



Universidade Federal de Uberlândia
Faculdade de Engenharia Elétrica
FEELT

CIRCUITOS TRIFÁSICOS EQUILIBRADOS

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
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 delta	7
4	Análise sobre segurança	8
5	Cálculos, análise dos resultados e questões	8
6	Simulação computacional	12
6.1	Carga em conexão estrela	12
6.2	Carga em conexão delta	13
7	Conclusões	13

1 Objetivos

Verificar experimentalmente os conceitos teóricos sobre as relações existentes entre tensões de fases V_F e de linhas V_L em cargas ligadas em estrela, e correntes de fases I_F e de linhas I_L em cargas ligadas em triângulo. 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 graus 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).

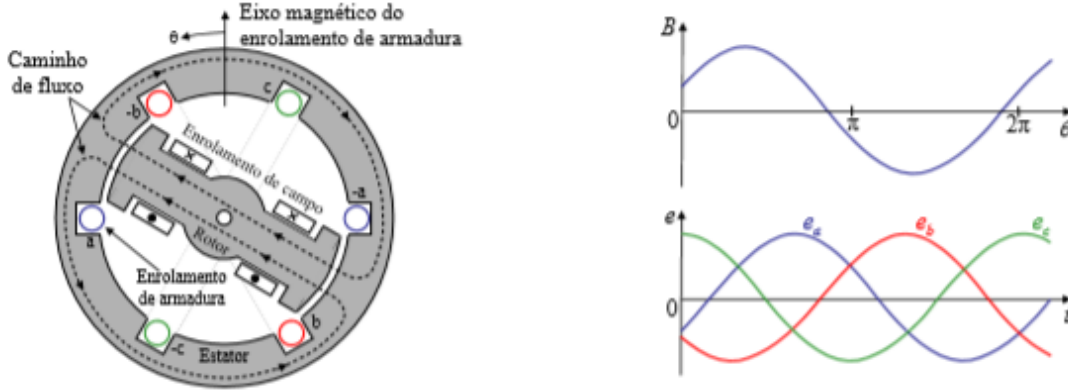


Figura 1: Geração de tensão alternada trifásica.

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].

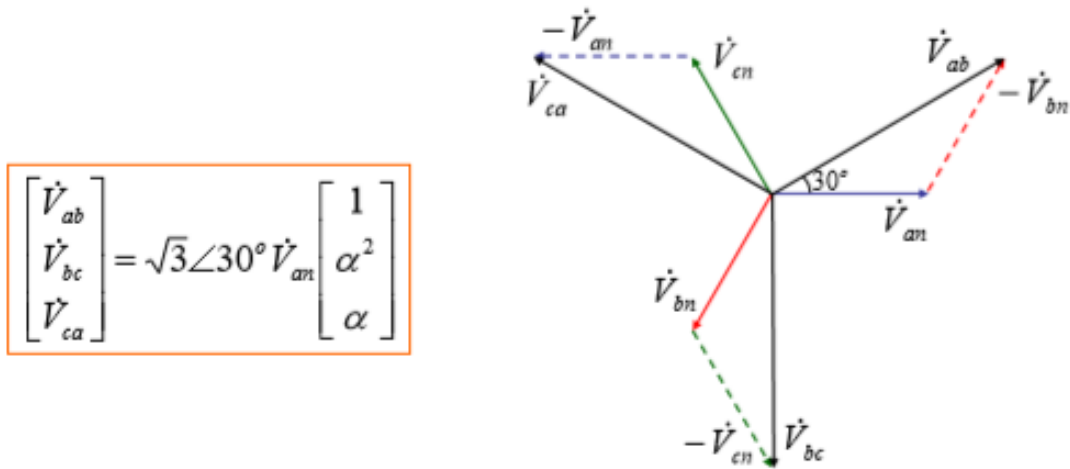


Figura 2: Relação entre tensão de linha e fase numa carga em estrela.

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.

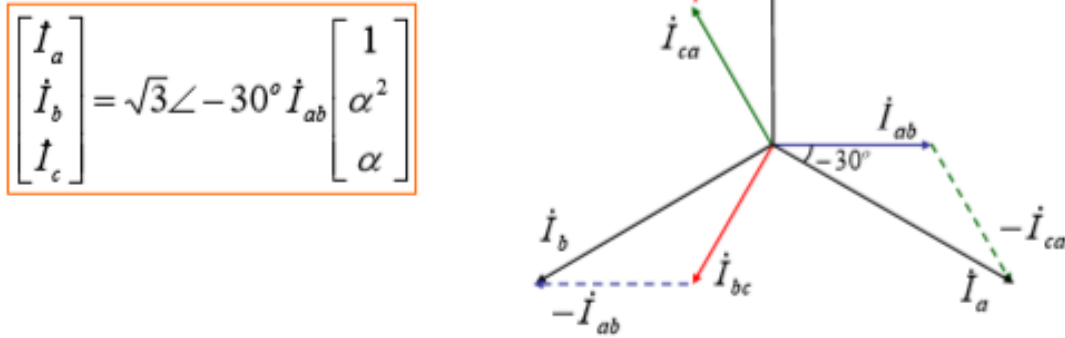


Figura 3: Relação entre corrente de linha e fase numa carga em delta.

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 (fp , $\cos\theta$) 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

Observe a montagem indicada na Figura 4 abaixo, alimentando os pontos a b e c n através de uma fonte alternada trifásica em seqüência de fases abc (ou direta), aplicando uma tensão entre linhas V_L igual a 100 V, em frequência de 60 Hz.

Os parâmetros da carga são: $R = 50\Omega$; $R_L = 3,8\Omega$; $L = 160mH$. Na Figura 4, V_L representa um voltímetro conectado para medir a tensão entre linhas (fases ab); V_F representa um voltímetro conectado para medir a tensão de fase (fases cn, por exemplo); A_L representa um amperímetro conectado para medir a corrente de linha (igual a de fase) e; A_N representa um amperímetro conectado para medir a corrente no fio neutro.

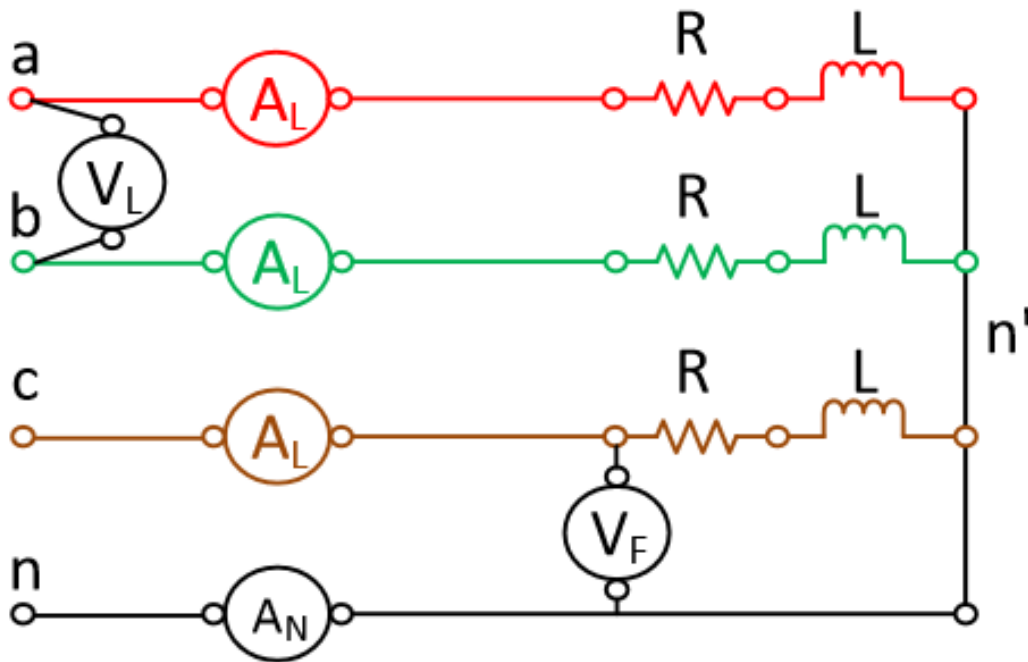


Figura 4: Ligação em estrela em seqüência de fases abc ($n = n'$).

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 AC entre n e n' .

Parâmetros do *Kron Mult-K*

$$TP = TC = 1.00$$

TL¹ = 0000 (Trifásico com Neutro “Estrela” – 3 Elementos 4 Fios)

Uma corrente por fase (3); Três tensões e o sinal de neutro (4)

Com o *Kron Mult-K* configurado com os parâmetros acima, foi possível obter as grandezas das Tabelas 1 e 2, sendo a primeira com neutro conectado e a segunda sem neutro conectado.

Tabela 1: Conexão em estrela com neutro conectado.

$V_L(V)$	$V_F(V)$	$I_L(A)$	$I_N(A)$	$P_F(W)$	$P_T(W)$	$Q_F(Var)$	$Q_T(Var)$	$S_F(VA)$	$S_T(VA)$
100,3	59,6	0,636	0	22,42	67,26	28,4	85,2	36,18	108,5
100,3	59,6	0,636		22,42		28,4		36,18	
100,3	59,6	0,636		22,42		28,4		36,18	

Tabela 2: Conexão em estrela sem neutro conectado.

$V_L(V)$	$V_F(V)$	$I_L(A)$	$I_N(A)$	$P_F(W)$	$P_T(W)$	$Q_F(Var)$	$Q_T(Var)$	$S_F(VA)$	$S_T(VA)$
100,4	57,9	0,627	-	22,64	67,92	28,29	84,87	36,23	108,7
100,4	57,9	0,627		22,64		28,29		36,23	
100,4	57,9	0,627		22,64		28,29		36,23	

Agora, conecte somente I_A , V_A e V_N do medidor eletrônico *Kron Mult-K*, e encontre os valores da Tabela 3 e 4 com a seguinte configuração:

$$TP = TC = 1.00$$

TL = 0003 (Trifásico Equilibrado – 1 Elemento 2 Fios)

Uma corrente de fase A (1); Sinal de tensão da fase A e neutro (2)

Limitações: somente aplicável para sistemas equilibrados.

Tabela 3: Conexão em estrela com neutro conectado (0003 - sistema equilibrado).

$V_L(V)$	$V_F(V)$	$I_L(A)$	$I_N(A)$	$P_F(W)$	$P_T(W)$	$Q_F(Var)$	$Q_T(Var)$	$S_F(VA)$	$S_T(VA)$
100,4	57,96	0,636	0	67,38	202,14	87,46	262,38	110,7	332,1
100,4	57,96	0,636		67,38		87,46		110,7	
100,4	57,96	0,636		67,38		87,46		110,7	

Tabela 4: Conexão em estrela sem neutro conectado (0003 - sistema equilibrado).

$V_L(V)$	$V_F(V)$	$I_L(A)$	$I_N(A)$	$P_F(W)$	$P_T(W)$	$Q_F(Var)$	$Q_T(Var)$	$S_F(VA)$	$S_T(VA)$
100,0	57,74	0,634	-	66,89	200,67	87,03	261,90	109,6	328,8
100,0	57,74	0,634		66,89		87,03		109,6	
100,0	57,74	0,634		66,89		87,03		109,6	

3.2.2 Carga em delta

Agora observe a montagem indicada na Figura 5 abaixo, com a mesma impedância anterior, só que agora com a carga conectada em triângulo. Na Figura 5, 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 um amperímetro conectado para medir a corrente de linha.

Observa-se também, como no caso anterior, é necessária a mudança dos medidores V_L para a obtenção dos demais valores de tensão de linha. Para isso, utilizaremos o medidor trifásico eletrônico *Kron Mult-K*, sendo as entradas V_A , V_B e V_C para as medidas de tensão e I_A , I_B e I_C para as medidas de corrente, realizando as ligações apropriadas. A corrente A_F será obtida usando o amperímetro analógico.

Parâmetros do *Kron Mult-K*

$TP = TC = 1.00$

$TL = 0048$ (Trifásico sem Neutro – 3 Elementos 3 Fios)

Uma corrente por fase (3); Três tensões (3)

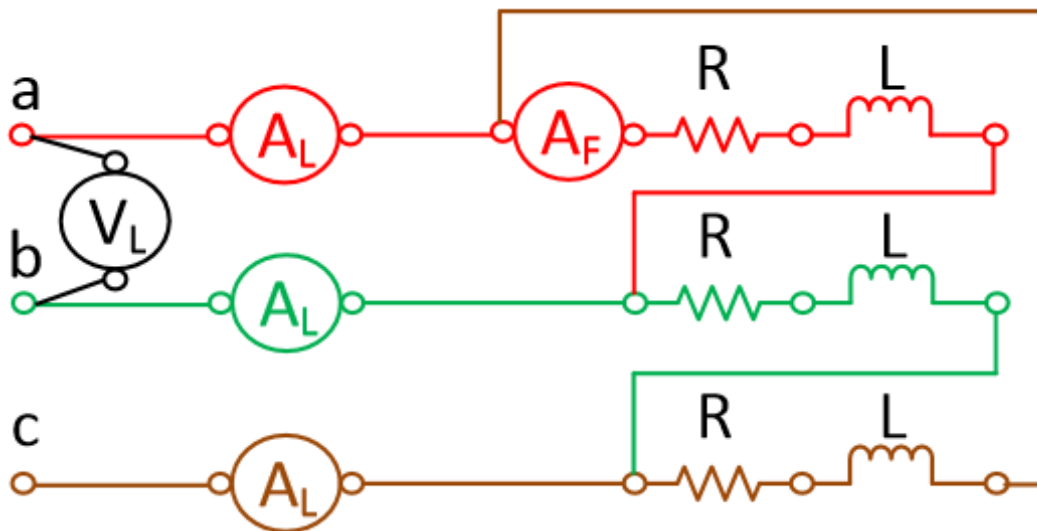


Figura 5: Ligação em triângulo em sequência de fases abc (convencional).

Os valores dos instrumentos devem ser anotados na Tabela 5.

Tabela 5: Conexão em delta ($TL = 0048$ - Trifásico sem neutro).

$V_L(V)$	$I_F(A)$	$I_L(A)$	$P_F(W)$	$P_T(W)$	$Q_F(Var)$	$Q_T(Var)$	$S_F(VA)$	$S_T(VA)$	Fator de potência
100,20	1,10	1,897	67,70	201,20	85,75	256,80	109,20	326,40	0,619
100,00		1,889	66,44		86,20		108,90		0,610
100,30		1,879	67,10		84,80		108,30		0,621

Agora, conecte somente I_A , I_C , V_A , V_B e V_C (desconecte I_B) do medidor eletrônico *Kron Mult-K*, e encontre os valores da Tabela 6 com a seguinte configuração:

$TP = TC = 1.00$

$TL = 0049$ (Trifásico sem Neutro – 2 Elementos 3 Fios)

Duas correntes de fase A e C (2); Sinal de tensão da três fases (3)

Limitações: somente aplicável para sistemas equilibrados.

Tabela 6: Conexão em delta ($TL = 0049$ - Trifásico sem neutro - equilibrado).

$V_L(V)$	$I_F(A)$	$I_L(A)$	$P_F(W)$	$P_T(W)$	$Q_F(Var)$	$Q_T(Var)$	$S_F(VA)$	$S_T(VA)$	Fator de potência
100,20	1,10	1,895	67,65	201,00	85,76	256,80	109,20	326,10	0,617
99,85		1,885	66,22		86,14		108,70		0,609
100,00		1,873	67,09		84,88		108,20		0,622

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) Verifique a relação entre as tensões de fase (VF) e de linha (VL) obtidas a partir da montagem da Figura 4

Resposta. Da primeira montagem tem-se $V_L = 100,3$ e $V_F = 59,06$, do que se confirma a relação $V_L = V_F \cdot \sqrt{3}$ da Figura 2.

- 2) Para o sistema equilibrado da Figura 4, a soma das correntes no ponto “n” deveria ser igual ou muito próximo a zero para as tensões senoidais aplicadas. Isto aconteceu? Explique.

Resposta. Na primeira montagem, o amperímetro analógico constatou-se que

a corrente que vai para o neutro $A_N \sim 0$. Confirma-se que a soma dos fasores de corrente deverá ser 0, uma vez que estão desafiados igualmente de 120° .

- 3) Se as correntes de linhas senoidais forem somadas fasorialmente, a soma será igual a corrente no neutro? Por quê?

Resposta. Será igual a do neutro, devido a Lei de Kirchhoff para os nós, a soma das correntes que saem do nó deve ser igual às que saem.

- 4) Quando o fio neutro foi interrompido, o que aconteceu com cada instrumento de medida? As medidas foram as mesmas do caso anterior?

Resposta. Foi necessário retirar o amperímetro analógico, que media a corrente no neutro, e as medidas obtidas para esse caso foram as mesmas do caso anterior, sendo afetadas somente por incertezas instrumentais. Essa similaridade ocorre, uma vez que idealmente a tensão é zero no neutro, e no caso de circuitos equilibrados a corrente também zera, assim é como se o circuito estivesse aberto, resultando em medidas idênticas.

- 5) Se, desconectando-se o fio neutro, um voltímetro fosse ligado entre os pontos n' e n , que valor de tensão marcaria?

Resposta. Marcaria zero, já que no neutro a tensão é zero, em ambos. Logo, a diferença de potencial marcaria 0 também.

- 6) A relação de tensão $V_L = \sqrt{3}V_F$ foi comprovada experimentalmente? Por quê?

Resposta. Com o neutro conectado foi possível comprovar a relação mencionada, pois o medidor *Kron* tinha referencial neutro do circuito para calcular a tensão de fase, e o erro experimental é mínimo, conforme a Tabela 7.

Tabela 7: Erro da tensão de fase experimental, com relação à teórica.

Dados experimentais		Dados teóricos	Erro (%)
$V_L(V)$	$V_F(V)$	$V_F(A)$	
100,30	57,6	57,91	-0,535
100,30	57,6	57,91	-0,535
100,30	57,6	57,91	-0,535

- 7) Verifique a relação entre as correntes de fase (I_F) e de linha (I_L) obtidas a partir da montagem da Figura 5. Foi igual a $I_L = \sqrt{3}I_F$?

Resposta. Comparando-se o resultado experimental com o teórico percebe-se que o erro é mínimo, conforme a Tabela 8.

Tabela 8: Erro da corrente de fase experimental, com relação à teórica.

Dados experimentais		Dados teóricos	Erro (%)
$I_L(V)$	$I_F(V)$	$I_F(A)$	
1,897	1,10	1,095	0,435
1,889		1,091	0,860
1,879		1,085	1,397

- 8) Observando as potências, real e reativa, trifásicas para a mesma impedância, na conexão em estrela e na conexão em triângulo o que pode concluir?

Resposta. Pode-se concluir que as cargas, conectadas em delta ou estrela possuem mesma potência quando se analisa um circuito equilibrado. O resultado deve-se ao fato de em ambas configurações a multiplicação $V_L \cdot I_L$ ser diretamente proporcional a um fator de $\sqrt{3}$.

- 9) Explique os motivos da pequena diferença apresentada entre as tensões de linha e de fase, mesmo sabendo que essas tensões são iguais entre si em circuitos elétricos equilibrados, alterando-se apenas o ângulo. Neste caso, a corrente no neutro é exatamente zero?

Resposta. No experimento constata-se que a corrente no neutro não é zero, mas próxima, o que provoca as pequenas variações nas medições de grandezas em fases distintas, porém num sistema equilibrado. Outro possível motivo pode ser qualquer pequena resistência oriunda dos conectores, o que provoca leve desequilíbrio no sistema.

- 10) Quando $TL = 0003$, explique por que basta a corrente da fase A e a tensão V_{AN} para que o medidor *Kron* encontre as demais medidas corretamente? Aponte uma vantagem técnica ao utilizar esse artifício.

Resposta. Na configuração $TL = 0003$, o medidor entende que o sistema do qual será retirada as informações, de tensão, corrente, potências e fator de potência, é um sistema trifásico equilibrado. Assim, é levado em consideração as características de um sistema estrela equilibrado, o qual possui corrente e tensão de linha idênticos para cada fase, podendo o circuito ser equivalente substituído por 3 circuitos monofásicos idênticos.

- 11) Ainda para $TL = 0003$, qual é a tensão informada pelo medidor: de fase ou de linha? Qual cuidado se deve ter em relação a esse experimento?

Resposta. A tensão informada é a de linha. Deve-se atentar que a configuração $TL = 0003$ é válida somente para sistemas equilibrados e não pode ser utilizada em outros experimentos nos quais não existe equilíbrio entre as cargas.

- 12) Ao aumentar gradativamente a tensão do varivolt, é importante checar se os

amperímetros não se alterem bruscamente devido a um provável curto-circuito. Um aluno observa A_N no primeiro experimento. Está incorreto? Por quê?

Resposta. Está incorreto, já que deve-se checar o amperímetro conectado à linha do sistema trifásico a fim de detecção de um possível curto-circuito. Esse aluno corre o risco do sistema entrar em curto-circuito ao observar A_N , pois a corrente por ele mostrada, pela LKC, tende sempre a ser 0 para sistemas equilibrados e informa dado relevante sobre uma possível corrente de curto.

- 13) Um aluno ao montar o primeiro experimento, à medida que altera o valor de tensão no varivolt, verifica que a corrente I_N está crescendo também. Está correto? Comente as principais causas.

Resposta. Não está correto, uma vez no neutro para um equilibrado não deve haver circulação de corrente, devido à Lei de Kirchhoff para as Correntes (LKC). 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° .

6 Simulação computacional

6.1 Carga em conexão estrela

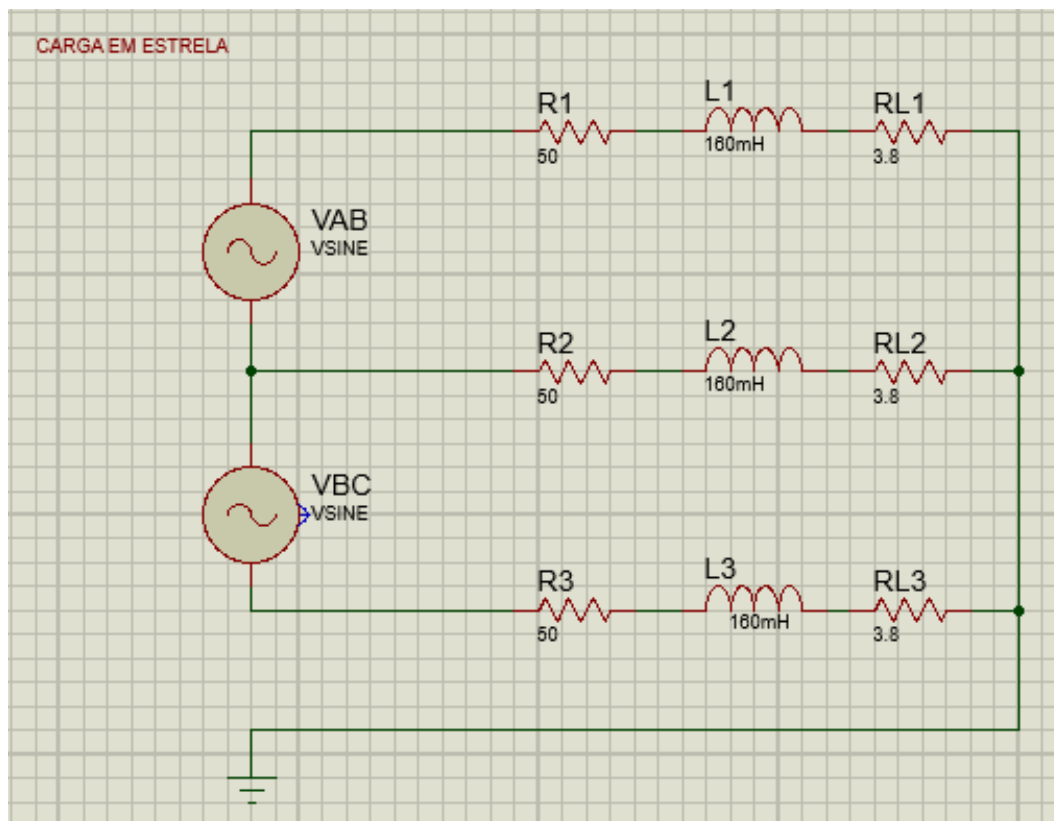


Figura 6: Circuito da carga em conexão estrela.

6.2 Carga em conexão delta

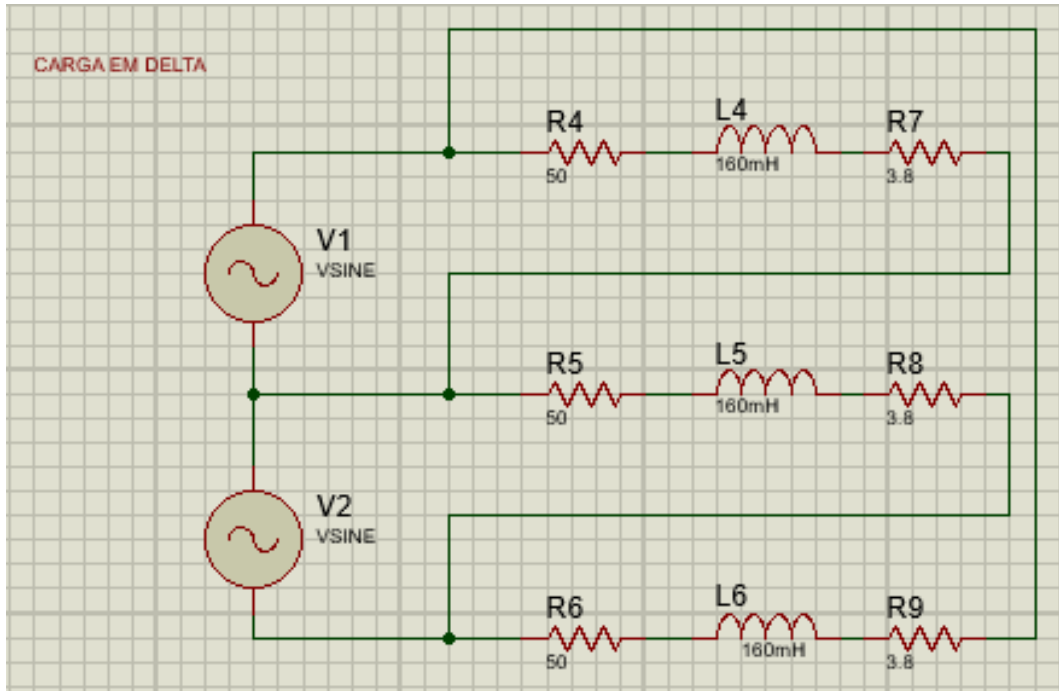


Figura 7: Circuito da carga em conexão delta.

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.

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.