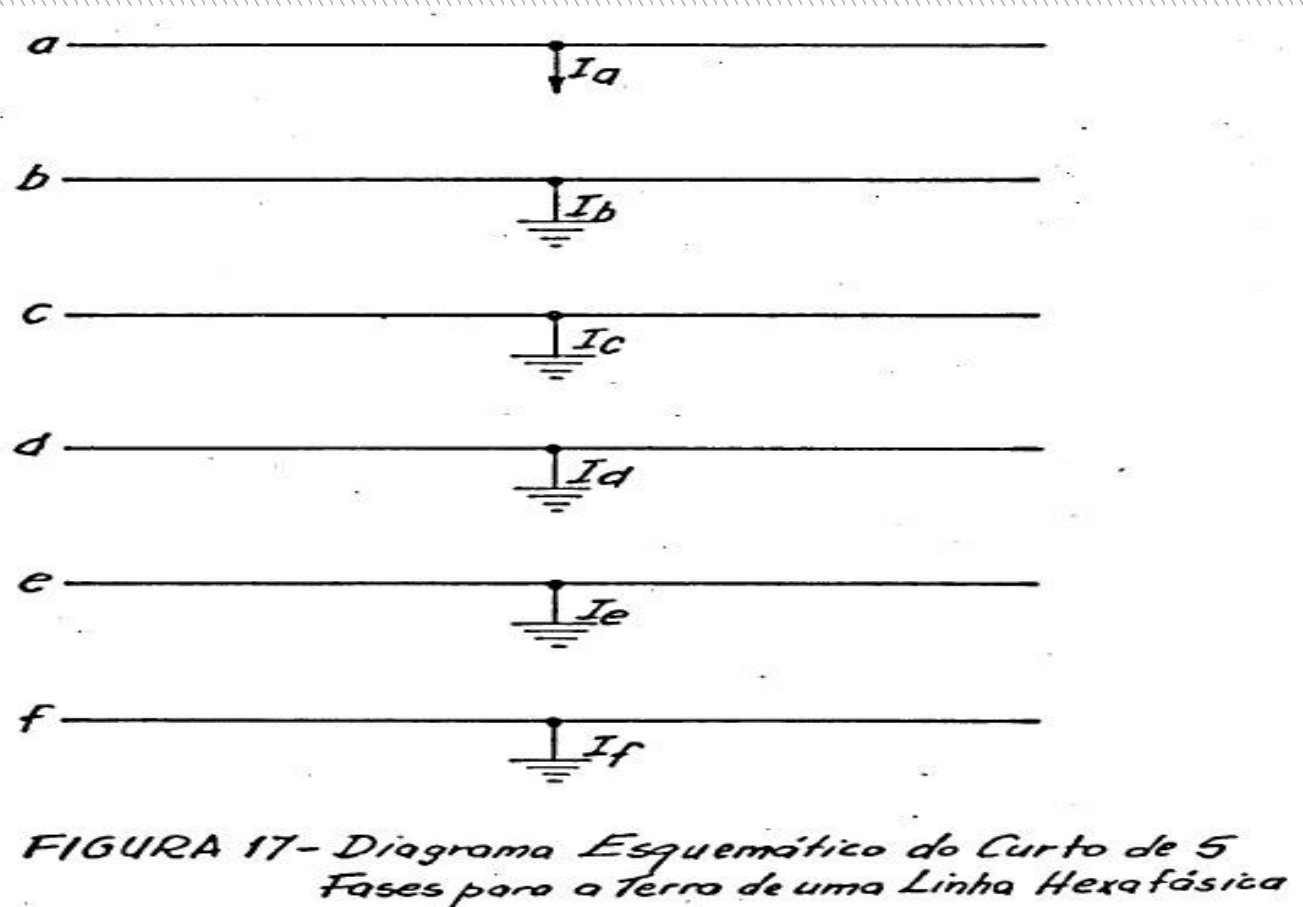


FIGURA 14- Esquema de Conexão das Redes de Sequência para Curto Fase-Terra numa Linha Hexafásica

# Análise de Alguns tipos de Curto

- ▶ Curto-circuito de 5 fases para terra.



# Análise de Alguns tipos de Curto

- Curto-circuito de 5 fases para terra.

Existem as seguintes relações:

$$I_a = 0 \quad V_b = V_c = V_d = V_e = V_f = 0$$

Portanto:

$$I_{a0} + I_{a1} + I_{a2} + I_{a3} + I_{a4} + I_{a5} = 0$$

e

$$V_{a0} = V_{a1} = V_{a2} = V_{a3} = V_{a4} = V_{a5}$$

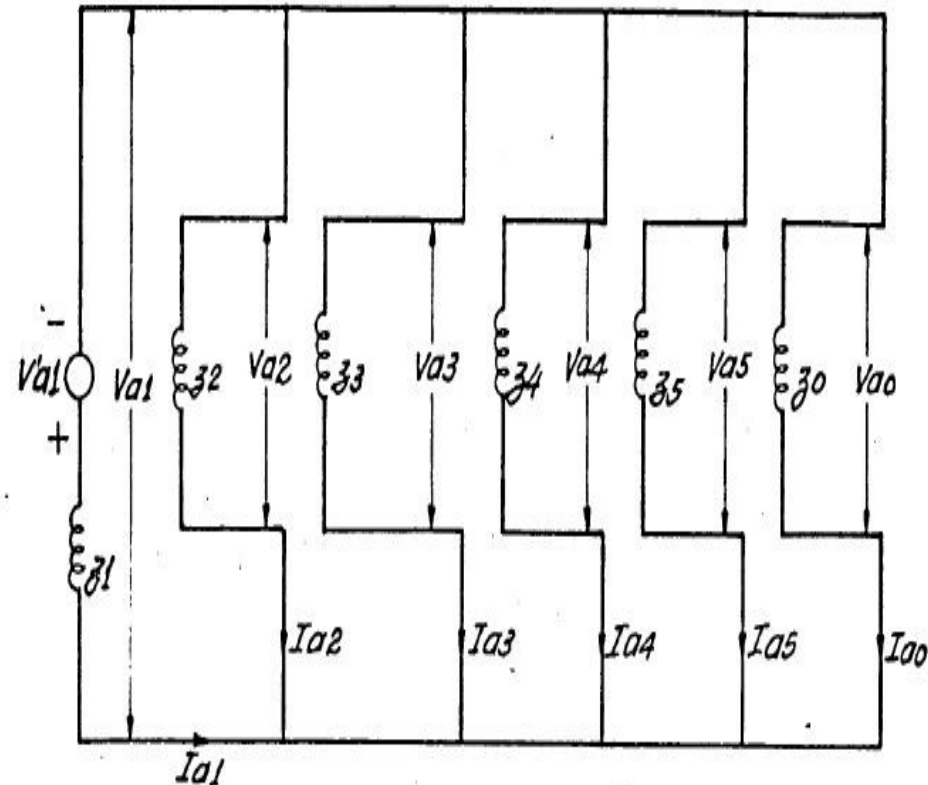


FIGURA 18 - Esquema de Conexão das Redes de Sequência para Curto 5 Fases para a Terra, de uma linha trifásica.

# Proteção

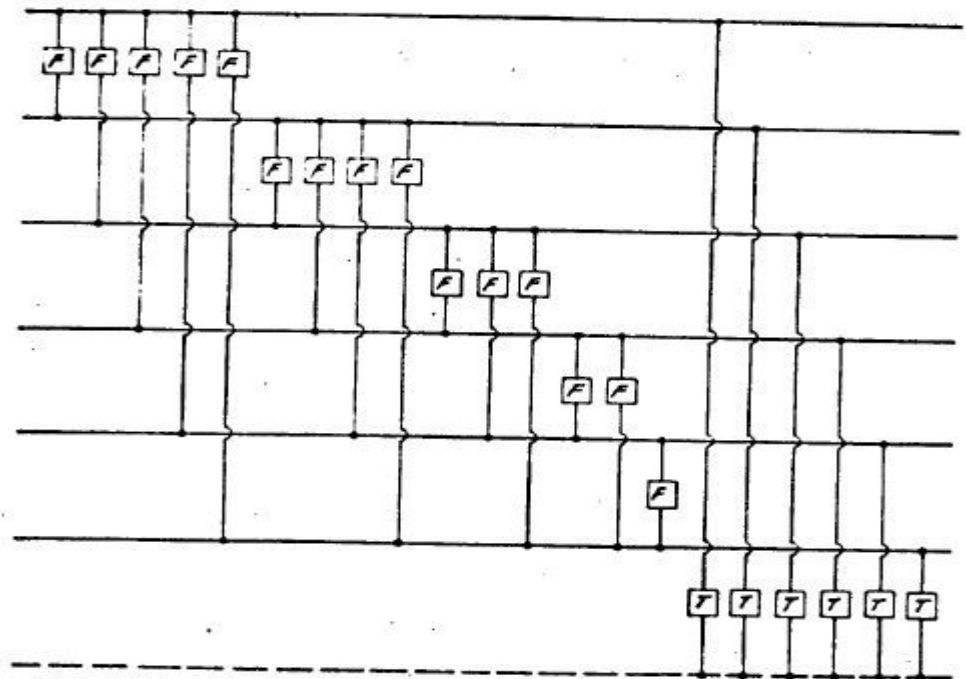
- ▶ A proteção é uma área na qual ainda há necessidades de evolução dentro das transmissões multifásicas.
  - ▶ a) Na ocorrência de um curto fase-terra, somente o circuito trifásico que envolve a fase curto-circuitada será desligado. Por exemplo, se o curto-circuito fase-terra ocorrer na fase "a", o circuito a e c será desligado permanecendo em operação o circuito b d f.
  - ▶ b) Quando ocorrer um curto-circuito fase-fase, seja por exemplo entre as fases "a" e "c", somente o circuito a e c será desligado.
  - ▶ c) No caso de um curto fase-fase que envolva os dois circuitos trifásicos, a linha trifásica inteira será desligada.

# Proteção

- ▶ A proteção também poderá ser feita por comparação de fases.

- 1) Seis relês entre fases, eletricamente defasados de  $60^\circ$ ;
- 2) Seis relês entre fases, eletricamente defasados de  $120^\circ$ ;
- 3) Três relês entre fases, eletricamente defasados de  $180^\circ$ ;
- 4) Seis relês entre cada fase e a terra

A figura 19 mostra o esquema proposto.



LEGENDA:

RELÉ DE FASE  
 RELÉ DE TERRA

FIGURA 19- Esquema de 21 Relés para Linha Trifásica

# Proteção

Estão sendo desenvolvidos estudos, visando a utilização de somente seis relés de fase e um relé de neutro para uma linha hexafásica.

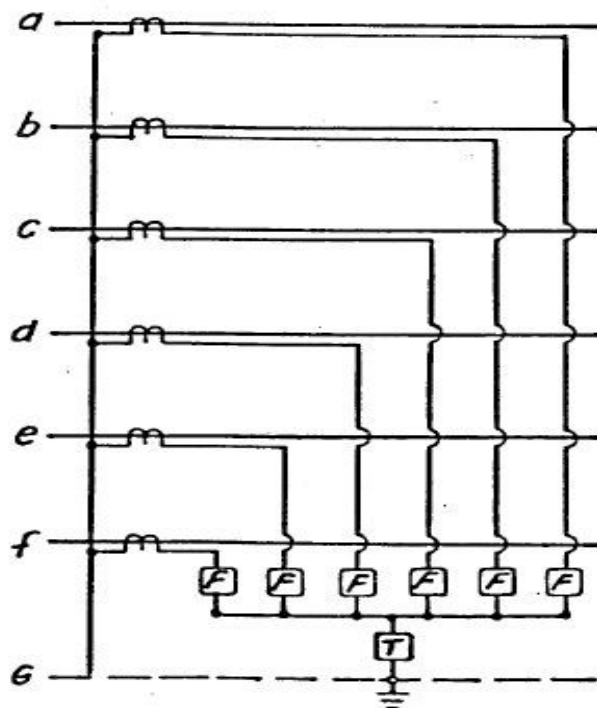


FIGURA 20 - Esquema de 7 Relés para Linha Hexafásica

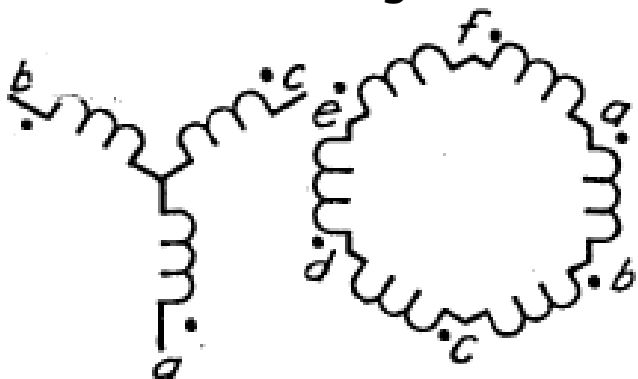
# Transformadores

- ▶ Potência, regulação e eficiência igual aos transformadores convencionais
- ▶ Diversos Tipos de Conexões

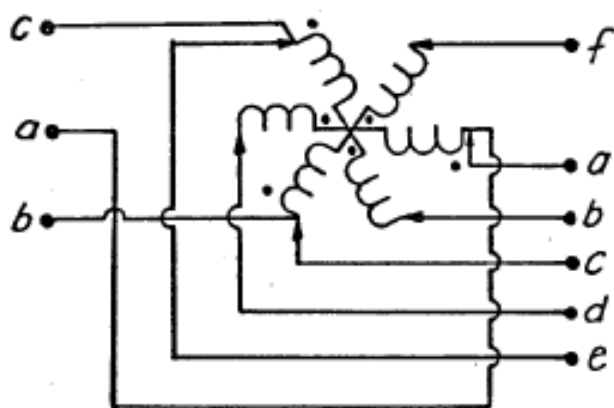
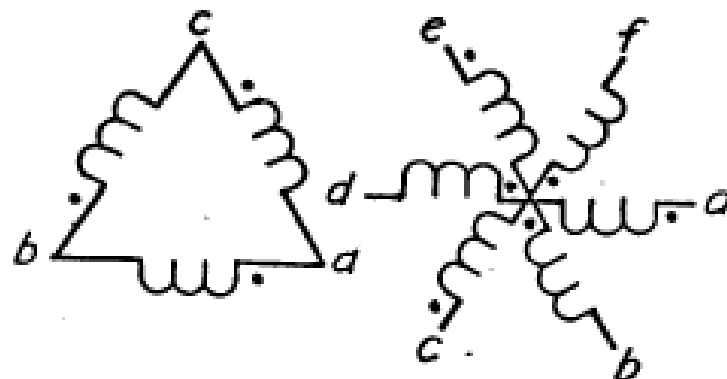
# Transformadores

- Transformador trifásico-hexafásico.

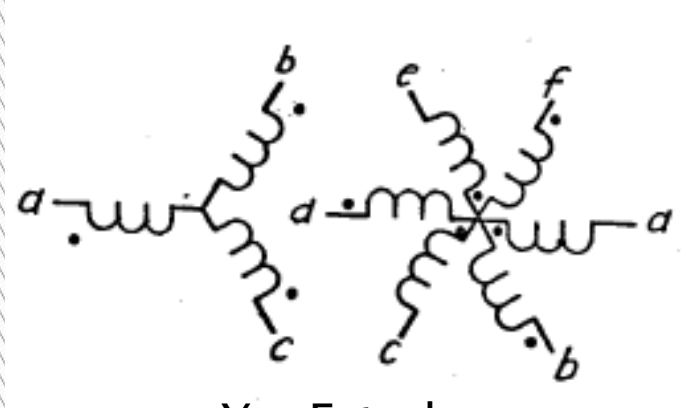
Y - Hexágono



Delta - Estrela



Autotransformador em estrela

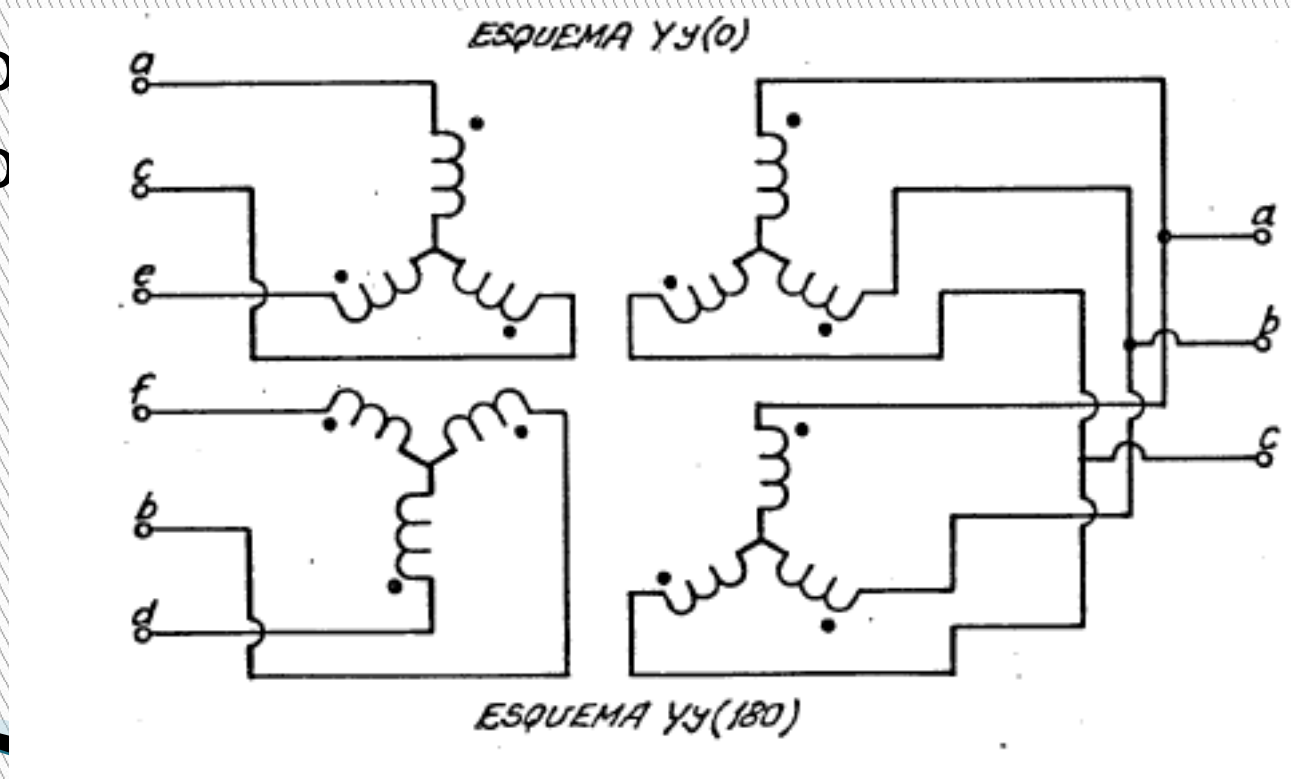


Y - Estrela

# Transformadores

- ▶ Esquema de transformação Hexafásico/Trifásico

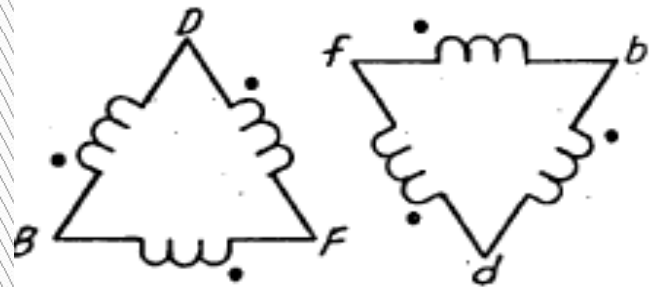
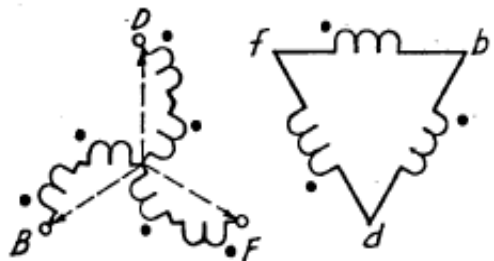
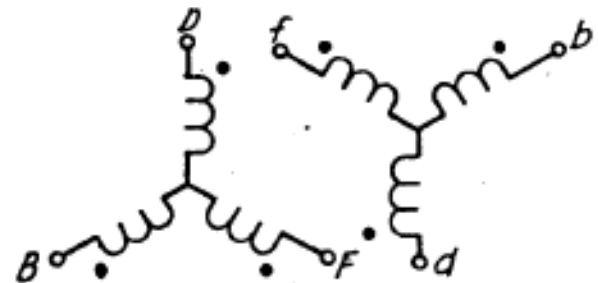
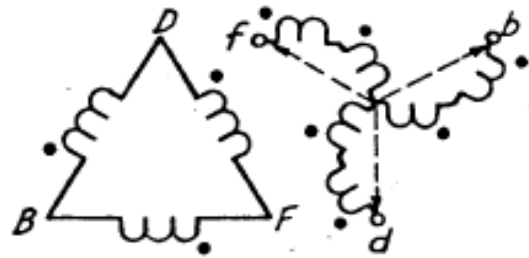
- Co
- Co



# Transformadores

## ► Conversão Hexafásico/Trifásico

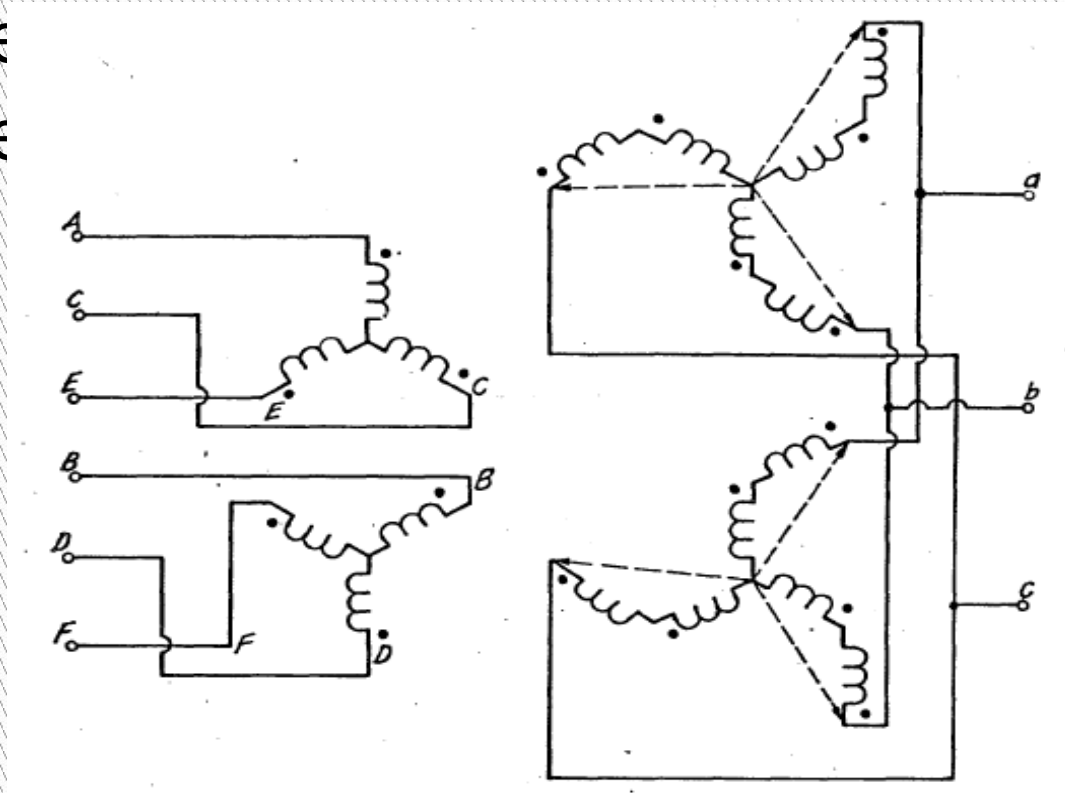
- Manter as tensões "a c e" inalteradas, sem nenhum defasamento angular e fazer girar  $180^\circ$  cada uma das fases "b d f" para ficarem em fase com as "a c e"



# Transformadores

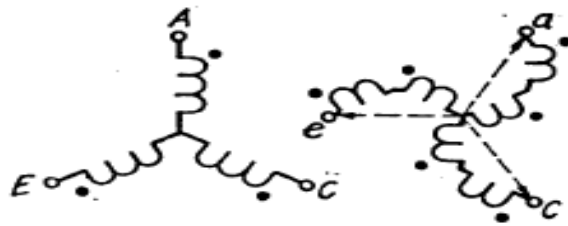
- ▶ Esquema de transformação Hexafásico/Trifásico

- Conexão
- Conexão

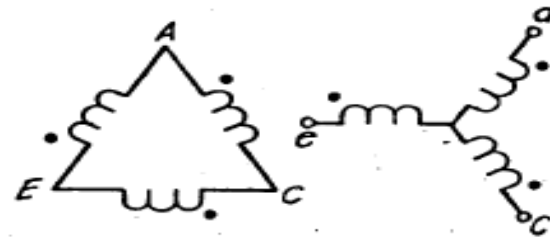


# Transformadores

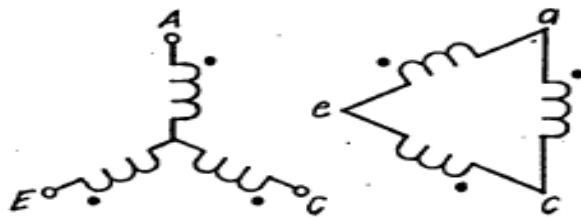
- Fazer o deslocamento angular de  $-30^\circ$  para o conjunto "a c e".



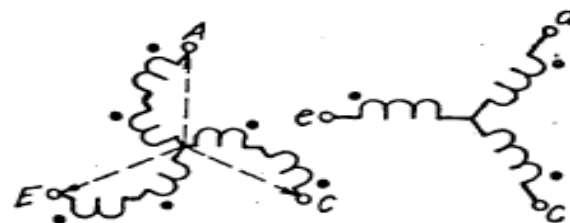
Conexão  $Y_3 (-30)$



Conexão  $D_y (-30)$



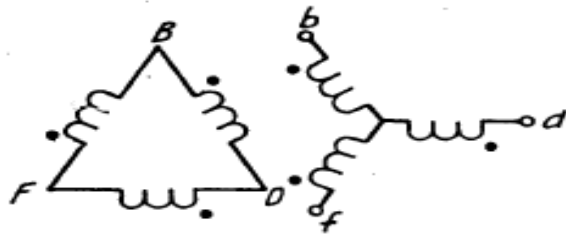
Conexão  $Y_d (-30)$



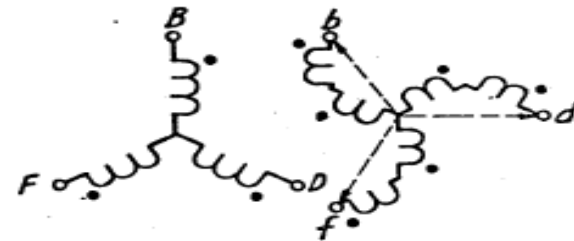
Conexão  $Z_y (-30)$

# Transformador

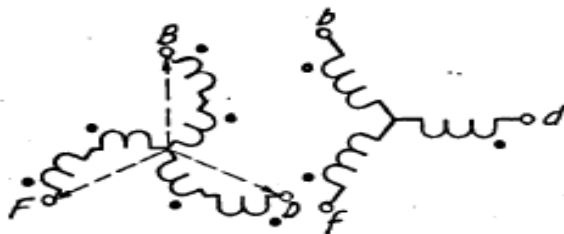
- Fazer o deslocamento angular de  $+30^\circ$ , de modo que as tensões transformadas  $ab$ ,  $cd$ ,  $ef$ , se tornem um sistema trifásico.



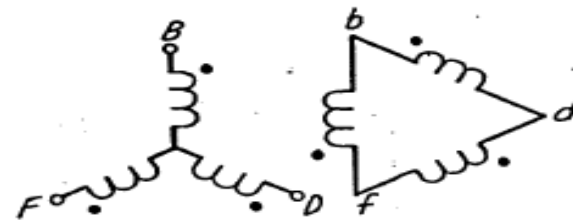
Conexão  $Dy(+30)$



Conexão  $Y3(+30)$



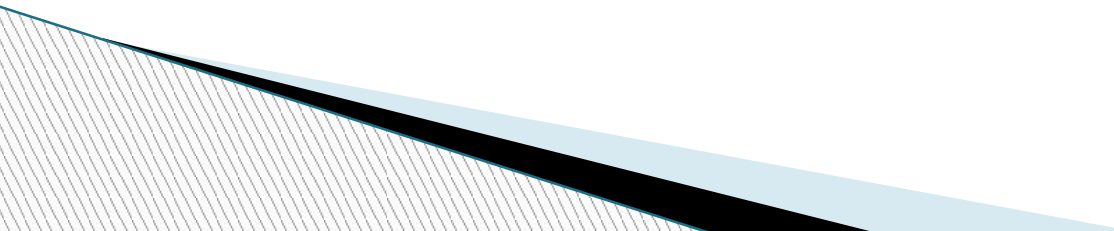
Conexão  $Zy(+30)$



Conexão  $Yd(+30)$

# Aspectos de Construção

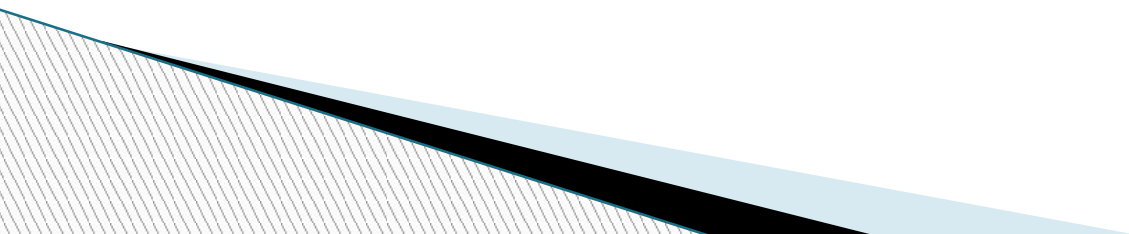
Para transformação de um circuito duplo trifásico em simples hexafásico:

- ▶ Acréscimo de unidades de isoladores nas cadeias;
  - ▶ Substituição de grampos de suspensão;
  - ▶ Substituição de conectores;
  - ▶ Colocação de anéis de guarda;
  - ▶ Retensionamento dos condutores.
- 

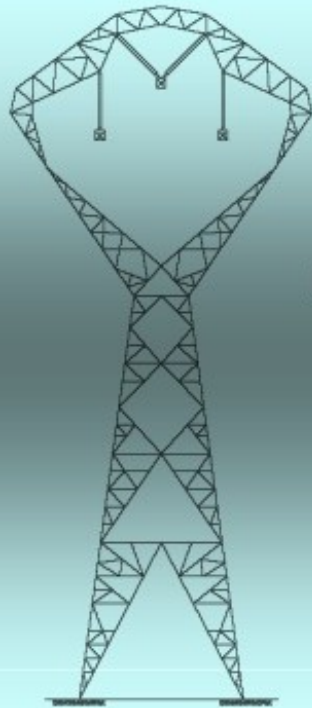
# Aspectos de Construção

Tópicos com as fases de construção de uma linha de transmissão:

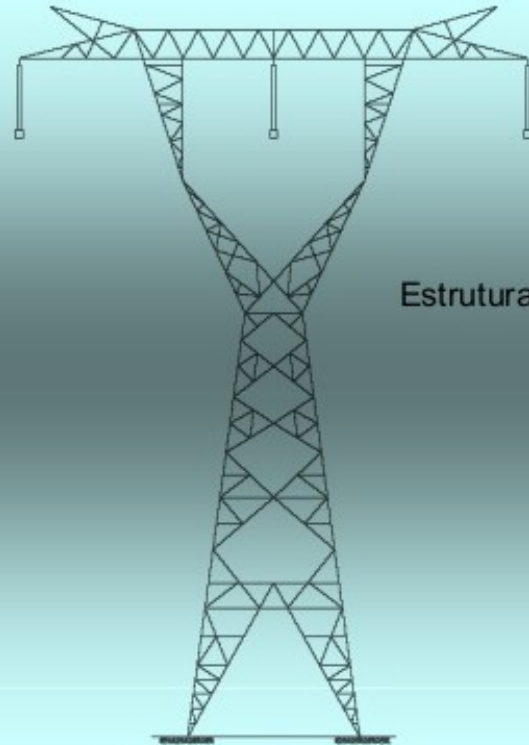
- ▶ Limpeza da faixa de segurança
- ▶ Fundações
- ▶ Montagem das estruturas
- ▶ Lançamento dos condutores



# Aspectos de Construção



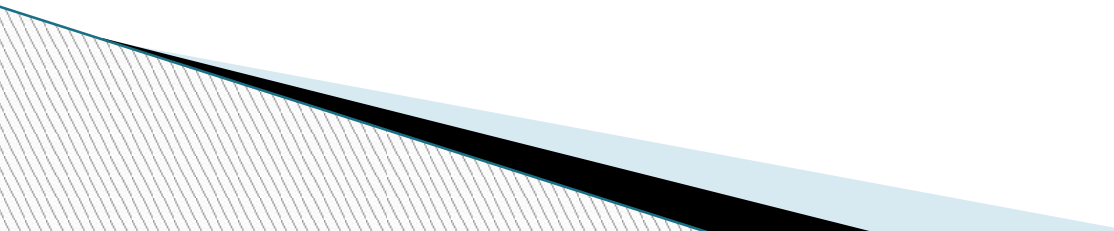
Estrutura Compacta Raquete



Estrutura Auto Portante

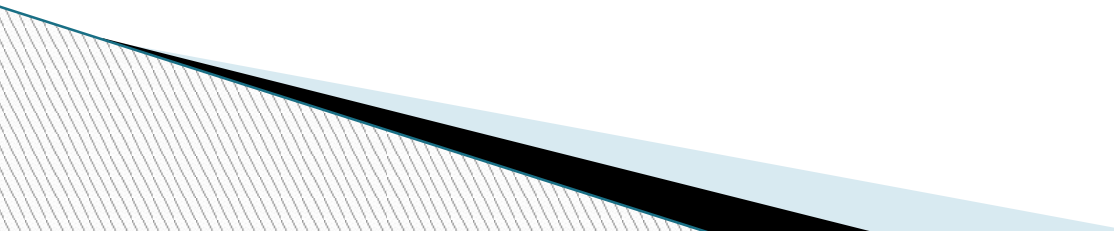
# Aspectos Econômicos

O cálculo dos custos tem origem nas alterações que serão necessárias para a transformação proposta.

- ▶ Custos decorrentes da adaptação da linha para operação no sistema hexafásico;
  - ▶ Custos devidos a perdas na linha, em condições de operação no sistema trifásico e no sistema hexafásico;
  - ▶ Custos devidos a transformação trifásica/hexafásica, nas subestações terminais da linha.
- 

# Aspectos Econômicos

Custos decorrentes da conversão para hexafásica, na linha:

- ▶ Adição de um isolador em cada cadeia;
  - ▶ Inclusão de um anel de guarda para reduzir o gradiente de potencial nos isoladores mais próximos ao condutos;
  - ▶ Troca de um conector por outro, que permita a fixação do anel de guarda.
- 

# Aspectos Econômicos

|                                                                                                                       |            |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| a) isolador de disco, de vidro temperado<br>5 <sup>3</sup> / <sub>4</sub> " x 10" de diâmetro.....                    | US\$ 16,60 |
| b) conector concha-olhal com suporte para<br>anel de guarda.....                                                      | US\$ 8,00  |
| c) anel de guarda.....                                                                                                | US\$ 15,00 |
| d) número de homens/hora para inclusão das<br>peças a, b, c nas cadeias de isolado-<br>res de uma estrutura = 14 H/H. |            |
| e) custo do homem/hora para realizar os ser-<br>viços dos itens a, b, c.....                                          | US\$ 21,00 |

# Aspectos Econômicos

Para o cálculo dos custos da conversão, estimou-se um índice de utilização de quatro estruturas tipo SS por quilometro, obtendo-se os seguintes valores:

|                                     |                  |
|-------------------------------------|------------------|
| - Custo dos isoladores.....         | US\$ 398,40/km   |
| - Custo dos conectores e anéis..... | US\$ 592,00/km   |
| - Custo da mão-de-obra.....         | US\$ 1.176,00/km |
| Custo Total (CTOT) .....            | US\$ 2.166,40/km |

# Aspectos Econômicos

Custos devidos as perdas na linha

Considere-se uma linha de transmissão operando no limite máximo de sua capacidade térmica nominal e que a temperatura máxima de projeto seja de 60° C.

A carga na linha é dada por:

$$S = NCIR \times NSUB \times NFA \times VF-N \times I \quad (MVA)$$

# Aspectos Econômicos

onde:

$S$  = carga do limite térmico nominal, MVA;

$NCIR$  = número de circuitos;

$NSUB$  = número de subcondutores;

$NFA$  = número de fases

$VF-N$  = tensão fase-neutro, em kV

$I$  = corrente em kA

# Aspectos Econômicos

- ▶ Para linha de transmissão no sistema trifásico

$$S_{3\phi} = 260 \text{ MVA}$$

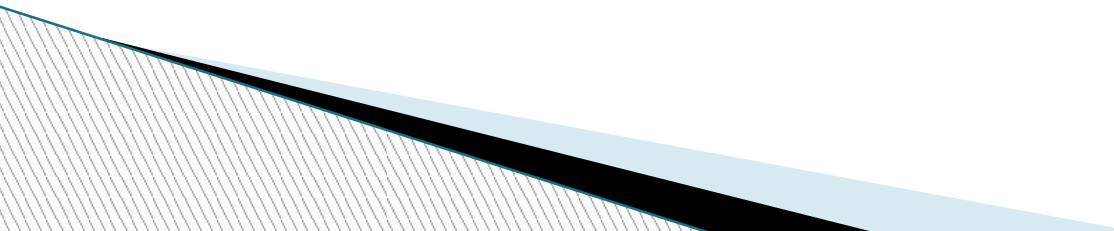
- ▶ Para linha de transmissão no sistema hexafásico

$$S_{6\phi} = 455 \text{ MVA}$$

# Aspectos Econômicos

## Calculo das perdas (PD, PE)

Para o calculo das perdas deve-se ter em mente as duas situações básicas que podem motivar a conversão da linha para hexafásica.

- ▶ Primeira: a conversão visa somente reduzir as perdas na linha, sem considerar o crescimento de carga;
  - ▶ Segunda: a conversão visa elevar a capacidade de transporte de potenciada linha (considera o crescimento da carga).
- 

# Aspectos Econômicos

As perdas por demanda (PD) e de energia (PE), são dadas pelas expressões:

$$PD = NF \times NCIR \times NSUB \times I^2 \times R \quad (MW/Km)$$

$$PE = PD \times FC \times 8.760 \quad (MWh/Km)$$

# Aspectos Econômicos

onde:

NF = número de fases

NCIR = número de circuitos

NSUB = número de subcondutores por fase

I = corrente nominal de cada subcondutor (em kA)

R = resistência de cada subcondutor a 50°C,  
(em  $\Omega/\text{Km}$ )

FC = fator de carga

# Aspectos Econômicos

Tendo essas expressões aplicadas às situações seguintes, podemos obter o valor das perdas

1) Linha de Transmissão Original  
circuito duplo trifásica -

Sendo  $NF = 3$ ;

$NCIR = 2$

$NSUB = 1$ ;

$I = 0,550 \text{ kA}$ ;

$R = 0,11558 \text{ } \Omega/\text{km}$ ; e

$FC = 0,5$

teremos

$PD1 = 0,2098 \text{ MW/km}$

$PE1 = 918,9240 \text{ MWh/km/ano}$

# Aspectos Econômicos

## 2] Linha de Transmissão Hexafásica (opção redução de perdas)

Neste caso, sendo as variáveis

$$NF = 6;$$

$$NCIR = 1;$$

$$I = 0,317 \text{ kA}$$

teremos

$$PD2 = 0,0697 \text{ MW/km}$$

$$PE2 = 305,2860 \text{ MWh/km/ano}$$

# Aspectos Econômicos

## 3) Linha de Transmissão Hexafásica

Sendo a capacidade térmica nominal do cabo o limite de transporte de potência da linha, as perdas ocorridas nesta situação são as mesmas da linha de transmissão original, portanto:

$$PD3=PD1 = 0,2098 \text{ MW/km}$$

$$PE3=PE1 = 918,9240 \text{ MW\text{h}/km/ano}$$

# Aspectos Econômicos

## Custos das perdas (CPD, CPE)

- Custo de demanda (CkW)            U\$ 250,00/kW/ano
- Custo da energia (CMWh)           U\$ 34,00/MWh

Sendo o custo das perdas obtido pelo produto dos custos unitários pelas respectivas perdas

- CPD1=CPD3 = U\$ 52.450,00/km
- CPE1=CPE3 = U\$ 31.243,42/km
- CPD2 = U\$ 17.425,00/km
- CPE2 = U\$ 10.379,72/km

# Aspectos Econômicos

- ▶ Custos de conversão para hexafásica, na subestação (CSE)

a) Para o transformador trifásico :

$$C_{\text{Trafo}} = S \times NT \times CT$$

b) Para o disjuntor trifásico :

$$C_{\text{Disj}} = V \times ND \times NF \times CD$$

onde :

S = potência do transformador em MVA

NT = número de transformadores

CT = custo do transformador (em U\$/kVA)

V = tensão do disjuntor, em kV

ND = número de disjuntores

# Análise Econômica

- ▶ Para termos um diferencial comum de comparação, entre as alternativas serão adotados os seguintes parâmetros econômicos:

- taxa de desconto anual ( $i$ ) = 10% a.a.

- número de períodos ( $n$ ) = 30 anos

- ▶ As parcelas anuais deverão ser convertidas em valor atual pelo fator de valor atual (FVA)

$$FVA(i, n) = \frac{(1+i)^{n-1}}{i(1+i)^n}$$

$$\text{ou seja } FVA(10, 30) = 9,4269$$

# Aspectos Econômicos

Análise comparativa dos custos da linha de transmissão onde se levará em conta

- ▶ Conversão hexafásica na linha de transmissão (CLT);
  - ▶ Perdas;
  - ▶ Conversão hexafásica na subestação.
- 