



UFPR



TE 991
Tópicos em Qualidade
de Energia

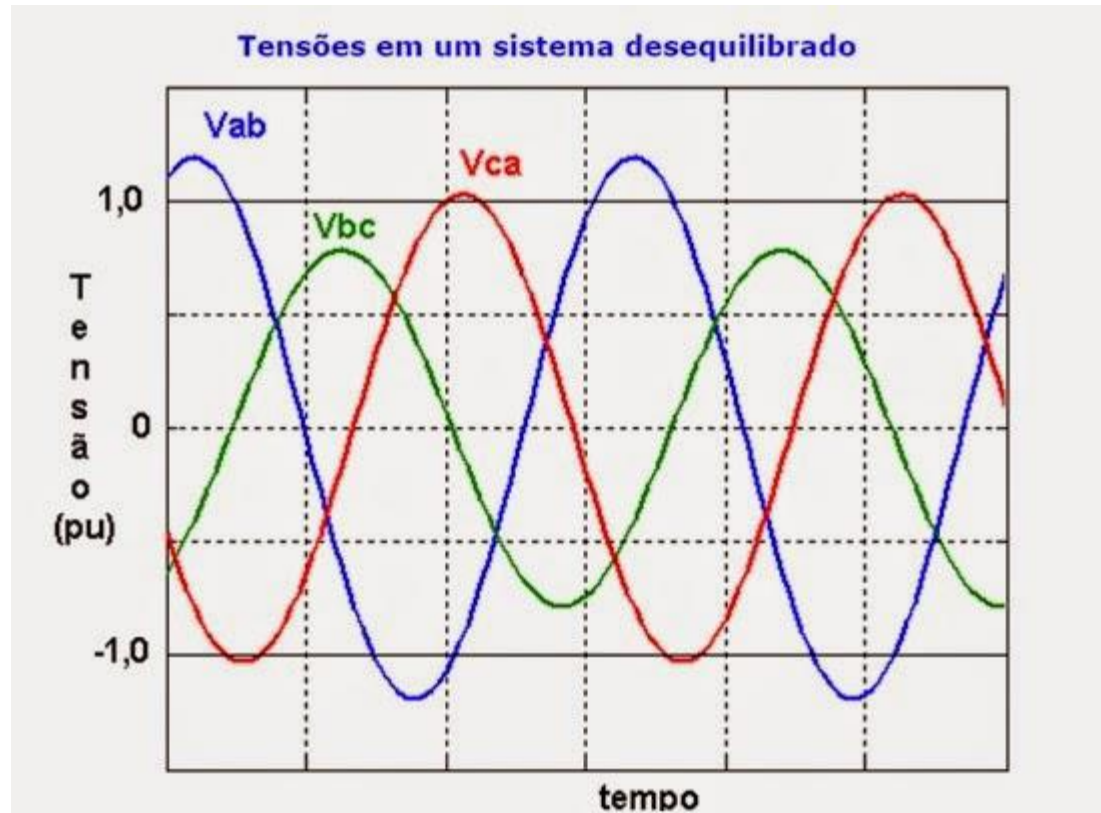
Cap. 6 – Desequilíbrio
de tensão e corrente

Prof. Mateus Duarte
Teixeira

1. Definição

“O desequilíbrio em um sistema elétrico trifásico é uma condição na qual as três fases apresentam diferentes valores de tensão em módulo ou defasagem angular entre fases diferentes de 120° elétricos ou, ainda, as duas condições simultaneamente”

1. Definição



1. Definição

- As origens destes desequilíbrios geralmente são nos sistemas de distribuição, os quais possuem cargas monofásicas distribuídas inadequadamente, fazendo surgir no circuito tensões de sequência negativa. Este problema se agrava quando consumidores alimentados de forma trifásica possuem uma má distribuição de carga em seus circuitos internos, impondo correntes desequilibradas no circuito da concessionária. Tensões desequilibradas podem também ser resultados da queima de fusíveis em uma fase de um banco de capacitores trifásicos

1. Definição

- Segundo o PRODIST, o desequilíbrio de tensão é analisado com base no fator de desequilíbrio, que exprime a relação entre as componentes de sequência negativa e sequência positiva da tensão expressa em termos percentuais da componente de sequência positiva.

2. Componentes Simétricas

- Todo conjunto de fasores (tensão ou corrente) desequilibrado pode ser decomposto em 3 conjuntos de fasores equilibrados:
- Um de sequência positiva
- Um de sequência negativa
- Um de sequência zero

$$\theta = \frac{2\pi}{k} = \frac{360^\circ}{k}$$

$$k = 3 \Rightarrow \theta = \frac{360^\circ}{3} = 120^\circ$$

2. Componentes Simétricas

Operadores Vetoriais

- Tem módulo 1 e quando multiplicam um vetor, rodam esse vetor em 120° , isto é:
 - Qualquer fasor multiplicado por \mathbf{a} tem como resultante um outro vetor de mesmo módulo defasado $+120^\circ$
 - Qualquer fasor multiplicado por \mathbf{a}^2 tem como resultante um outro vetor de mesmo módulo defasado -120°

$$\mathbf{a} = 1 \angle \theta = 1 \angle 120^\circ$$

$$\begin{aligned}\mathbf{a}^2 &= (1 \angle 120^\circ) \cdot (1 \angle 120^\circ) \\ &= (1 \angle 240^\circ) = (1 \angle -120^\circ)\end{aligned}$$

2. Componentes Simétricas

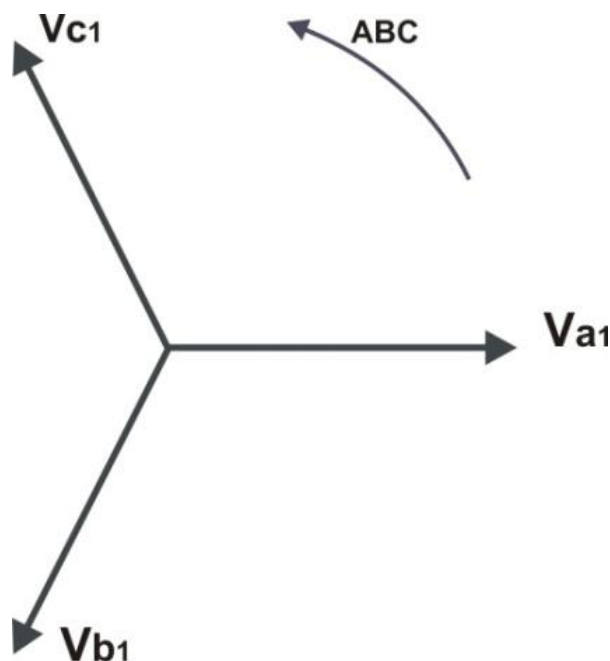
TEOREMA DE FORTESCUE

- Semelhante ao teorema de Fourier relativo a ondas complexas, os componentes simétricos, que é o teorema de Fortescue, consiste em decompor um sistema trifásico não equilibrado em três sistemas equilibrados, ou seja, qualquer sistema de vetores trifásicos não equilibrados pode ser resolvido com a adição de três sistemas equilibrados.

2. Componentes Simétricas

Sistema Trifásico de Sequência Positiva:

- É um conjunto de três fasores balanceados, ou seja, de mesmo módulo, defasados de 120° , com sequência de fase idêntica a do sistema trifásico original desbalanceado. O índice 1 representa a sequência positiva.



$$V_{a1}$$

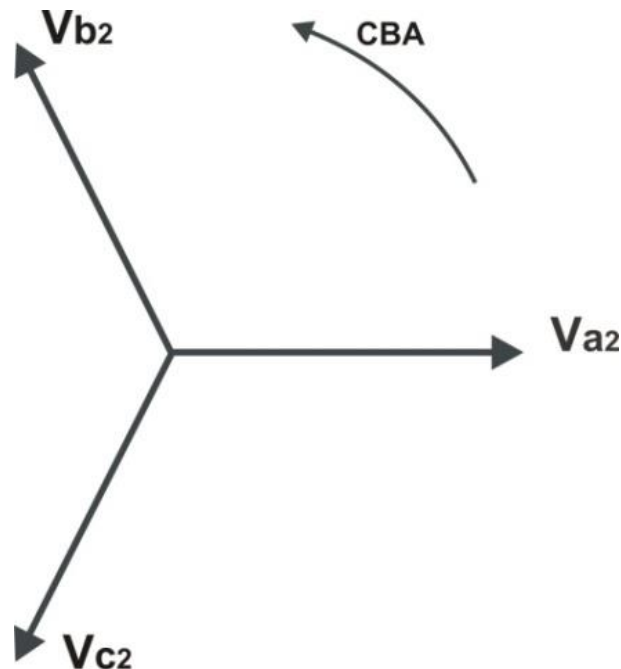
$$V_{b1} = \mathbf{a}^2 \times V_{a1}$$

$$V_{c1} = \mathbf{a} \times V_{a1}$$

2. Componentes Simétricas

Sistema Trifásico de Sequência Negativa:

- É um conjunto de três fasores balanceados, girando numa sequência de fase contrária a do sistema original desbalanceado, em velocidade síncrona contrária a da sequência positiva. O índice 2 representa a sequência positiva.



$$V_{a2}$$

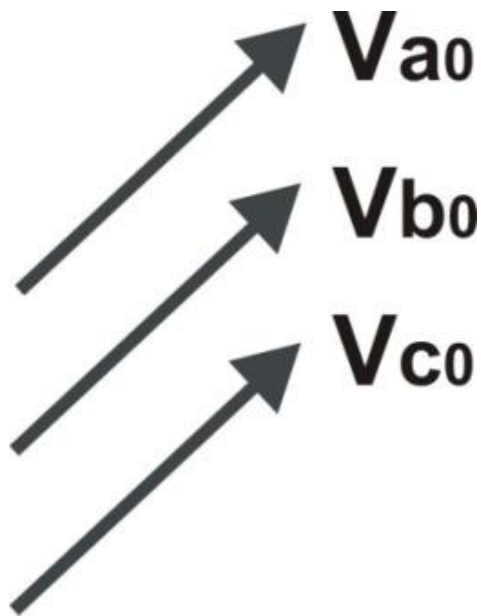
$$V_{b2} = \mathbf{a} \times V_{a2}$$

$$V_{c2} = \mathbf{a}^2 \times V_{a2}$$

2. Componentes Simétricas

Sistema Trifásico de Sequência Zero:

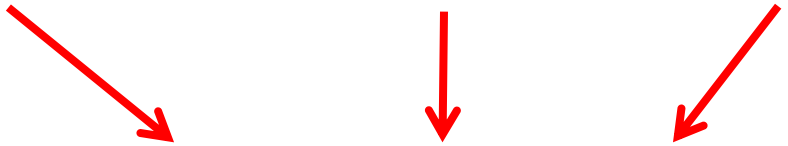
- É um conjunto de três fasores iguais, em fase, girando no mesmo sentido da sequência do sistema original desbalanceado, isto é, da sequência positiva. O índice 0 representa a sequência positiva.



$$V_{a0} = V_{b0} = V_{c0}$$

2. Componentes Simétricas

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix}$$


$$\bar{V}_F = \tilde{Q} \cdot \bar{V}_S$$

\bar{V}_F – Vetor das tensões de fase

\tilde{Q} – Matriz de Transformação de Fortescue

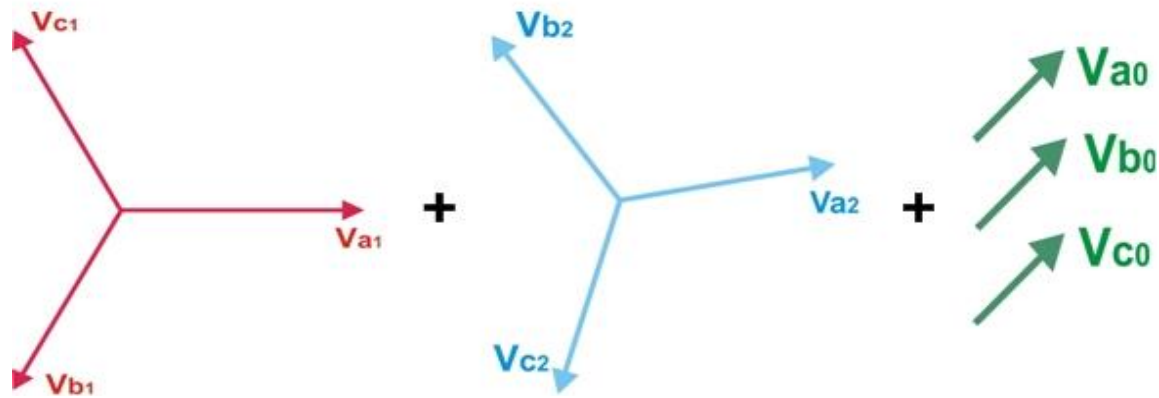
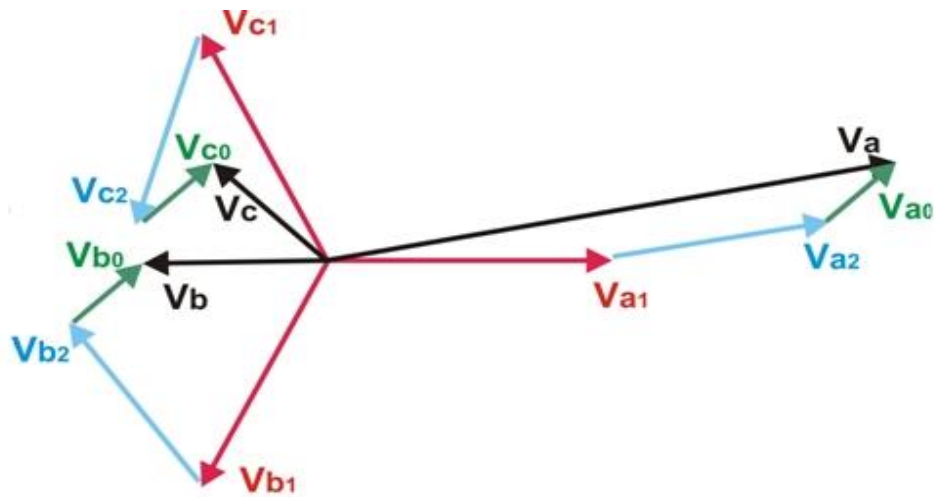
\bar{V}_S – Vetor das tensões de componentes simétricas

2. Componentes Simétricas

- Como já foi dito, um sistema trifásico desequilibrado é composto por três sistemas trifásicos equilibrados de sequência zero, positiva e negativa. Portanto, fazendo a superposição dos três sistemas equilibrados, obtém-se como resultado real o sistema desbalanceado original.

$$\begin{aligned} \mathbf{V}_a &= \mathbf{V}_{a0} + \mathbf{V}_{a1} + \mathbf{V}_{a2} \\ \mathbf{V}_b &= \mathbf{V}_{a0} + (\mathbf{a}^2 \times \mathbf{V}_{a1}) + (\mathbf{a} \times \mathbf{V}_{a2}) \\ \mathbf{V}_c &= \mathbf{V}_{a0} + (\mathbf{a} \times \mathbf{V}_{a1}) + (\mathbf{a}^2 \times \mathbf{V}_{a2}) \end{aligned} \quad \Rightarrow \quad \begin{aligned} \mathbf{V}_{a0} &= \frac{1}{3} \times (\mathbf{V}_a + \mathbf{V}_b + \mathbf{V}_c) \\ \mathbf{V}_{a1} &= \frac{1}{3} \times (\mathbf{V}_a + (\mathbf{a} \times \mathbf{V}_b) + (\mathbf{a}^2 \times \mathbf{V}_c)) \\ \mathbf{V}_{a2} &= \frac{1}{3} \times (\mathbf{V}_a + (\mathbf{a}^2 \times \mathbf{V}_b) + (\mathbf{a} \times \mathbf{V}_c)) \end{aligned}$$

2. Componentes Simétricas



2. Componentes Simétricas

Exercício 1:

- Qual o valor das tensões da fase A em componentes simétricas?

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4 + j3 \\ 4 - j3 \\ 4 \end{bmatrix}$$

2. Componentes Simétricas

Exercício 2:

- Em um sistema trifásico desbalanceado, a sequência de fase é ABC. A tensão da fase A é $9\angle 90^\circ$ V e os seus componentes de sequência positiva e zero valem, respectivamente, $6\angle 90^\circ$ V e $3\angle 30^\circ$ V. Qual o valor do componente de sequência negativa da tensão na fase B?

Solução:

$$V_a = V_{a0} + V_{a1} + V_{a2} = 9\angle 90^\circ = 3\angle 30^\circ + 6\angle 90^\circ + V_{a2} \Rightarrow$$

$$V_{a2} = 9\angle 90^\circ - 3\angle 30^\circ - 6\angle 90^\circ = 3\angle 150^\circ$$

$$\text{Como } V_{b2} = V_{a2} \cdot \alpha = 3\angle (150^\circ + 120^\circ) = 3\angle 270^\circ = 3\angle -90^\circ$$

3. Fator de Desequilíbrio



Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
PRODIST - Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica

IDENTIFICAÇÃO DA GRANDEZA	SÍMBOLO
Fator de desequilíbrio	FD
Magnitude da tensão de seqüência negativa (RMS)	V-
Magnitude da tensão de seqüência positiva (RMS)	V+
Magnitudes das tensões trifásicas de linha (RMS)	V _{ab} , V _{bc} e V _{ca}

Definição:

$$FD = \frac{V_-}{V_+} \cdot 100$$

Determinação:

$$FD = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\gamma}}{1 + \sqrt{3 - 6\gamma}}} \cdot 100$$

$$\gamma = \frac{V_{ab}^4 + V_{bc}^4 + V_{ca}^4}{(V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2)^2}$$

3. Fator de Desequilíbrio

- O valor de referência nos barramentos do sistema de distribuição, com exceção da BT, deve ser igual ou inferior a 2%. (PRODIST/ANEEL Modulo 8 / itens 5.6.1 – valor de referência).

4. Causas dos Desequilíbrios

- Cargas, devido a distribuição irregular por fase, que pode estar variando continuamente através de um sistema de potência trifásico.
- Transformadores trifásicos, devido às diferenças magnéticas oriundas da sua própria construção, resultam em correntes de magnetização ligeiramente diferentes para as três fases.
- Anomalias no sistema, como a abertura de um condutor, falha na isolação de um equipamento ou a abertura de fusíveis em uma das fases de um banco de capacitores (responsáveis pelos desequilíbrios superiores a 5%).

4. Causas dos Desequilíbrios

- No campo industrial, uma das principais fontes de desequilíbrios está no emprego de fornos elétricos trifásicos a arco. Durante o processo de fusão e refino a carga elétrica equivalente provoca diferentes carregamentos entre as fases, originando altas correntes desequilibradas que provocam grandes desequilíbrios nas tensões.
- Linhas aéreas de transmissão com disposição física assimétrica e sem transposição. Este é o caso das linhas em que os condutores são alinhados no mesmo plano horizontal ou vertical. Nestas configurações, a fase central apresenta uma impedância da ordem de 6 a 7% inferior às impedâncias das fases mais externas para linhas de 69 ou 13,8 kV.

5. Principais consequências

- Aumento das perdas nas linhas e no complexo elétrico como um todo. Estas perdas não apenas resultam em gastos financeiros indevidos, como também, implicam em redução das potências úteis disponíveis de linhas e equipamentos.
- Dispositivos para o controle e regulação de tensão responderão indevidamente se as tensões se apresentam desequilibradas. Já foram registradas ocorrências em que o equipamento regulador de tensão elevou a tensão quando, de fato, deveria reduzi-la.
- Fluxo de correntes de sequencia zero pelos condutores neutros. Deslocamento de neutro das cargas monofásicas em relação a referência de neutro do sistema.
- Aquecimento e oscilações de torque em máquinas elétricas, vibrações e perda de vida útil dos mancais .

5. Principais consequências

Motores de Indução

- Quando as tensões de alimentação apresentam desequilíbrios, seja em módulo ou em ângulo, ocorrem alterações nas características térmicas, elétricas e mecânicas dos motores de indução, afetando o seu desempenho e comprometendo a sua vida útil.
- A primeira consequência é a produção de esforços mecânicos axiais e radiais sobre o eixo, com o aparecimento de vibrações, ruídos, batimento, desgaste e o aquecimento excessivo dos mancais em consequência de correntes parasitas que podem aparecer no sistema eixo-mancais-terra.

5. Principais consequências

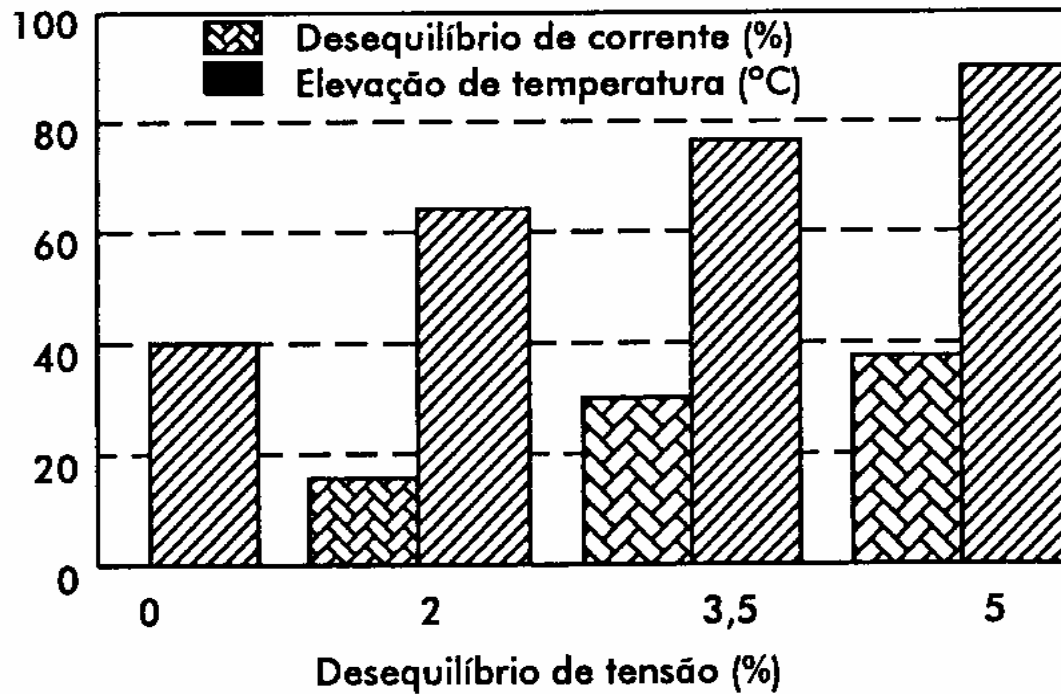
Motores de Indução

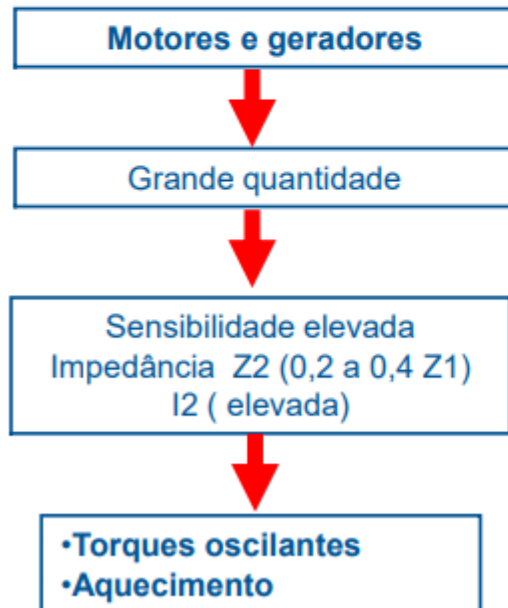
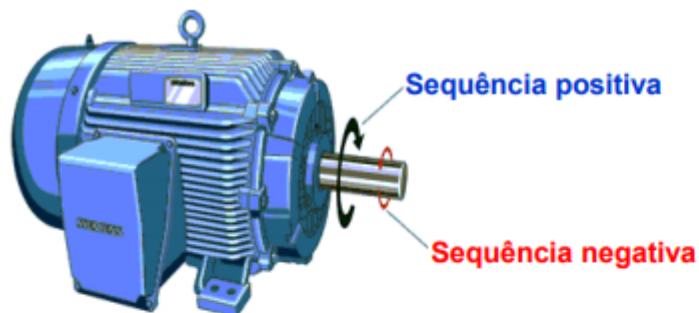
- Outro efeito importante é o fato das impedâncias de sequência negativa possuir valores muito pequenos, resultando em um desequilíbrio de corrente bastante elevado, aumentando sensivelmente a temperatura.

Característica	Desempenho		
<i>Tensão Média [V]</i>	230	230	230
<i>Desequilíbrio de Tensão [%]</i>	0,3	2,3	5,4
<i>Desequilíbrio de Corrente [%]</i>	0,4	17,7	40,0
<i>Elevação Temperatura [°C]</i>	0	30	40

5. Principais consequências

Motores de Indução

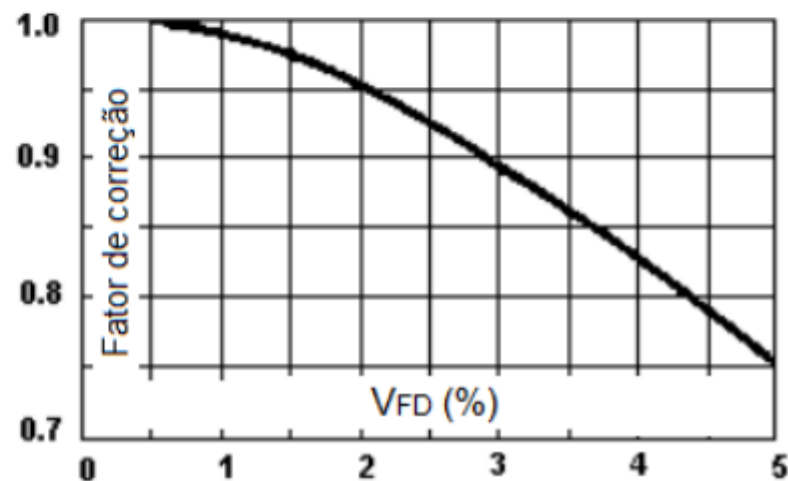




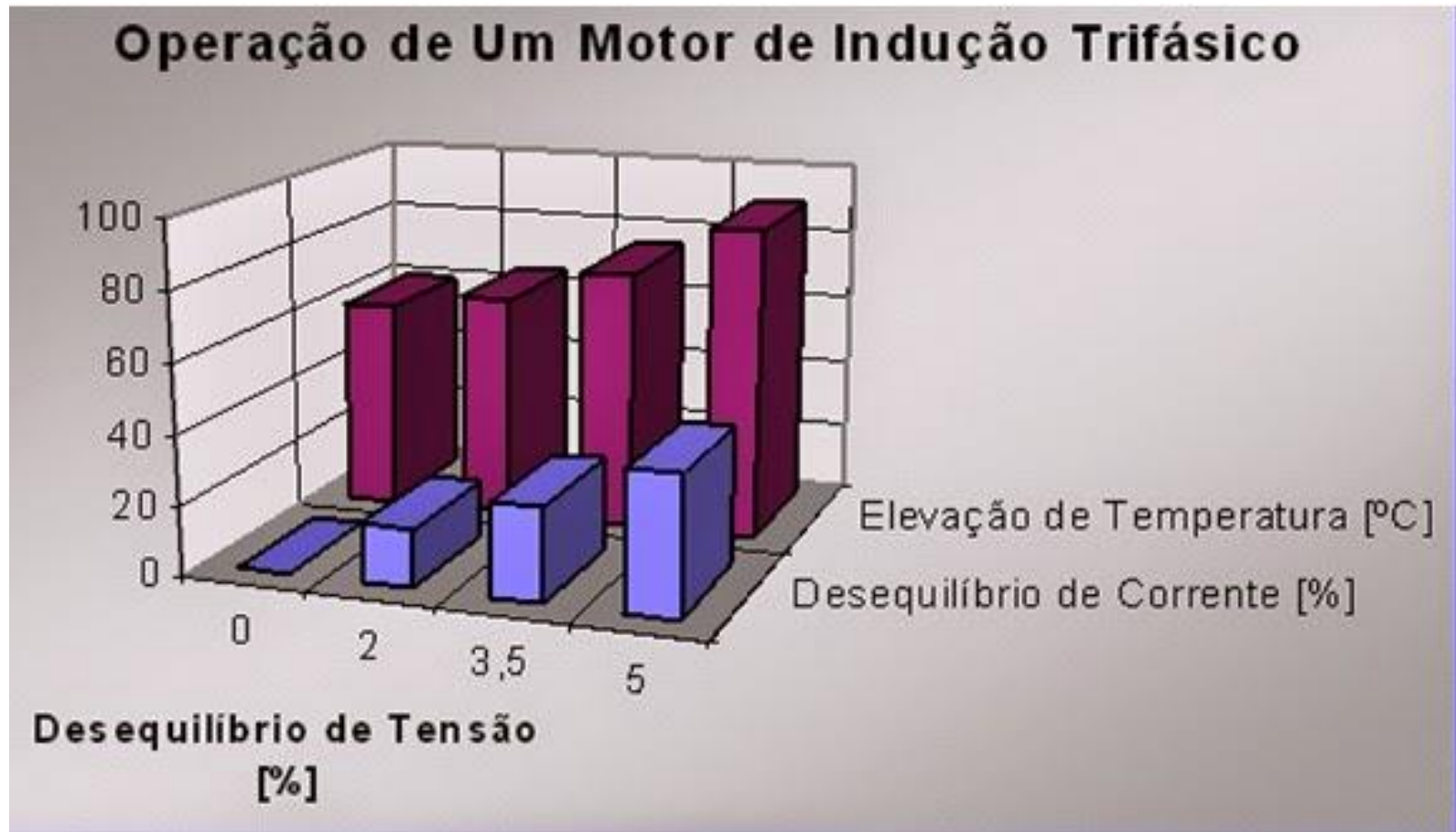
Aumento da temperatura de operação

FD (%)	(I_2)	$\Delta\theta$
0.0	0	0 °C
2.0	15	5 °C
3.5	27	15 °C
5.0	38	30 °C

Fator de degradação da potência disponível



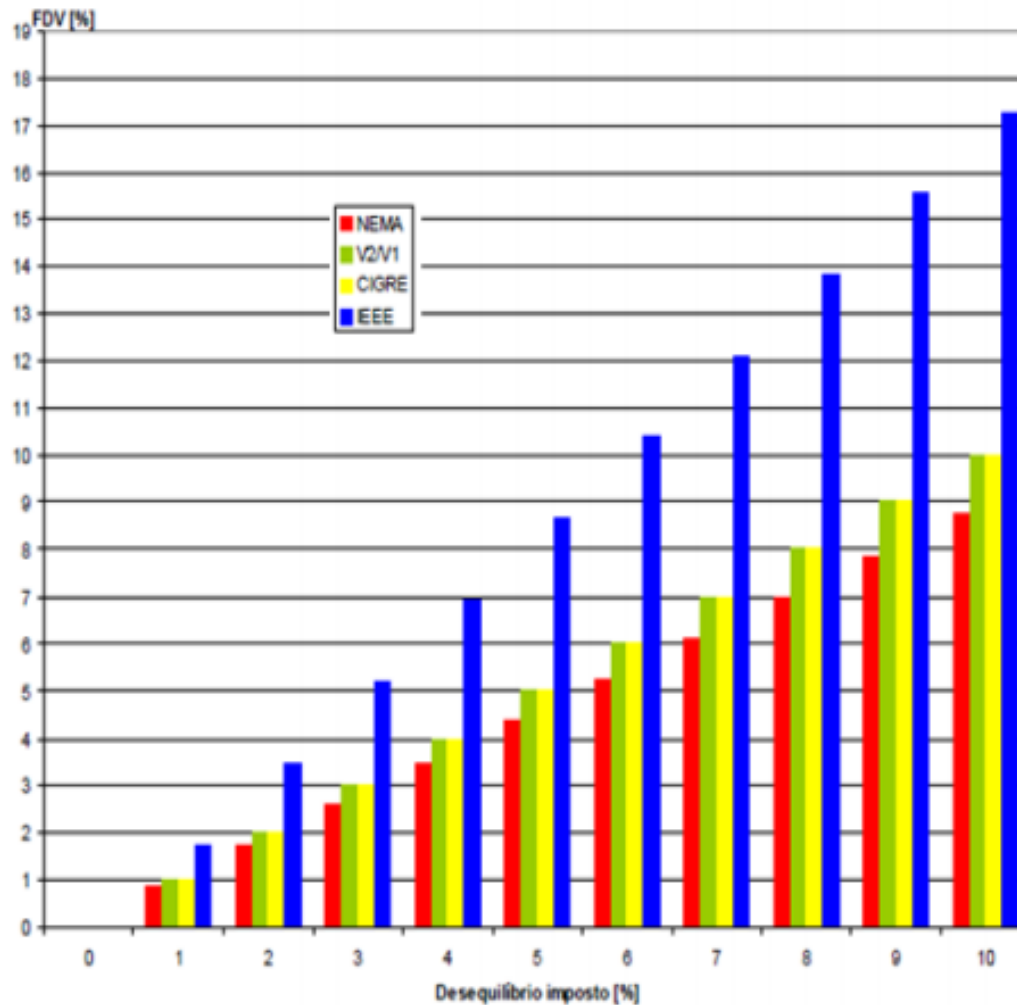
5. Principais consequências



6. Avaliação do nível de desequilíbrio em redes elétricas

RECOMENDAÇÕES / NORMAS CONSULTADAS	EXPRESSÕES
IEC	$K = \frac{V_2}{V_1} \times 100$
IEEE 519	-
GCOI/GCPS	$K = \frac{V_2}{V_1} \times 100$ ou $K = 100 \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}}$ sendo $\beta = \frac{V_{ab}^4 + V_{bc}^4 + V_{ca}^4}{(V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2)^2}$
CENELEC	$K = \frac{V_2}{V_1} \times 100$
NRS 048	$UB = \frac{V_n}{V_p} \times 100$ ou $UB = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} \times 100$ sendo $\beta = \frac{V_{12}^4 + V_{23}^4 + V_{31}^4}{(V_{12}^2 + V_{23}^2 + V_{31}^2)^2} \times 100$
NTCSE	-
ANSI	$FDV\% = \frac{DV_{Max}}{V_{Med}} \cdot 100$
IEEE	$FDV\% = \frac{3 \cdot (V_{max} - V_{min})}{V_a + V_b + V_c} \cdot 100 \%$

6. Avaliação do nível de desequilíbrio em redes elétricas



7. Solução

- Redistribuição de cargas monofásicas
- Compensadores/reguladores eletromagnéticos.
- Statcom
- Filtro ativo
- UPQ

6. Solução

SVC (Static VAR Compensator)

