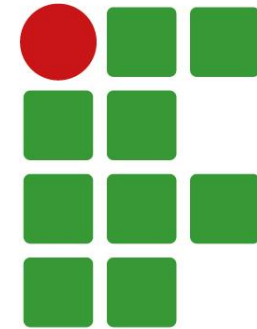


Conversão de Energia I (CVEE6)

Aula 07

Prof. Elian João Agnoletto
agnoletto.elian@ifsp.edu.br



**INSTITUTO
FEDERAL**

São Paulo

Câmpus
Cubatão

Roteiro

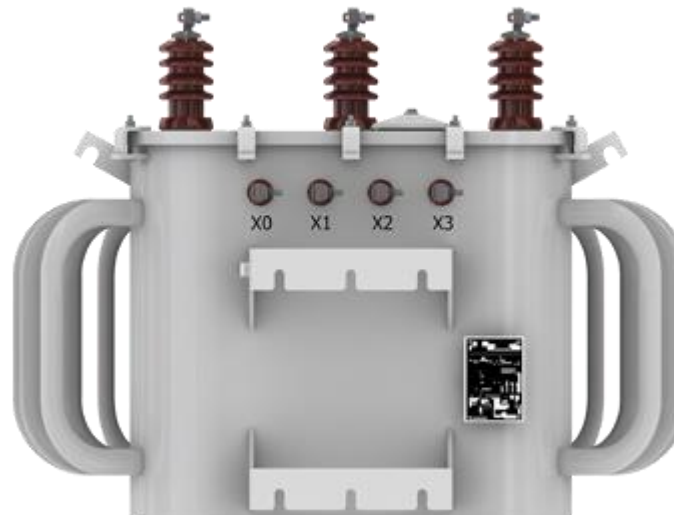
- ❑ Transformadores trifásicos.

Transformadores trifásicos

- ❑ Equipamentos indispensáveis para o funcionamento de um sistema elétrico;
- ❑ Presentes nos principais sistemas de geração e distribuição de potência no mundo;



CVEE6

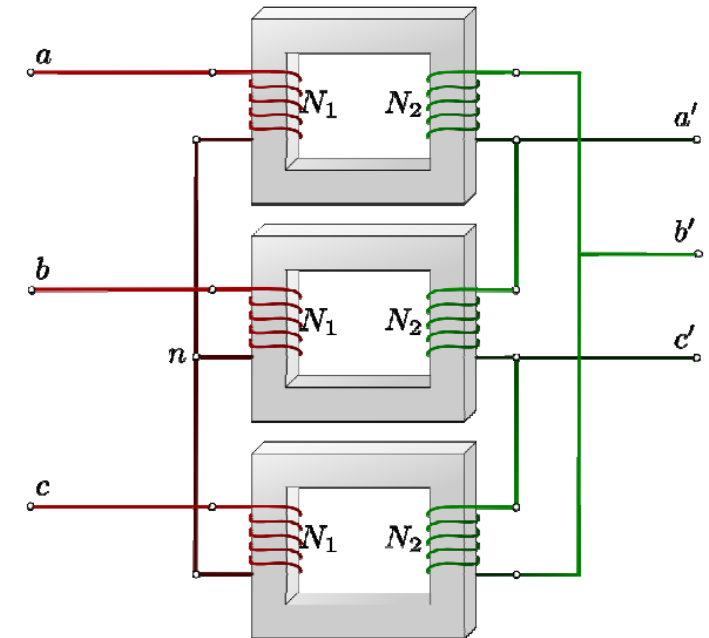
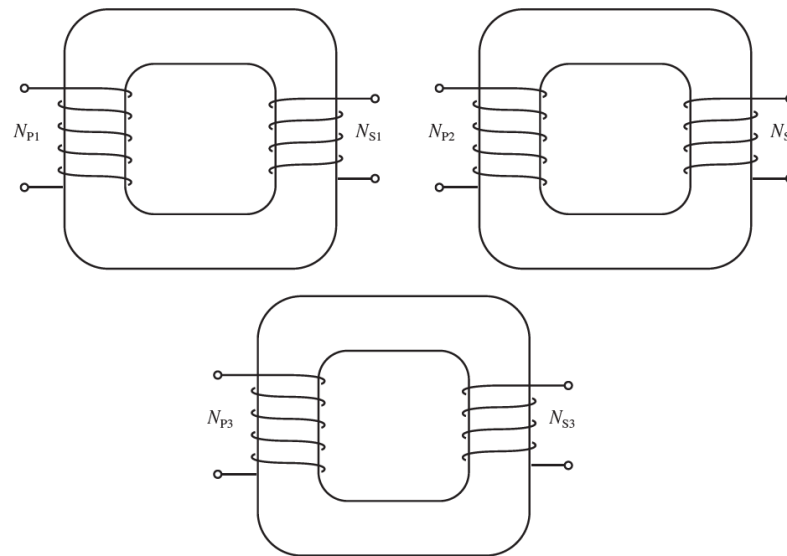


Conversão de Energia I



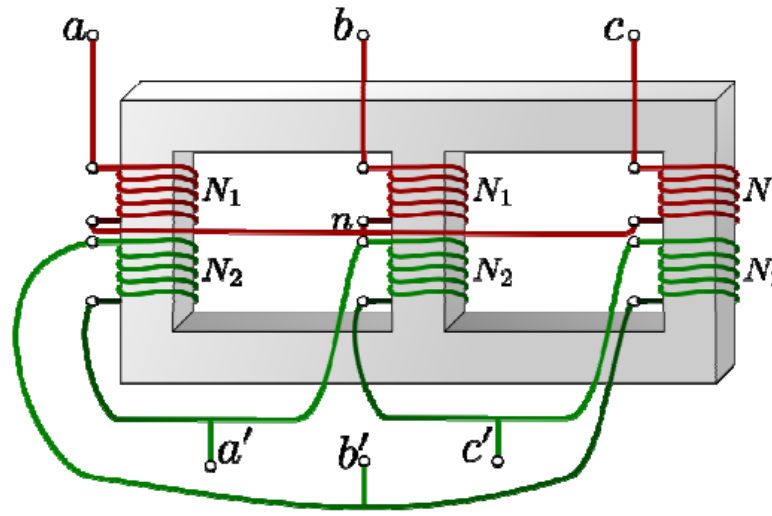
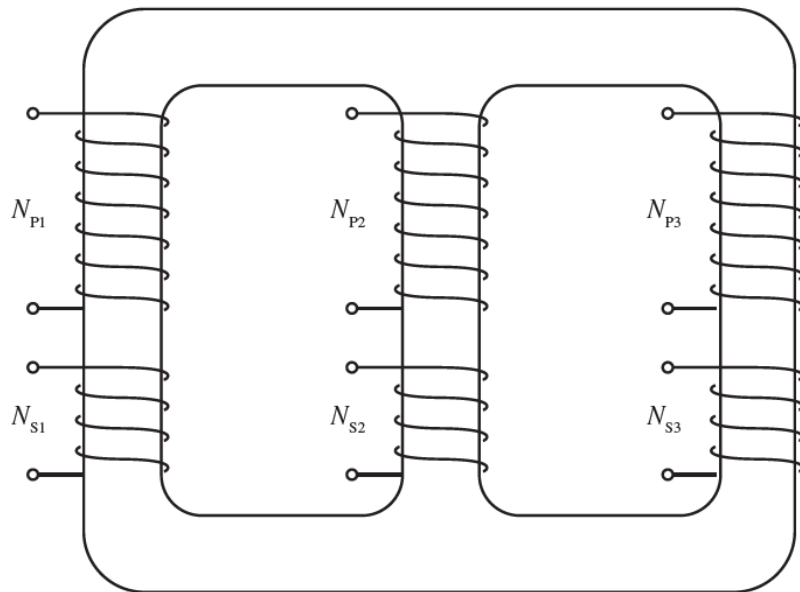
Transformadores trifásicos

- Podem ser construídos a partir de transformadores monofásicos (banco trifásico) ou por meio de três conjuntos de enrolamentos que envolvem um núcleo comum;
- Banco monofásico:** flexibilidade (substituição individual no caso de problema), estoque.



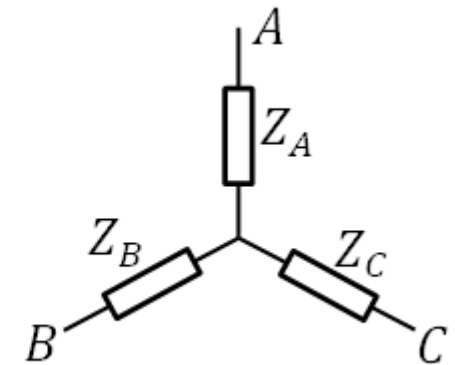
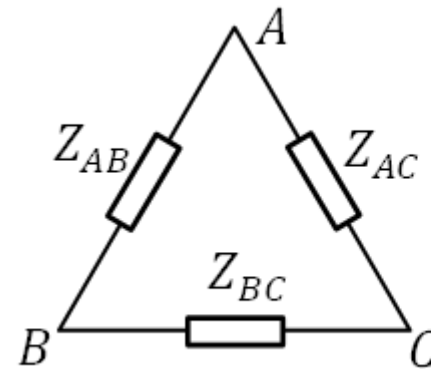
Transformadores trifásicos

- ❑ Podem ser construídos a partir de transformadores monofásicos (banco trifásico) ou por meio de três conjuntos de enrolamentos que envolvem um núcleo comum;
- ❑ **Transformador trifásico**: mais leve, menor, custo mais baixo e ligeiramente mais eficiente.



Ligações em um transformador trifásico

- ❑ Um transformador trifásico é constituído de pelo menos três enrolamentos no primário e três enrolamentos no secundário;
- ❑ Como qualquer componente trifásico, podem ser conectados em Estrela (Y) ou Delta (Δ);
- ❑ Principais configurações possíveis de ligação:
 - Estrela-estrela (Y – Y)
 - Estrela-triângulo (Y – Δ)
 - Triângulo-estrela (Δ – Y)
 - Triângulo-triângulo (Δ – Δ)



Ligações em um transformador trifásico

- ❑ A análise de um banco de transformadores trifásicos pode ser realizada para um único transformador do banco;
- ❑ Para os transformadores trifásicos, os cálculos de impedância, regulação de tensão, eficiência e outros similares são **realizados tomando uma fase de cada vez**;
- ❑ A **relação de transformação** de transformadores trifásicos são especificadas pela razão entre as tensões de linha do primário e do secundário.

Circuitos trifásicos

Definições:

- **Tensão de fase:** tensão medida entre fase e neutro;
- **Tensão de linha:** tensão medida entre duas fases.

A tensão de linha é dada por:

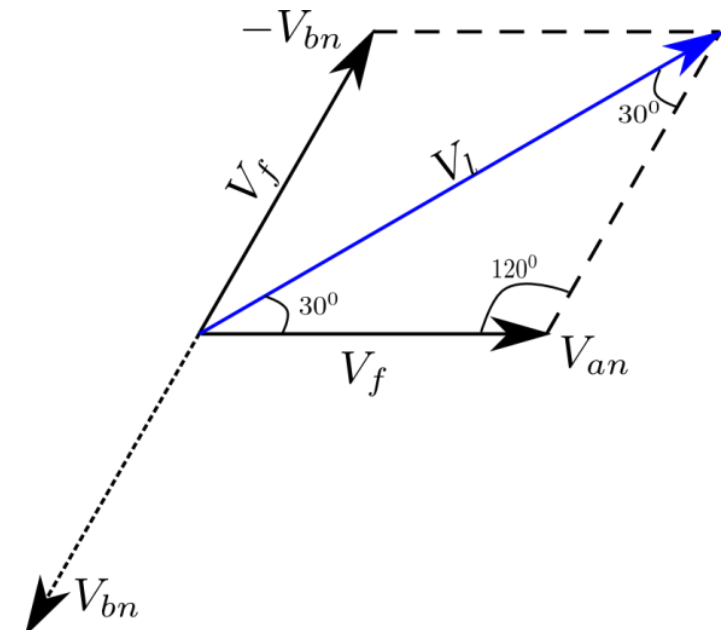
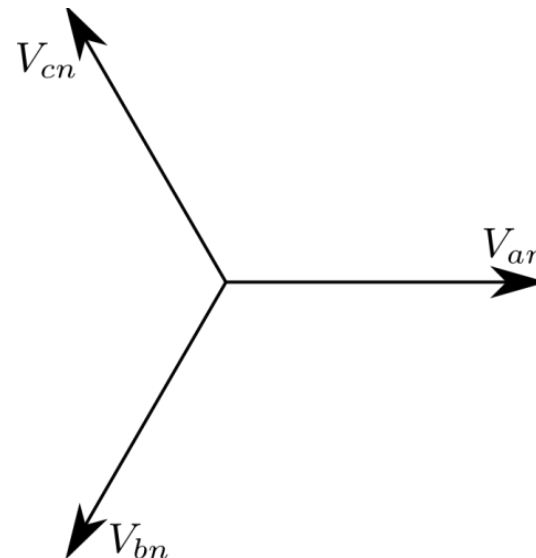
$$V_{ab} = V_{an} - V_{bn}$$

Tensões de fase:

$$V_{an} = V_f \text{ sen}(\omega t)$$

$$V_{bn} = V_f \text{ sen}(\omega t - 120^\circ)$$

$$V_{cn} = V_f \text{ sen}(\omega t + 120^\circ)$$



Circuitos trifásicos

❑ As conexões Y- Δ e Δ -Y envolvem defasagens de 30° entre as tensões de linha do primário e do secundário.

❑ Tensões de fase:

$$V_{an} = V \sin(\omega t)$$

$$V_{bn} = V \sin(\omega t - 120^\circ)$$

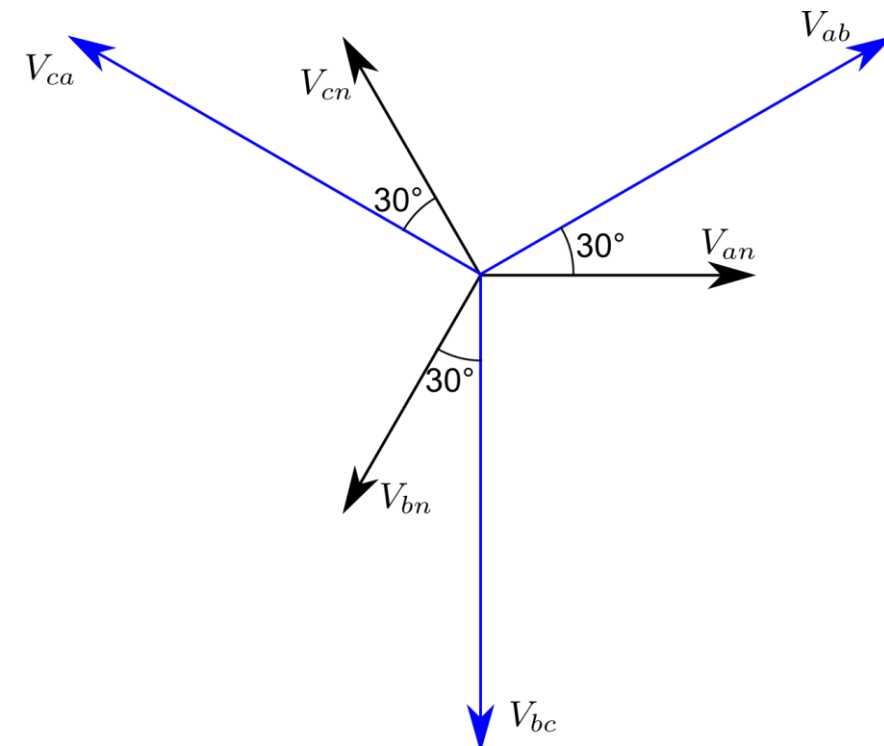
$$V_{cn} = V \sin(\omega t + 120^\circ)$$

❑ Tensões de linha:

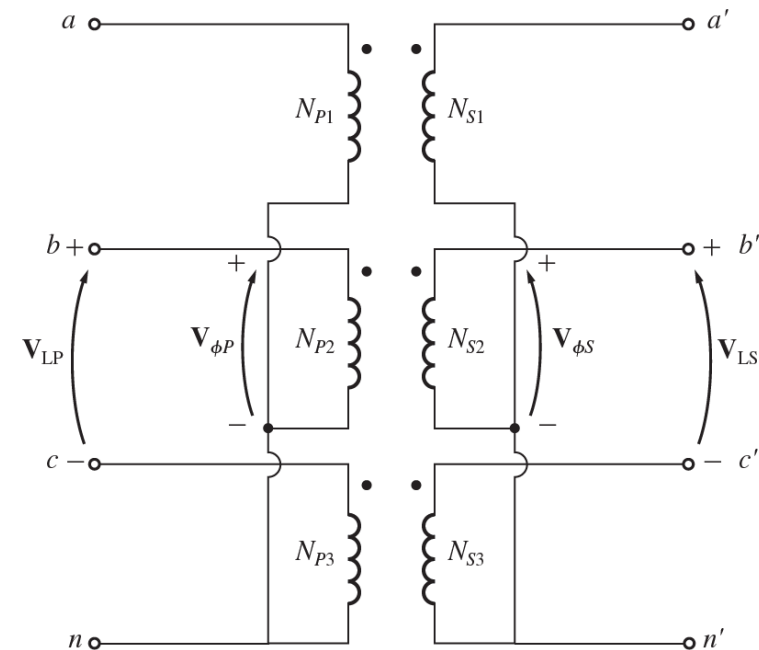
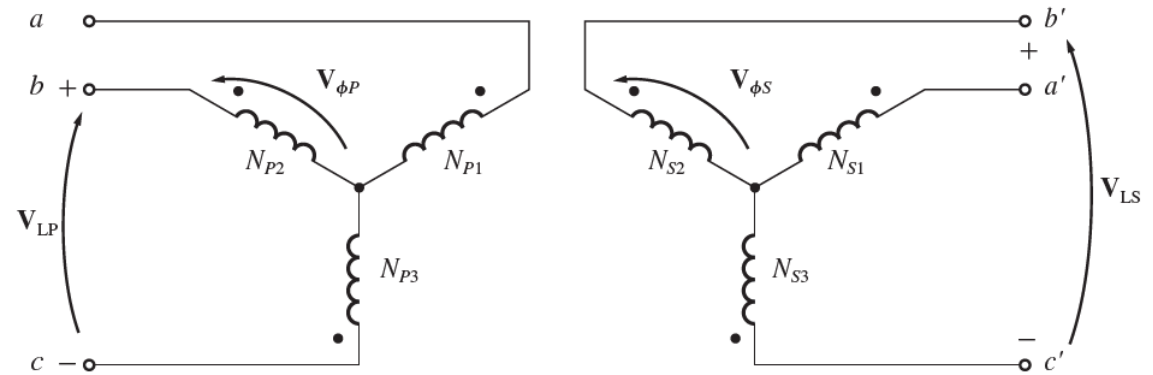
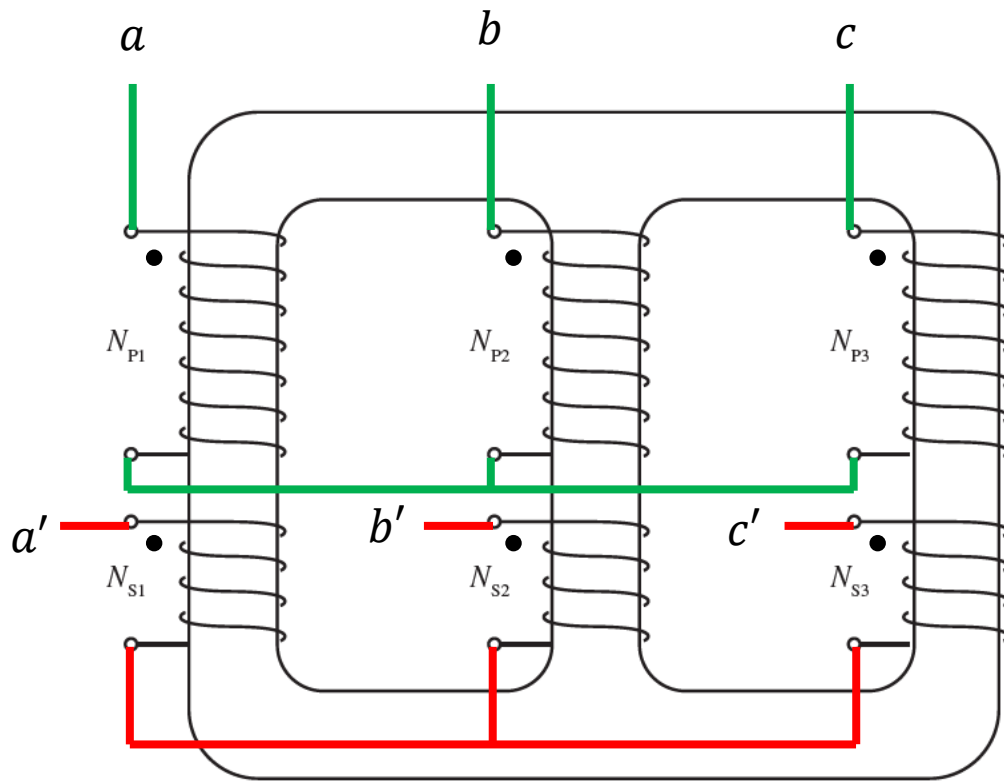
$$V_{ab} = V_{an} - V_{bn} = \sqrt{3}V \sin(\omega t + 30^\circ)$$

$$V_{bc} = V_{bn} - V_{cn} = \sqrt{3}V \sin(\omega t - 90^\circ)$$

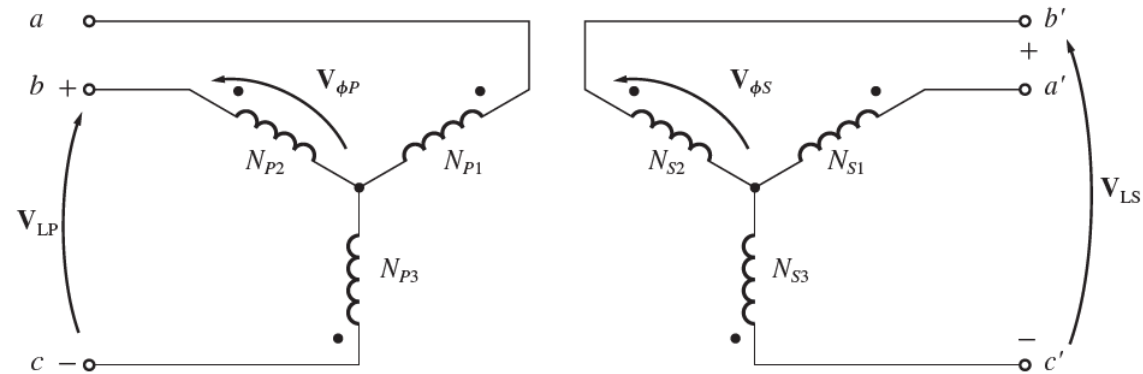
$$V_{ca} = V_{cn} - V_{an} = \sqrt{3}V \sin(\omega t + 150^\circ)$$



Ligação Y – Y



Ligação Y – Y



Relações de tensões:

$$\frac{V_{\phi P}}{V_{\phi S}} = a$$

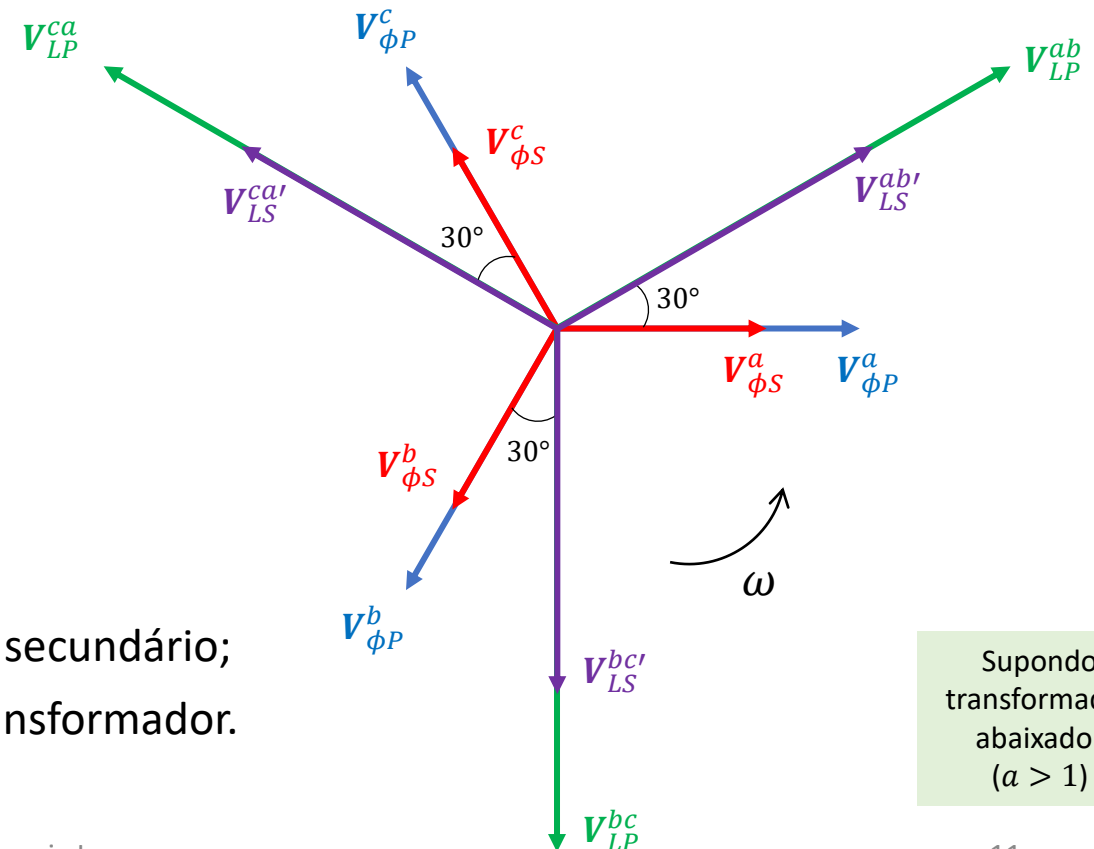
$$V_{LP} = \sqrt{3}V_{\phi P}$$

$$V_{LS} = \sqrt{3}V_{\phi S}$$

relação de
transformação

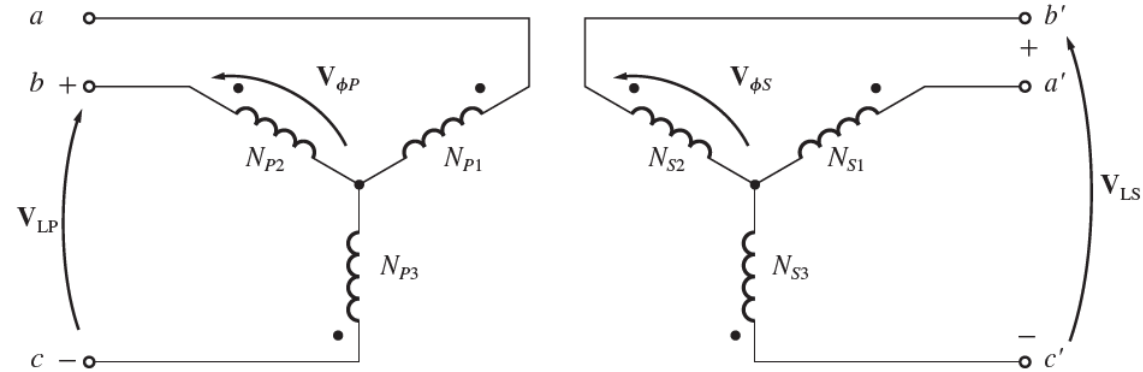
$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{\sqrt{3}V_{\phi P}}{\sqrt{3}V_{\phi S}} = a$$

- Não há defasagem angular entre as tensões do primário e do secundário;
- A relação de transformação é igual à relação de espiras do transformador.



Supondo
transformador
abaixador
($a > 1$)

Ligação Y – Y

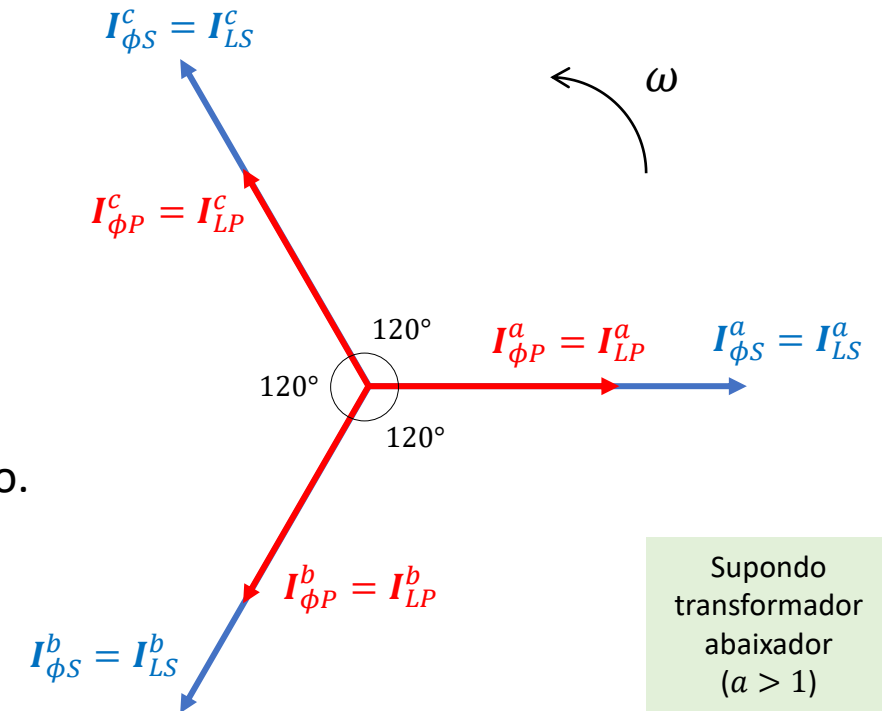


Relações de correntes:

$$\frac{I_{\phi P}}{I_{\phi S}} = \frac{1}{a}$$

$$\frac{I_{LP}}{I_{LS}} = \frac{I_{\phi P}}{I_{\phi S}} = \frac{1}{a}$$

- Não há defasagem angular entre as correntes do primário e do secundário.

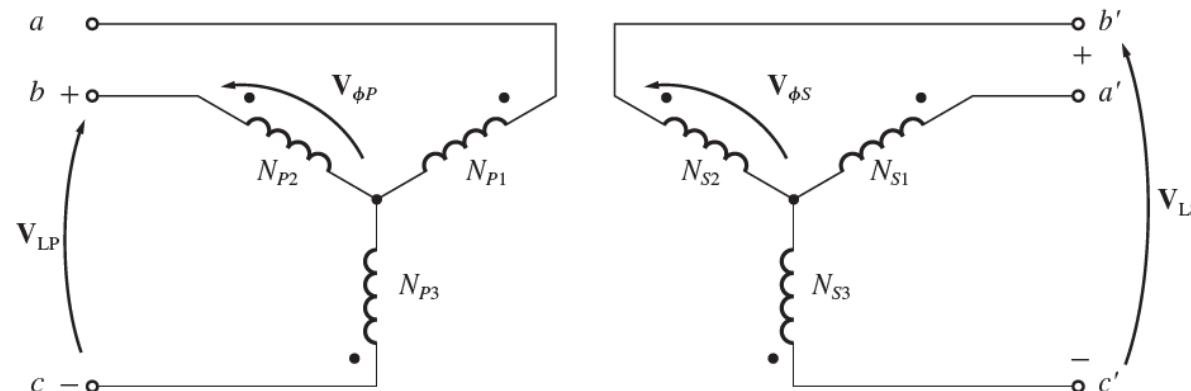


Supondo
transformador
abaixador
($a > 1$)

Ligação Y – Y

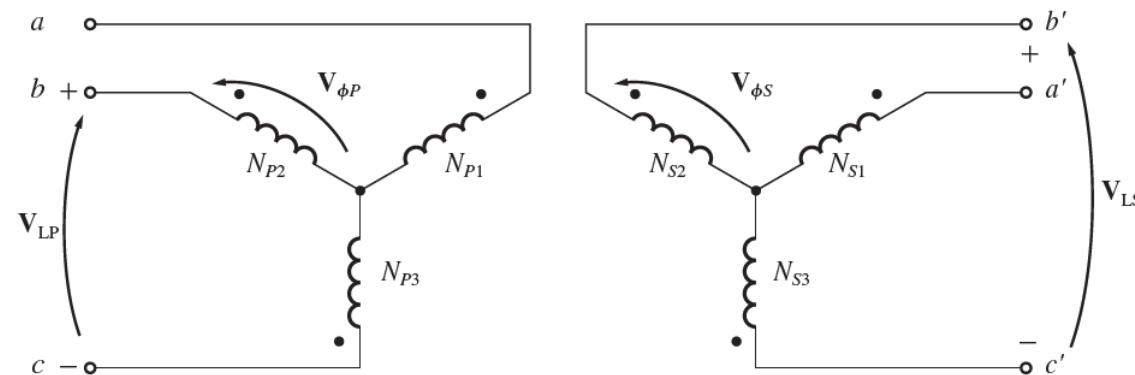
❑ Problemas:

- Se as cargas no circuito do transformador estiverem desequilibradas, as tensões nas fases do transformador podem se tornar gravemente desequilibradas;
- Como não há conexão de neutro para conduzir as harmônicas da corrente de excitação, tensões harmônicas são produzidas distorcendo de modo significativo as tensões do transformador;
- As tensões das terceiras harmônicas podem ser elevadas.

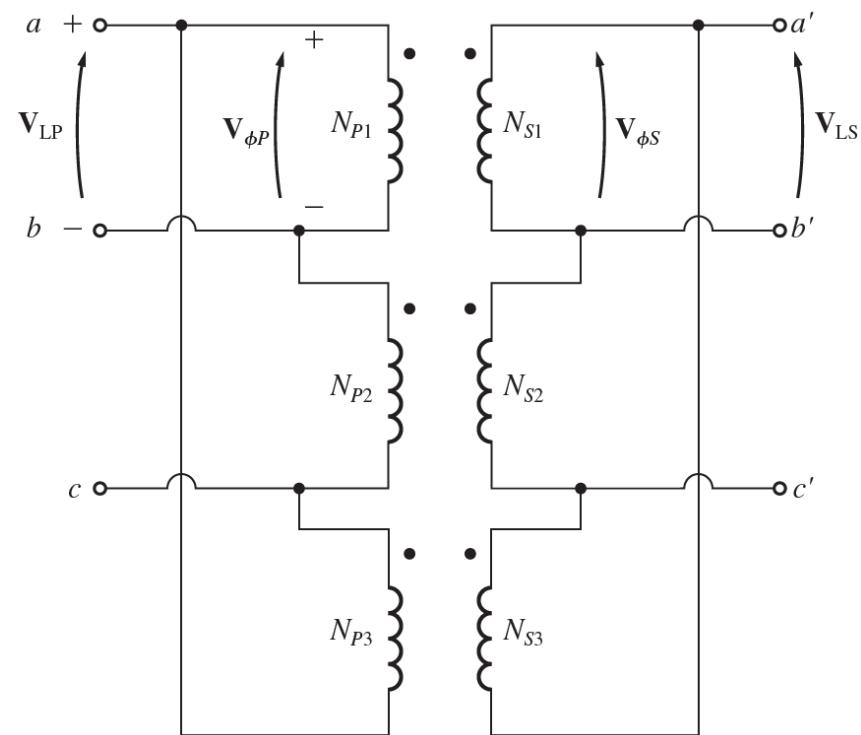
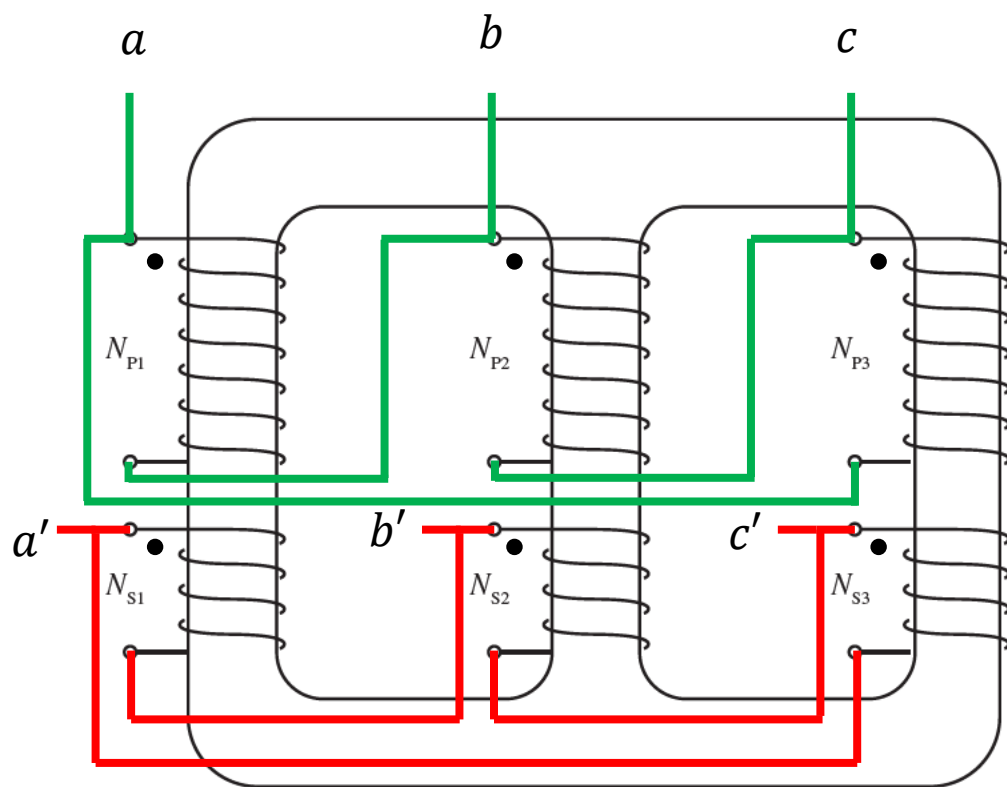
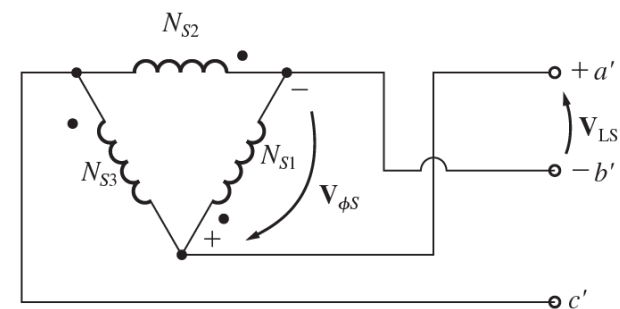
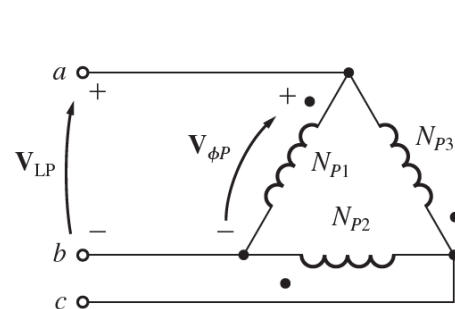


Ligação Y – Y

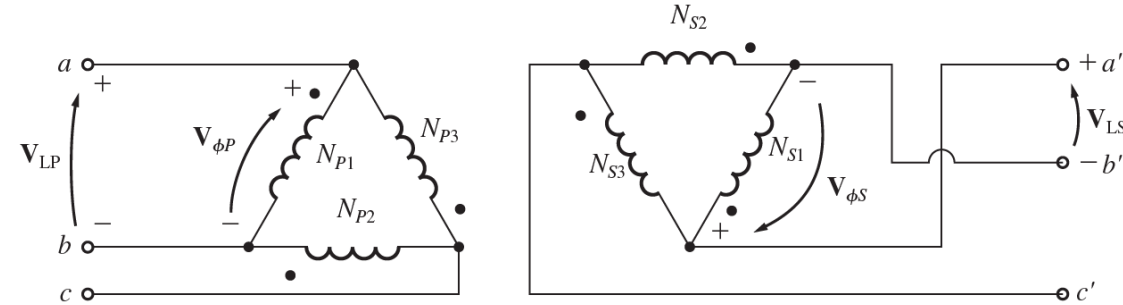
- Os problemas de desequilíbrio e de terceira harmônica podem ser resolvidos utilizando uma das duas técnicas seguintes:
 - ✓ Aterrar solidamente os neutros dos transformadores, especialmente o neutro do enrolamento primário;
 - ✓ Acrescentar um terceiro enrolamento (terciário) ligado em Δ ao banco de transformadores;
- A ligação Y – Y é pouco utilizada na prática.



Ligação $\Delta - \Delta$



Ligação $\Delta - \Delta$



Relações de tensões:

$$\frac{V_{\phi P}}{V_{\phi S}} = a$$

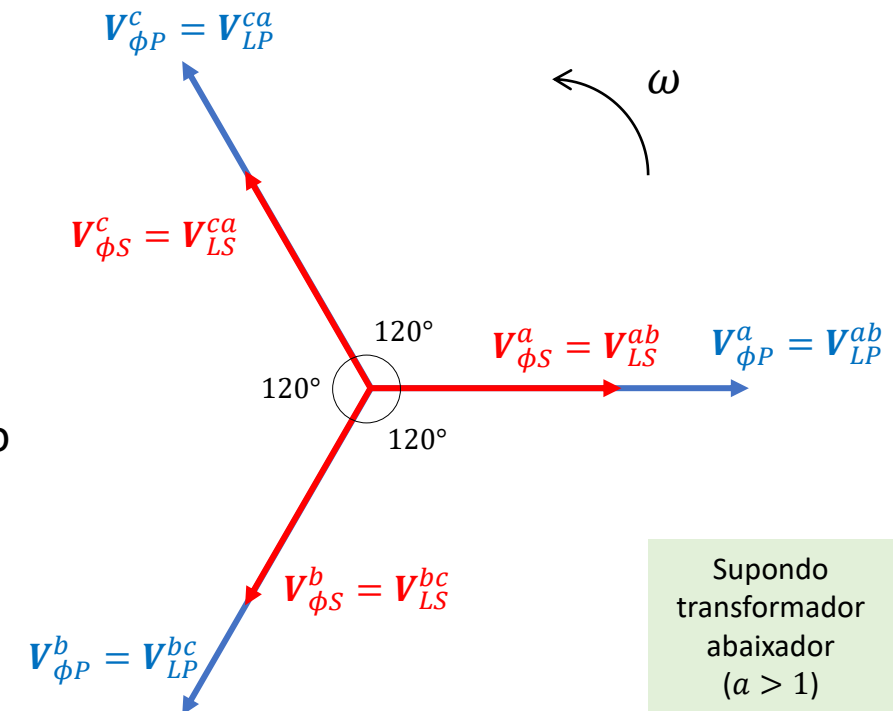
$$V_{LP} = V_{\phi P}$$

$$V_{LS} = V_{\phi S}$$

relação de
transformação

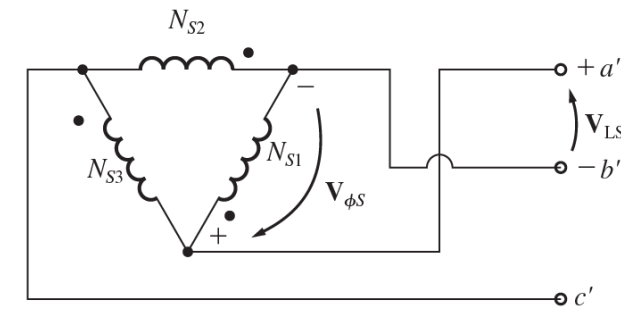
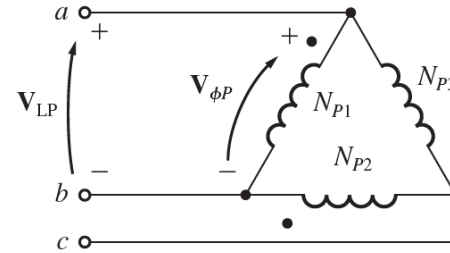
$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{V_{\phi P}}{V_{\phi S}} = a$$

- Não apresenta nenhum deslocamento de fase entre as tensões do primário e do secundário;
- Não tem problemas de cargas desequilibradas ou harmônicas;
- A relação de transformação é igual à relação de espiras do transformador.



Supondo
transformador
abaixador
($a > 1$)

Ligação $\Delta - \Delta$

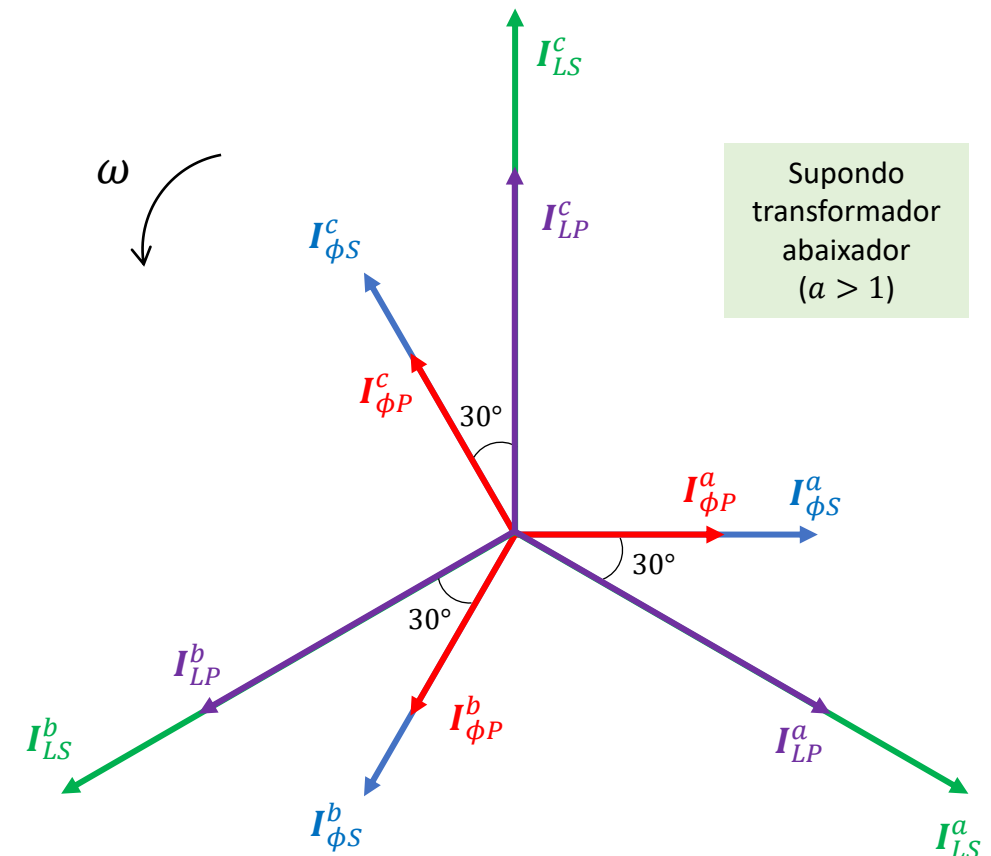


Relações de correntes:

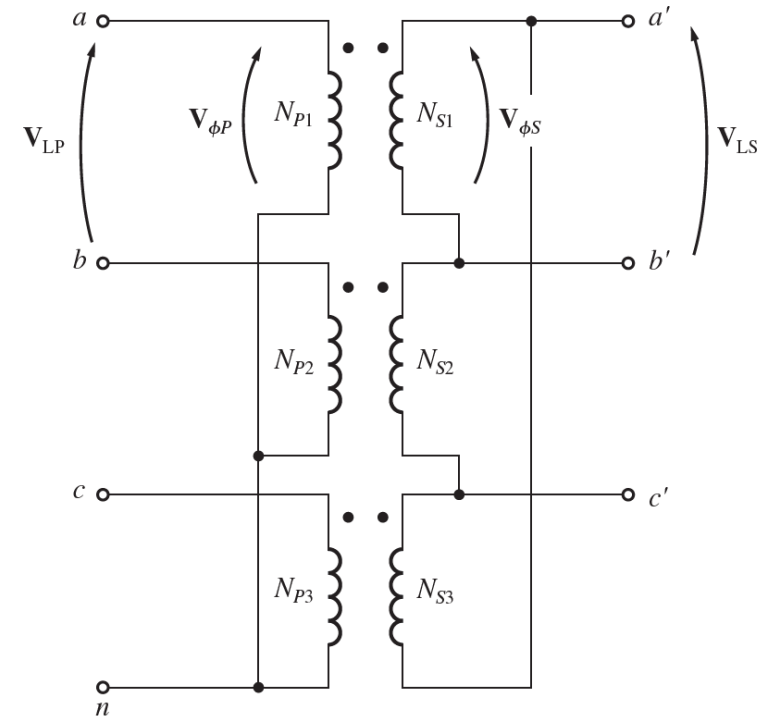
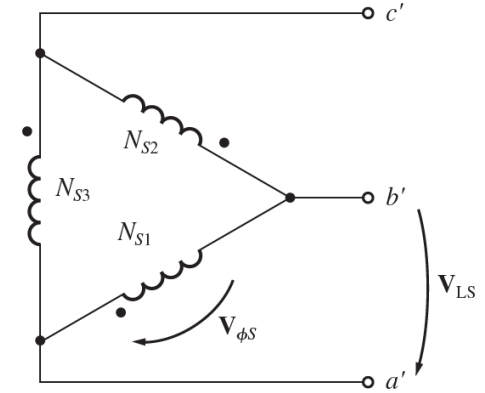
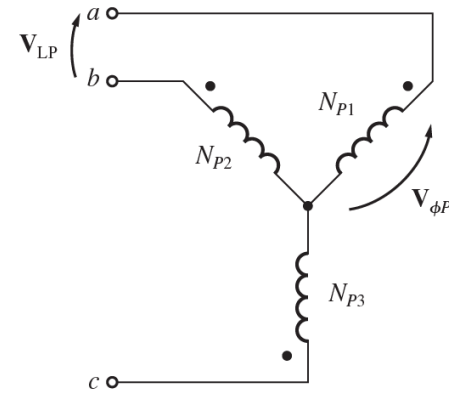
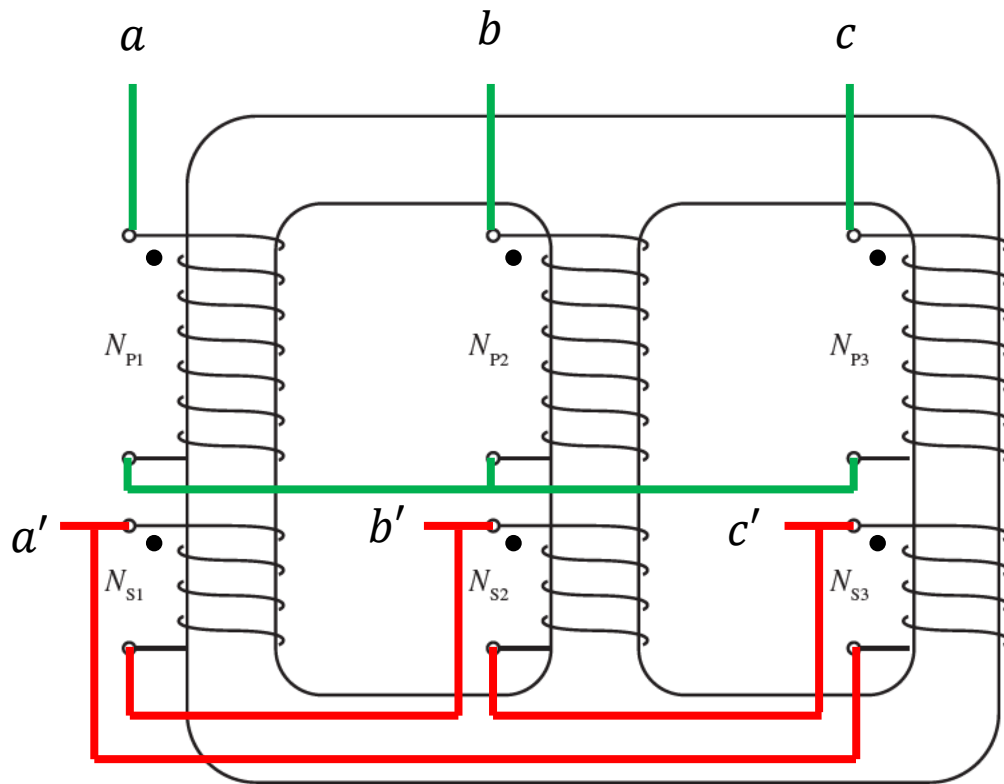
$$\frac{I_{\phi P}}{I_{\phi S}} = \frac{1}{a}$$

$$\frac{I_{LP}}{I_{LS}} = \frac{\sqrt{3}I_{\phi P}}{\sqrt{3}I_{\phi S}} = \frac{1}{a}$$

- ❑ Não apresenta deslocamento de fase entre as correntes do primário e do secundário;
- ❑ Defasagem de 30° em relação às correntes de linha e de fase (natural da ligação Δ);
- ❑ Não tem problemas de cargas desequilibradas ou harmônicas.



Ligação Y – Δ



Ligação Y – Δ

Relações de tensões:

$$\frac{V_{\phi P}}{V_{LS}} = a$$

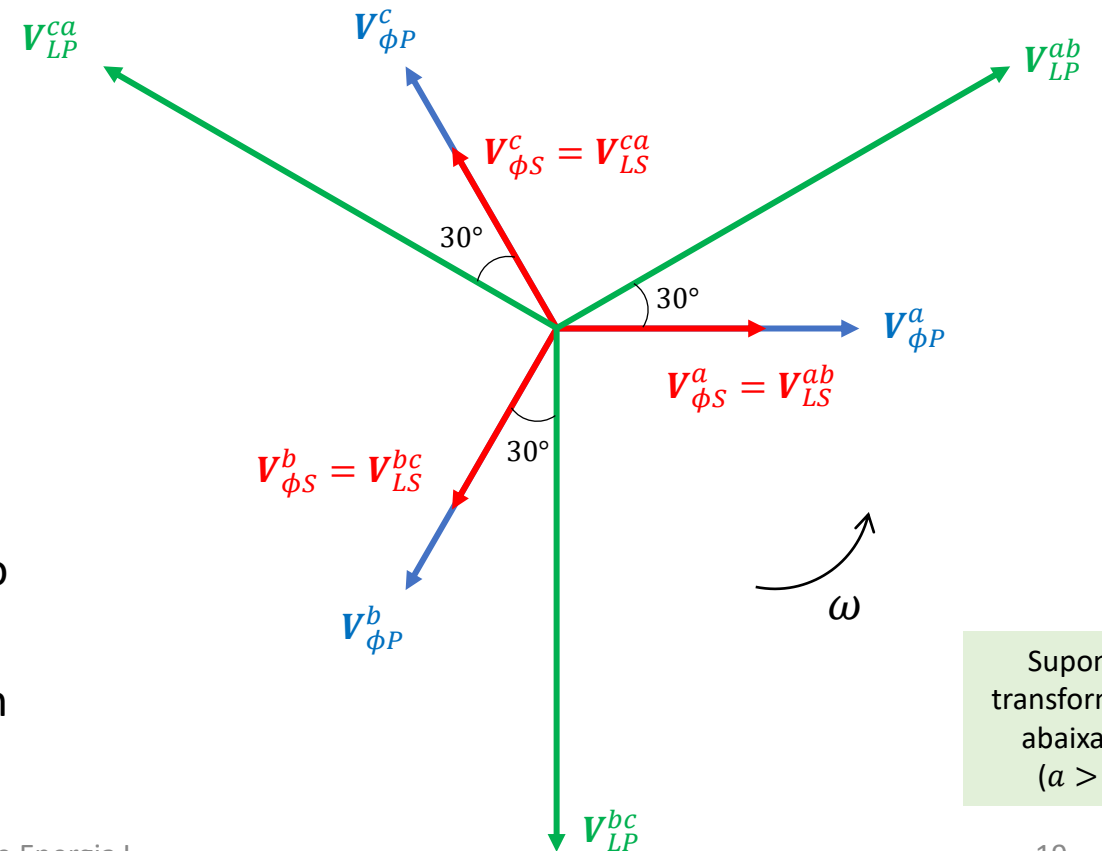
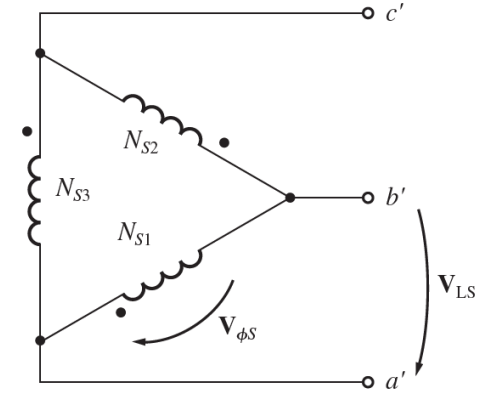
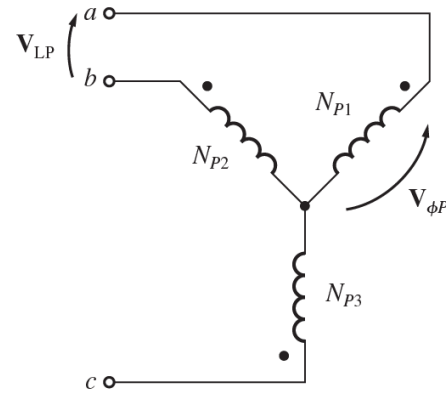
$$V_{LP} = \sqrt{3}V_{\phi P}$$

$$V_{LS} = V_{\phi S}$$

relação de
transformação

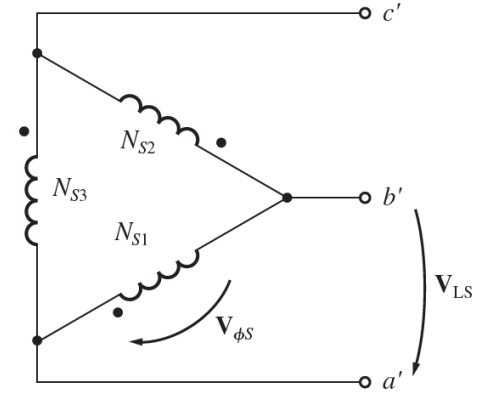
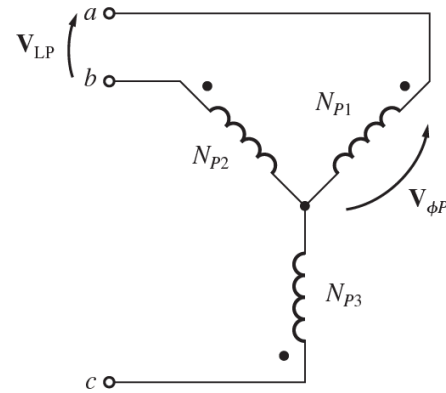
$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{\sqrt{3}V_{\phi P}}{V_{LS}} = \sqrt{3}a$$

- Defasagem de 30° em relação às tensões de linha do primário e do secundário;
- A tensão de linha do secundário está **atrasada 30°** em relação à tensão de linha do primário;



Supondo
transformador
abaixador
($a > 1$)

Ligação Y – Δ

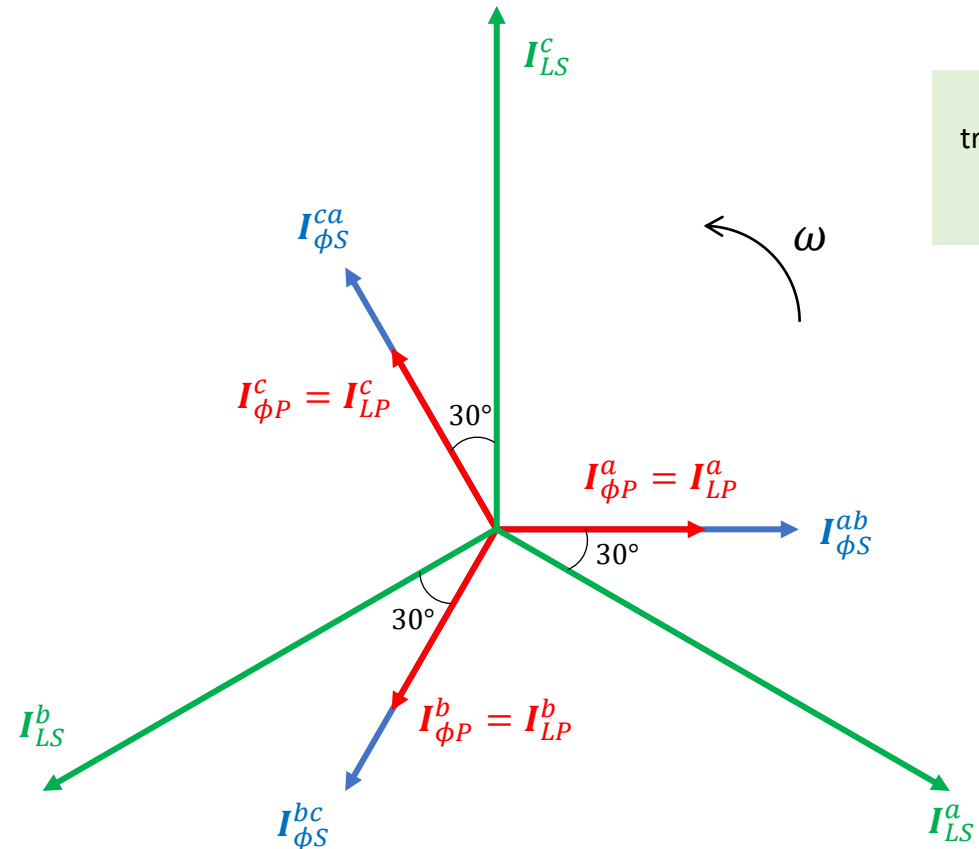


Relações de correntes:

$$\frac{I_{\phi P}}{I_{\phi S}} = \frac{1}{a}$$

$$\frac{I_{LP}}{I_{LS}} = \frac{I_{\phi P}}{\sqrt{3}I_{\phi S}} = \frac{1}{\sqrt{3}a}$$

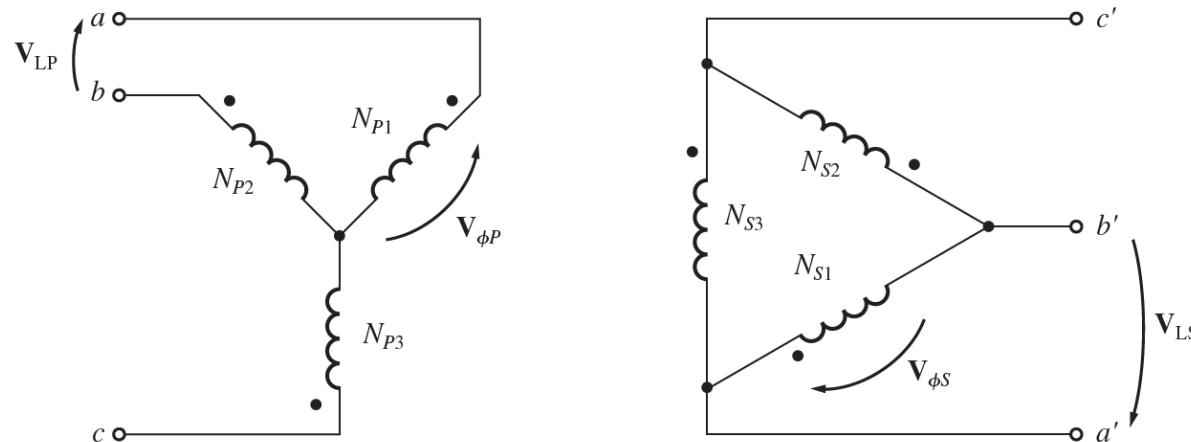
- Apresenta deslocamento de fase de 30° entre as correntes de linha do primário e do secundário;
- A corrente de linha do primário está **adiantada 30°** em relação à corrente de linha do secundário.



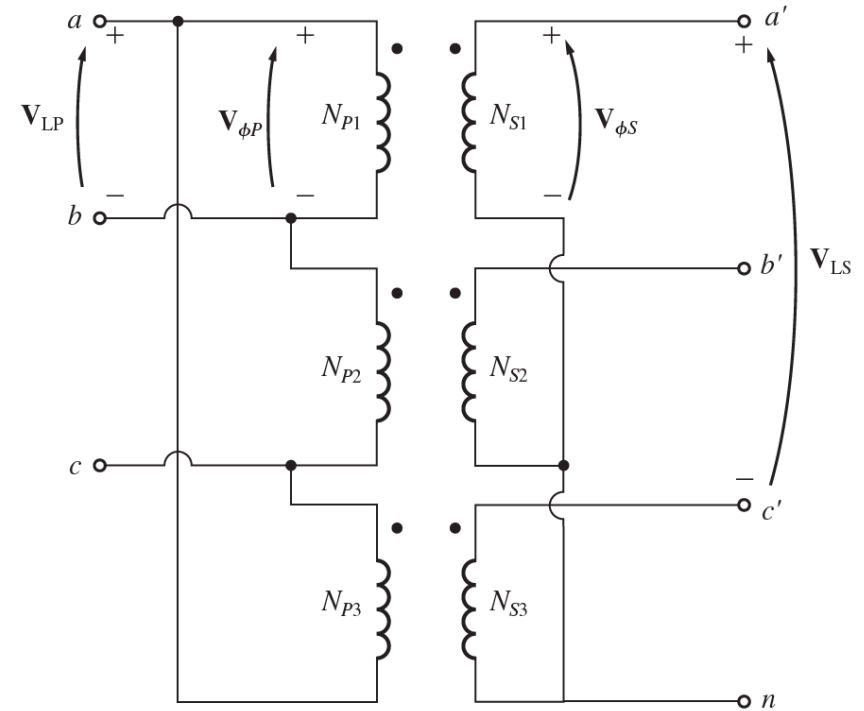
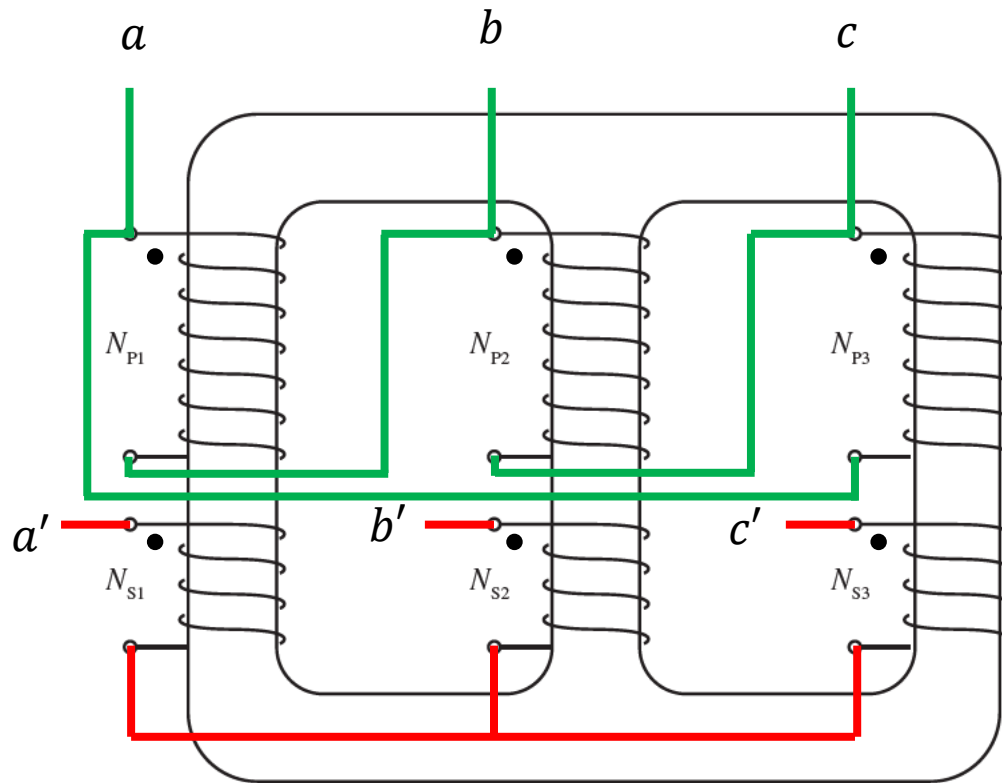
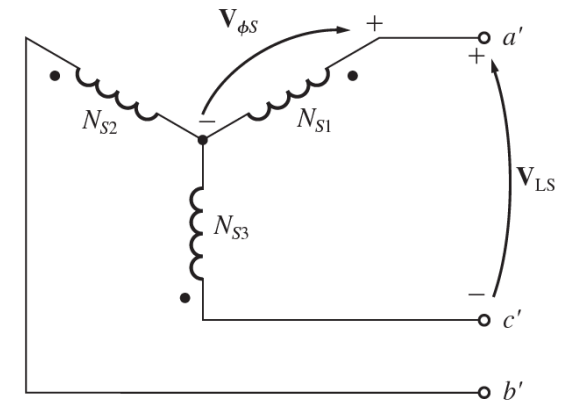
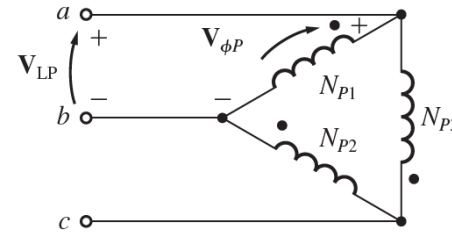
Supondo
transformador
abaixador
($a > 1$)

Ligação Y – Δ

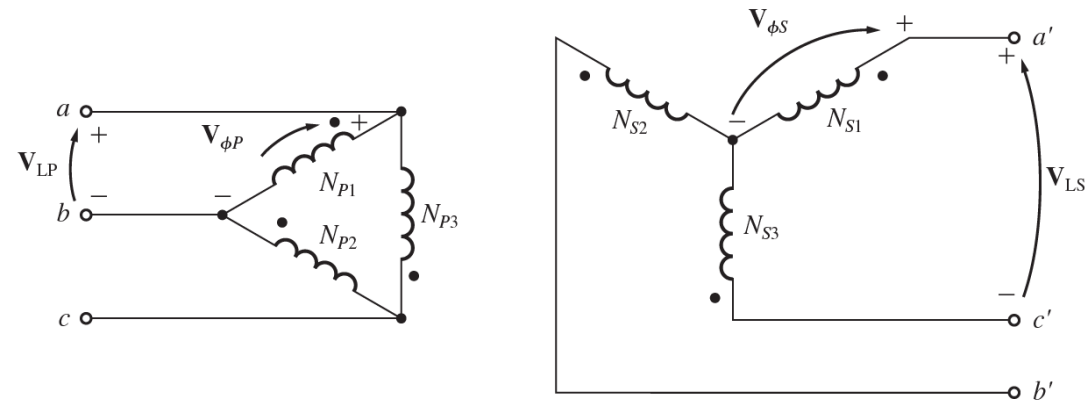
- ❑ Não apresenta problemas com as componentes de terceira harmônica em suas tensões, porque elas são suprimidas por uma corrente que circula no lado Δ ;
- ❑ Mais estável em relação a cargas desequilibradas, porque o lado Δ redistribui parcialmente qualquer desequilíbrio que possa ocorrer;
- ❑ A tensão secundária é deslocada de 30° em relação à tensão primária do transformador (cuidados adicionais com paralelismo de transformadores).



Ligação $\Delta - Y$



Ligação $\Delta - Y$



Relações de tensões:

$$\frac{V_{\phi P}}{V_{\phi S}} = a$$

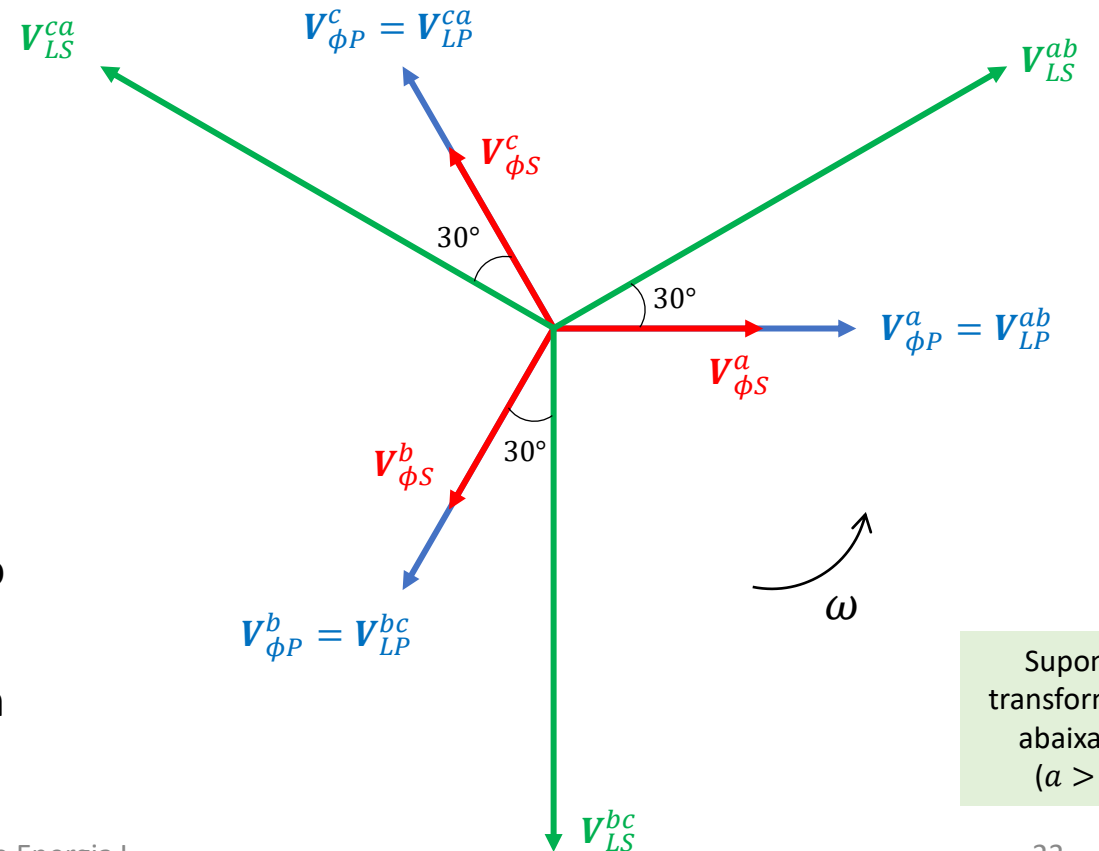
$$V_{LP} = V_{\phi P}$$

$$V_{LS} = \sqrt{3}V_{\phi S}$$

relação de
transformação

$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{V_{\phi P}}{\sqrt{3}V_{\phi S}} = \frac{a}{\sqrt{3}}$$

- Defasagem de 30° em relação às tensões de linha do primário e do secundário;
- A tensão de linha do secundário está **adiantada 30°** em relação à tensão de linha do primário;



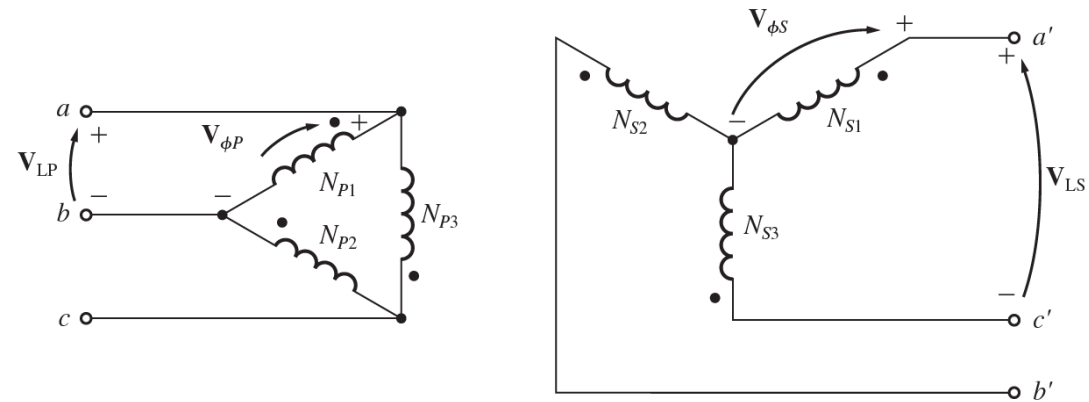
Supondo
transformador
abaixador
($a > 1$)

Ligação $\Delta - Y$

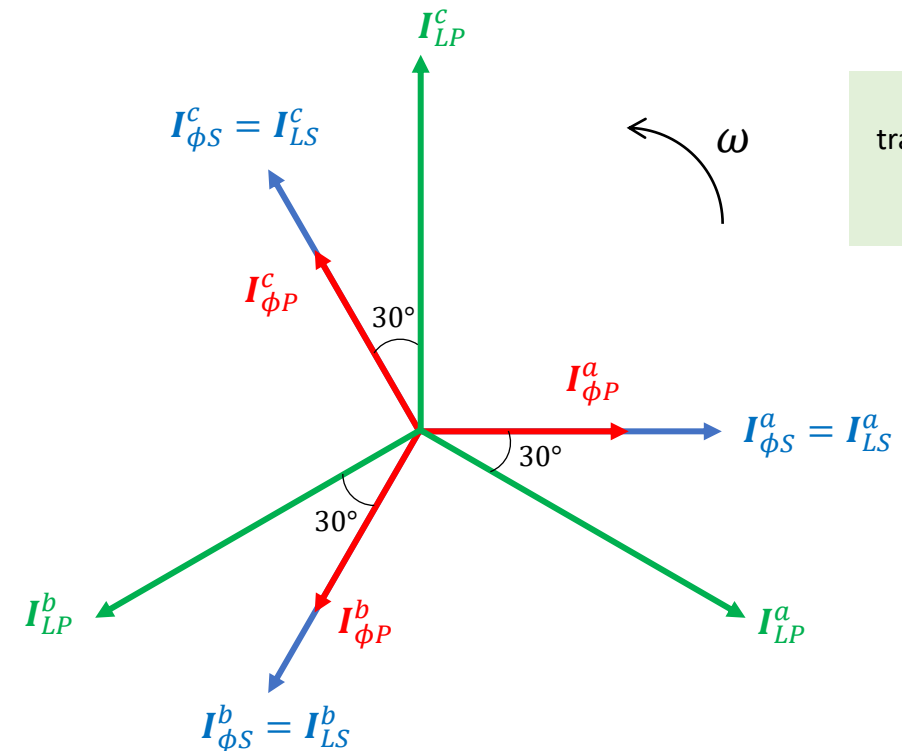
Relações de correntes:

$$\frac{I_{\phi P}}{I_{\phi S}} = \frac{1}{a}$$

$$\frac{I_{LP}}{I_{LS}} = \frac{\sqrt{3}I_{\phi P}}{I_{\phi S}} = \frac{\sqrt{3}}{a}$$

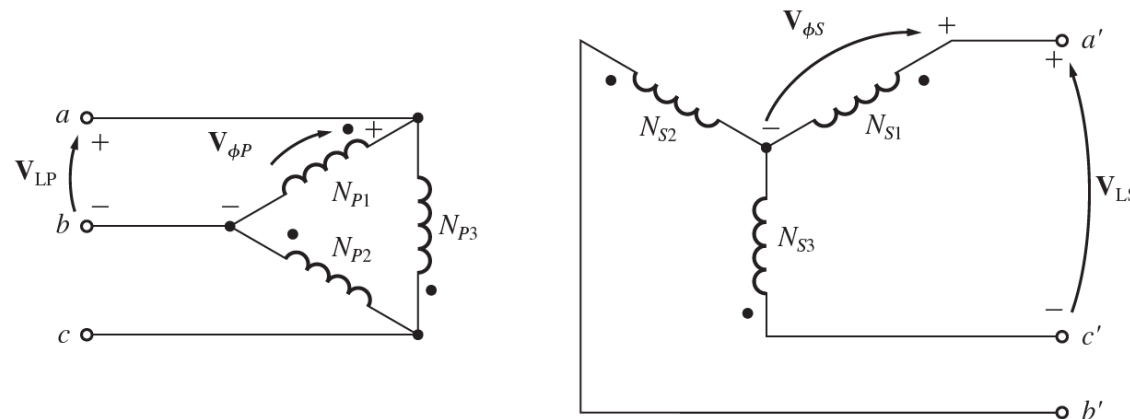


- Apresenta deslocamento de fase de 30° entre as correntes de linha do primário e do secundário;
- A corrente de linha do primário está **atrasada 30°** em relação à corrente de linha do secundário.



Ligação $\Delta - Y$

- ❑ Não apresenta problemas com as componentes de terceira harmônica em suas tensões, porque elas são suprimidas por uma corrente que circula no lado;
- ❑ Mais estável em relação a cargas desequilibradas, porque o lado Δ redistribui parcialmente qualquer desequilíbrio que possa ocorrer;
- ❑ A tensão secundária é deslocada de 30° em relação à tensão primária do transformador (cuidados adicionais com paralelismo de transformadores).



Conversão de Energia I (CVEE6)

Obrigado!

Prof. Elian João Agnoletto
agnoletto.elian@ifsp.edu.br

