



Universidade Federal de Uberlândia
Faculdade de Engenharia Elétrica
FEELT

**CIRCUITOS TRIFÁSICOS EQUILIBRADOS - MEDIDA
DE POTÊNCIA COM 2 WATTÍMETROS**

Relatório da Disciplina de Experimental de Circuitos Elétricos II
por

Lesly Viviane Montúfar Berrios
11811ETE001

Prof. Wellington Maycon Santos Bernardes
Uberlândia, Outubro / 2019

Sumário

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Objetivos | 2 |
| 2 | Introdução teórica | 2 |
| 2.1 | Carga em conexão em estrela | 3 |
| 2.2 | Carga em conexão em delta ou triângulo | 4 |
| 2.3 | Medição de potência pelo método dos 2 wattímetros | 4 |
| 3 | Preparação | 4 |
| 3.1 | Materiais e ferramentas | 4 |
| 3.2 | Montagem | 5 |
| 3.2.1 | Carga em estrela | 5 |
| 3.2.2 | Carga em triângulo | 6 |
| 4 | Análise sobre segurança | 7 |
| 5 | Cálculos, análise dos resultados e questões | 8 |
| 6 | Simulação computacional | 10 |
| 6.1 | Carga em conexão estrela | 10 |
| 6.2 | Carga em conexão delta | 11 |
| 7 | Conclusões | 11 |

1 Objetivos

Verificar experimentalmente os conceitos teóricos sobre os métodos utilizados para medir a potência ativa trifásica das cargas. Além disso, comparar os resultados com os valores obtidos utilizando uma análise teórica.

2 Introdução teórica

As primeiras linhas de transmissão de energia elétrica, que surgiram no final do século XIX, destinavam-se exclusivamente ao suprimento do sistema de iluminação, pequenos motores e sistema de tração (railway) e operavam em corrente contínua a baixa magnitude de tensão. A geração e transmissão usando os mesmos níveis de tensão das diferentes cargas restringiu a distância entre a planta de geração e os consumidores e a tensão da geração em corrente contínua não podia ser facilmente aumentada para a transmissão a grandes distâncias [1].

Para realizar uma transmissão de energia elétrica a grandes distâncias era necessário um nível elevado de magnitude de tensão, e essa tecnologia de conversão para corrente contínua não era viável naquela época. Por isso, foi necessária a mudança da transmissão de corrente contínua para corrente alternada, devido principalmente aos seguintes motivos:

- O desenvolvimento e uso dos transformadores, permitindo a transmissão a grandes distâncias usando altos níveis de tensão, reduzindo as perdas elétricas dos sistemas e a queda de tensão.
- A elevação/redução da magnitude de tensão é realizado com uma alta eficiência e a baixo custo através dos transformadores.
- Surgimento de geradores e motores em corrente alternada, construtivamente mais simples, eficientes e baratos que as máquinas em corrente contínua

Assim, a corrente alternada seria a melhor alternativa para a transmissão de energia elétrica à grandes distâncias. Além disso, introduz-se o conceito de gerador trifásico, ilustrado pela Figura 1, no qual três bobinas defasadas em 120° elétricos no espaço geram um conjunto de três tensões de mesmo valor máximo, defasadas de 120 graus elétricos no tempo.

Um gerador trifásico aproveita melhor o espaço físico, resultando em um gerador de tamanho reduzido e mais barato, comparado com os geradores monofásicos de igual potência, ademais são superiores aos motores monofásicos em rendimento, tamanho, fator de potência e capacidade de sobrecarga. Um sistema monofásico

precisa de dois condutores; e um sistema trifásico (perfeitamente balanceado) precisa de três condutores, porém conduz três vezes mais potência. Na prática, devido a pequenos desequilíbrios inevitáveis, os sistemas trifásicos contam com um quarto condutor, o neutro.

É possível conectar as bobinas de gerador trifásicos em configuração estrela ou delta, assim como a carga em *Conexão em estrela* (2.1) ou *Conexão em delta/triângulo* (2.2).

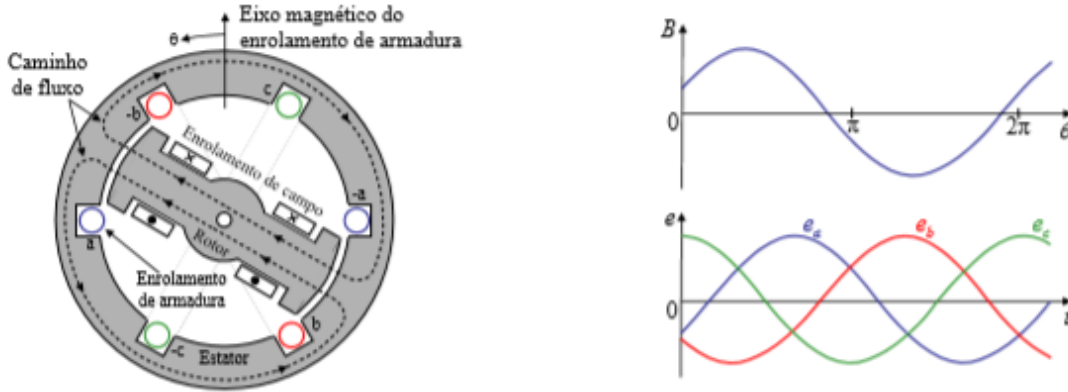


Figura 1: Geração de tensão alternada trifásica.

2.1 Carga em conexão em estrela

A carga na configuração estrela é caracterizada por ter uma tensão fase-neutro entre seus terminais e corrente de linha igual à corrente de fase ($I_L = I_F$). Ainda é possível determinar a tensão fase-fase ou de linha pela relação descrita na Figura 2 [2].

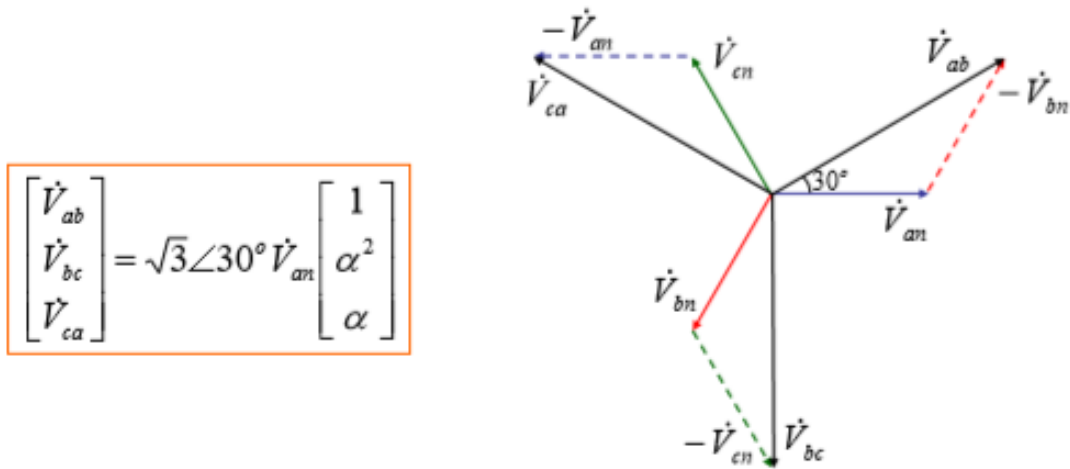


Figura 2: Relação entre tensão de linha e fase numa carga em estrela.

2.2 Carga em conexão em delta ou triângulo

Já para a carga na configuração delta, ou triângulo, em seus terminais há uma tensão de linha igual a tensão de fase [2]. Nesse caso, a relação entre linha e fase ocorre para a corrente, conforme descrito na Figura 3.

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{bmatrix} = \sqrt{3} \angle -30^\circ \dot{I}_{ab} \begin{bmatrix} 1 \\ \alpha^2 \\ \alpha \end{bmatrix}$$

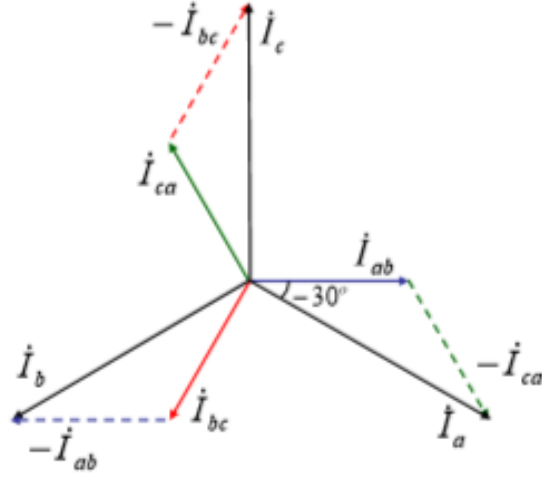


Figura 3: Relação entre corrente de linha e fase numa carga em delta.

2.3 Medição de potência pelo método dos 2 wattímetros

3 Preparação

3.1 Materiais e ferramentas

- 1 - **Fonte:** Alimentará todo o circuito. Possui frequência de $60Hz$.
- 2 - **Regulador de tensão (Varivolt):** Também chamado de autotransformador, permitirá obter o valor desejado de corrente a partir da regulação correta da tensão fornecida pela fonte.
- 3 - **Conectores:** Para as conexões no circuito foi utilizado majoritariamente cabos banana-banana.
- 4 - **Medidor eletrônico KRON Mult K:** Possibilita encontrar a medição da potência real (P) - vatímetro, reativa (Q) e aparente (S) do circuito. Ele também possui função de cofasímetro, instrumento elétrico que mede o fator de potência ($\cos\theta$) ou o ângulo da impedância θ do circuito, para um circuito com a impedância $Z = Z \angle \theta$.
- 5 - **Amperímetro analógico AC:** Instrumento utilizado para acompanhar visualmente o aumento da corrente.

6 - **Reatores de 160 mH:** Foram utilizados 3, para compor a carga do circuito trifásico. Sendo $L = 160mH$ e $R_L = 3,8\Omega$.

7 - **Resistores de 50Ω:** Foram utilizados 3, para compor a carga do circuito trifásico.

3.2 Montagem

3.2.1 Carga em estrela

Efetue a montagem indicada na Figura 1 abaixo, alimentando os pontos **a b c n** através de uma fonte alternada trifásica em seqüência de fases **abc** (ou **direta**), aplicando uma tensão entre linhas V_L igual a 100V, em frequência de 60 Hz. Os parâmetros da carga são: $R = 50\Omega$; $R_L = 3,8\Omega$; $L = 160mH$. Na figura 5, V_L representa um voltímetro conectado para medir a tensão entre linhas; A_L representa um amperímetro conectado para medir a corrente de linha (igual a de fase); W_i representa um wattímetro analógico conectado para medir a potência ativa da carga. Os valores dos instrumentos devem ser anotados na Tabela 1.

Utilize os medidores digitais *Kron* para medida de corrente e tensão ($TL = 0048 - 3\phi$ sem Neutro). Além disso, compare os valores das potências entre *Kron* e os wattímetros analógicos. **Atente-se a escala do wattímetro (corrente e tensão).**

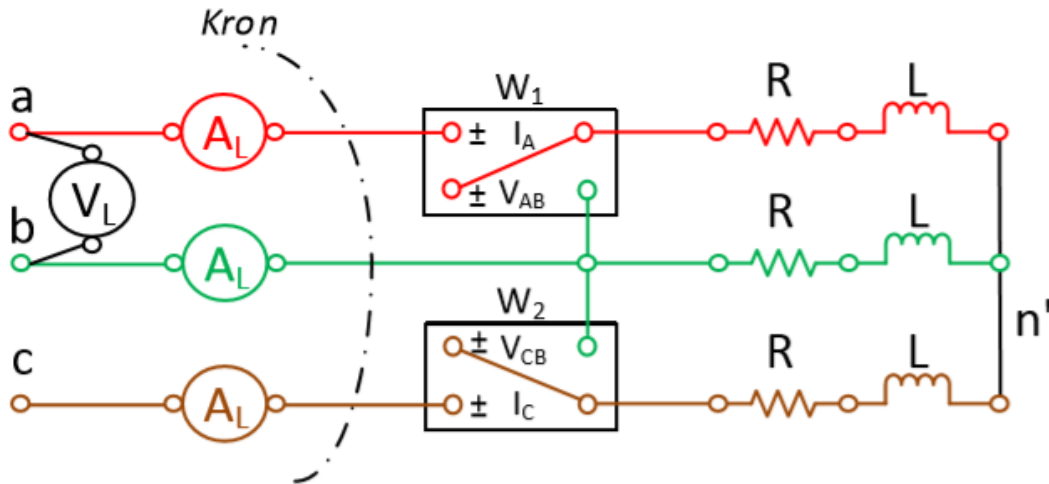


Figura 4: Ligação em estrela em sequência de fases abc.

Observa-se pelo desenho que não é possível obter a tensão e corrente de todas as fases de forma simultânea, sendo necessária a mudança dos medidores V_L e V_F para a obtenção dos demais valores. Para isso, utilizaremos o medidor trifásico eletrônico *Kron Mult-K* (wattímetro), usando as entradas V_A , V_B , V_C , V_N para as medidas de tensão e I_A , I_B e I_C para as medidas de corrente, assim sendo, realizando as ligações

apropriadas. Como o *Kron* não mede a corrente de neutro, então é necessário um amperímetro analógico A_C entre n e n' .

Tabela 1: Ligação em triângulo em sequência de fases abc.

| $V_L(V)$ | $I_L(A)$ | $W_1(W)$ | $W_2(W)$ | $P_F(W)$ | $P_T(W)$ | $Q_F(Var)$ | $Q_T(Var)$ | $S_F(VA)$ | $S_T(VA)$ | Fator de potência |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|------------|------------|-----------|-----------|-------------------|
| 99,46 | 0,501 | 5,00 | 50,00 | 16,15 | 51,44 | 25,01 | 75,43 | 29,60 | 90,96 | 0,543 |
| 100,60 | 0,514 | | | 18,09 | | 24,52 | | 30,32 | | 0,596 |
| 100,50 | 0,532 | | | 17,20 | | 25,90 | | 31,04 | | 0,556 |

Lembre-se que $P = W_1 + W_2$ e que $Q = \sqrt{3}(W_2 - W_1)$ para a **sequência abc** da conexão acima.

Agora, troque duas fases na saída do *varivolt* para obter a **sequência cba** da conexão acima. Anote os valores na Tabela 2.

Tabela 2: Ligação em triângulo em sequência de fases abc.

| $V_L(V)$ | $I_L(A)$ | $W_1(W)$ | $W_2(W)$ | $P_F(W)$ | $P_T(W)$ | $Q_F(Var)$ | $Q_T(Var)$ | $S_F(VA)$ | $S_T(VA)$ | Fator de potência |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|------------|------------|-----------|-----------|-------------------|
| 100,70 | 0,499 | 50,00 | 5,00 | 15,92 | 51,42 | 24,30 | 75,30 | 29,13 | 91,42 | 0,550 |
| 100,50 | 0,540 | | | 17,17 | | 26,50 | | 31,68 | | 0,544 |
| 100,90 | 0,523 | | | 18,33 | | 24,50 | | 30,61 | | 0,599 |

3.2.2 Carga em triângulo

Efetue a montagem indicada na Figura ?? abaixo, alimentando os pontos **a b c** através de uma fonte alternada trifásica em sequência de fases **abc** (ou *direta*), aplicando uma tensão entre linhas $V_L = 100V$, em frequência de 60 Hz. Os parâmetros da carga são: $R = 50\Omega$; $C = 45,9\mu F$. Na Figura ??, V_L representa um voltímetro conectado para medir a tensão entre linhas; A_F representa um amperímetro conectado para medir a corrente de fase; A_L representa o amperímetro conectado para medir a corrente de linha; W_i representa um wattímetro analógico conectado para medir a potência ativa trifásica da carga. Os valores dos instrumentos devem ser anotados na Tabela 3.

Utilize os medidores digitais *Kron* para medida de corrente e tensão ($TL = 0048 - 3\phi$ sem Neutro). Além disso, compare os valores das potências entre *Kron* e os wattímetros analógicos. Atente-se a escala do wattímetro (corrente e tensão).

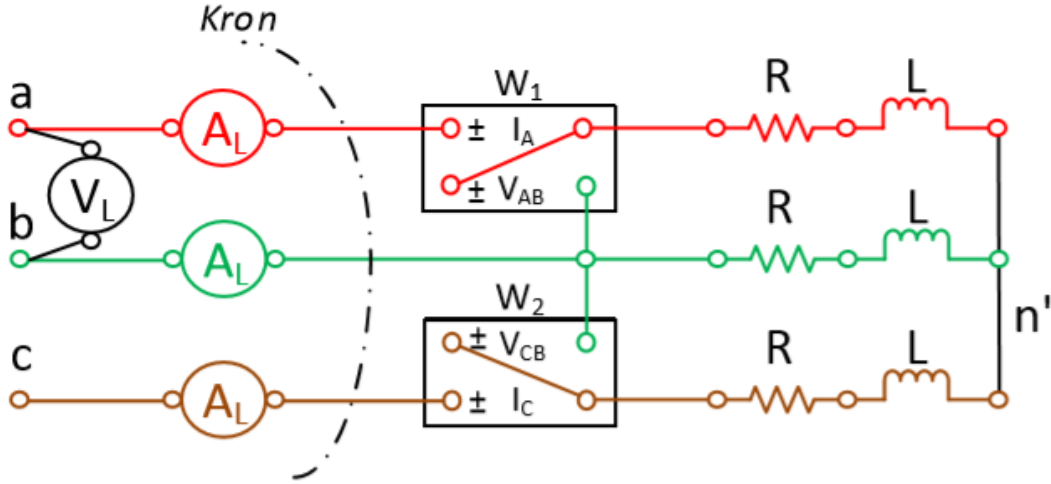


Figura 5: Ligação em estrela em sequência de fases abc.

Tabela 3: Ligação em triângulo em sequência de fases abc.

| $V_L(V)$ | $I_L(A)$ | $I_{A_F}(A)$ | $W_1(W)$ | $W_2(W)$ | $P_F(W)$ | $P_T(W)$ | $Q_F(Var)$ | $Q_T(Var)$ | $S_F(VA)$ | $S_T(VA)$ | Fator de potência |
|----------|----------|--------------|----------|----------|----------|----------|------------|------------|-----------|-----------|-------------------|
| 79,53 | 1,782 | 0,5 | 132,50 | 25,00 | 55,44 | 164,68 | 61,57 | 185,39 | 81,65 | 245,23 | 0,673 |
| 80,36 | 1,777 | | | | 54,24 | | 62,50 | | 81,76 | | 0,660 |
| 80,59 | 1,787 | | | | 55,00 | | 61,32 | | 81,82 | | 0,667 |

Lembre-se que $P = W_1 + W_2$ e que $Q = \sqrt{3}(W_2 - W_1)$ para a **sequência abc** da conexão acima.

Agora, troque duas fases na saída do *varivolt* para obter a **sequência cba** da conexão acima. Anote os valores na Tabela 4.

Tabela 4: Ligação em triângulo em sequência de fases cba.

| $V_L(V)$ | $I_L(A)$ | $I_{A_F}(A)$ | $W_1(W)$ | $W_2(W)$ | $P_F(W)$ | $P_T(W)$ | $Q_F(Var)$ | $Q_T(Var)$ | $S_F(VA)$ | $S_T(VA)$ | Fator de potência |
|----------|----------|--------------|----------|----------|----------|----------|------------|------------|-----------|-----------|-------------------|
| 80,18 | 1,789 | 0,5 | 30,00 | 120,00 | 55,28 | 165,96 | 62,28 | 185,52 | 82,93 | 248,51 | 0,665 |
| 80,45 | 1,776 | | | | 55,12 | | 61,55 | | 82,91 | | 0,667 |
| 80,60 | 1,791 | | | | 55,56 | | 61,69 | | 82,67 | | 0,667 |

4 Análise sobre segurança

Os óculos de segurança são Equipamentos de Proteção Individual (EPIs) e são utilizados para a proteção da área ao redor dos olhos contra qualquer tipo de detrito estranho, que possa causar irritação ou ferimentos. Também protegem contra faíscas, respingos de produtos químicos, detritos, poeira, radiação e etc [4]. É importante a utilização desse equipamento durante os experimentos a fim de evitar qualquer dano, além de preparar o profissional para o manejo correto e seguro de qualquer equipamento. Além disso, foi de extrema importância a presença do professor ou técnico na verificação da montagem do circuito antes de energizá-lo. Assim, reduziu-se riscos de curtos-circuitos ou sobrecarga na rede.

5 Cálculos, análise dos resultados e questões

- 1) Para os sistemas das Figuras 1 e 2, ao ser ligado, o que aconteceu com os wattímetros W_1 e W_2 quando a sequência de fases foi invertida? Algum deles marcou valor negativo? Explique. Encontre as potências usando as leituras.

Resposta. Quando a sequência de fases foi invertida, houve uma permuta entre as leituras dos wattímetros W_1 e W_2 , uma vez que o sistema é equilibrado, e, no caso deste experimento em especial, não foi marcado nenhum valor negativo. Daria negativo no caso ...

Para o cálculo das potências utilizando-se as leituras dos wattímetros tem-se a teoria descrita na seção 2.3. Assim, para a sequência , $P_{3\phi} = W_1 + W_2 = 5,00 + 50,00 = 55W$ e $Q_{3\phi} = \sqrt{3} (W_1 - W_2) = \sqrt{3} (50 - 5) = 77,94VAr$ e como a potência aparente é dada por $S = P + Qj$, tem-se $S = 55 + 77,94 \cdot j \Rightarrow S_{3\phi} = 95,392 \angle 54,79 [VA]$. O resultado visual teórico e experimental é visto na Figura 6.

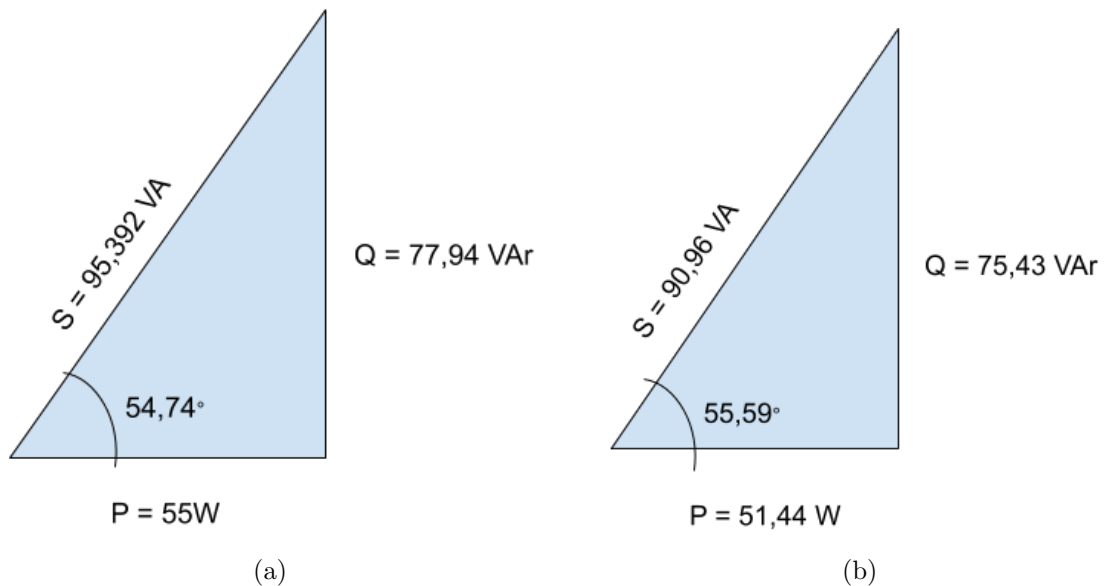


Figura 6: Comparação das potências obtidas para o caso estrela **abc** (a) teórico, (b) experimental.

- 2) Encontre o valor das leituras dos wattímetros usando as expressões analíticas.

Resposta.

- 3) Mostre através de um diagrama fasorial que de acordo com as polaridades das bobinas de corrente e de potencial a leitura do wattímetro analógico é positiva para um ângulo $|\theta_Z| < 60^\circ$. Mostre que a leitura será negativa se $|\theta_Z| > 60^\circ$.

Resposta.

- 4) Mostre através de um diagrama fasorial que se a polaridade de uma das bobinas

não for seguida a leitura terá um sinal oposto ao correto.

Resposta.

6 Simulação computacional

6.1 Carga em conexão estrela

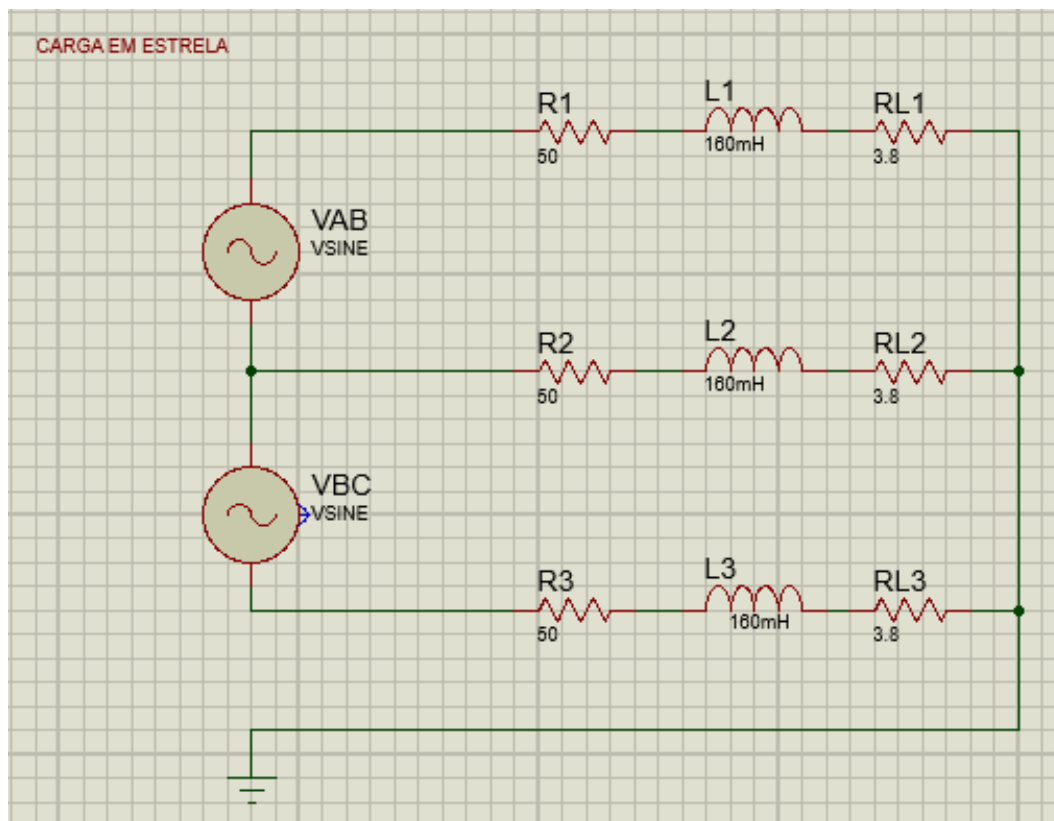


Figura 7: Circuito da carga em conexão estrela.

6.2 Carga em conexão delta

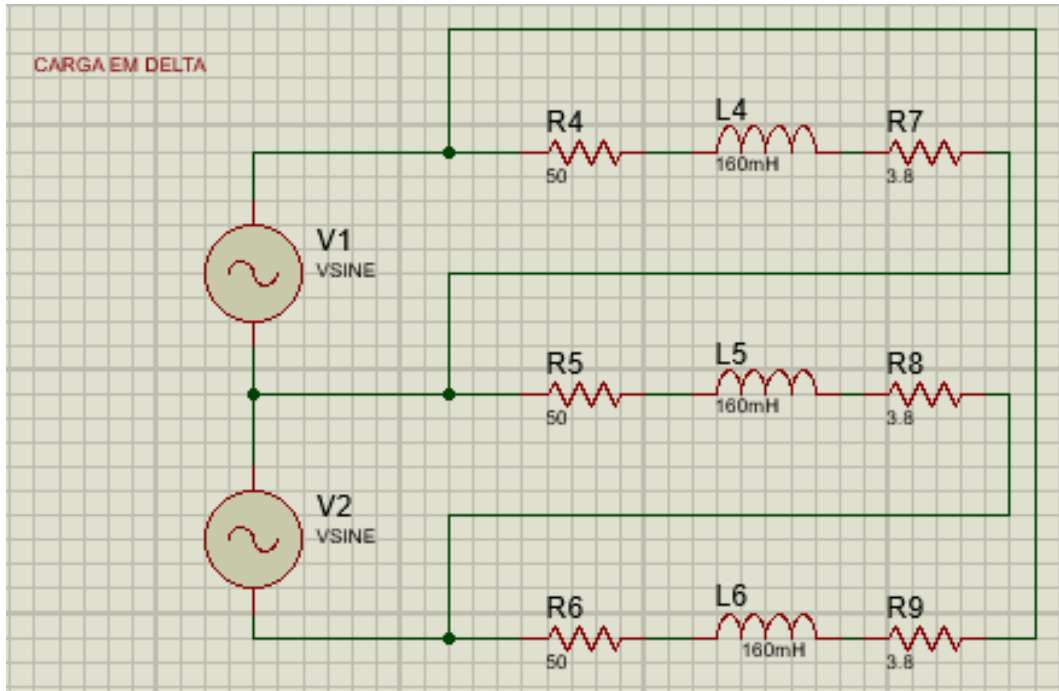


Figura 8: Circuito da carga em conexão delta.

7 Conclusões

Neste experimento investiga-se as acerca de circuitos trifásicos equilibrados e suas particularidades em configuração delta e estrela. A análise experimental permitiu confirmar relações teóricas como $V_L = V_F \cdot \sqrt{3}$ para uma carga em estrela e $I_L = \sqrt{3} \cdot I_F$ para uma carga em delta. Além de verificar que para ambas configurações as potências (real e reativa) são as mesmas, devido as às duas relações teóricas já mencionadas apresentarem certa simetria.

Outro ponto importante verificado neste experimento é a inexistência de corrente no neutro para um circuito equilibrado. Assim, não é correto conferir corrente de curto-circuito pela corrente no neutro, já que idelamente tem valor nulo. As principais causas para a existência de corrente no neutro são: circuito em desequilíbrio, ou seja, as cargas possuem distintos valores de impedância e a LKC indica que haverá corrente no neutro; mal contato numa das fases ou rompimento dos conectores, nesse caso aparece corrente no neutro que será a soma fasorial das correntes nas fases que restaram, logo de módulo I_F , pois estão defasadas de 120° .

Referências

- [1] P. H. O. Rezende, "Circuitos Polifásicos Equilibrados", 2018.
- [2] J. D. Irwin, "Análise de Circuitos Em Engenharia", Pearson, 4ª Ed., 2000.
- [3] R. L. Boylestad, "Introdução À Análise de Circuitos", Pearson, 10ª Ed., 2004.
- [4] SafetyTrabi, "Óculos de segurança: Saiba quando utilizar este EPI", SafetyTrab, 2019. Disponível em: <https://www.safetytrab.com.br/blog/oculos-de-seguranca/>. Acesso em: ago. 2019.