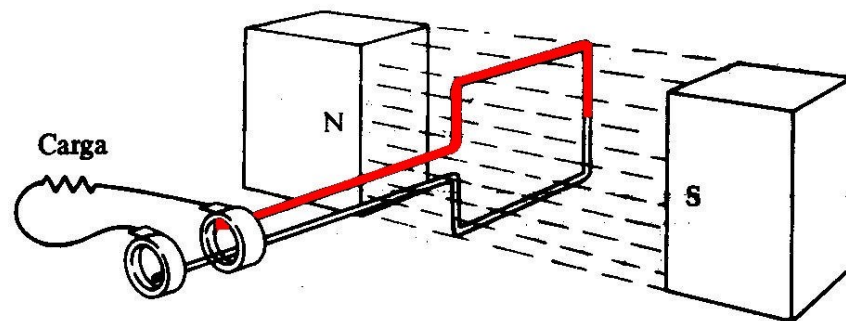


# Retificadores Não Controlados Trifásicos

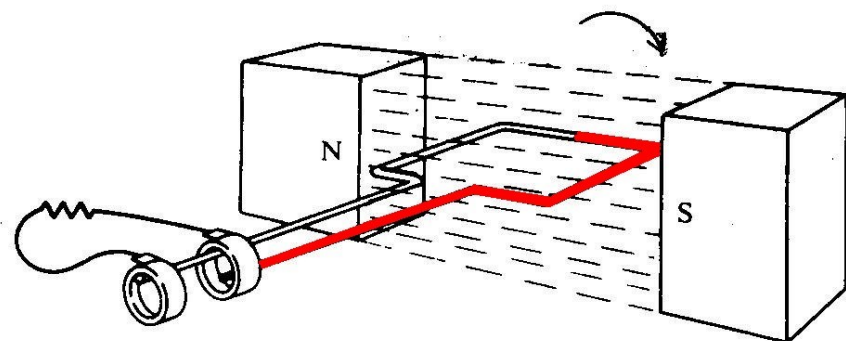
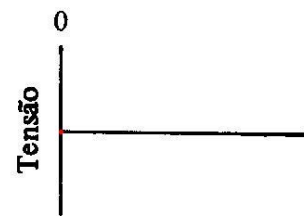
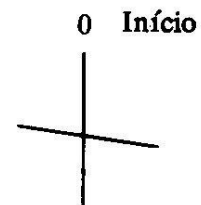
Material Formatado por Anderson Soares

Fonte: “Eletrônica de Potência”

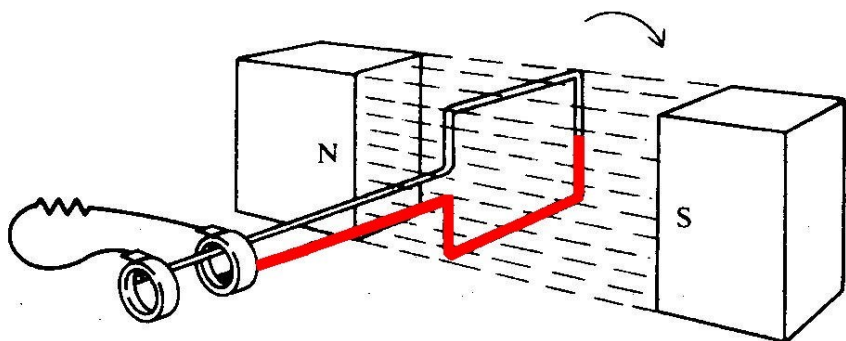
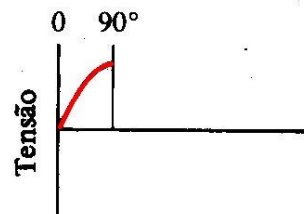
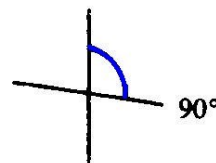
Prof. Dr. Ing [Ivo Barbi](#)



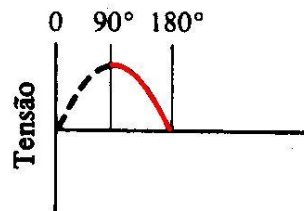
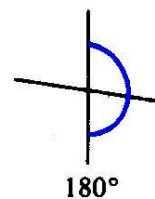
Posição 1

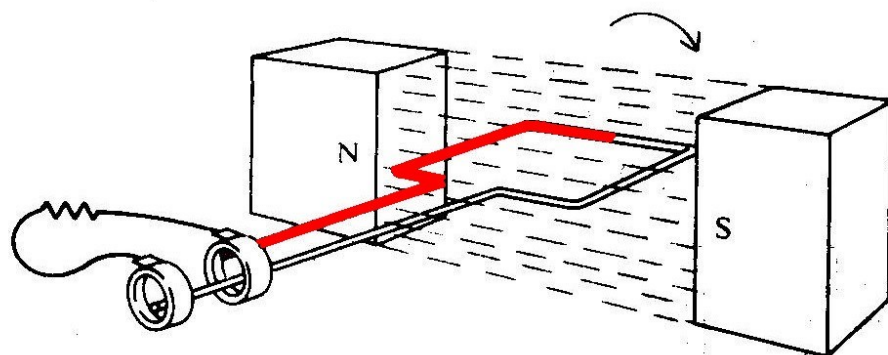


Posição 2

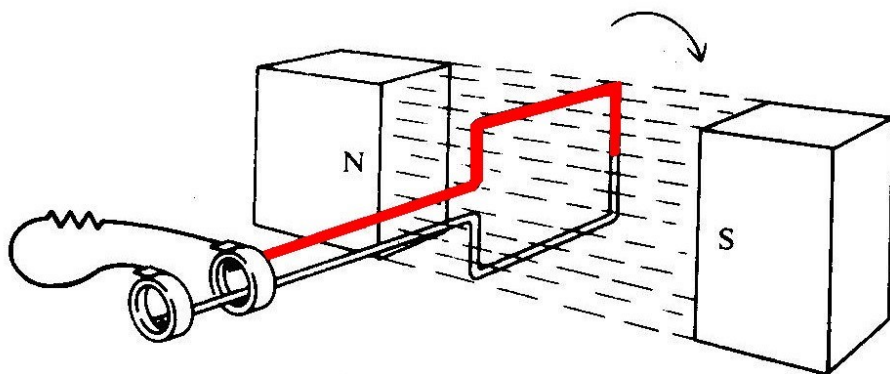
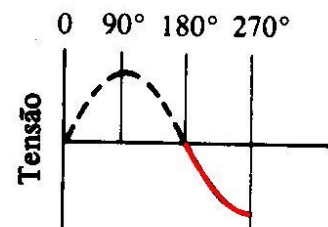
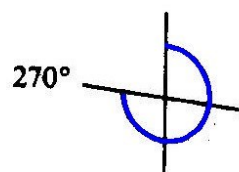


Posição 3

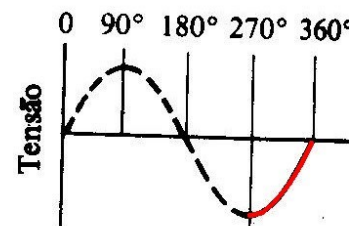
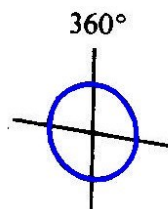




Posição 4



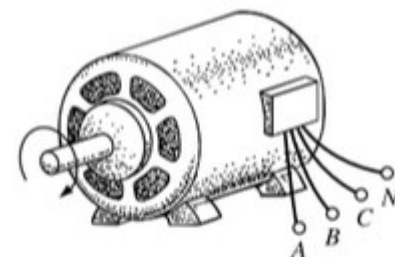
Posição 5



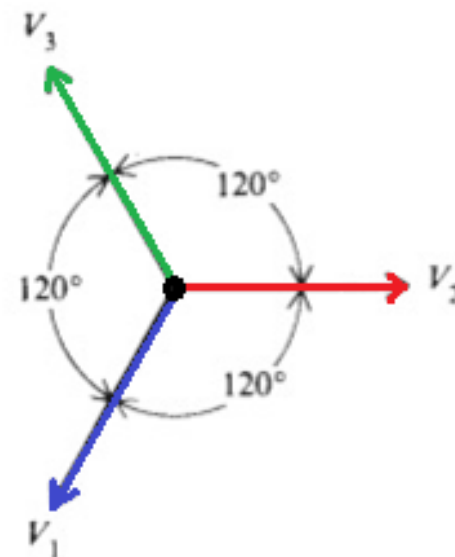
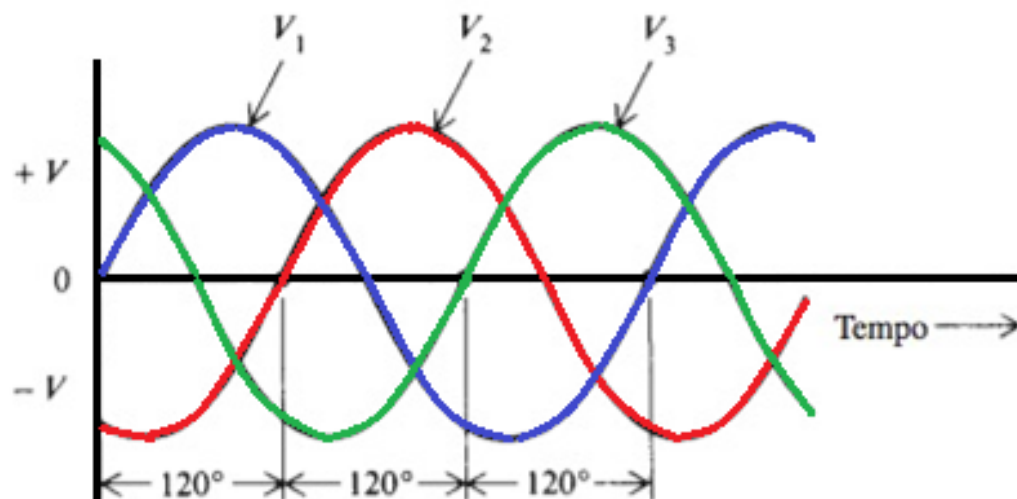
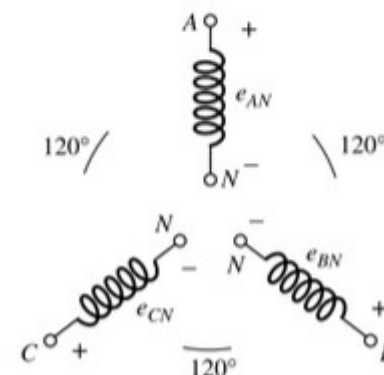
## 7 SISTEMAS POLIFÁSICOS

### 7.1 Sistema Trifásico

Um sistema trifásico é uma combinação de três sistemas monofásicos. Em um sistema equilibrado, a potência é fornecida por um gerador CA que produz três tensões iguais mas separadas por uma defasagem de  $120^\circ$ .



(a)



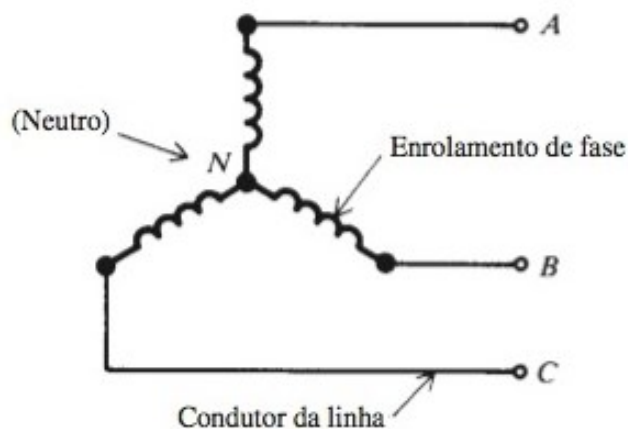
## 7 SISTEMAS POLIFÁSICOS

### 7.2 Agrupamento de Sistemas Trifásico

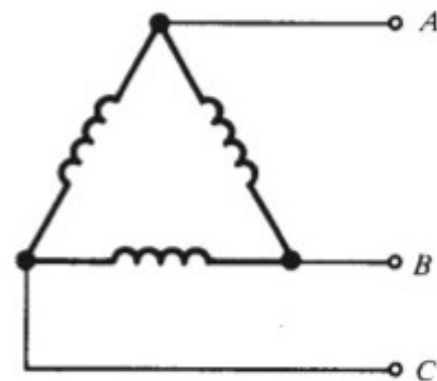
Os circuitos trifásicos são amplamente utilizados por exigirem:

- Menor peso dos condutores;
- Permitem maior flexibilidade nas escolhas das tensões;
- Os equipamentos trifásicos (motores) tem menores dimensões, mais leves e mais eficientes do que máquinas monofásicos.

A três fases podem ser ligadas em conexão estrela Y ou triângulo  $\Delta$ .

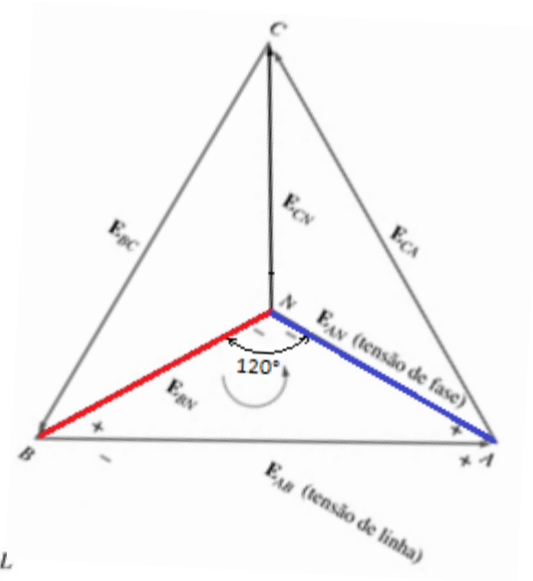
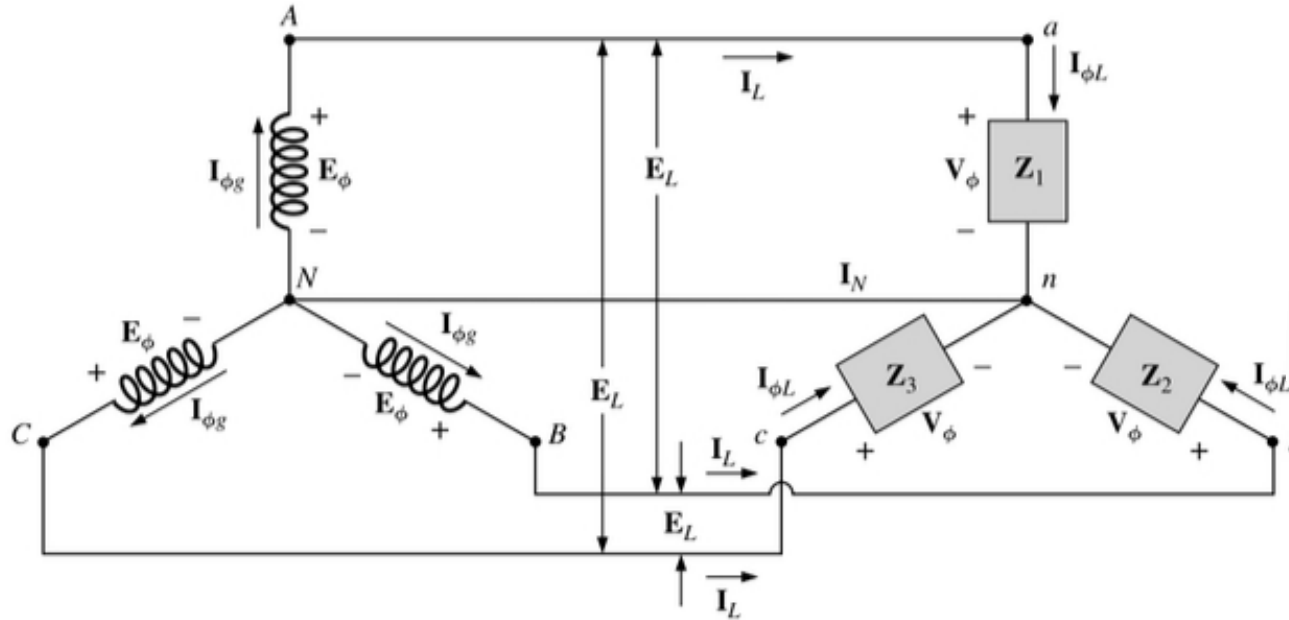


(a) Conexão em estrela ou Y



(b) Conexão em triângulo ou  $\Delta$

### 7.2.1 Ligação Estrela Y



$$E_{\phi} = V_{\phi} = \text{Tensão de Fase}$$

$$I_{\phi g} = I_{\phi L} = \text{Corrente de Fase}$$

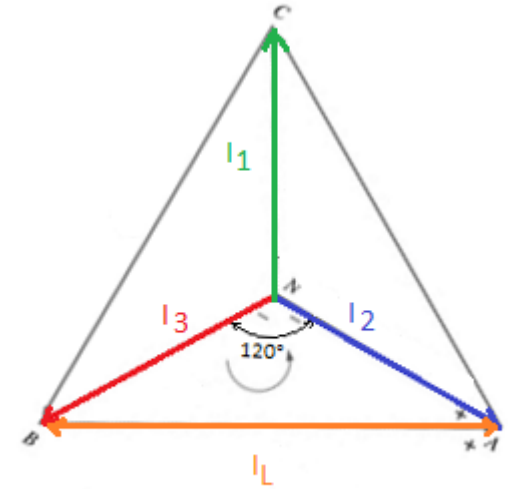
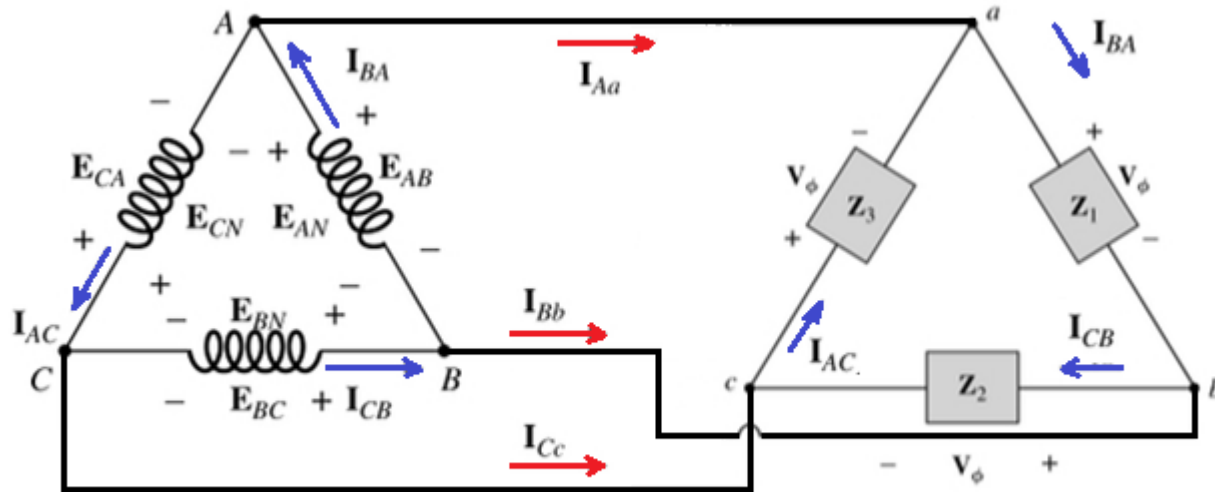
$$E_L = \text{Tensão de Linha}$$

$$I_L = \text{Corrente de Linha}$$

$$\text{Tensão de Linha} = \sqrt{3} \times \text{tensão fase}$$

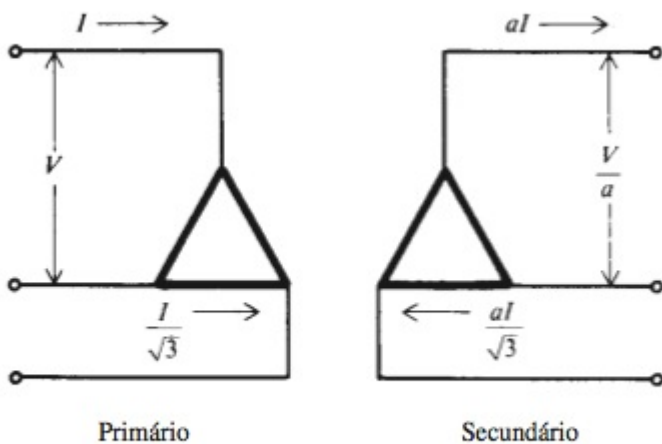
$$\text{Corrente de Linha} = \text{Corrente de Fase}$$

### 7.3.3 Ligação Triângulo ( $\Delta$ )

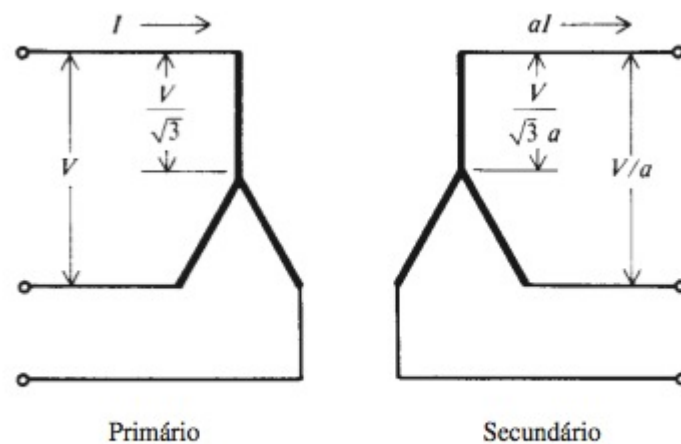


*Corrente de Linha =  $\sqrt{3} \times$  corrente fase*  
*Tensão de Linha = Tensão de Fase*

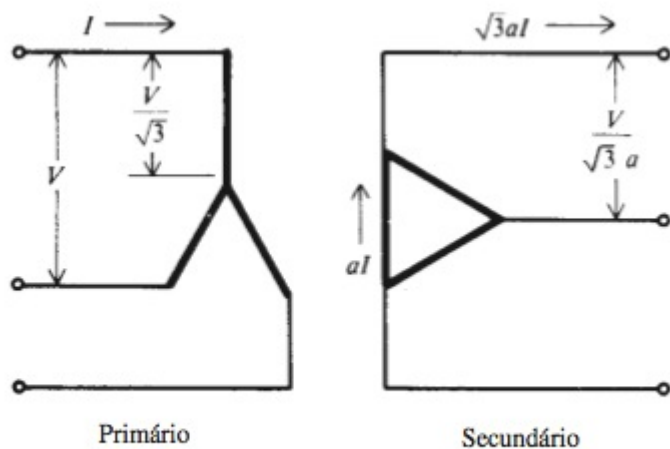
## 7.4 Conexão Entre Transformadores Trifásico



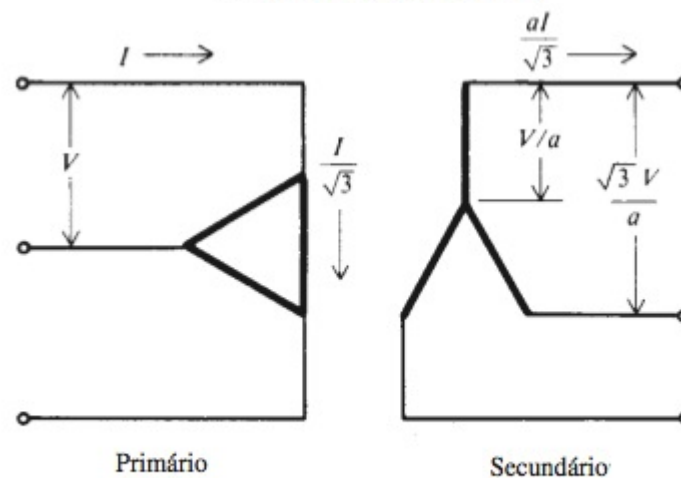
(a) Triângulo com triângulo ( $\Delta$ - $\Delta$ )



(b) Estrela com estrela (Y-Y)



(c) Estrela com triângulo (Y- $\Delta$ )



(d) Triângulo com estrela ( $\Delta$ -Y)

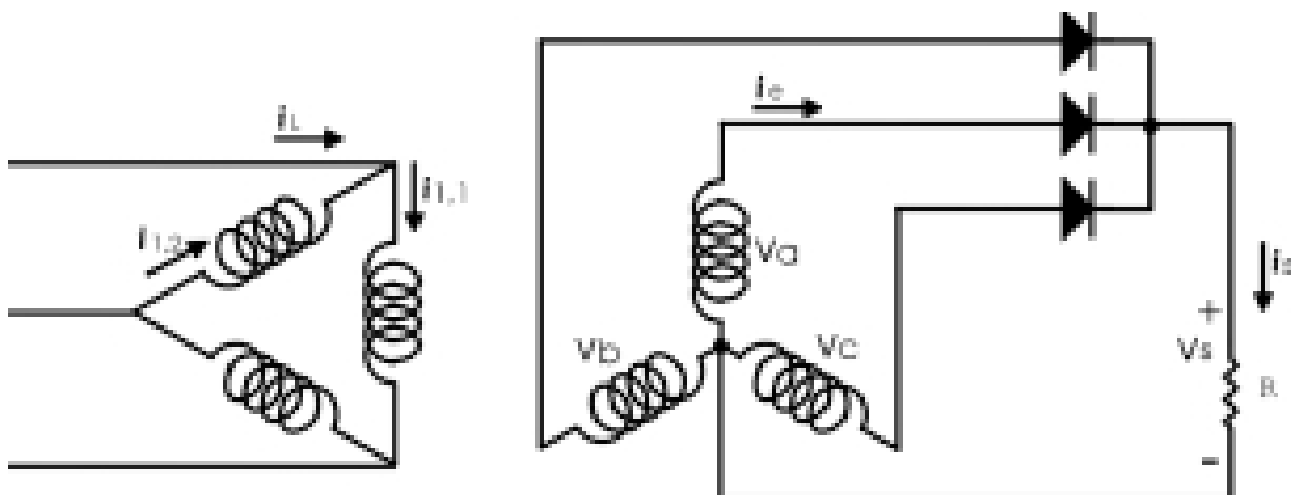
$a = N_1/N_2$

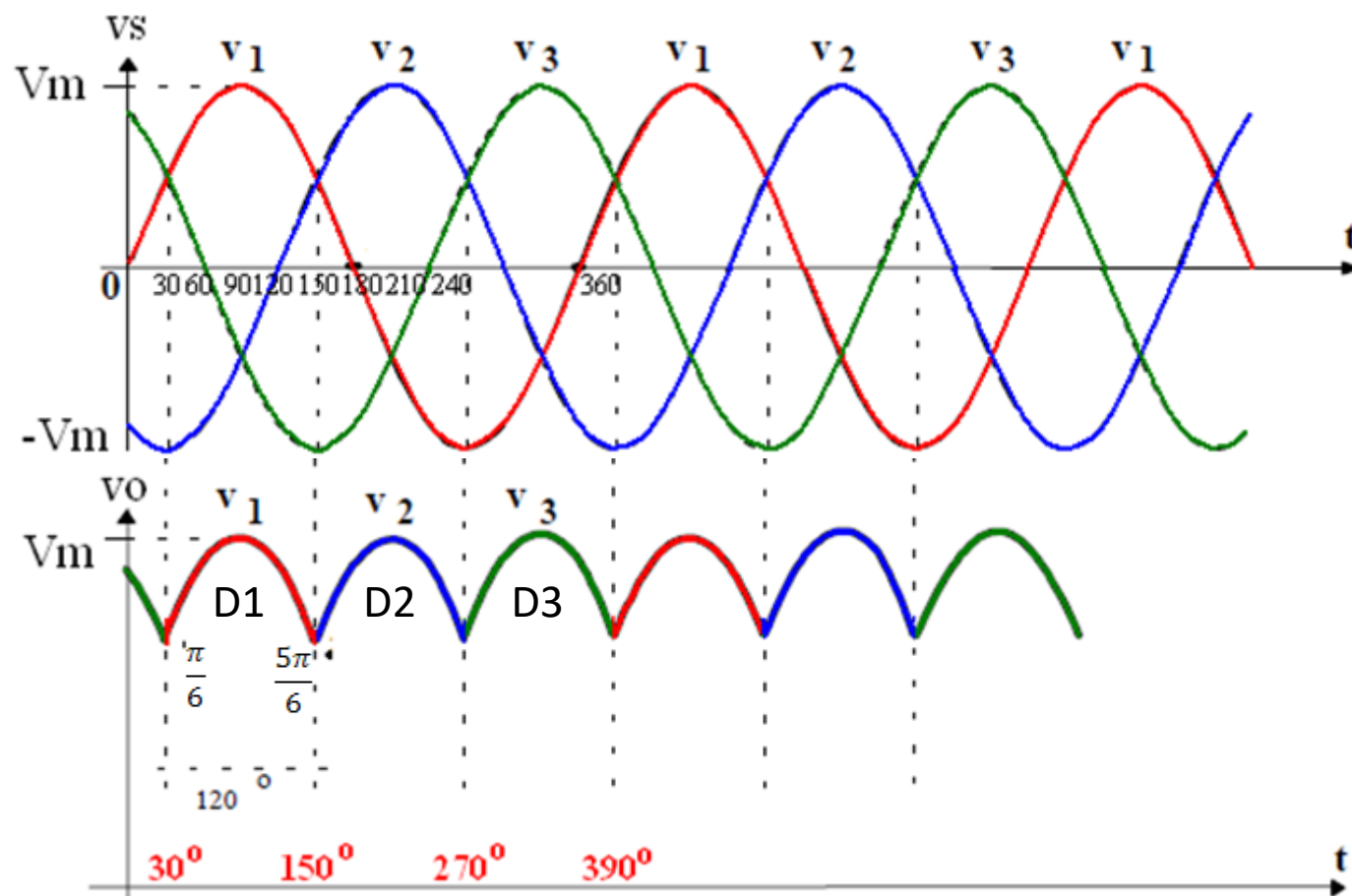
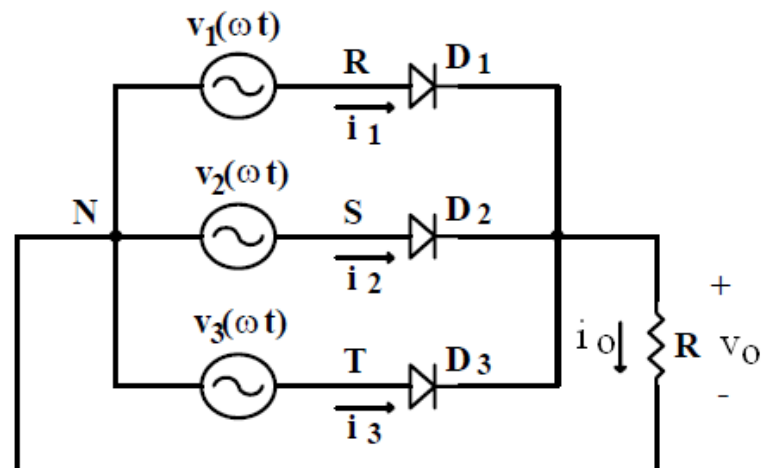


Os retificadores trifásicos apresentam algumas vantagens quando comparados com os retificadores monofásicos:

- Tensão de saída mais alta, para uma dada tensão de entrada;
- Amplitude mais baixa da ondulação da tensão de saída;
- Frequência de ondulação mais alta, facilitando a filtragem e;
- Eficiência total mais alta.

### 1) Retificador Trifásico de Meia-Onda (Três Pulsos), Carga R





**a) Tensão média na carga**

$$V_{\text{Lmed}} = \frac{3}{2\pi} \int_{\pi/6}^{5\pi/6} \sqrt{2} V_o \sin(\omega t) d(\omega t) = \frac{3\sqrt{3}\sqrt{2} V_o}{2\pi} \cong 1,17 V_o$$

**b) Corrente média na carga**

$$I_{\text{Lmed}} = \frac{1,17 V_o}{R}$$

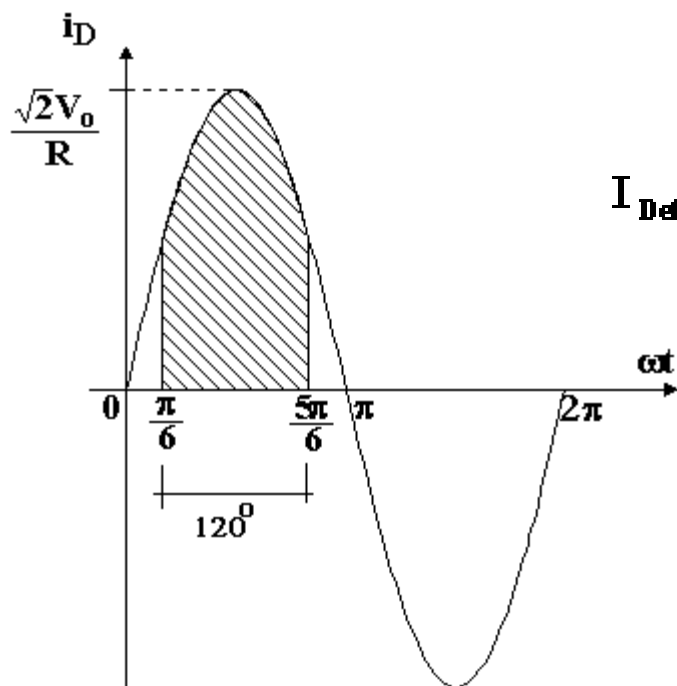
**d) Corrente de pico nos diodos**

$$I_{\text{Dp}} = \frac{\sqrt{2} V_o}{R}$$

**c) Corrente média nos diodos**

$$I_{\text{Dmed}} = \frac{I_{\text{Lmed}}}{3} \cong \frac{1,17 V_o}{3R}$$

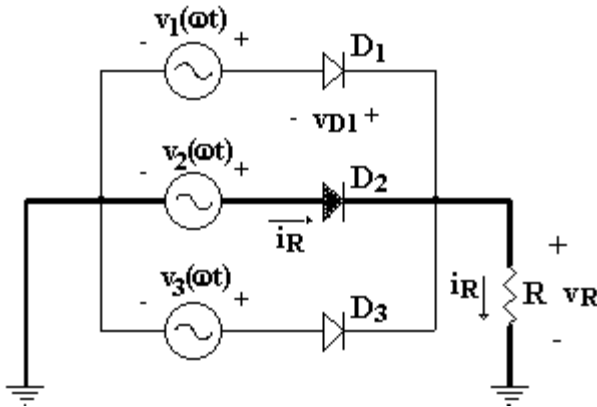
### e) Corrente eficaz no diodo



$$I_{De} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\pi/6}^{5\pi/6} \left[ \frac{\sqrt{2} V_o}{R} \sin(\omega t) \right]^2 d(\omega t)} \cong 0,59 I_{Ime1}$$

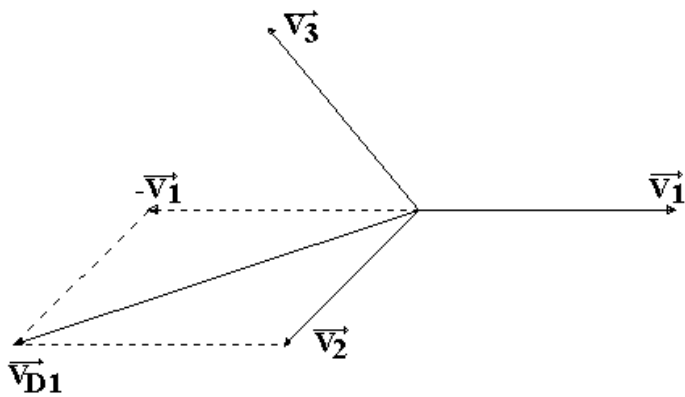
*Corrente em um diodo para carga resistiva.*

## f) Tensão reversa nos diodos



A composição fasorial das tensões  $V_1$  e  $V_2$ , para obtenção de  $V_{D1}$ , é apresentada abaixo:

$$\overline{V_1} + \overline{V_m} = \overline{V_2} \quad \overline{V_{D1}} = \overline{V_2} - \overline{V_1}$$



$$V_{D1p} = \sqrt{3} \sqrt{2} V_o \cong 2,45 V_o$$

| Período     | Diodos ON | Diodos OFF | Tensões reversas nos diodos |          |          |
|-------------|-----------|------------|-----------------------------|----------|----------|
|             |           |            | $V_{D1}$                    | $V_{D2}$ | $V_{D3}$ |
| 0° à 30°    | D3        | D1,D2      | $v_{13}$                    | $v_{23}$ | 0        |
| 30° à 150°  | D1        | D2,D3      | 0                           | $v_{21}$ | $v_{31}$ |
| 150° à 270° | D2        | D1,D3      | $v_{12}$                    | 0        | $v_{32}$ |
| 270° à 390° | D3        | D1,D2      | $v_{13}$                    | $v_{23}$ | 0        |

Tensão reversa aplicada ao diodo é a tensão de linha  $V_{13}$ ,  $V_{23}$  e  $V_{12}$ .

### Exemplo 01)

Um retificador não controlado de três pulsos está ligado a uma fonte AC trifásica de 4 fios de 220V (tensão de fase). Se a resistência de carga for de 20 ohm, determine:

- a) Tensão máxima da carga
- b) Corrente máxima na carga
- c) Tensão média na carga
- d) Corrente máxima no diodo
- e) Corrente média no diodo
- f) A Tensão reversa máxima no diodo
- g) A corrente eficaz na carga
- h) A potência dissipada na carga

## 2) Retificador Trifásico de Meia-Onda (Três Pulsos), Carga RL

No desenvolvimento da tensão de alimentação, em Série de Fourier, serão ignoradas as demais harmônicas, por serem de frequências elevadas, de pequena amplitude e conseqüentemente por produzirem correntes de valores desprezíveis em face do valor assumido pela corrente média na carga.

### a) Tensão média na carga

$$v_L(\omega t) = 1,17 V_o + \frac{2 \cdot 1,17}{8} V_o \sin(3\omega t)$$

### b) Corrente da carga

$$i_L(\omega t) = \frac{1,17 V_o}{R} + \frac{0,3 V_o}{\sqrt{R^2 + 9\omega^2 L^2}} \sin(3\omega t - \phi_3) \quad \phi_3 = \arctg \frac{3\omega L}{R}$$

$$I_{Lef} = \sqrt{I_{Lmed}^2 + I_{3ef}^2}$$

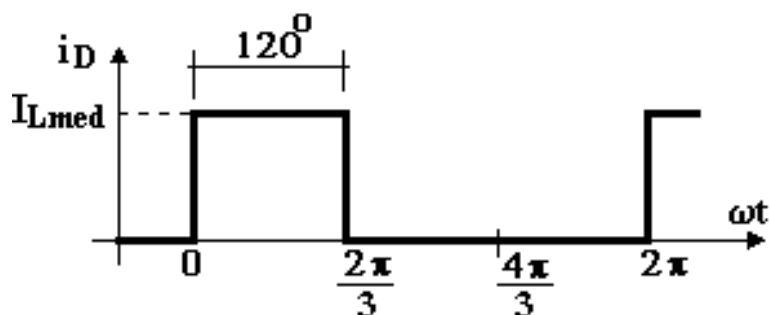
Onde:

$$I_{Lmed} = 1,17 V_o / R$$

$$I_{3ef} = \frac{0,3 V_o}{\sqrt{2} \sqrt{R^2 + 9\omega^2 L^2}}$$

### c) Corrente eficaz no diodo

Para o cálculo do valor eficaz da corrente em cada diodo, serão ignoradas as componentes alternadas (harmônicos), ou seja, admite-se que a corrente seja constante e igual ao valor médio.



### Corrente eficaz no diodo

$$I_{Def} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi/3} (I_{Lmed})^2 d(\omega t)} = \frac{I_{Lmed}}{\sqrt{3}}$$

### Corrente média no diodo

$$I_{Dmed} = \frac{I_{Lmed}}{3}$$

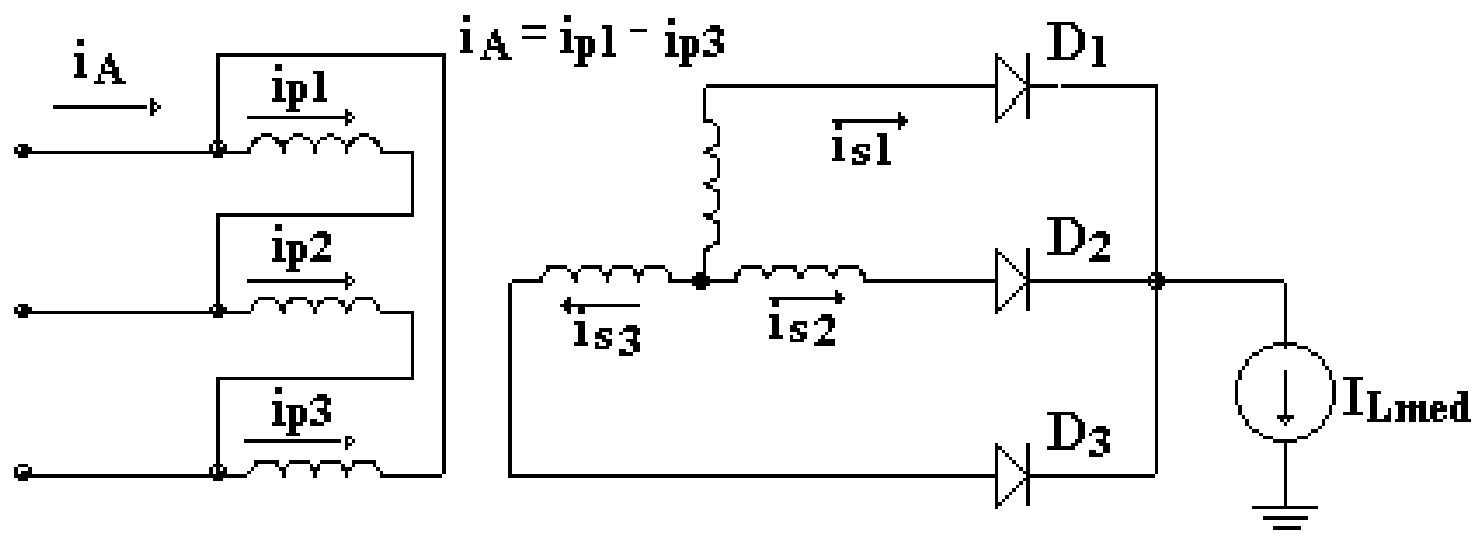
### O fator de ondulação de corrente na carga

$$K_i = \frac{I_{CAef}}{I_{Lmed}} \cong \frac{0,3V_o}{\sqrt{2} \sqrt{R^2 + (3\omega L)^2}} \cdot \frac{R}{1,17V_o}$$



### 3) Retificador Trifásico de Meia-Onda (Três Pulsos) – Estudo do Transformador

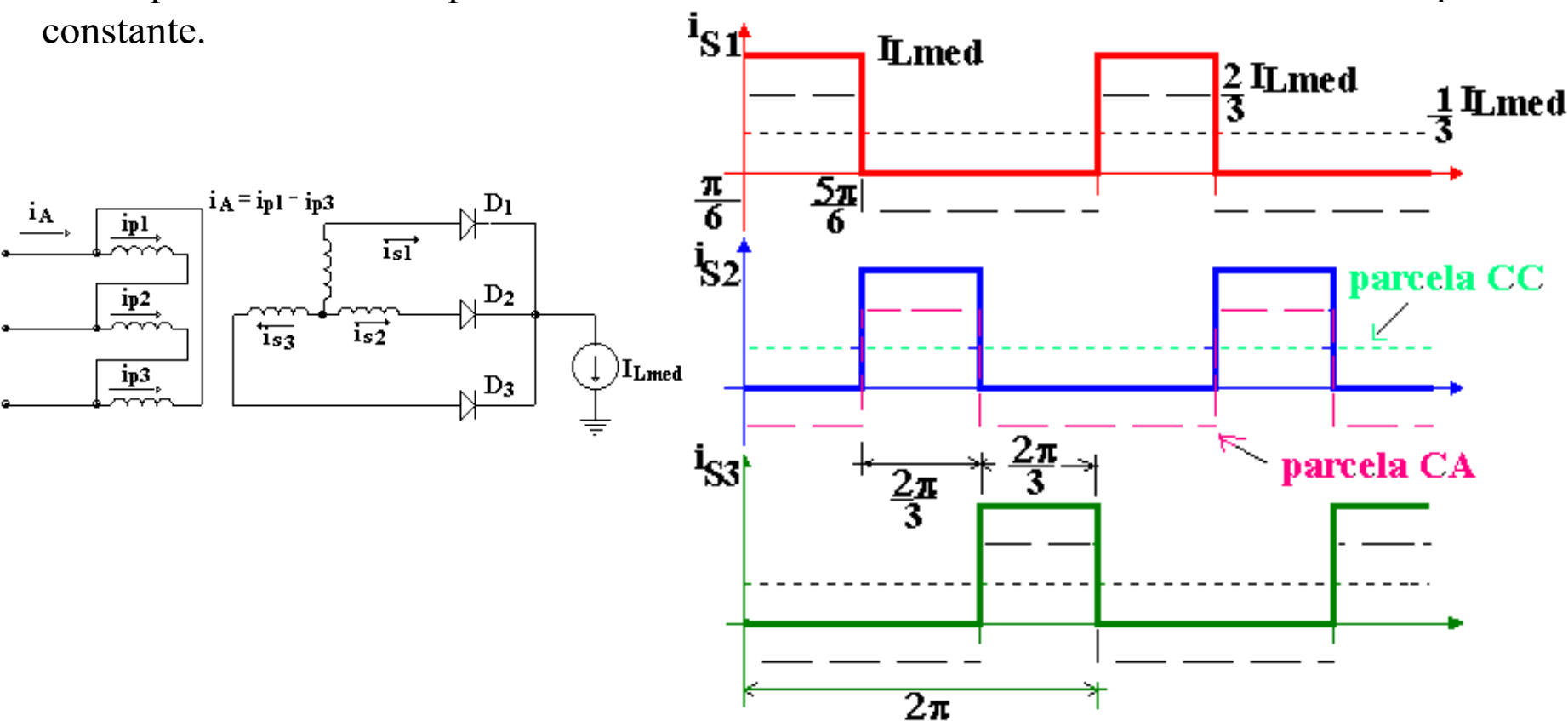
Para o estudo do comportamento do transformador, que alimenta o retificador trifásico, serão admitidas as simplificações anteriormente adotadas.



*Retificador trifásico com ponto médio, associado a um transformador  $\Delta$ -Y*

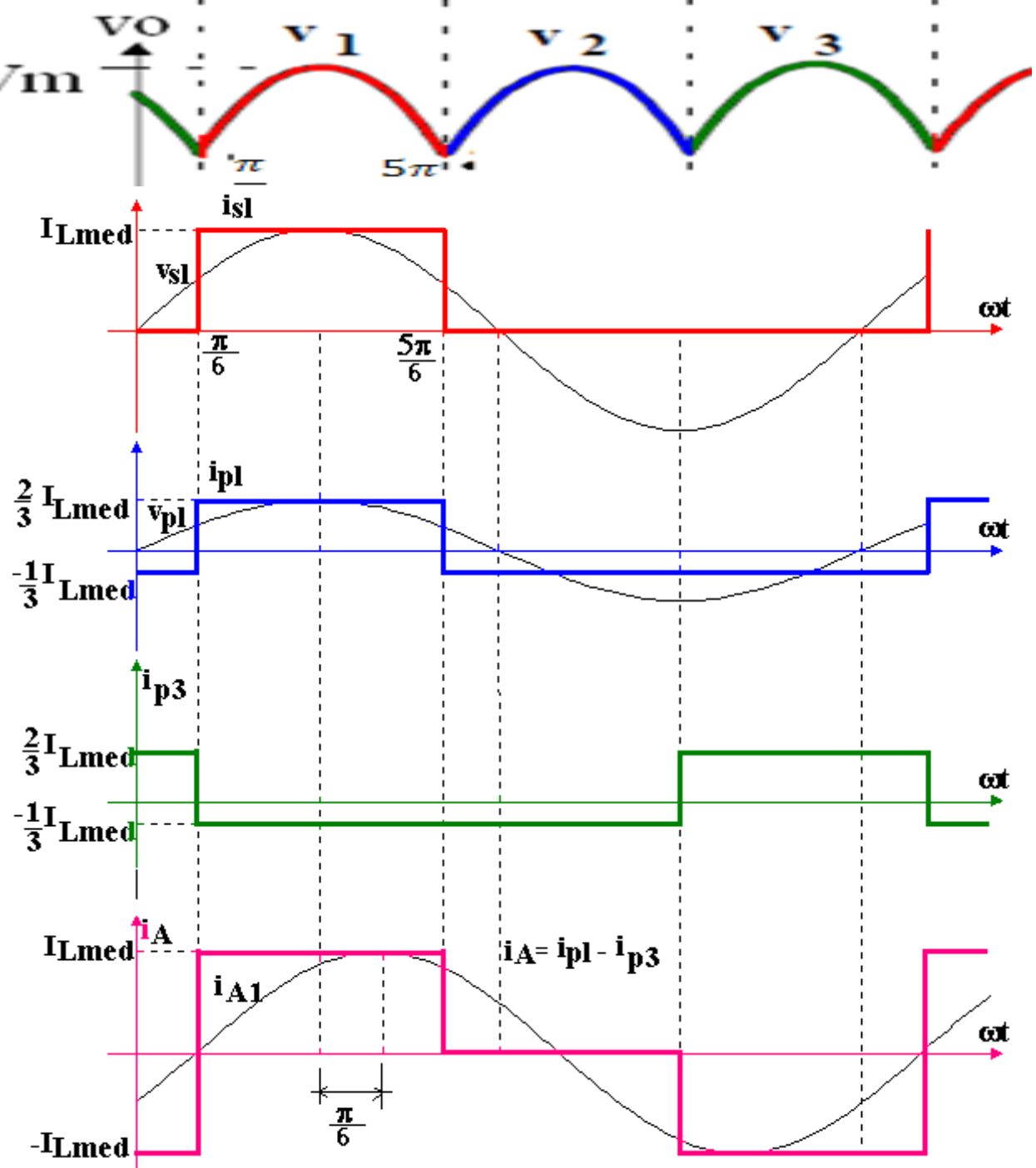
## a) Correntes nos enrolamentos secundários do transformador

Em cada enrolamento a corrente é composta de pulsos de corrente com duração de  $120^\circ$ , sendo portanto unidirecional. A corrente de cada enrolamento pode ser então decomposta numa componente alternada com valor médio nulo e numa componente constante.



## b) Correntes nos enrolamentos primários do transformador

Há uma defasagem de trinta graus entre a componente fundamental da corrente de linha  $i_A(\omega t)$  e a tensão do enrolamento primário  $v_{p1}(\omega t)$ , característica da transformação  $\Delta$ -Y.



### a) Corrente eficaz num enrolamento secundário

$$I_{sef} = \frac{I_{Lmed}}{\sqrt{3}}$$

### b) Potência aparente secundária por fase

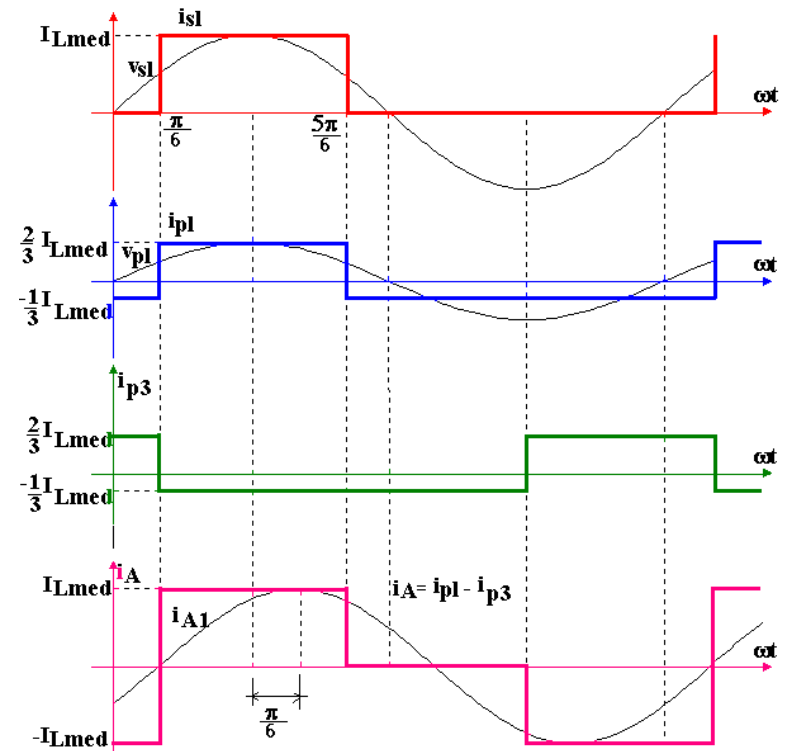
$$V_o = \frac{V_{Lmed}}{1,17}$$

$$S_{2f} = V_o I_{sef} \cong \frac{V_{Lmed} I_{Lmed}}{1,17 \sqrt{3}} \cong 0,493 V_{Lmed} I_{Lmed}$$

### c) Potência aparente total secundária

$$P_L = V_{Lmed} \cdot I_{Lmed}$$

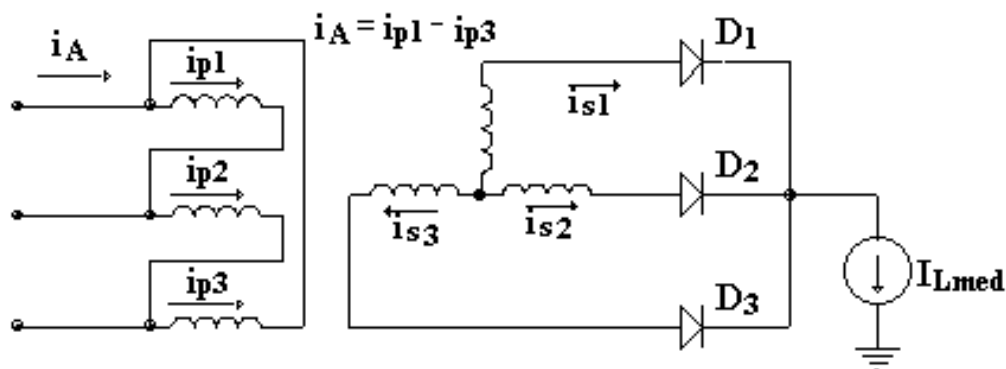
$$S_2 = 3S_{2f} \cong 1,48 \cdot V_{Lmed} \cdot I_{Lmed} = 1,48 \cdot P_L$$



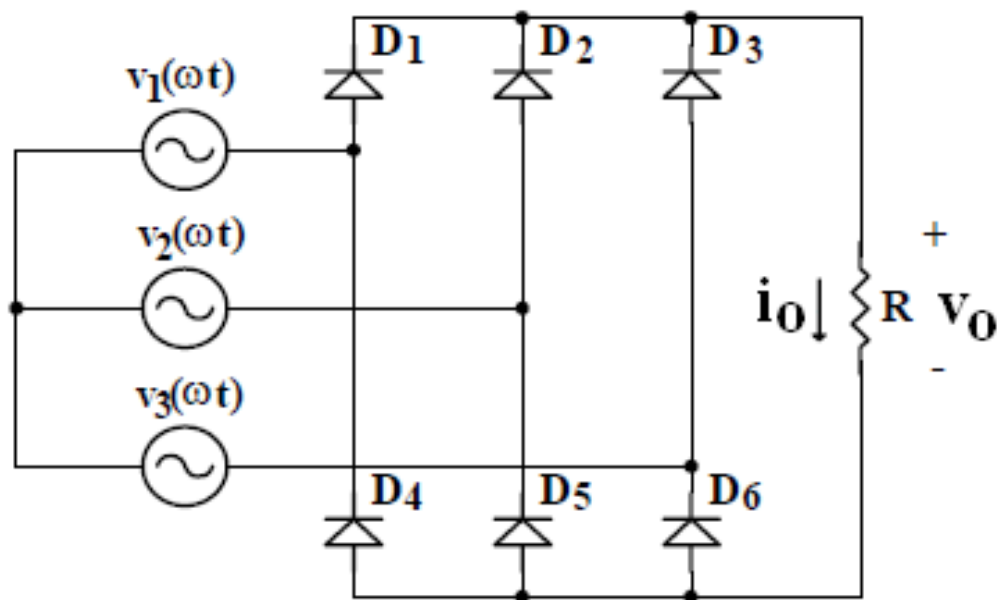
## Exemplo 01) Retificador Trifásico de Meia-Onda (Três Pulsos) – Estudo do Transformador

O retificador abaixo apresenta tensão de linha eficaz no primário de 380V, número de espiras no primário 100 espiras e número de espiras no secundário 50 espiras. A carga é composta por resistência de 20 ohm e um indutor em série de 500 mH. Ignorando as harmônicas de carga. Determine:

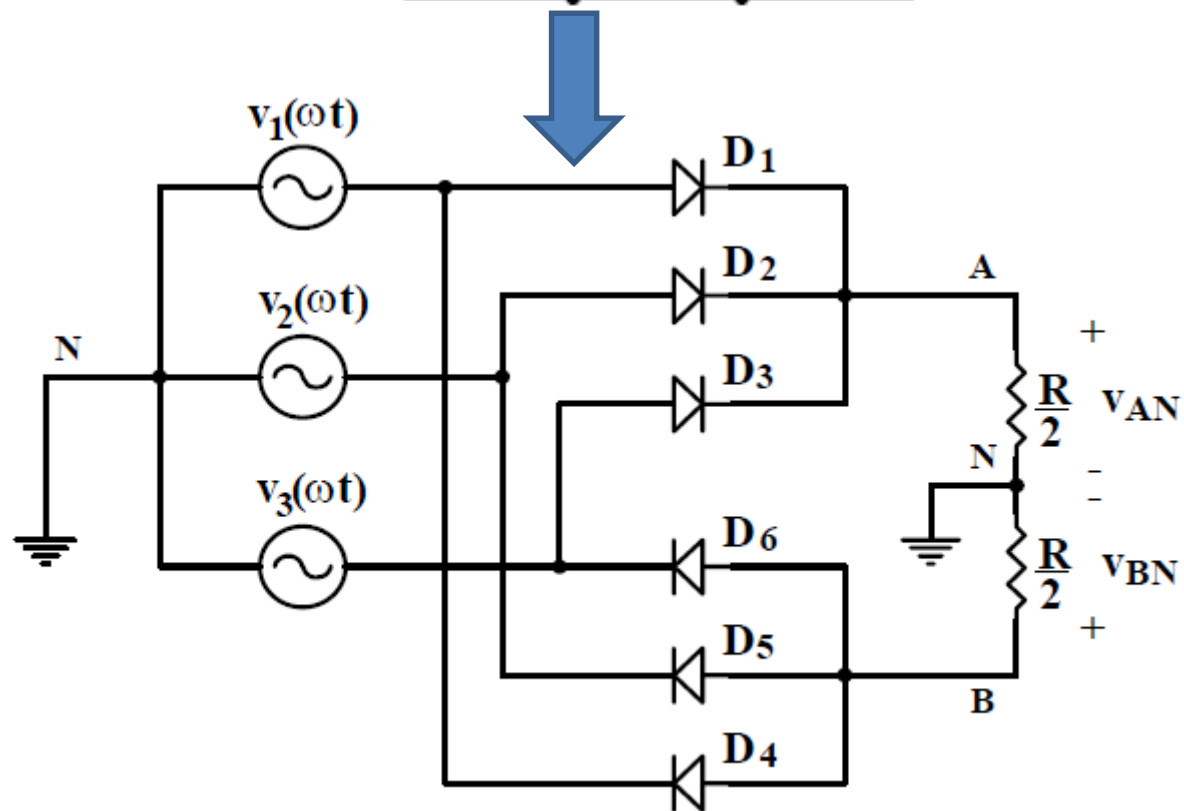
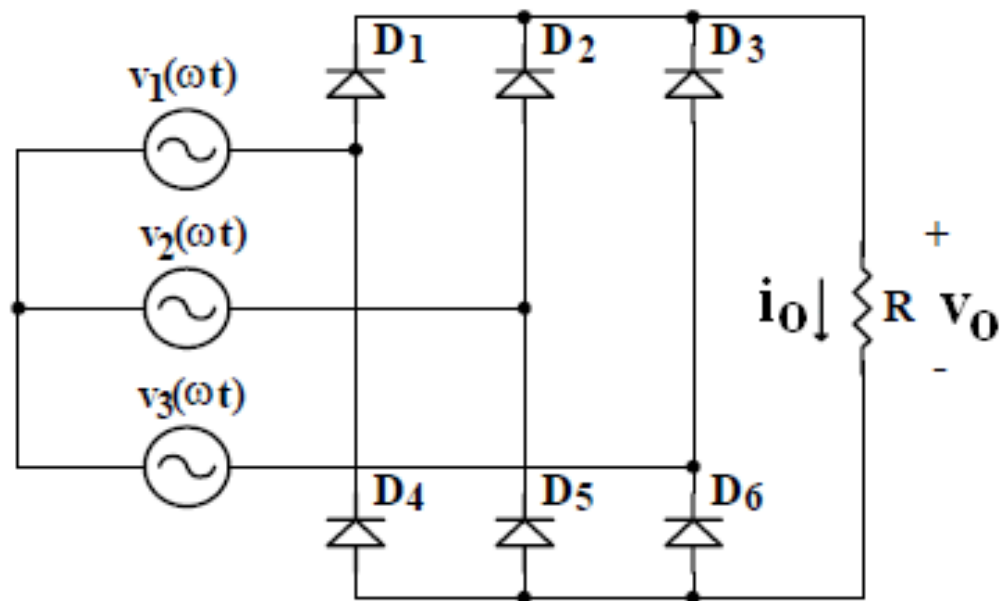
- A tensão média na carga;
- A corrente média na carga;
- Corrente em cada enrolamento;
- A potência aparente do secundário do transformador.
- Especificações dos diodos.

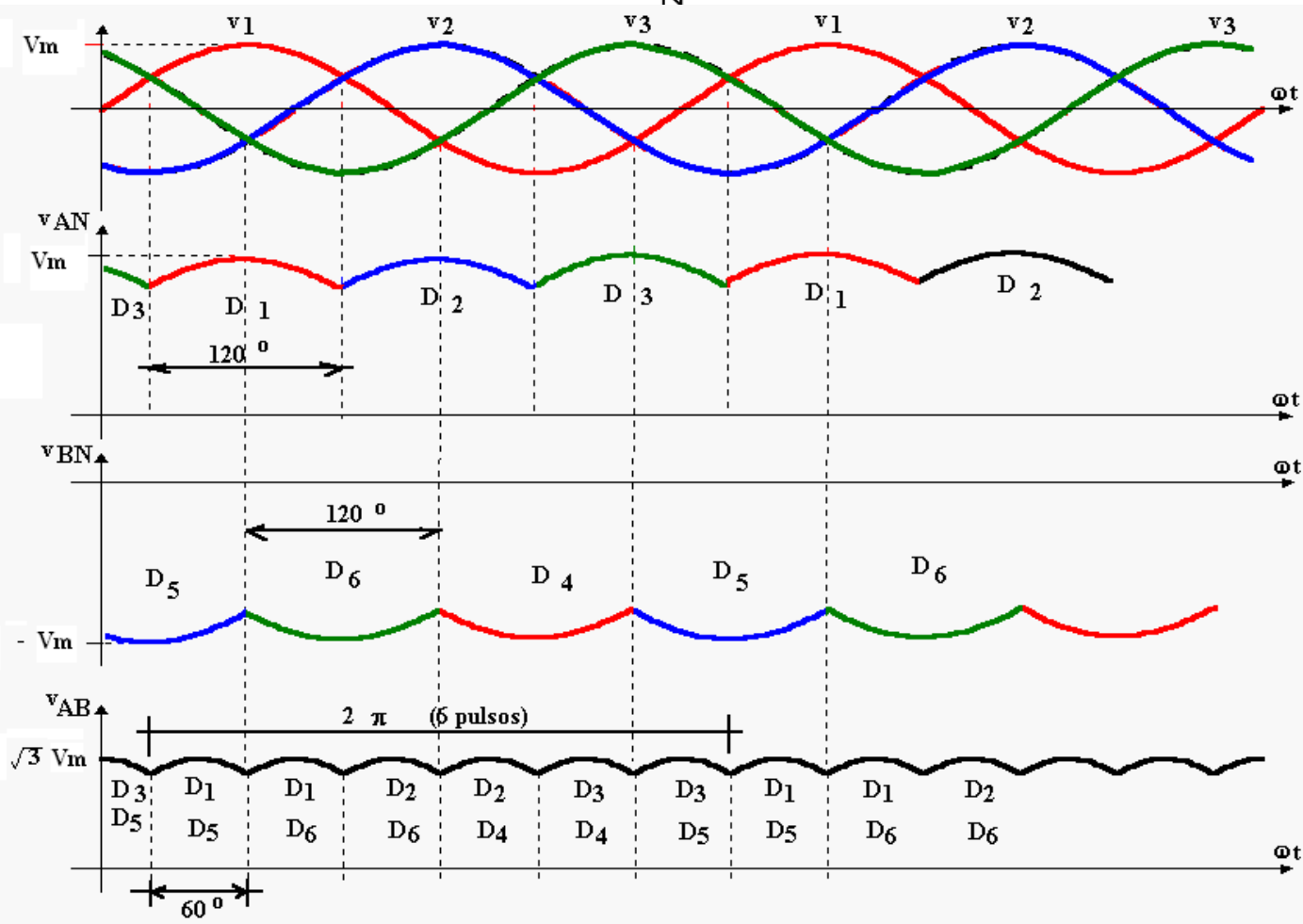
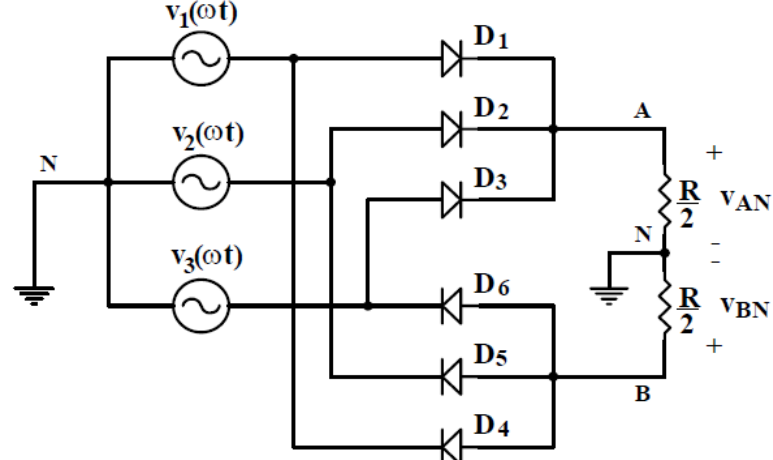


#### 4) Retificador Trifásico de Onda Completa (Seis Pulsos), Carga R

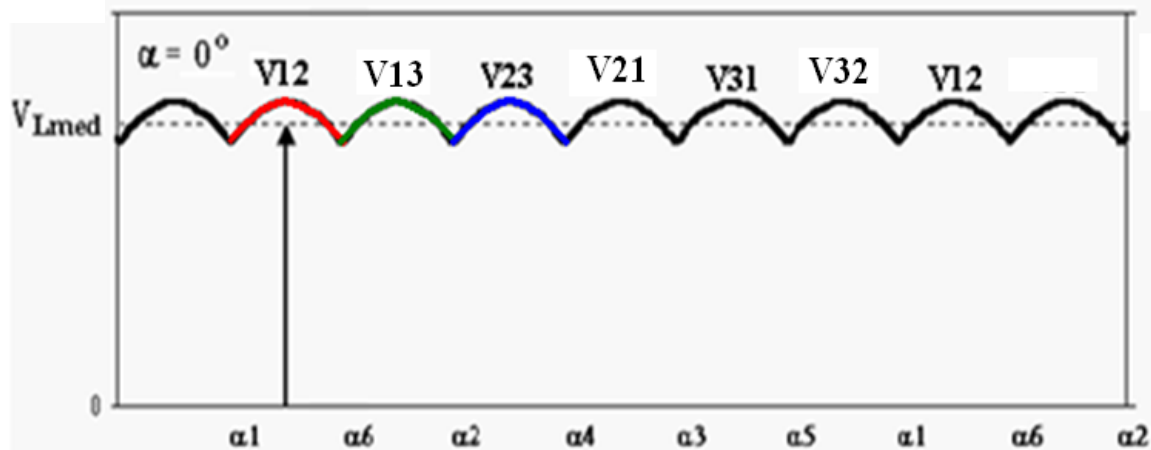
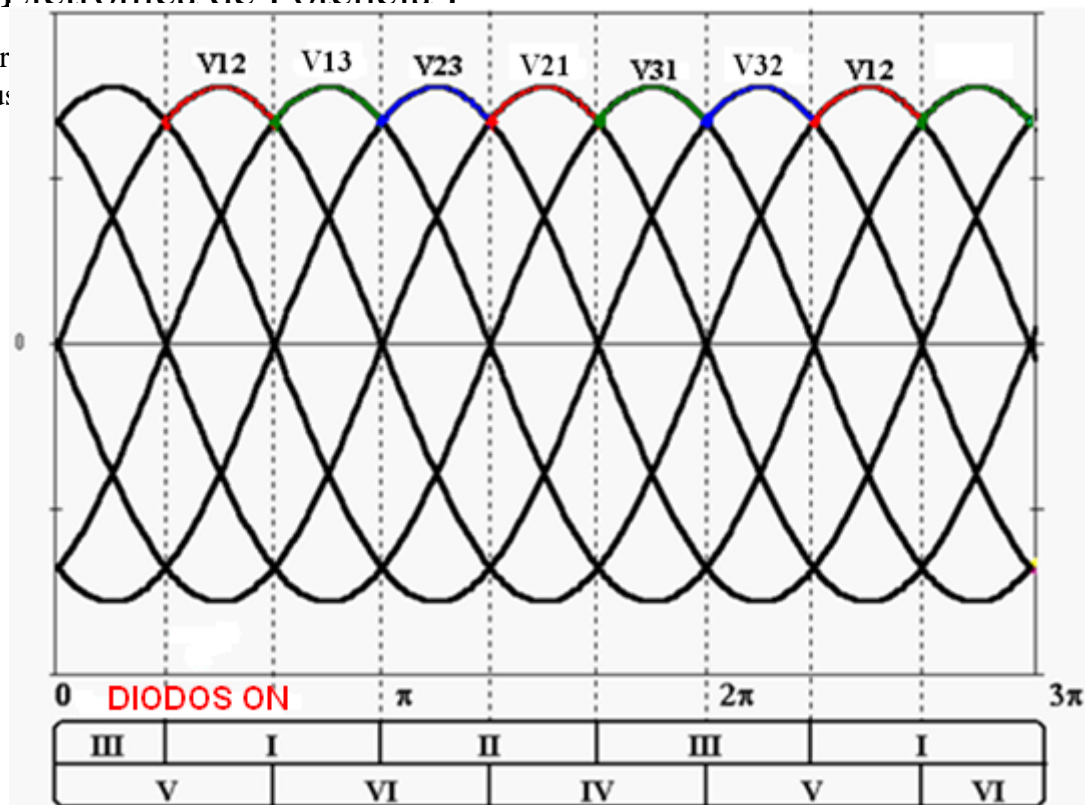
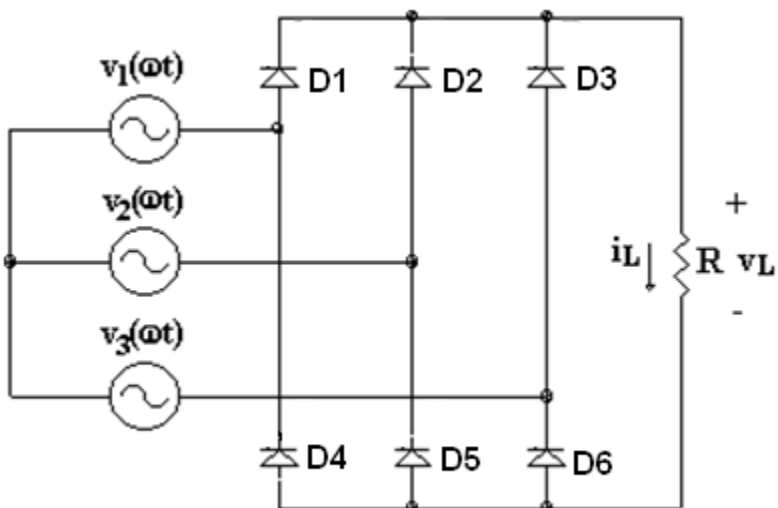


O retificador trifásico de onda completa em ponte (seis pulsos) é um dos circuitos mais importantes em aplicações de alta potência. Este retificador fornece uma tensão de saída com menos ondulação do que um retificador de três pulsos.



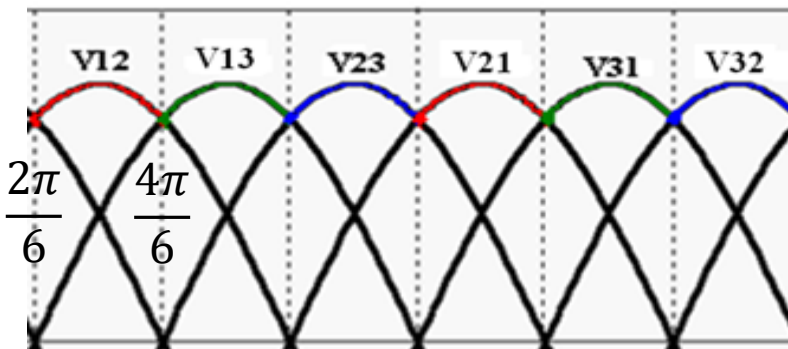






- Cada diodo conduz durante um intervalo de  $120^\circ$ ;
- Existem sempre dois diodos em condução, um no grupo positivo e outro no grupo negativo do retificador;
- Ocorre uma comutação a cada  $60^\circ$ ;
- A frequência da componente fundamental da tensão é igual a 6 vezes a frequência da tensão de alimentação.

### a) Tensão média na carga



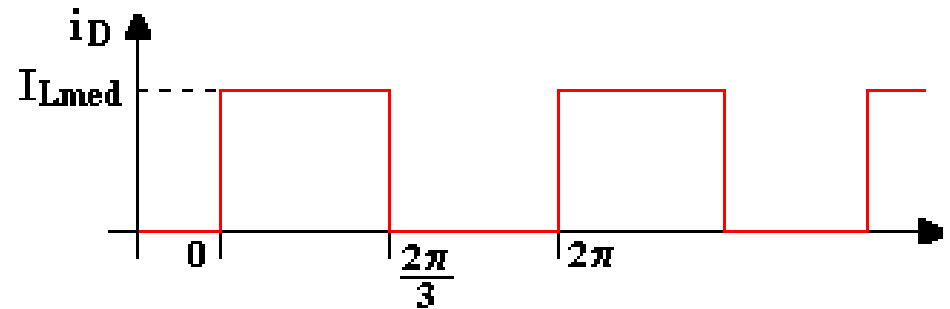
*Observação de 1/6 de período  
para o cálculo da tensão média  
na carga*

$$V_{Lmed} = \frac{6}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{3}}^{\frac{2\pi}{3}} \sqrt{3} \sqrt{2} V_o \sin(\omega t) d\omega t$$

$$V_{Lmed} = 2,34 \times V_0$$

## b) Corrente média em cada diodo

$$I_{Dmed} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi/3} I_{Lmed} d(\omega t) = \frac{I_{Lmed}}{3}$$



## c) Corrente eficaz nos diodos

$$I_{Def} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi/3} (I_{Lmed})^2 d(\omega t)} = \frac{I_{Lmed}}{\sqrt{3}}$$

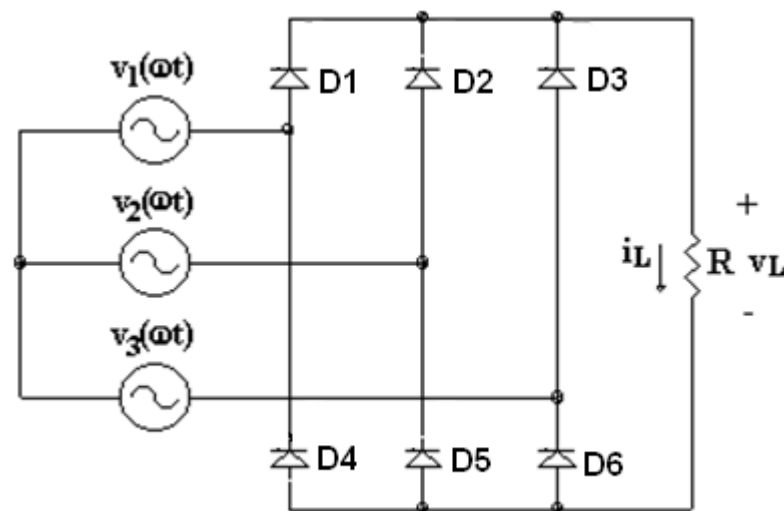
## d) A tensão máxima de bloqueio para cada diodo

$$V_{Dp} = \sqrt{3} \sqrt{2} V_o \cong 2,45 V_o$$

## Exemplo 02)

Um retificador não controlado de seis pulsos está ligado a uma fonte AC trifásica de 3 fios de 208V (tensão de fase), conforme a figura abaixo. Se a resistência de carga for de  $5\Omega$ , determine:

- Tensão máxima da carga
- Corrente máxima na carga
- Tensão média na carga
- Corrente média no diodo
- Corrente eficaz no diodo
- A Tensão reversa máxima no diodo.



### Exemplo 03)

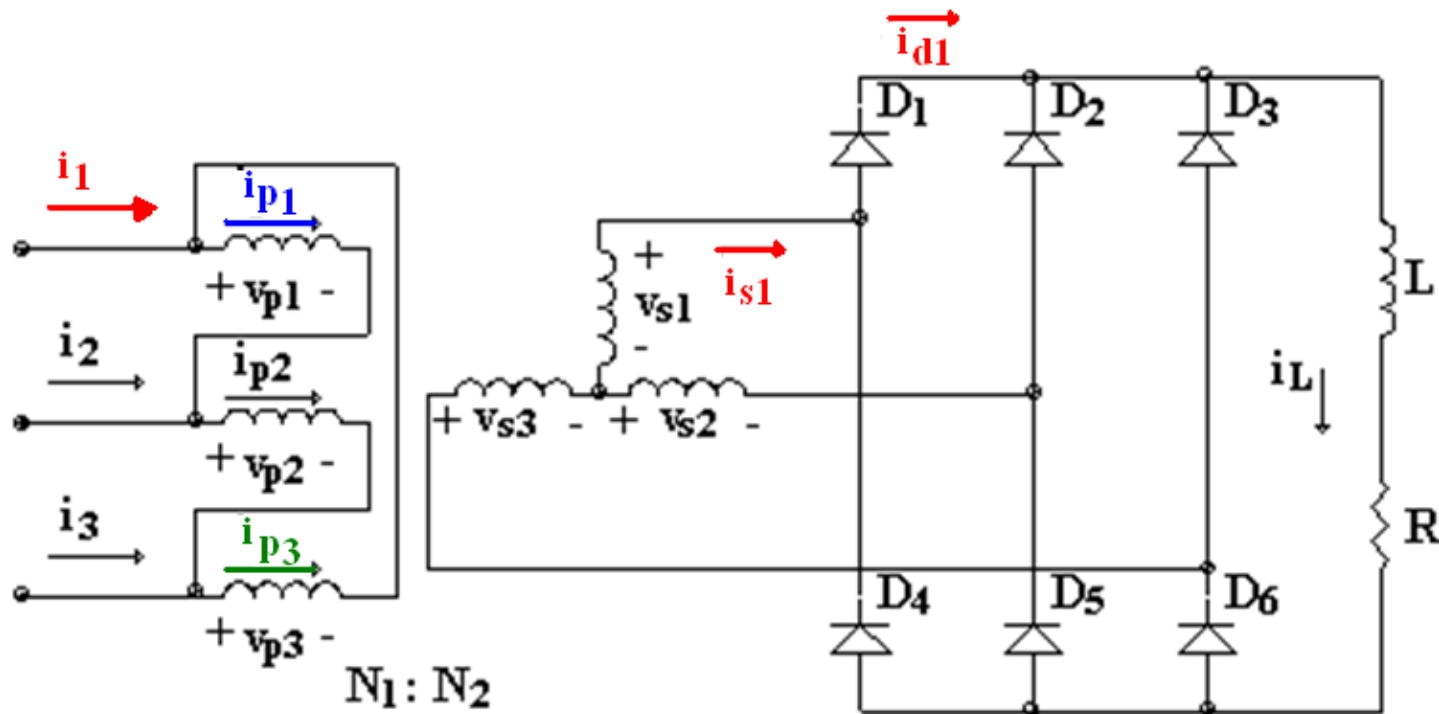
Um retificador não controlado de seis pulsos está ligado a uma fonte AC trifásica de 3 fios de 220V (tensão de fase). Se a resistência de carga for de  $50\Omega$ , indutância  $L=100\text{mH}$ , frequência= 60Hz. Calcular:

- a) Tensão e corrente média na carga
- b) Corrente média e eficaz no diodo
- c) Corrente eficaz na carga

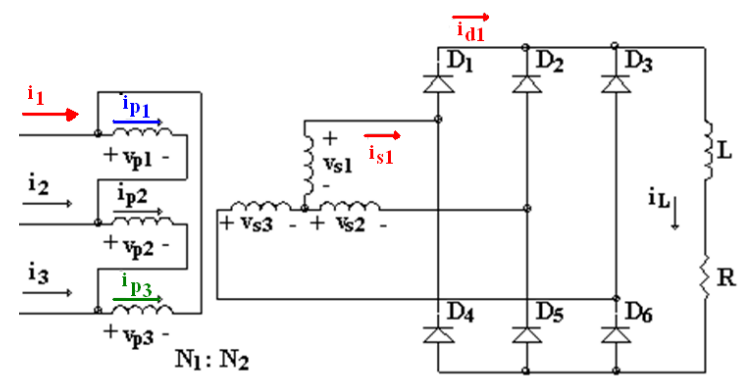
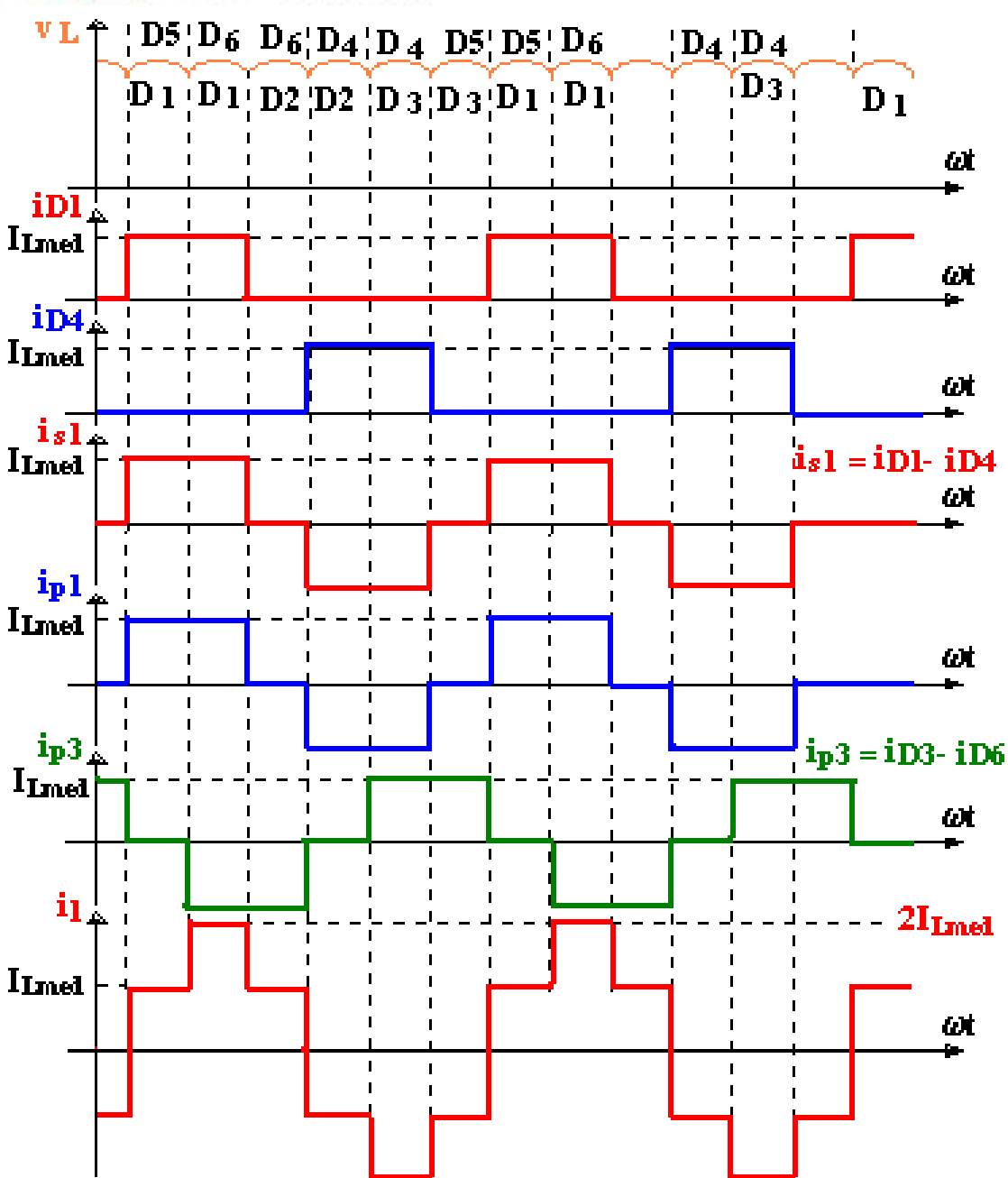
$$v_L = 2,34V_o + 0,134V_o \cos(6\omega t) - 0,033V_o \cos(12\omega t) + \dots$$

$$I_{6ef} = \frac{0,134V_o}{\sqrt{2}} \cdot \frac{1}{\sqrt{R^2 + 36\omega^2 L^2}}$$

## 4.1) Retificador Trifásico de Onda Completa (Seis Pulsos) Carga RL – Estudo do transformador



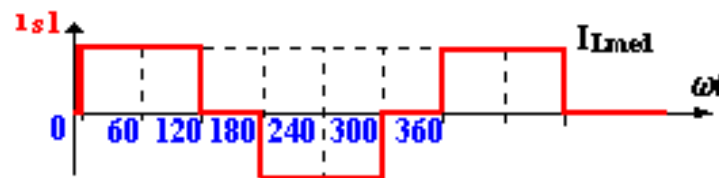
A conexão mais comum do transformador, é aquela em que o primário é ligado em delta e o secundário em estrela.



$$i_1 = i_{p1} - i_{p3}$$

## a) Corrente eficaz no enrolamento secundário

$$I_{sef} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \left[ \int_0^{2\pi/3} \{I_{Lmed}\}^2 d(\omega t) + \int_{\pi}^{5\pi/3} \{I_{Lmed}\}^2 d(\omega t) \right]} = \sqrt{\frac{2}{3}} I_{Lmed}$$

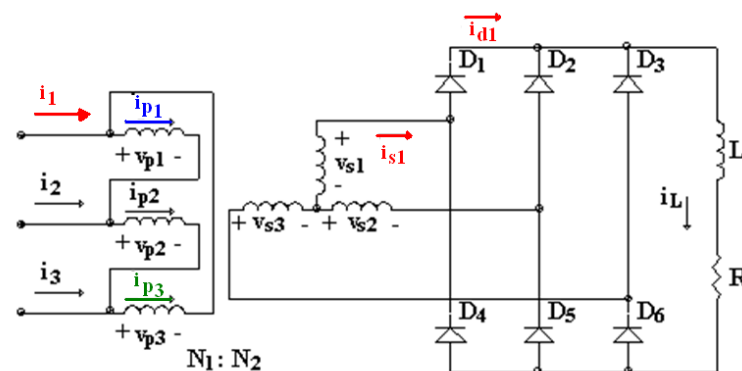


## b) Tensão eficaz na fase do enrolamento secundário

$$V_{sef} = V_O \cong V_{Lmed} / 2,34$$

## c) A potência aparente que circula nos enrolamentos do secundário

$$S_2 = 3V_O I_{sef} \cong \frac{3V_{Lmed}}{2,34} \cdot \sqrt{\frac{2}{3}} I_{Lmed} \cong 1,05 P_L$$



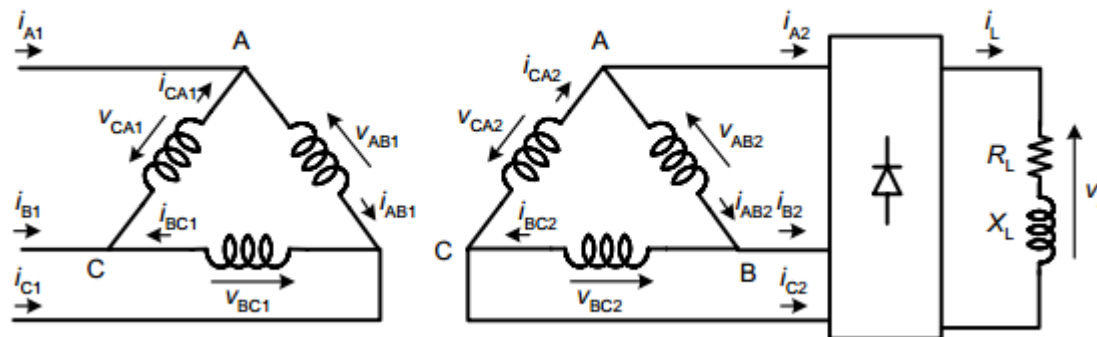
O retificador trifásico de seis pulsos, ou ponte de Graetz, é a estrutura retificadora que propicia o melhor aproveitamento do transformador.

Como as correntes primárias e secundárias por fase são iguais, a potência aparente que a rede entrega ao transformador é igual a  $S_2$ . Assim:

$$S_1 = S_2$$

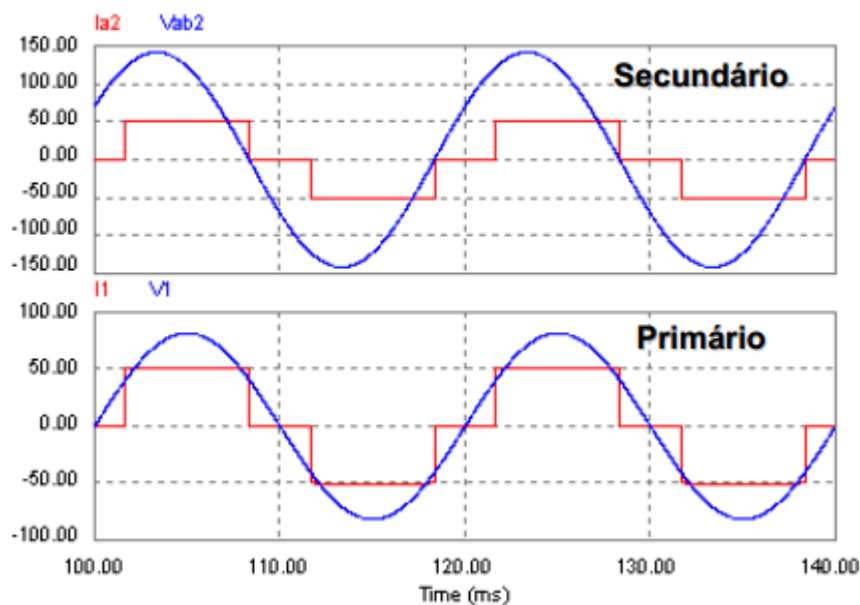


## Transformador $\Delta$ - $\Delta$

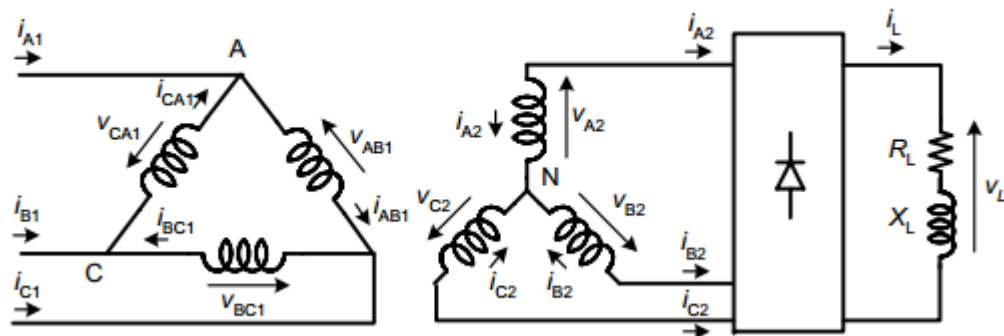


## Formas de onda $\Delta$ - $\Delta$

**$I = 50A$**   
 **$V_o = 57,73V$**   
 **$f = 50Hz$**   
 **$N_1 = 1$**   
 **$N_2 = 1$**



## Transformador $\Delta$ -Y



## Formas de onda $\Delta$ -Y

$I = 50A$   
 $V_o = 57,73V$   
 $f = 50Hz$   
 $N_1 = 1.73$   
 $N_2 = 1$

