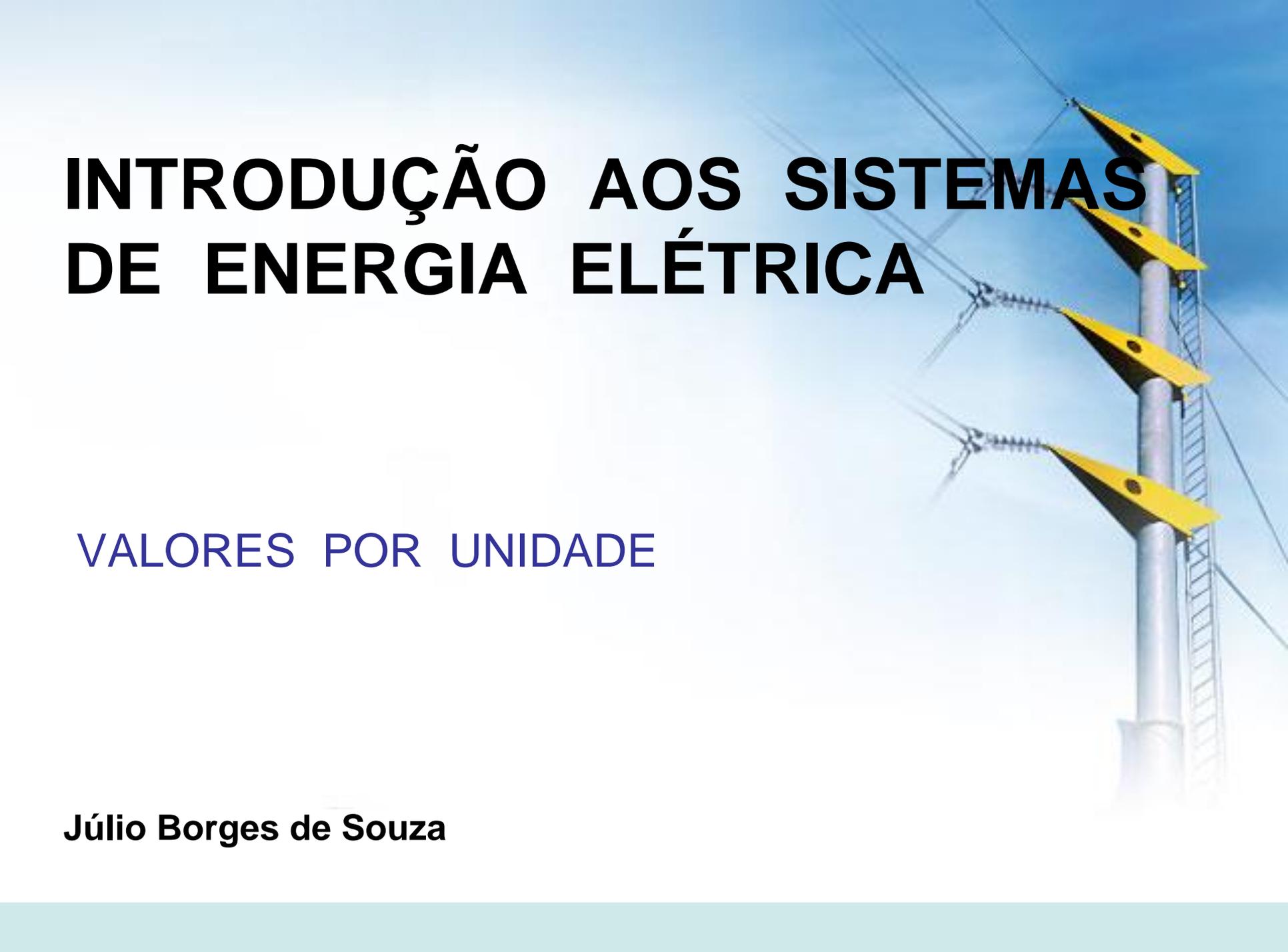


# INTRODUÇÃO AOS SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA



VALORES POR UNIDADE

Júlio Borges de Souza

## 2.1 - INTRODUÇÃO

---

- A UTILIZAÇÃO DE VARIÁVEIS ELÉTRICAS “REAIS” PARA A ANÁLISE DE CIRCUITOS ELÉTRICOS APRESENTA CERTAS DIFICULDADES EM TERMOS DE ORDEM DE GRANDEZA DESTAS VARIÁVEIS, BEM COMO QUANDO EXISTEM TRANSFORMADORES NO CIRCUITO.
- OS VALORES PERCENTUAIS E OS VALORES POR UNIDADE (PU) CORRESPONDEM A UMA MUDANÇA DE ESCALA DAS PRINCIPAIS GRANDEZAS EM SISTEMAS ELÉTRICOS: TENSÃO, CORRENTE, POTÊNCIA E IMPEDÂNCIA.
- O OBJETIVO DE SEU EMPREGO CONSISTE EM FACILITAR O CÁLCULO DE REDES, ESPECIALMENTE QUANDO EXISTEM TRANSFORMADORES NOS SISTEMAS EM ESTUDO.

## 2.2 - DEFINIÇÕES

---

- PARA RELACIONARMOS OS MÓDULOS DAS QUATRO PRINCIPAIS GRANDEZAS ELÉTRICAS EM CIRCUITOS MONOFÁSICOS, TEM-SE:

$$V = Z \cdot I$$

$$S = V \cdot I$$

- AO TRABALHARMOS COM VALORES **PU** DEVEMOS SEMPRE DEFINIR DUAS GRANDEZAS FUNDAMENTAIS ATRIBUINDO-LHES CORRESPONDENTES VALORES QUE DESIGNAREMOS POR VALORES DE **BASE**.
- OS VALORES DE BASE PARA AS DUAS OUTRAS GRANDEZAS (GRANDEZAS DERIVADAS) RESULTAM DAS RELAÇÕES ANTERIORES.

## 2.2 - DEFINIÇÕES

---

- SE FIXARMOS VALORES BASE PARA A TENSÃO EM UM DETERMINADO CIRCUITO, QUALQUER OUTRA TENSÃO NESTE CIRCUITO SERÁ EXPRESSA COMO UMA PERCENTAGEM (VALOR PERCENTUAL) OU UMA FRAÇÃO DESTA TENSÃO (VALOR PU).

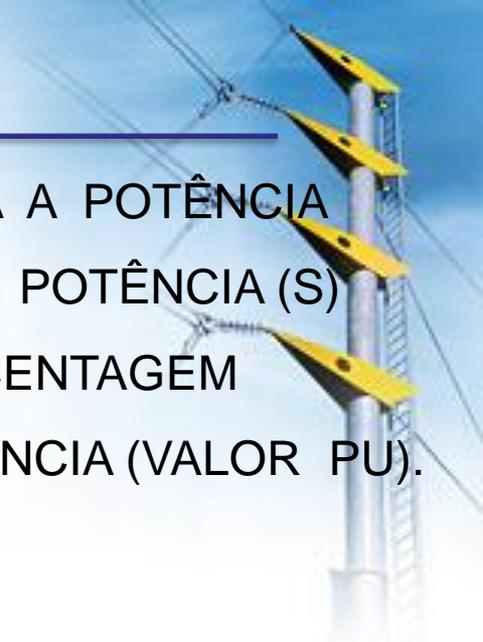
$$V_{base} = V_1$$

- LOGO, UMA TENSÃO QUALQUER,  $V$ , SERÁ EXPRESSA POR:

$$v\% = \frac{V}{V_{base}} \cdot 100 \quad (v \text{ percentual}),$$

$$v = \frac{V}{V_{base}} \text{ pu} \quad (v \text{ por unidade}).$$

## 2.2 - DEFINIÇÕES



- ANALOGAMENTE, SE FIXARMOS VALORES BASE PARA A POTÊNCIA EM UM DETERMINADO CIRCUITO, QUALQUER OUTRA POTÊNCIA ( $S$ ) NESTE CIRCUITO SERÁ EXPRESSA COMO UMA PERCENTAGEM (VALOR PERCENTUAL) OU UMA FRAÇÃO DESTA POTÊNCIA (VALOR PU).

$$S_{base} = S_1$$

- LOGO, UMA POTÊNCIA QUALQUER,  $S$ , SERÁ EXPRESSA POR:

$$s\% = \frac{S}{S_{base}} \cdot 100 \quad (s \text{ percentual}),$$

$$s = \frac{S}{S_{base}} \text{ pu} \quad (s \text{ por unidade}).$$

- OBSERVAR QUE O VALOR CORRESPONDENTE À GRANDEZA PU SERÁ EXPRESSO EM LETRAS MINÚSCULAS.

## 2.2 - DEFINIÇÕES

- LEMBRANDO QUE:

$$S = V \cdot I$$

$$V = Z \cdot I$$

- PODEMOS DEDUZIR QUE PARA CORRENTES E IMPEDÂNCIAS, TEREMOS OS SEGUINTE VALORES BASE:

$$I_{base} = \frac{S_{base}}{V_{base}}$$

$$Z_{base} = \frac{V_{base}}{I_{base}} = \frac{V_{base}^2}{S_{base}}$$

- ANALOGAMENTE, QUALQUER VALOR DE CORRENTE (I) E DE IMPEDÂNCIA (Z) SERÃO EXPRESSOS POR:

$$i = \frac{I}{I_{base}} = I \cdot \frac{V_{base}}{S_{base}} \text{ pu} \quad \text{e} \quad i\% = 100 \cdot i$$

$$z = \frac{Z}{Z_{base}} = Z \cdot \frac{S_{base}}{V_{base}^2} \text{ pu} \quad \text{e} \quad z\% = 100 \cdot z$$

## 2.2 - DEFINIÇÕES

- SENDO:

$$S = V \cdot I$$

- TEMOS:

$$\frac{S}{S_{base}} = \frac{V \cdot I}{S_{base}} = \frac{V}{V_{base}} \cdot \frac{I}{I_{base}}$$

- PORTANTO:

$$s = v \cdot i$$

- SABE-SE QUE:

$$P = VI \cos \varphi$$

- LOGO:

$$p = \frac{P}{S_{base}} = \frac{VI \cos \varphi}{S_{base}} = \frac{V}{V_{base}} \cdot \frac{I}{I_{base}} \cdot \cos \varphi = vi \cos \varphi$$

- PARA A POTÊNCIA REATIVA PODE-SE OBTER EXPRESSÃO SEMELHANTE.

EXEMPLOS 1 E 2

## 2.3 – REPRESENTAÇÃO DE EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS EM VALORES POR UNIDADE

---

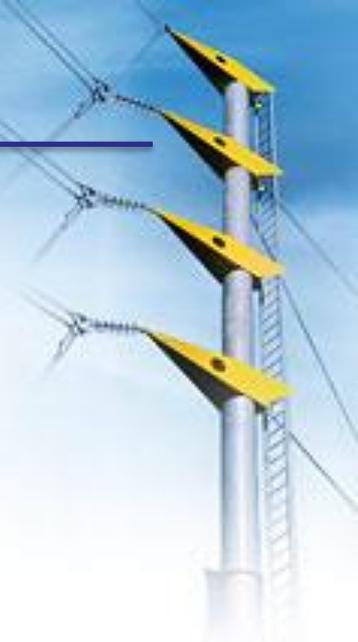
### 2.3.1 – TRANSFORMADORES

- OS FABRICANTES DEVEM ESPECIFICAR OS SEGUINTE VALORES NOMINAIS (DADOS DE CHAPA - VALORES DE PLENA CARGA):

- a – Potência nominal aparente (  $S_N$  ) – temperatura limite em funcionamento contínuo;
- b – Tensão nominal do enrolamento de alta tensão (  $V_{NA}$  ) – isolamento;
- c – Tensão nominal do enrolamento de baixa tensão (  $V_{NB}$  ) – isolamento;
- d – Impedância equivalente ou de curto-circuito percentual ou por unidade (  $z_E$  ) – perdas no transformador.

## 2.3.1 – TRANSFORMADORES

---



- DEFINE-SE AINDA:

- **Tensão primária** ( alta tensão ou baixa tensão ) – projeto do trafo – enrolamento pelo qual a energia chega no trafo.

- **Tensão secundária** ( baixa tensão ou alta tensão ) – induzida – enrolamento pelo qual a energia sai do trafo.

- VALORES BASE ADOTADOS PARA OS TRANSFORMADORES:

- Enrolamento de alta tensão –  $V_{NA}$  e  $S_N$

- Enrolamento de baixa tensão –  $V_{NB}$  e  $S_N$

- **Motivo:** com esses valores de base, a impedância equivalente referida ao primário ou ao secundário, em pu, tem o mesmo valor.

- **OBS.** A impedância equivalente do transformador deve ser colocada no primário ou no secundário do circuito equivalente.

## 2.3.1 – TRANSFORMADORES

- **CIRCUITO EQUIVALENTE DE UM TRANSFORMADOR – FIG. 4:**
- uma impedância em paralelo com os terminais de entrada – impedância em vazio
- uma impedância em série com um transformador ideal – impedância de curto-circuito

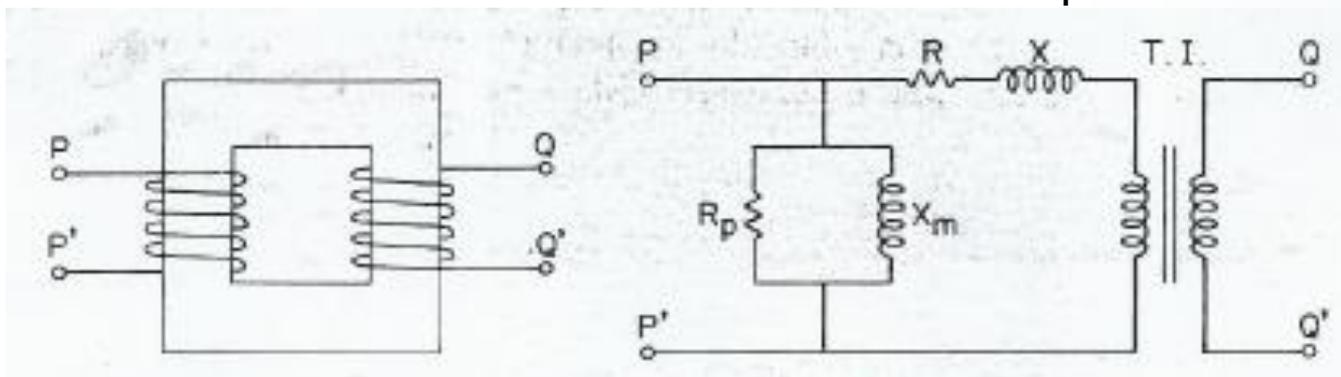


Fig. 4 – Circuito equivalente de um transformador monofásico

- A RELAÇÃO DE ESPIRAS DO TRAFÓ IDEAL ( NÃO APRESENTA PERDAS – SÓ A RELAÇÃO DE TRANSFORMAÇÃO ) É IGUAL À RELAÇÃO DE SUAS TENSÕES NOMINAIS.

$$\frac{V_{NA}}{V_{NB}} = \frac{NA}{NB} = cte$$

$$\frac{V_{NA}}{NA} = \frac{V_{NB}}{NB} = cte$$

## 2.3.1 – TRANSFORMADORES

---

- O circuito ligado ao primário independe eletricamente do circuito ligado ao secundário.
- Pode-se fixar valores base quaisquer para o primário e o secundário.
- **Se escolhermos as bases de forma apropriada pode-se ter um Trafo com relação 1:1.**
- Neste caso pode-se omitir o Trafo ideal reduzindo o circuito entre os pontos P e Q às impedâncias a vazio e de curto-circuito.



## 2.3.1 – TRANSFORMADORES

- Consideremos que o enrolamento de alta tensão coincide com o primário.
- Adotemos para o primário e secundário os valores de base  $V_{base}$ ,  $S_{base}$ ,  $V'_{base}$  e  $S'_{base}$ , respectivamente, conforme Fig. 5.

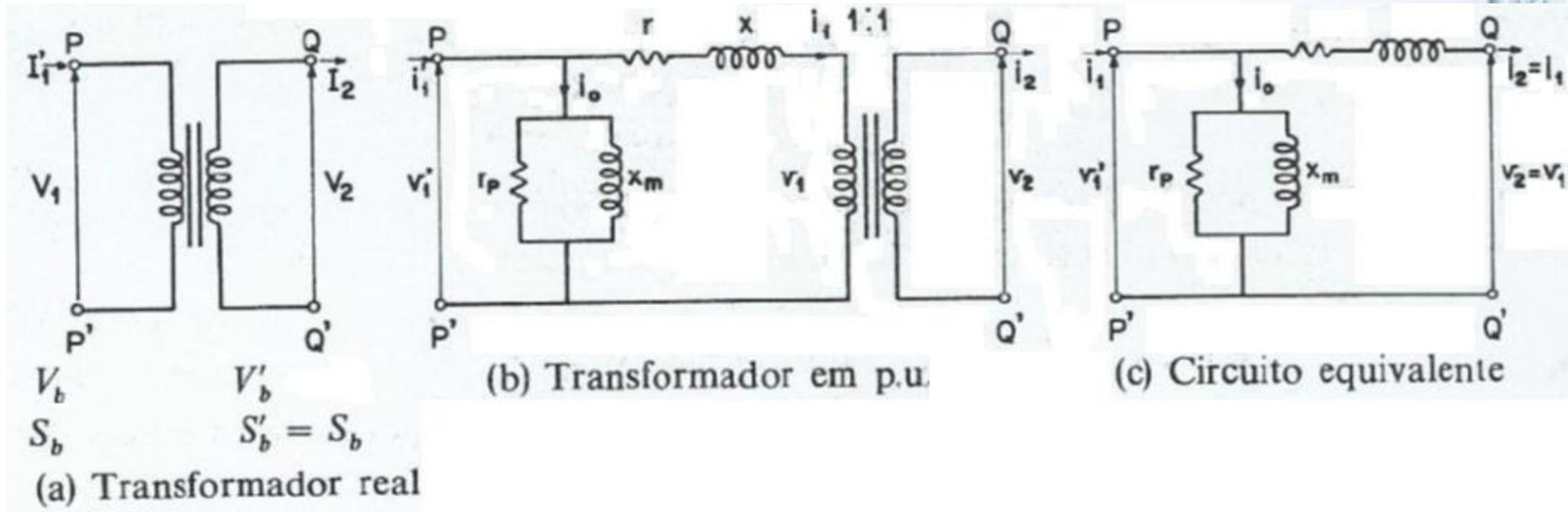


Fig. 5 – Representação de um transformador em valores pu.

## 2.3.1 – TRANSFORMADORES

- Aplicando ao primário do Trafo ideal uma tensão  $V_1$  teremos, no secundário, uma tensão  $V_2$  cujo valor é:

$$\frac{V_2}{V_{NB}} = \frac{V_1}{V_{NA}}$$

$$V_2 = V_1 \cdot \frac{V_{NB}}{V_{NA}}$$

- Exprimindo estas tensões em pu, tem-se:

$$v_1 = \frac{V_1}{V_{base}} = \text{tensão aplicada ao primário em pu,}$$
$$v_2 = \frac{V_2}{V'_{base}} = V_1 \cdot \frac{V_{NB}}{V_{NA}} \cdot \frac{1}{V'_{base}} = \text{tensão secundária em pu.}$$

## 2.3.1 – TRANSFORMADORES

- Como queremos que a relação de espiras, em pu, seja 1:1, deve-se ter:

$$v_1 = v_2$$

- Logo, deve-se ter:

$$\frac{1}{V_{base}} = \frac{V_{NB}}{V_{NA}} \cdot \frac{1}{V'_{base}}$$

- Portanto,

$$\frac{V_{base}}{V'_{base}} = \frac{V_{NA}}{V_{NB}} = \frac{NA}{NB} \rightarrow \frac{V_{base}}{V_{NA}} = \frac{V'_{base}}{V_{NB}} \rightarrow V'_{base} = V_{base} \cdot \frac{V_{NB}}{V_{NA}}$$

- Ou seja, se fixarmos os valores de base da tensão no primário e no secundário na relação das espiras do transformador, (ou de suas tensões nominais, as tensões primárias e secundárias, em pu, serão iguais.

## 2.3.1 – TRANSFORMADORES

- Com relação à potência complexa, tem-se:
  - Primário: absorve  $\bar{S}_1$
  - Secundário: fornece  $\bar{S}_2$
- Como o Trafo é ideal:

$$\bar{S}_1 = \bar{S}_2$$

- Em pu, tem-se:

$$\bar{s}_1 = \frac{\bar{S}_1}{S_{base}}$$

e

$$\bar{s}_2 = \frac{\bar{S}_2}{S'_{base}}$$

- Para que

$$\bar{s}_1 = \bar{s}_2$$

- Deve-se ter:

$$S_{base} = S'_{base}$$



## 2.3.1 – TRANSFORMADORES

- Precisamos verificar como ficam as correntes primária e secundária e se uma impedância referida ao primário e ao secundário são iguais.
- Seja  $\dot{I}_1$  uma corrente no primário e  $\dot{I}_2$  no secundário.
- Sendo  $N_A$  e  $N_B$  o número de espiras dos enrolamentos primário e secundário, para que haja conservação de energia, deve-se ter:

$$N_A \dot{I}_1 = N_B \dot{I}_2$$

- Ou seja,

$$\dot{I}_2 = \dot{I}_1 \cdot \frac{N_A}{N_B} = \dot{I}_1 \cdot \frac{V_{NA}}{V_{NB}}$$

## 2.3.1 – TRANSFORMADORES

- Os valores de base das correntes primária e secundária, são:

$$I_{base} = \frac{S_{base}}{V_{base}} \quad \text{e} \quad I'_{base} = \frac{S'_{base}}{V'_{base}} = \frac{S_{base}}{V_{base}} \cdot \frac{V_{NA}}{V_{NB}} = I_{base} \cdot \frac{V_{NA}}{V_{NB}}$$

$$\frac{I'_{base}}{V_{NA}} = \frac{I_{base}}{V_{NB}}$$

- Portanto, as correntes  $i_1$  e  $i_2$ , em pu, valem:

$$i_1 = \frac{I_1}{I_{base}}$$

$$i_2 = \frac{I_2}{I'_{base}} = \frac{I_1 \left( V_{NA} / V_{NB} \right)}{I_{base} \left( V_{NA} / V_{NB} \right)} = \frac{I_1}{I_{base}} = i_1$$

- Ou seja, em pu, com as tensões e potência de base escolhidos, as correntes primária e secundária, em pu, são iguais.

## 2.3.1 – TRANSFORMADORES

- Uma impedância  $Z_1$  ligada em série no primário do transformador ideal é equivalente a uma  $Z_2$  ligada em série com o secundário, desde que:

$$I_1^2 Z_1 = I_2^2 Z_2 = I_1^2 \left( \frac{V_{NA}}{V_{NB}} \right)^2 Z_2$$

- Ou,

$$Z_2 = Z_1 \left( \frac{V_{NB}}{V_{NA}} \right)^2$$

- Bases de impedâncias no primário e secundário:

$$Z'_{base} = \frac{V_{base}^2}{S'_{base}} = \frac{V_{base}^2}{S_{base}} \left( \frac{V_{NB}}{V_{NA}} \right)^2 = Z_{base} \left( \frac{V_{NB}}{V_{NA}} \right)^2$$

$$Z_{base} = \frac{V_{base}^2}{S_{base}}$$

- Logo

$$z_1 = \frac{Z_1}{Z_{base}} = Z_1 \frac{S_{base}}{V_{base}^2}$$

$$z_2 = \frac{Z_2}{Z'_{base}} = \frac{Z_1 \left( \frac{V_{NB}}{V_{NA}} \right)^2}{Z_{base} \left( \frac{V_{NB}}{V_{NA}} \right)^2} = Z_1 \frac{S_{base}}{V_{base}^2} = z_1$$

- Conclusão: quando os valores de base são os adotados para o primário e para o secundário de um transformador, em pu este é representado por um Trafo com relação de espiras 1:1.

## 2.3.2 – MÁQUINAS ELÉTRICAS ROTATIVAS

### GERADORES

- O FABRICANTE FORNECE:
  - A POTÊNCIA APARENTE NOMINAL – VA
  - A TENSÃO NOMINAL - V
  - A FREQUÊNCIA - Hz
  - AS IMPEDÂNCIAS SUBTRANSITÓRIA, TRANSITÓRIA E DE REGIME - % - ADOTANDO OS VALORES NOMINAIS DA MÁQUINA COMO BASE
- EXEMPLO 5 - Um alternador monofásico de 100 MVA, 13,8 kV, tem reatância subtransiente de 25%. Pede-se o valor dessa reatância em ohm.

**Solução:**

$$X' = x'Z_{base} = x' \frac{V_{base}^2}{S_{base}} = 0,25 \frac{13,8^2}{100} = 0,476 \Omega.$$

## 2.3.2 – MÁQUINAS ELÉTRICAS ROTATIVAS

### MOTORES

- O FABRICANTE FORNECE:
  - A POTÊNCIA MECÂNICA DISPONÍVEL NO EIXO - CV
  - A TENSÃO NOMINAL - V
  - AS REATÂNCIAS - % - ADOTANDO OS VALORES NOMINAIS DA MÁQUINA COMO BASE
  - A POTÊNCIA APARENTE ABSORVIDA PELA MÁQUINA QUANDO ESTÁ FORNECENDO A POTÊNCIA MECÂNICA NOMINAL - VA
- EXEMPLO 6 - Um motor síncrono de 1500 cv, 600 V,  $x'' = 10\%$  funciona a plena carga com fator de potência unitário e tem rendimento de 89,5%.  
Pede-se o valor em ohm da reatância.

**Solução:** sendo 1 CV = 0,736 kW, resulta:

$$S = \frac{P_{mec}}{\eta \cos \varphi} = \frac{1500 \cdot 0,736}{0,895 \cdot 1} = 1234 \text{ kVA.}$$

$$X'' = x'' \cdot \frac{V_{base}^2}{S_{base}} = 0,10 \cdot \frac{600^2}{1234 \cdot 10^3} = 0,0292 \Omega$$

## 2.4 – MUDANÇA DE BASES

---

- ÀS VEZES É NECESSÁRIO MUDAR O VALOR DE UMA GRANDEZA EM PU PARA UMA NOVA BASE.
- O PROCEDIMENTO CONSISTE EM MULTIPLICAR O VALOR EM PU PELA BASE ATUAL E DIVIDIR PELA NOVA BASE.
- SEJAM  $V$ ,  $I$ ,  $P$  E  $Z$  VALORES EM PU NAS BASES  $V_{BASE}$  E  $S_{BASE}$ .
- NECESSITA-SE DETERMINAR ESTES VALORES, EM PU, NAS NOVAS BASES  $V'_{BASE}$  E  $S'_{BASE}$ .

## 2.4 – MUDANÇA DE BASES

### TENSÃO

- DETERMINA-SE O VALOR DA TENSÃO EM VOLT:

$$V = v \cdot V_{base}$$

- A SEGUIR, DETERMINA-SE O VALOR DESSA TENSÃO EM PU NA NOVA BASE:

$$v' = \frac{V}{V'_{base}} = v \cdot \frac{V_{base}}{V'_{base}}$$

### CORRENTE

$$I = i \cdot I_{base} = i \cdot \frac{S_{base}}{V_{base}}$$

$$i' = \frac{I}{I'_{base}} = i \cdot \frac{S_{base}}{V_{base}} \cdot \frac{V'_{base}}{S'_{base}} = i \cdot \frac{V'_{base}}{V_{base}} \cdot \frac{S_{base}}{S'_{base}}$$

## 2.4 – MUDANÇA DE BASES

### POTÊNCIA

- CONSIDEREMOS AS TRÊS POTÊNCIAS:

$$P = p \cdot S_{base}$$

$$Q = q \cdot S_{base}$$

$$S = s \cdot S_{base}$$

- NAS NOVAS BASES TÊM-SE:

$$p' = \frac{P}{S'_{base}} = p \cdot \frac{S_{base}}{S'_{base}}$$

$$q' = \frac{Q}{S'_{base}} = q \cdot \frac{S_{base}}{S'_{base}}$$

$$s' = \frac{S}{S'_{base}} = s \cdot \frac{S_{base}}{S'_{base}}$$

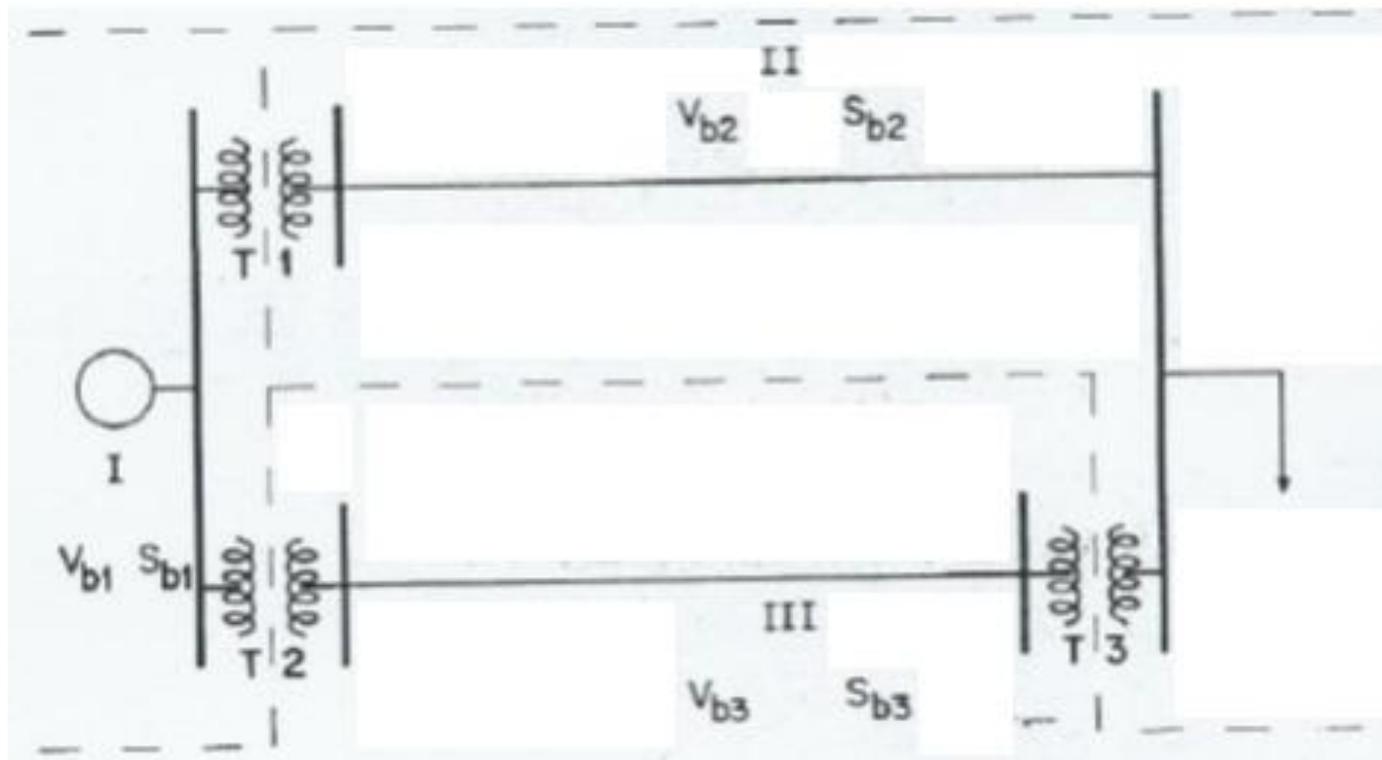
### IMPEDÂNCIA

$$Z = z \cdot Z_{base} = z \cdot \frac{V_{base}^2}{S_{base}}$$

$$z' = \frac{Z}{Z'_{base}} = z \cdot \frac{V_{base}^2}{S_{base}} \cdot \frac{S'_{base}}{V'^2_{base}} = z \cdot \frac{S'_{base}}{S_{base}} \cdot \left( \frac{V_{base}}{V'_{base}} \right)^2$$

## 2.5 – CHOQUE DE BASES

- EM REDES EM MALHA, NEM SEMPRE É POSSÍVEL FIXAR AS BASES PARA TODOS OS TRANSFORMADORES.
- HAVERÁ UM ÚLTIMO TRANSFORMADOR NO QUAL AS BASES JÁ FORAM FIXADAS PELOS PRECEDENTES.
- NA FIGURA A SEGUIR A REDE EM MALHA É DIVIDIDA EM 3 PARTES.



## 2.5 – CHOQUE DE BASES

- PARA A ÁREA I PODE-SE ADOTAR VALORES DE BASE QUAISQUER.
- SEJA OS VALORES:

$$V_{b1} \quad \text{e} \quad S_{b1}$$

- NA ÁREA II, SECUNDÁRIO DE T1, O VALOR DE BASE DA TENSÃO ESTÁ FIXADO PELA RELAÇÃO DE ESPIRAS DE T1,  $V_{N1} - V_{N2}$ , E A POTÊNCIA DE BASE É IGUAL À DA ÁREA I, OU SEJA:

$$V_{b2} = V_{b1} \cdot \frac{V_{N2}}{V_{N1}} \quad \text{e} \quad S_{b2} = S_{b1}$$

- NA ÁREA III, SECUNDÁRIO DE T2, O VALOR DE BASE DA TENSÃO ESTÁ FIXADO PELA RELAÇÃO DE ESPIRAS DE T2,  $V'_{N1} - V'_{N2}$ , ISTO É:

$$V_{b3} = V_{b1} \cdot \frac{V'_{N2}}{V'_{N1}} \quad \text{e} \quad S_{b3} = S_{b1}$$

## 2.5 – CHOQUE DE BASES

- PORTANTO, OS VALORES DE BASE PARA O PRIMÁRIO E O SECUNDÁRIO DO T3, CUJA RELAÇÃO DE ESPIRAS É  $V''_{N1} - V''_{N2}$ , ESTÃO FIXADOS, OU SEJA:

(1) Primário de  $T_3$

$$\text{tensão de base: } V_{b3} = V_{b1} \cdot \frac{V'_{N2}}{V'_{N1}};$$

$$\text{potência de base: } S_{b3} = S_{b1}.$$

(2) Secundário de  $T_3$

$$\text{tensão de base: } V_{b2} = V_{b1} \cdot \frac{V_{N2}}{V_{N1}}$$

$$\text{potência de base: } S_{b2} = S_{b1}.$$

## 2.5 – CHOQUE DE BASES

- QUANTO À POTÊNCIA DE BASE, NÃO HÁ PROBLEMA ALGUM, POIS  $S_{b2} = S_{b3}$ .
- PORÉM, QUANTO ÀS TENSÕES DE BASE, ESTAS SOMENTE ESTARÃO NA RELAÇÃO DE ESPIRAS DO T3 QUANDO:

$$\frac{V_{b3}}{V_{b2}} = \frac{V''_{N1}}{V''_{N2}}$$

- ISTO É, QUANDO:

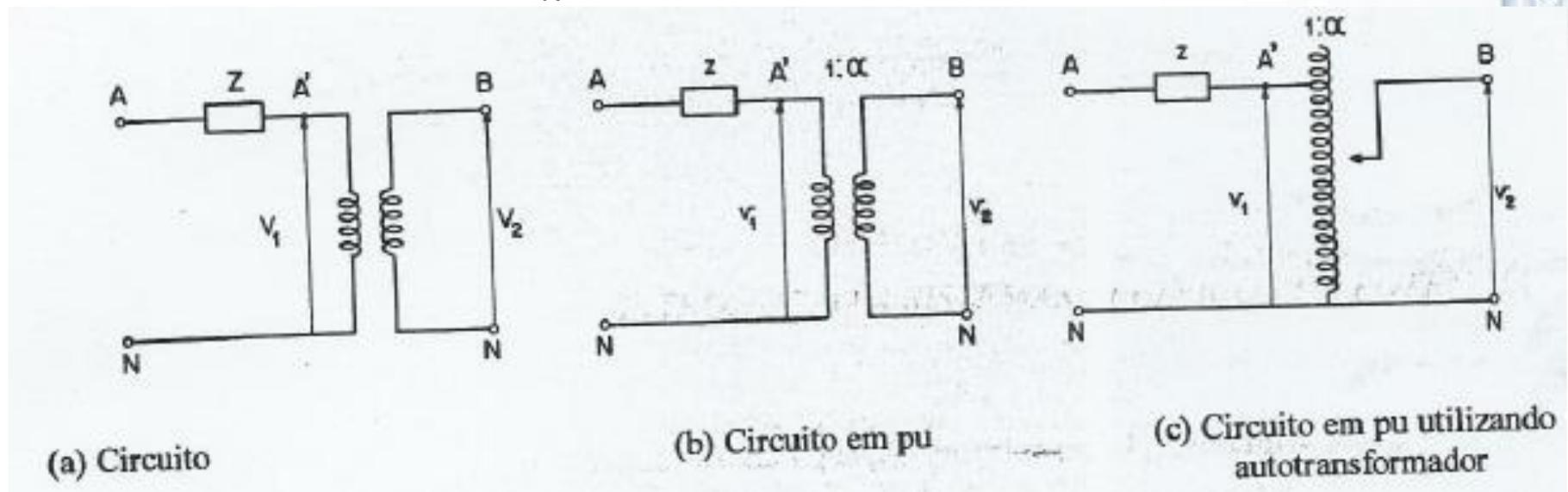
$$\frac{V'_{N2}}{V'_{N1}} \cdot \frac{V_{N1}}{V_{N2}} = \frac{V''_{N1}}{V''_{N2}}$$

- ISTO NEM SEMPRE SE VERIFICA.
- LOGO, O T3, EM PU, NÃO PODERÁ SER REPRESENTADO PELA SUA IMPEDÂNCIA DE CURTO-CIRCUITO EM SÉRIE COM UM TRAFO IDEAL DE RELAÇÃO DE ESPIRAS 1:1, OU SEJA, O T3 PERMANECERÁ NO CIRCUITO EM PU.

## 2.5 – CHOQUE DE BASES

### - REPRESENTAÇÃO DO TRAFÓ QUANDO HÁ CHOQUE DE BASES

- CONSIDEREMOS UM TRAFÓ COM TENSÕES NOMINAIS  $V_{N1} - V_{N2}$ , POTÊNCIA NOMINAL  $S_N$ , E IMPEDÂNCIA EQUIVALENTE  $z$  EM PU.



TRANSFORMADOR DE VALORES DE BASE DE TENSÃO FORA DA  
RELAÇÃO DE ESPIRAS.

## 2.5 – CHOQUE DE BASES

### - REPRESENTAÇÃO DO TRAFÓ QUANDO HÁ CHOQUE DE BASES

- SUPONHAMOS ADOPTAR NO PRIMÁRIO E NO SECUNDÁRIO DO TRAFÓ OS SEGUINTE VALORES DE BASE:

$$V_{b1} \quad e \quad S_b$$
$$V_{b2} \neq V_{N2} \cdot \frac{V_{b1}}{V_{N1}} \quad e \quad S_b$$

- SUPONHAMOS APLICAR AO PRIMÁRIO UMA TENSÃO TAL QUE, NO TRAFÓ REAL, TENHAMOS TENSÃO  $V_1$ .
- NO SECUNDÁRIO, A TENSÃO SERÁ:

$$V_2 = V_1 \cdot \frac{V_{N2}}{V_{N1}}$$

## 2.5 – CHOQUE DE BASES

- REPRESENTAÇÃO DO TRAFÓ QUANDO HÁ CHOQUE DE BASES

- EM PU, TEM-SE:

$$v_1 = \frac{V_1}{V_{b1}}, \quad \text{e} \quad v_2 = \frac{V_2}{V_{b2}} = V_1 \cdot \frac{V_{N2}}{V_{N1}} \cdot \frac{1}{V_{b2}}$$

- MULTIPLICANDO E DIVIDINDO O SEGUNDO MEMBRO DA EQUAÇÃO ANTERIOR POR  $V_{b1}$ , TEM-SE:

$$v_2 = \frac{V_1}{V_{b1}} \cdot \frac{V_{b1}}{V_{b2}} \cdot \frac{V_{N2}}{V_{N1}} = v_1 \cdot \frac{V_{b1}}{V_{N1}} \cdot \frac{V_{N2}}{V_{b2}}$$

## 2.5 – CHOQUE DE BASES

### - REPRESENTAÇÃO DO TRAFÓ QUANDO HÁ CHOQUE DE BASES

- DESIGNANDO-SE POR  $v_{n1}$  e  $v_{n2}$  OS VALORES DAS TENSÕES NOMINAIS DO TRAFÓ, EXPRESSAS EM PU, NAS BASES  $V_{b1}$  e  $V_{b2}$ , RESPECTIVAMENTE, OU SEJA:

$$v_{N1} = \frac{V_{N1}}{V_{b1}} \quad \text{e} \quad v_{N2} = \frac{V_{N2}}{V_{b2}}$$

- RESULTA:

$$v_2 = v_1 \cdot \frac{v_{N2}}{v_{N1}}$$

- PORTANTO, O TRAFÓ DADO NA REPRESENTAÇÃO EM PU PODE SER SUBSTITUÍDO POR SUA IMPEDÂNCIA DE CURTO-CIRCUITO EM SÉRIE COM UM TRAFÓ IDEAL QUE TENHA  $k \cdot v_{n1}$  ESPIRAS NO ENROLAMENTO PRIMÁRIO E  $k \cdot v_{n2}$  ESPIRAS NO ENROLAMENTO SECUNDÁRIO. SUA RELAÇÃO SERÁ  $1:\alpha$  DESDE QUE:

$$\alpha = \frac{v_{N2}}{v_{N1}}$$

ISTO É:  $v_2 = \alpha \cdot v_1$

## 2.6 – CIRC. TRIF. SIM. COM CARGA EQUILIBRADA

- Tudo o que foi definido para circuitos monofásicos é válido para circuitos trifásicos simétricos com carga equilibrada, pois podem ser substituídos por monofásico fase-neutro.
- Deve-se escolher valores de base para linha e para fase de tal forma que, em pu, as grandezas de linha e de fase sejam iguais.

### - ESCOLHA DAS BASES

- Circuito trifásico com todos os elementos ligados em estrela, sendo:

$V$  = tensão de linha;  
 $V_F$  = tensão de fase;  
 $I$  = corrente de linha ou de fase (ligação estrela  $I_F = I_L$ );  
 $S$  = potência aparente fornecida ao trifásico;  
 $S_F$  = potência aparente fornecida a uma fase;  
 $Z$  = impedância de fase.

## 2.6 – CIRC. TRIF. SIM. COM CARGA EQUILIBRADA

- Essas grandezas obedecem às seguintes relações:

$$\begin{aligned}V_F &= Z \cdot I, \\S_F &= V_F \cdot I, \\V &= \sqrt{3}V_F, \\S &= 3S_F.\end{aligned}$$

- Adotando:

$$V_{bF} \quad \text{e} \quad S_{bF}$$

- Como valores de base para as grandezas de fase, resultam as seguintes bases de corrente e impedância:

$$I_{bF} = \frac{S_{bF}}{V_{bF}} \quad \text{e} \quad Z_{bF} = \frac{V_{bF}}{I_{bF}} = \frac{V_{bF}^2}{S_{bF}}$$

- Os módulos das grandezas de fase em pu são:

$$v_F = \frac{V_F}{V_{bF}}, \quad s_F = \frac{S_F}{S_{bF}}, \quad i_F = \frac{I}{I_{bF}} = I \frac{V_{bF}}{S_{bF}}, \quad z = \frac{Z}{Z_{bF}} = Z \frac{S_{bF}}{V_{bF}^2}.$$

## 2.6 – CIRC. TRIF. SIM. COM CARGA EQUILIBRADA

- Por outro lado, fixando-se para as grandezas de linha os valores de base:

$$V_b = \sqrt{3}V_{bF} \quad \text{e} \quad S_b = 3S_{bF},$$

- Resultam, para as bases de corrente e de impedância, os valores:

$$I_b = \frac{S_b}{\sqrt{3}V_b} = \frac{3S_{bF}}{3V_{bF}} = \frac{S_{bF}}{V_{bF}} = I_{bF},$$

$$Z_b = \frac{V_b / \sqrt{3}}{I_b} = \frac{V_b / \sqrt{3}}{S_b / \sqrt{3}V_b} = \frac{V_b^2}{S_b} = \frac{V_{bF}^2}{S_{bF}} = Z_{bF},$$

- Resultando, para os valores pu das grandezas de linha, em módulo:

$$v = \frac{V}{V_b} = \frac{\sqrt{3}V_F}{\sqrt{3}V_{bF}} = \frac{V_F}{V_{bF}} = v_F,$$
$$s = \frac{S}{S_b} = \frac{3S_F}{3S_{bF}} = \frac{S_F}{S_{bF}} = s_F,$$

$$i = \frac{I}{I_b} = \frac{I}{I_{bF}} = i_F,$$
$$z = \frac{Z}{Z_b} = \frac{Z}{Z_{bF}} = z.$$

## 2.6 – CIRC. TRIF. SIM. COM CARGA EQUILIBRADA

---

- Nota-se que, com a escolha conveniente dos valores de base, os módulos das grandezas de linha e de fase, expressos em valores pu, têm o mesmo valor.
- Quanto à fase deve-se levar em conta a defasagem de  $30^\circ$  entre os valores de linha e de fase.
- A tensão de linha está adiantada de  $30^\circ$  em relação à de fase quando a sequência é direta e atrasada de  $30^\circ$  quando a sequência de fase é inversa.