UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ - UFC
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA - DEE
CURSO DE CIRCUITOS ELÉTRICOS EM C.A.
LABORATÓRIO DE CIRCUITOS ELÉTRICOS II

CIRCUITOS TRIFÁSICOS DESEQUILIBRADOS

OBJETIVOS

- Verificar os valores de tensões e correntes de linha e de fase em circuitos trifásicos desequilibrados.
- Medir potência ativa trifásica.
- Determinar fator de potência equivalente de um circuito trifásico desequilibrado.
- Fazer uso de sequência abc e cba.

MATERIAL UTILIZADO

- Fonte trifásica senoidal 80 V_{rms}
- Resistor 120 Ω
- Indutor 1,47 H
- Capacitor 9,22 μF
- Ponteira de tensão
- Ponteira de corrente
- Voltímetro ca
- Amperímetro ca
- Wattímetro
- Computador
- Simulador PSIM

CONCEITO TEÓRICO

Qualquer carga trifásica em que a impedância em uma ou mais fases difere das demais, diz ser desequilibrada. Mesmo que as impedâncias das três fases sejam idênticas, o sistema também é dito desequilibrado se as tensões aplicadas à carga forem desbalanceadas diferindo quer em magnitude e/ou ângulo de fase.

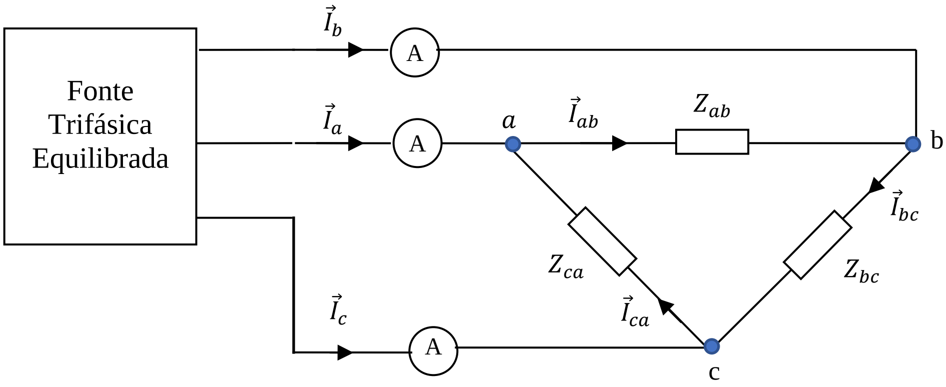
Cargas desequilibradas em Δ

Se as tensões trifásicas de linha aplicadas aos terminais de uma carga desequilibrada em delta forem conhecidas, as correntes em cada fase ou impedância da carga podem ser determinadas diretamente. As correntes de linha são obtidas somando-se fasorialmente as correntes dos nós a, b e c da carga.

Para determinar as correntes fasoriais de linha, aplica-se a lei das correntes de Kirchhoff:

$$\begin{aligned} \vec{I}_a &= \vec{I}_{ab} - \vec{I}_{ca} \\ \vec{I}_b &= \vec{I}_{bc} - \vec{I}_{ab} \\ \vec{I}_c &= \vec{I}_{ca} - \vec{I}_{bc} \end{aligned} \tag{1}$$

Figura 1 – Carga em Δ desequilibrada.



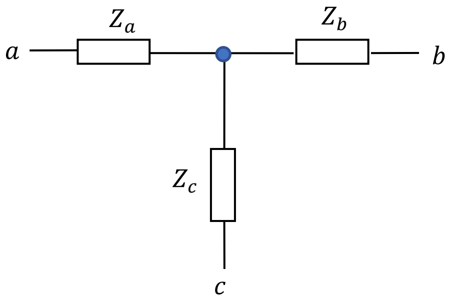
Logo,

$$\vec{I}_a = \frac{\vec{V}_{ab}}{Z_{ab}} - \frac{\vec{V}_{ca}}{Z_{ca}}$$
$$\vec{I}_b = \frac{\vec{V}_{bc}}{Z_{bc}} - \frac{\vec{V}_{ab}}{Z_{ab}}$$
$$\vec{I}_c = \frac{\vec{V}_{ac}}{Z_{ac}} - \frac{\vec{V}_{bc}}{Z_{bc}} \qquad (2)$$

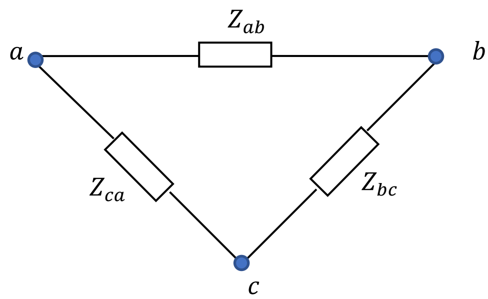
Carga desequilibrada em Y a três condutores

Se as tensões de linha que alimentam os terminais a, b e c de uma carga desequilibrada em Y são conhecidas, então as correntes de linha $\vec{I}_a$, $\vec{I}_b$ e $\vec{I}_c$ podem ser obtidas da mesma forma que em uma carga em Δ desequilibrada, se for realizada a transformação Δ-Y. A Figura 2 mostra duas cargas trifásicas Y e Δ desequilibradas.

Figura 2. Cargas em Y e Δ desequilibradas.



(2a)



(2b)

Ao realizar a transformação Δ-Y, as impedâncias Z_a, Z_b e Z_c podem ser obtidas da seguinte forma:

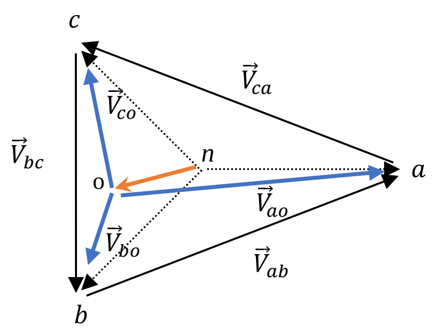
$$Z_a = \frac{Z_{ab} \cdot Z_{ca}}{Z_{ab}+Z_{bc}+Z_{ca}}$$
$$Z_b = \frac{Z_{ab} \cdot Z_{bc}}{Z_{ab}+Z_{bc}+Z_{ca}}$$
$$Z_c = \frac{Z_{bc} \cdot Z_{ca}}{Z_{ab}+Z_{bc}+Z_{ca}} \qquad (3)$$

O conhecimento das correntes de linha $\vec{I}_a$, $\vec{I}_b$ e $\vec{I}_c$, a partir da representação da carga em Δ, permitem a determinação das tensões entre as fases e o centro-estrela "o" ($\vec{V}_{ao}$, $\vec{V}_{bo}$ e $\vec{V}_{co}$) nas três impedâncias.

$$\vec{V}_{ao} = Z_a\vec{I}_a$$
$$\vec{V}_{bo} = Z_b\vec{I}_b$$
$$\vec{V}_{co} = Z_c\vec{I}_c \tag{4}$$

As tensões $\vec{V}_{ao}$, $\vec{V}_{bo}$ e $\vec{V}_{co}$ são desequilibradas, no entanto, o diagrama de fasores de tensões de linha forma um triângulo equilátero, pois $\vec{V}_{ab}$, $\vec{V}_{bc}$ e $\vec{V}_{ca}$ estão equilibradas. A Figura 3 mostra o diagrama fasorial contendo todos os fasores de tensão.

Figura 3 – Diagrama fasorial de tensões para uma carga trifásica desequilibrada.



O ponto n representa o neutro do circuito trifásico equilibrado, com potencial elétrico nulo. O ponto o representa o centro-estrela da carga Y desequilibrada. Existe uma diferença de potencial entre o centro-estrela o e o neutro n, que pode ser determinada da seguinte forma:

$$\vec{V}_{an} = \vec{V}_{0n} + \vec{V}_{a0} \quad \therefore \quad \vec{V}_{0n} = \vec{V}_{an} - \vec{V}_{a0} \tag{5}$$

Carga desequilibrada em Y a quatro fios

Em uma carga em Y desequilibrada a quatro fios existe uma corrente circulando pelo condutor neutro. Pela lei das correntes de Kirchhoff, a corrente no neutro é a soma das correntes de linha da carga:

$$\vec{I}_n = \vec{I}_a + \vec{I}_b + \vec{I}_c \tag{6}$$

Como as correntes não são simétricas, $\vec{I}_n \neq 0$.

Potência e fator de potência em sistemas trifásicos desequilibrados

O fator de potência em um circuito monofásico ou em um sistema trifásico de cargas equilibradas tem um sentido físico definido. É a relação entre os watts por fase e os volt-ampères, também por fase. Na análise senoidal, o fator de potência é equivalente ao cosseno do ângulo de defasagem ϕ entre tensão e corrente, sendo ϕ também definido como o argumento da impedância complexa por fase da carga.

Em um sistema trifásico desequilibrado, cada fase tem seu próprio fator de potência. O fator de potência resultante será a relação entre o somatório das potências ativa por fase, em W, e o módulo do somatório da potência complexa por fase, em VA. O índice "i" indica cada uma das fases da carga.

$$FP_T = \frac{\sum_{i=1}^{3} P_i}{\left|\sum_{i=1}^{3} S_i\right|} \qquad (7)$$

PROCEDIMENTO

1. Montar e simular no PSIM o circuito da Figura 4, alimentado com tensão rms de linha em 80 V com sequência direta, e valores de impedância de carga conectada em Y como definidos na Tabela 1.

Figura 4. Carga resistiva desequilibrada em Y para ensaio em laboratório.

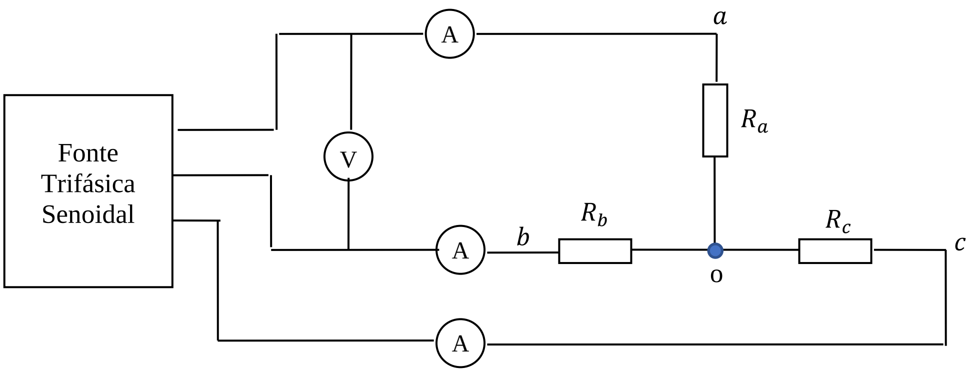


Tabela 1 – Tensões e correntes da carga trifásica desequilibrada em Y.

Tensão rms de Linha (V)	Condição de carga (*)			Tensão de fase na forma polar (V)			Corrente de linha na forma polar (A)			Tensão de deslocamento de neutro na forma polar (V)	Corrente de neutro na forma polar (A)
V_L	R_a	R_b	R_c	$\vec{V}_{ao}$	$\vec{V}_{bo}$	$\vec{V}_{co}$	$\vec{I}_a$	$\vec{I}_b$	$\vec{I}_c$	$\vec{V}_{on}$	$\vec{I}_n$
80	$3R$	$3R$	$3R$								
	$3R$	$2R$	$1R$								
	$3R$	$2R$	∞								

(*) $nR \equiv$ Resistores em paralelo

a) Medir e plotar em um mesmo gráfico as tensões de linha $\vec{V}_{ab}$, $\vec{V}_{bc}$, $\vec{V}_{ca}$.
b) Medir e plotar em um mesmo gráfico as tensões de fase $\vec{V}_{ao}$, $\vec{V}_{bo}$, $\vec{V}_{co}$; medir e registrar na Tabela 1 o ângulo de fase e o valor rms das tensões.
c) Medir e plotar em um mesmo gráfico as correntes $\vec{I}_a$, $\vec{I}_b$ e $\vec{I}_c$; medir e registrar na Tabela 1 o ângulo de fase e o valor rms das correntes.
d) Medir e plotar a tensão $\vec{V}_{on}$ entre o centro-estrela da carga "o" e o neutro da fonte "n". Calcular o valor teórico de $\vec{V}_{on}$ e comparar com o valor medido. Comente sobre a condição em que uma fase está aberta ($R_c = \infty \cong 10^6\ \Omega$) quanto à corrente e tensão.
e) Desenhar o diagrama fasorial das tensões de linha, tensões de fase e correntes de linha em um mesmo gráfico.

f) Ligar o neutro da fonte ao centro-estrela da carga por meio de uma ponteira de corrente. Registrar magnitude e ângulo de $\vec{I}_n$ na Tabela 1. Calcular o valor teórico de $\vec{I}_n$ e comparar com o valor medido. Explicar os resultados obtidos com a corrente de neutro na condição de carga Y desequilibrada a quatro condutores (neutro da carga ligado ao neutro da fonte) em relação à condição de carga equilibrada.
g) Para a condição de neutro fonte-carga interligados, medir as tensões de fase $\vec{V}_{ao}$, $\vec{V}_{bo}$, $\vec{V}_{co}$ da carga. Comente o resultado das tensões obtidas em relação à condição de neutro flutuante.
h) Mudar a sequência de fase da fonte de alimentação da carga para cba e para a condição de impedância de carga $3R$, $2R$ e $1R$, medir e plotar as tensões de linha, tensões de fase, correntes de linha e corrente no neutro para a condição de neutros fonte-carga interligados. Represente as variáveis citadas na forma polar e verifique a sequência de fase. Compare o valor da corrente no neutro para a condição cba em relação à abc.

Dica:

- **A sequência de fase pode ser invertida conectando o terminal a da fonte ao terminal a' da carga, o terminal b da fonte ao terminal c' da carga e o terminal c da fonte ao terminal b' da carga. O procedimento fez uso da permuta entre as fases b e c.**
- **Plotar as formas de onda de tensão de cada fase em cores distintas bem como as correntes e colocar legenda nos gráficos.**
- **Os cálculos e os circuitos no PSIM devem constar no relatório.**

Para o circuito da Figura 4, calcular o equivalente Δ da carga Y com impedâncias $3R$, $2R$ e $1R$ ($nR \equiv$ resistores em paralelo), simular o circuito no PSIM e registrar os valores obtidos na Tabela 2.

Tabela 2 – Tensões e correntes da carga trifásica desequilibrada em Δ.

Tensão rms de Linha (V)	Condição de carga (*)			Correntes de fase na forma polar (V)			Corrente de linha na forma polar (A)			Corrente entre fases na forma polar (A)
V_L	R_{ab}	R_{bc}	R_{ca}	$\vec{I}_{ab}$	$\vec{I}_{bc}$	$\vec{I}_{ca}$	$\vec{I}_a$	$\vec{I}_b$	$\vec{I}_c$	$\vec{I}_\Delta$
80										

a) Medir e plotar as correntes de linha $\vec{I}_a$, $\vec{I}_b$ e $\vec{I}_c$ e correntes de fase $\vec{I}_{ab}$, $\vec{I}_{bc}$ e $\vec{I}_{ca}$ da carga para a condição de tensões de alimentação em sequência direta.
b) Inserir uma ponteira de corrente no delta, plotar a forma de onda da corrente e medir sua magnitude rms e ângulo de fase. Compare o valor teórico calculado com o valor medido da corrente no delta.
c) Desenhar em um mesmo diagrama unifilar as tensões sobre a carga em Δ, as correntes de fase e as correntes de linha.
d) Inverter a sequência de fase da fonte e medir a corrente no interior do Δ.
e) Compare as correntes no interior do Δ para as diferentes sequências de fase abc e cba; compare ainda com os respectivos valores de correntes no neutro da questão 1) para a condição de carga $3R$, $2R$ e $1R$.

2. Considerando as condições de carga mostradas na Tabela 3, montar e simular no PSIM o circuito da Figura 5, com as cargas individuais alimentadas com uma tensão fase-fase de 80 V_{rms}, sequência abc.

Tabela 3 – Características de cargas individuais.

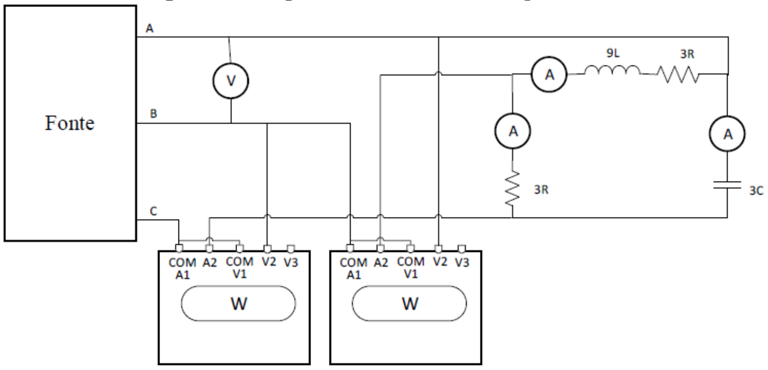
Condição de carga (*)	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência Ativa (W)	Potência Complexa (VA)	FP
$3R$	80				
$3R + 9L$					
$3C$					

(*) nR: resistores em paralelo; nL: indutores em paralelo; nC: capacitores em paralelo.

a) Determinar o fator de potência (FP) de deslocamento e a potência complexa $S = P \pm jQ$ de cada fase, utilizando um wattímetro, um voltímetro e um amperímetro em cada fase.
b) Se uma das fases do circuito na Figura 5 é aberta ($Z = \infty$, insira um valor de impedância $Z > 10^6$), medir as correntes de linha $\vec{I}_a$, $\vec{I}_b$ e $\vec{I}_c$ e explicar por que nenhuma das correntes de linha é zero.

3. No circuito mostrado na Figura 5, realizar a medição de potência ativa trifásica utilizando o método dos dois wattímetros.

Figura 5. Carga trifásica em Δ desequilibrada.



(*) nR: resistores em paralelo; nL: indutores em paralelo; nC: capacitores em paralelo

a) Comparar a potência medida pelo método dos dois wattímetros com a soma das componentes reais das potências complexas individuais da Tabela 2. Analisar o resultado.
b) Determinar o fator de potência e a potência complexa da carga trifásica da Fig. 5.

REFERÊNCIAS

DESOER, Charles A.; KUH, Ernest S. **Teoria Básica de Circuitos**. Rio de Janeiro: Guanabara, 1988.

CLOSE, Charles M. **The Analysis of Linear Circuits**. New York: Harcourt, Brace & World, 1966.

HAYT, Jr., W.H.; KEMMERLY, J.E. **Análise de Circuitos em Engenharia**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1973.

EDMINISTER, J.A. **Circuitos Elétricos**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 2.ed., 1991.

MEDEIROS FILHO, Solon. **Medição de Energia Elétrica**. Rio de Janeiro: Guanabara, 2.ed., 1976.