



# Capítulo I

## Conceitos básicos – Números complexos

Por Cláudio Mardegan\*

Embora a palavra curto-circuito seja muito usada na engenharia elétrica, o seu conhecimento profundo e adequado é dominado por poucos profissionais. A ideia destes próximos capítulos é descortinar os detalhes mais importantes e fascinantes do curto-circuito, que é uma palavra derivada do inglês, que, se traduzida para o português, seria “circuito-curto”, que é o que realmente acontece, pois quando ocorre um curto-circuito a tensão não chega até os terminais da carga, ou seja, o circuito ficou mais curto, e, assim, a carga acaba ficando “jumpeada”. Como a impedância da carga é a maior impedância de um circuito, ao “jumpeá-la”, a corrente aumenta. Como podem ver, é algo tido como um fenômeno, mas de fato, relativamente simples se entendido e estudado de forma mais abrangente. A corrente de curto-circuito varia com o tempo, daí o tema “curto-circuito para a seletividade”, pois vai interessar aos profissionais de proteção o valor da corrente nos instantes de sensibilização dos respectivos dispositivos de proteção. É necessário primeiro uma revisão dos conceitos básicos que vão dar subsídios para o entendimento do tema e dos respectivos fatores que influenciam o seu valor, dos dados necessários para se elaborar um estudo de curto-circuito e seletividade e, por fim, o estudo de curto-circuito.

### CÁLCULO EM POR UNIDADE

#### (a) Definição

Um valor por unidade (PU) de uma grandeza pode ser definido como sendo a relação entre dois números, um que consiste no valor real e outro que é tomado como base, resultando assim, num número puro.

#### (b) Por que utilizar valores em PU?

- ▶ Simplificar nos cálculos que envolvem transformadores
- ▶ Visualização geral das grandezas elétricas
- ▶ Correlacionar máquinas de um mesmo tipo
- ▶ Avaliar a influência de cada equipamento no sistema
- ▶ Obter uma melhor precisão nos cálculos

#### (c) Cálculos EM por unidade

O conceito se baseia na definição de duas grandezas elétricas (normalmente tensão e potência e calcula-se a impedância e a corrente).

$$VALOR_{PU} = \frac{VALOR_{ATUAL}}{VALOR_{BASE}}$$

Como pode ser visto, o número obtido é um número puro (sem unidade). Um valor em %, corresponde a um valor em PU x 100.

#### (d) Cálculo das grandezas elétricas em PU

$$I_{PU} = \frac{CORRENTE [A]}{CORRENTE BASE [A]}$$

$$Z_{PU} = \frac{IMPEDÂNCIA [\Omega]}{IMPEDÂNCIA BASE [\Omega]}$$

$$V_{PU} = \frac{TENSÃO [V]}{TENSÃO BASE [V]}$$

$$f_{PU} = \frac{FREQUÊNCIA [Hz]}{FREQUÊNCIA BASE [Hz]}$$

$$S_{PU} = \frac{POTÊNCIA [MVA]}{POTÊNCIA BASE [MVA]}$$

No caso de curto-circuito, necessita-se fundamentalmente calcular as impedâncias pu. A impedância de cada equipamento é normalmente fornecida pelo respectivo fabricante, em Ohms ou em % (porcentagem), na base do equipamento. Assim, para convertê-las para pu, deve-se dividir pela impedância base, quando fornecidas em Ohms; ou se fornecidas em porcentagem, é necessário fazer uma mudança de base, da base do equipamento para a nova base adotada para o sistema, normalmente 100 MVA.

### (e) Equações básicas

#### Impedância base

A determinação da impedância base deriva da fórmula para o cálculo da potência:

$$S_{BASE} = \frac{V_{BASE}^2}{Z_{BASE}} \quad Z_{BASE} = \frac{V_{BASE}^2}{S_{BASE}}$$

$$Z = \frac{(kV \times 10^{-3})^2}{S} = \frac{kV \times 10^{-6}}{MVA \times 10^{-6}}$$

$$Z_{BASE} = \frac{kV_{BASE}^2}{MVA_{BASE}}$$

#### Mudança de base

Quando a impedância dos equipamentos é dada em por cento (%), para se fazer o cálculo em por unidade, na base do sistema, se faz necessário fazer uma mudança de base, da base do equipamento (ZE) para a base do sistema (ZS).

$$Z_{EQUIP-PU} = \frac{Z_{\Omega}}{Z_{BASE-EQUIP}} = \frac{Z_{\Omega}}{\left(\frac{kV_{EQ}^2}{MVA_E}\right)}$$

$$Z_{\Omega} = Z_{EQUIP-PU} \times \left(\frac{kV_{EQ}^2}{MVA_E}\right)$$

$$Z_{SIST-PU} = \frac{Z_{\Omega}}{Z_{BASE-SIST}} = \frac{Z_{\Omega}}{\left(\frac{kV_{SIST}^2}{MVA_{sist}}\right)} = \frac{Z_{EQUIP-PU} \times \left(\frac{kV_{EQ}^2}{MVA_E}\right)}{\left(\frac{kV_{SIST}^2}{MVA_{sist}}\right)}$$

$$Z_{SIST-PU} = Z_{EQUIP-PU} \times \frac{MVA_{sist}}{MVA_E} \times \left(\frac{kV_{EQUIP}^2}{kV_{SIST}}\right)^2$$

#### (f) Valores base comumente adotados

Os valores tomados como base, como regra, devem ser os valores que se dispõem. Assim, os valores base comumente adotados são aqueles encontrados na placa dos equipamentos:

- ▶ Potência
- ▶ Tensão (na entrada da instalação)

Normalmente, os valores são tomados como base na entrada da instalação. O valor base da tensão muda com a relação de transformação do transformador.

Conhecendo-se  $MVA_{BASE}$  e  $kV_{BASE}$ , pode-se calcular o valor das outras duas grandezas, corrente base e impedância base.

Assim:

$$Z_{BASE} = \frac{kV_{BASE}^2}{MVA_{BASE}}$$

$$I_{BASE} = \frac{MVA_{BASE} \times 1000}{\sqrt{3} \times kV_{BASE}}$$

O valor da potência base não muda com a relação de transformação.

Nos estudos de engenharia é prática comum adotar a potência base como sendo 100 MVA.

Apresenta-se a seguir a Tabela 1, contemplando a corrente e a impedância base para as tensões base mais comuns e potência base de 100 MVA.

**TABELA 1 – CORRENTES E IMPEDÂNCIAS BASE PARA AS TENSÕES MAIS COMUNS**

Tensão Base [kV]	Potência Base [MVA]	Corrente Base [A]	Impedância Base [Ω]
230	100	251.02	529.0000
138	100	418.37	190.4400
88	100	656.08	77.4400
69	100	836.74	47.6100
34.5	100	1673.48	11.9025
23	100	2510.22	5.2900
13.8	100	4183.70	1.9044
13.2	100	4373.87	1.7424
11.9	100	4851.68	1.4161
6.6	100	8747.731351	0.4356
4.16	100	13878.61224	0.173056
2.4	100	24056.26122	0.0576
0.69	100	83673.95	0.0048
0.48	100	120281.31	0.0023
0.44	100	131215.97	0.0019
0.4	100	144337.57	0.0016
0.38	100	151934.28	0.0014
0.22	100	262431.94	0.0005

### (g) Aplicação a equipamentos elétricos

#### Cabos/linhas

Para cabos, conhece-se o valor da resistência (Rc) e de reatância (Xc) em Ω/km. Deve-se conhecer também a distância (ℓ). Para se obter os valores de R e X em [Ω], faz-se  $R = R_c \times \ell$  e  $X = X_c \times \ell$ . Para passar para pu, basta calcular o valor de ZBASE naquele nível de tensão, conforme indicado abaixo, e dividir o valor de R e X por esse valor calculado, ou seja,  $R_{pu} = R / Z_{BASE}$  e  $X_{pu} = X / Z_{BASE}$ . Em outras palavras:

$$Z_{BASE} = \frac{kV_{BASE}^2}{MVA_{BASE}} \quad R_{PU} = \frac{R_C \cdot \ell}{Z_{BASE}} \quad X_{PU} = \frac{X_C \cdot \ell}{Z_{BASE}}$$

#### Exemplo:

Calcular a impedância PU de um cabo de 70 mm<sup>2</sup>, 8.7/15kV, instalado na tensão de 13.8kV, de comprimento de 100 m, na configuração em trifólio, na base de 100 MVA.

#### Solução:

Do catálogo do fabricante extraem-se os valores da resistência e da reatância.

$$R_{CABO} = 0.3430 \text{ [Ω/km]} \quad e \quad X_{CABO} = 0.1450 \text{ [Ω/km]}$$

$$R = 0.3430 \times 0.100 = 0.0343 \text{ [Ω]}$$

$$X = 0.1450 \times 0.100 = 0.0145 \text{ [Ω]}$$

$$Z_{BASE} = \frac{kV_{BASE}^2}{MVA_{BASE}} = \frac{(13.8)^2}{100}$$

$$Z_{Base} = 1.9044 \text{ [Ω]}$$

$$R_{pu} = R / Z_{base} = 0.0343 / 1.9044 = 0.0180 \text{ pu}$$

$$X_{pu} = X / Z_{base} = 0.0145 / 1.9044 = 0.0076 \text{ pu}$$

#### Exemplo:

Para fins didáticos, vamos supor o mesmo cabo do exemplo anterior (cabo de 70 mm<sup>2</sup>, 8.7/15 kV, 100 m), instalado agora, na tensão de 0.48 kV, na configuração em trifólio. Calcular a impedância pu, na base de 100 MVA, para essa nova situação.

#### Solução:

Do catálogo do fabricante extrai-se o valor da resistência e da reatância.

$$R_C = 0.3430 \text{ [Ω/km]}$$

$$X_C = 0.1450 \text{ [Ω/km]}$$

$$R = 0.3430 \times 0.100 = 0.0343 \text{ [Ω]}$$

$$X = 0.1450 \times 0.100 = 0.0145 \text{ [Ω]}$$

$$Z_{BASE} = \frac{kV_{BASE}^2}{MVA_{BASE}} = \frac{(0.48)^2}{100}$$

$$Z_{Base} = 0.0023 \text{ [Ω]}$$

$$R_{pu} = R / Z_{base} = 14.8872 \text{ pu}$$

$$X_{pu} = X / Z_{base} = 6.2934 \text{ pu}$$

Como pode ser observado na baixa tensão, o cabo limita muito o curto-circuito. O valor da impedância pu do cabo na baixa tensão é 826.6 vezes maior que o valor pu da média tensão.

#### Transformadores

Para transformadores conhece-se normalmente o valor da sua potência nominal de placa (em ventilação normal), a sua impedância e a relação de tensões. O procedimento consiste em se fazer uma mudança de base, na impedância, da base do transformador (valor para o qual a sua impedância é referida), para a base do sistema.

**Mudança de Base**

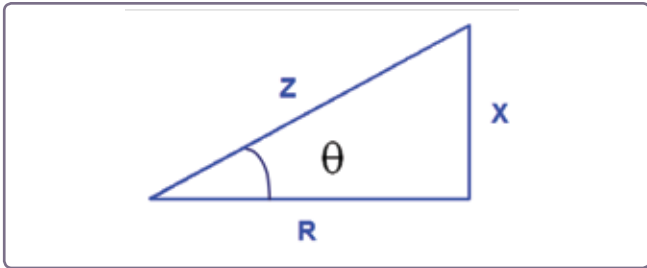
$$Z_{\text{TRAF0-PU}} = \frac{Z\%}{100} \times \frac{MVA_{\text{BASE}}}{MVA_{\text{TRAF0}}} \times \left( \frac{kV_{\text{EQUIP}}^2}{kV_{\text{SIST}}^2} \right)^2$$

Como, normalmente, MVA-Base é 100 e a tensão do transformador corresponde à tensão base do sistema:

$$Z_{\text{TRAF0-PU}} = \frac{Z\%}{100} \times \frac{100}{MVA_{\text{TRAF0}}} \times \left( \frac{kV_{\text{EQUIP}}^2}{kV_{\text{SIST}}^2} \right)^2$$

$$Z_{\text{TRAF0-PU}} = \frac{Z\%}{MVA_{\text{TRAF0}}}$$

Os cálculos para a obtenção de R e X a partir do valor da impedância saem do triângulo de impedâncias. Veja Figura 1.



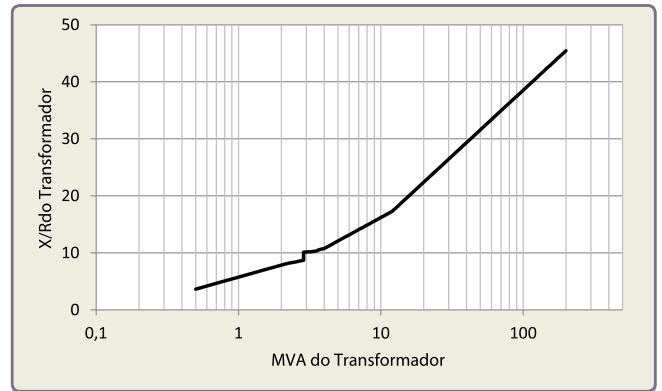
**Figura 1 – Triângulo das impedâncias.**

$$Z^2 = R^2 + X^2 \quad \frac{X}{R} = a \quad X = aR \quad Z^2 = R^2 + (aR)^2$$

$$Z^2 = R^2 (1 + a^2) = R^2 \left( 1 + \left( \frac{X}{R} \right)^2 \right)$$

$$R = \frac{Z}{\sqrt{1 + \left( \frac{X}{R} \right)^2}} \quad X = R \times \frac{X}{R}$$

Porém, nos cálculos, são necessários R e X e tem-se apenas Z. Raramente se tem o data sheet com o ensaio de curto-circuito. Quando se tem, utiliza-se o valor de X/R obtido no ensaio. Quando não se tem, pode-se utilizar o valor de X/R obtido do Red Book, IEEE Std 141-1999, cuja curva tem a aparência da mostrada na Figura 1.



**Figura 1 – Curva X/R versus MVA para transformadores do IEEE Std 141.**

A curva do X/R x MVA do transformador pode ser traduzida em termos de equação, como segue:

$$MVA \leq 0.5 \rightarrow X/R = 3.6364$$

$$0.5 < MVA \leq 3.02 \rightarrow X/R = 5.738711 + 6.983725 \cdot \log(MVA)$$

$$3.02 < MVA \leq 12.02 \rightarrow X/R = 2.545460 + 13.636325 \cdot \log(MVA)$$

$$12.02 < MVA \rightarrow X/R = -7.654119 + 23.0804 \cdot \log(MVA)$$

Com base nas equações tabelou-se o valor de X/R para as potências mais usadas e são apresentadas na Tabela 2.

**TABELA 2 - VALORES DE X/R TÍPICOS DE TRANSFORMADORES PARA AS POTÊNCIAS MAIS USUAIS**

kVA	X/R
500	3.5
750	5.0
1000	5.5
1500	7.0
1750	7.5
2000	8.0
2500	8.5
3000	9.0
3500	10.0
3750	10.5
5000	12.0
7500	14.5
10000	16.0
12000	17.5
15000	19.5

### Exemplo

Calcular a impedância PU (R e X) de um transformador de 2000 kVA, Z%=6, relação de 13.8-0.48kV, nas bases de tensão de 13.8 kV e 100 MVA.

### Solução:

Do IEEE Std 141, tira-se o valor de X/R ~ 8.

$$Z_{\text{TRAF0-PU}} = \frac{Z\%}{MVA_{\text{TRAF0}}} \quad Z_{\text{TRAF0-PU}} = \frac{6}{2} = 3 \text{ pu}$$

$$R = \frac{Z}{\sqrt{1 + \left(\frac{X}{R}\right)^2}} = \frac{3}{\sqrt{1 + (8)^2}} = \frac{3}{\sqrt{65}} = \frac{3}{8.0623}$$

$$X = R \times \frac{X}{R} = 0.3721 \times 8$$

$$R = 0.3721 \text{ pu}$$

$$X = 2.9768 \text{ pu}$$

*\*Cláudio Sérgio Mardegan é diretor da EngePower Engenharia e Comércio Ltda. É engenheiro eletricitista formado pela Unifei, especialista em proteção de sistemas elétricos industriais e qualidade de energia, com experiência de mais de 35 anos nesta área. É autor do livro "Proteção e Seletividade em Sistemas Elétricos Industriais", patrocinado pela Schneider, e coautor do "Guia O Setor Elétrico de Normas Brasileiras". É membro sênior do IEEE e participa também dos Working Groups do IEEE que elaboram os "Color Books". É Chairman do Capítulo 6 do Buff Book, atual 3004 series (3004.6) sobre Ground Fault Protection e também participa de Forensics.*

### CONTINUA NA PRÓXIMA EDIÇÃO

Acompanhe todos os artigos deste fascículo em [www.osetoreletrico.com.br](http://www.osetoreletrico.com.br)  
Dúvidas, sugestões e comentários podem ser encaminhados para [redacao@atitudeeditorial.com.br](mailto:redacao@atitudeeditorial.com.br)