



Universidade Federal de Uberlândia
Faculdade de Engenharia Elétrica
FEELT

VERIFICAÇÃO DA SEQUÊNCIA DE FASES DAS TENSÕES

Relatório da Disciplina de Experimental de Circuitos Elétricos II
por

Lesly Viviane Montúfar Berrios
11811ETE001

Prof. Wellington Maycon Santos Bernardes
Uberlândia, Dezembro / 2019

Sumário

1	Objetivos	2
2	Introdução teórica	2
3	Preparação	2
3.1	Materiais e ferramentas	2
3.2	Montagem	3
3.2.1	Carga em estrela com neutro conectado	3
3.2.2	Carga em estrela com neutro isolado	3
3.2.3	Carga em triângulo desequilibrado	4
4	Dados Experimentais	5
4.1	Carga em estrela com neutro conectado	5
4.2	Carga em estrela com neutro isolado	5
4.3	Carga em triângulo desequilibrado	6
5	Análise sobre segurança	6
6	Cálculos, análise dos resultados e questões	7
6.1	Análise teórica do circuito	7
6.1.1	Carga em estrela com neutro conectado	7
6.1.2	Carga em estrela com neutro isolado	8
6.1.3	Carga em triângulo desequilibrado	10
6.2	Reflexão	11
6.2.1	E na ausência de um voltímetro?	11
6.2.2	Mas porque encontrar a correta sequência de fase em um circuito elétrico?	11
7	Simulação computacional	12
8	Conclusões	13

1 Objetivos

Pretende-se verificar experimentalmente conceitos teóricos de como encontrar a correta sequência de fase diante da ausência de um sequencímetro (método do voltímetro).

2 Introdução teórica

O sequencímetro é um instrumento de medida elétrica analógica ou digital que tem por finalidade a verificação da sequência de fases de um motor trifásico (circuito alimentado por corrente alternada), ou seja, indica a fase aberta e o sentido de rotação do motor. Na Figura ??, é observado um fasímetro, que possui a mesma função, havendo poucas diferenças, entre elas, estão a tensão de entrada e a faixa de frequência. Sobre seu funcionamento diz-se que, a partir do momento em que o sequencímetro detecta a passagem por zero (pulso positivo de curta duração) de cada fase é aplicado em um circuito sequencial feito com flip-flop e indica a sequência da rede [3].

Circuitos desequilibrados podem ser utilizados para a verificação de sequência de fases em certo sistema elétrico, na ausência de um sequencímetro. Para isso

3 Preparação

3.1 Materiais e ferramentas

- 1 - **Fonte:** Alimentará todo o circuito. Possui frequência de 60 Hz .
- 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 - **Resistor de 50Ω** : Carga resistiva para compor a carga do circuito trifásico.

7 - **Capacitor de $45,9\mu F$** : Sendo sua resistência quase nula, portanto desprezível nessa aplicação (Esquenta pouco, logo dissipa menos energia).

3.2 Montagem

3.2.1 Carga em estrela com neutro conectado

A montagem utilizada observa-se na Figura 1, a qual ilustra o circuito na sequência de fases ABC. Pretende-se com este circuito investigar-se acerca do efeito do neutro em circuitos trifásicos desequilibrados. Usou-se TL=0000, TC=TP=1 como configurações no medidor *Kron*. Aplica-se uma tensão linha $V_L = 100V$ com o auxílio do *Varivolt*, em frequência de 60Hz. Ademais, a carga desequilibrada possui os seguintes parâmetro: $R = 50\Omega$, $R_L = 3,8\Omega$, $L = 166mH$ e $C = 45,9\mu F$.

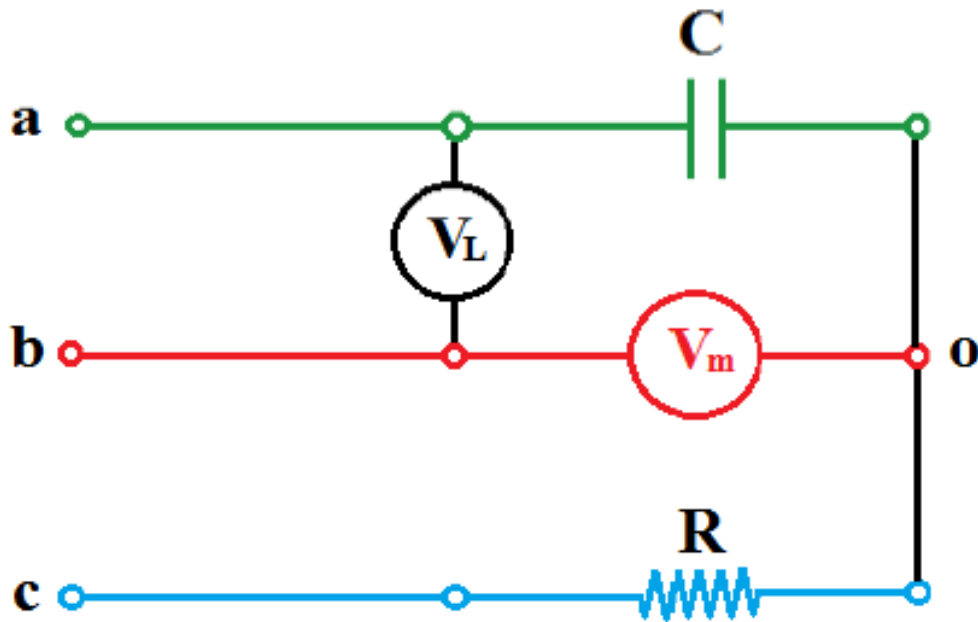


Figura 1: Circuito esquemático da montagem 1.

3.2.2 Carga em estrela com neutro isolado

Com os mesmos parâmetros de impedância e tensão de entrada, porém agora com neutro isolado, mantém-se a configuração do medidor *Kron*. Entretanto, nessa situação espera-se deslocamento da tensão no neutro, ou seja, $V_{n'n} \neq 0$.

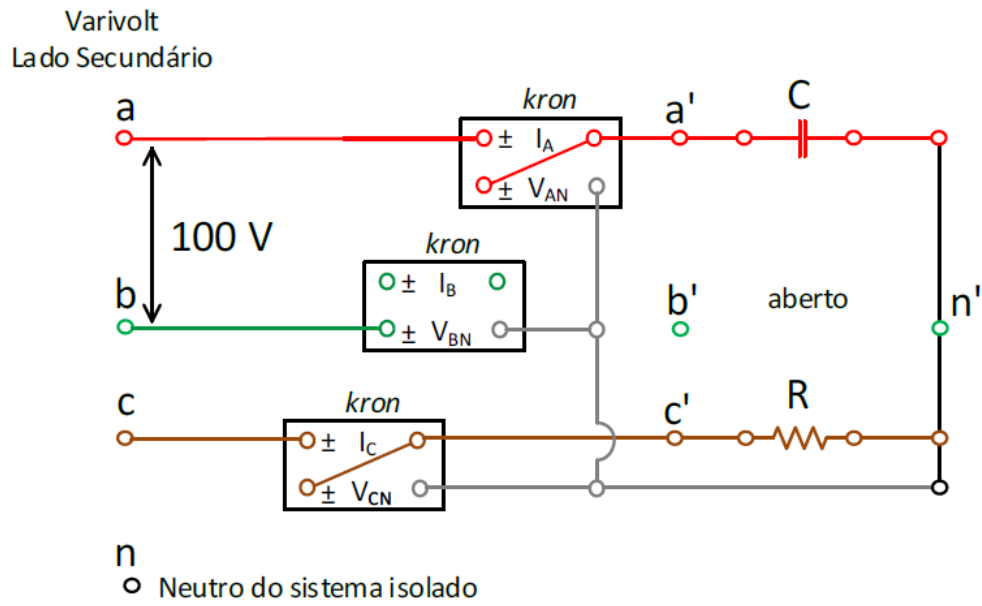


Figura 2: Circuito esquemático da montagem 2.

3.2.3 Carga em triângulo desequilibrado

Agora, na conexão em triângulo e sem neutro, a configuração TL é diferente (TL=0048, 3 ϕ sem Neutro). Nessa montagem, tem-se tensão de entrada $V_{AB} = 50V$, a fim de evitar-se correntes próximas ou superiores a 1,8A no medidor *Kron*.

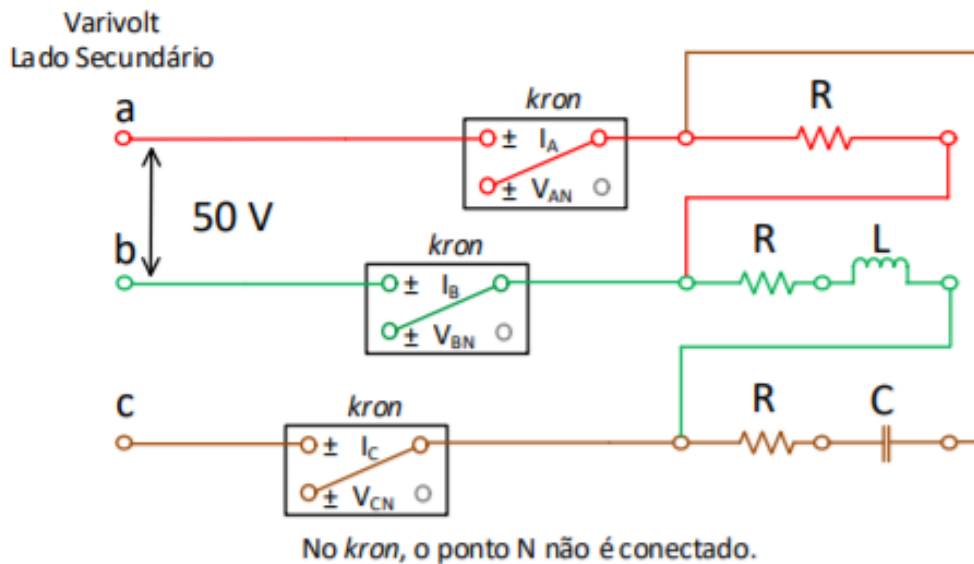


Figura 3: Circuito esquemático da montagem 3.

4 Dados Experimentais

4.1 Carga em estrela com neutro conectado

Dos dados da Tabela 1, ainda tem-se $P_T = 115,5\text{W}$, $Q_T = 61,42\text{VAr}$ e $S_T = 144,24\text{VA}$. Enquanto que para sequência de fases CBA (Tabela 2), $P_T = 118,16\text{W}$, $Q_T = 60,7\text{VAr}$ e $S_T = 155,79\text{VA}$.

Tabela 1: Dados experimentais da primeira montagem em sequência ABC.

	V_L (V)	V_F (V)	I_L (A)	P (W)	Q (VAr)	S (VA)	FP	A_N (A)	$V_{N'N}$ (V)
A	96,10	55,89	1,13	63,84	0,30	64,16	1	0,21	0
B	100,07	56,57	0,62	22,12	27,68	35,58	0,625		
C	99,69	58,82	0,76	29,54	33,44	44,50	0,659		

Tabela 2: Dados experimentais da primeira montagem em sequência CBA.

	V_L (V)	V_F (V)	I_L (A)	P (W)	Q (VAr)	S (VA)	FP	A_N (A)	$V_{N'N}$ (V)
A	100,50	57,60	1,096	63,25	0,24	63,51	1	1,6	0
B	99,25	57,45	0,641	23,94	27,85	36,76	0,652		
C	100,70	58,34	0,767	30,57	32,61	55,52	0,683		

4.2 Carga em estrela com neutro isolado

Dos dados da Tabela 3, ainda tem-se $P_T = 122,92\text{W}$, $Q_T = 55,16\text{VAr}$ e $S_T = 149,04\text{VA}$. Enquanto que para sequência de fases CBA (Tabela 4), $P_T = 125,598\text{W}$, $Q_T = 146,509\text{VAr}$ e $S_T = 193,813\text{VA}$.

Tabela 3: Dados experimentais da segunda montagem em sequência ABC.

	V_L (V)	V_F (V)	I_L (A)	P (W)	Q (VAr)	S (VA)	FP	$V_{N'N}$ (V)
A	96,01	62,03	1,24	77,34	0,30	77,60	1	0
B	100,6	54,74	0,59	20,24	25,60	32,78	0,621	
C	99,51	54,98	0,70	25,34	29,26	38,66	0,654	

Tabela 4: Dados experimentais da segunda montagem em sequência CBA.

	V_L (V)	V_F (V)	I_L (A)	P (W)	Q (VAr)	S (VA)	FP	$V_{N'N}$ (V)
A	100,4	14,18	0,210	3,968	0,069	3,963	1	42
B	97,79	81,92	1,002	57,21	72,29	91,69	0,690	
C	101,4	87,82	1,123	64,42	74,15	98,16	0,655	

4.3 Carga em triângulo desequilibrado

Dos dados da Tabela 5, ainda tem-se $P_T = 88,603\text{W}$, $Q_T = 37,569\text{VAr}$ e $S_T = 96,969\text{VA}$. Enquanto que para sequência de fases CBA (Tabela 6), $P_T = 94\text{W}$, $Q_T = 4,303\text{VAr}$ e $S_T = 91,19\text{VA}$.

Tabela 5: Dados experimentais da terceira montagem em sequência ABC.

	I_L (A)	P (W)	Q (VAr)	S (VA)	FP
A	5,63	42,38	17,26	45,82	0,925
B	1,472	39,40	17,75	43,84	0,911
C	0,266	6,823	2,559	7,309	0,934

Tabela 6: Dados experimentais da terceira montagem em sequência CBA.

	I_L (A)	P (W)	Q (VAr)	S (VA)	FP
A	1,018	29,56	3,584	29,81	0,993
B	0,963	28,35	0,628	28,35	1
C	1,21	36,09	0,091	33,03	1

5 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 [2]. 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.

6 Cálculos, análise dos resultados e questões

6.1 Análise teórica do circuito

Como o circuito é desequilibrado, a análise deve ser feita fase por fase. No entanto, há uma certeza: as tensões da fonte são equilibradas em módulo e ângulo. Assim, sabendo-se que $V_L = V_F \sqrt{3} \angle 30^\circ$, tem-se os seguintes dados:

$$\begin{bmatrix} E_{AB} \\ E_{BC} \\ E_{CA} \end{bmatrix} = 100V \begin{bmatrix} 1 \\ \alpha^2 \\ \alpha \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad \begin{bmatrix} E_{AN} \\ E_{BN} \\ E_{CN} \end{bmatrix} = 57,74V \angle -30^\circ \begin{bmatrix} 1 \\ \alpha^2 \\ \alpha \end{bmatrix}$$

6.1.1 Carga em estrela com neutro conectado

Primeiramente, é possível descrever as impedâncias como abaixo:

$$\begin{cases} Z_A = 50 \, [\Omega] \\ Z_B = 53,8 + j 62,58 \, [\Omega] \\ Z_C = 50 - j 57,79 \, [\Omega] \end{cases} \quad \text{e também} \quad \begin{cases} Y_A = 0,02 \, [S] \\ Y_B = 0,0122 \angle -49,31 \, [S] \\ Y_C = 0,0131 \angle 49,13 \, [S] \end{cases}$$

Como os neutros da fonte e da carga estão conectados, não há deslocamento de neutro, $V_{n'n} = 0$. Portanto, a tensão na carga é a mesma da fonte, como consequência da presença do neutro.

$$\begin{aligned} P_A &= \Re \{ I_A^* \cdot V_{AN} \} = I_A V_{AN} \cdot \cos \theta_A \\ Q_A &= \Im \{ I_A^* \cdot V_{AN} \} = I_A V_{AN} \cdot \sin \theta_A \\ S_A &= I_A^* \cdot V_{AN} \end{aligned}$$

Cálculo de corrente: $V = R \cdot I$

$$\begin{aligned} (57,74 \angle 0^\circ) &= Z_A \cdot I_A \Rightarrow I_A = 1,155 \angle 0^\circ [A] \\ (57,74 \angle -120^\circ) &= Z_B \cdot I_B \Rightarrow I_B = 0,6997 \angle -169,3^\circ [A] \\ (57,74 \angle 120^\circ) &= Z_C \cdot I_C \Rightarrow I_C = 0,756 \angle 169,1^\circ [A] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_N &= I_B + I_C \\ I_N &= 1,155 \angle 0^\circ + 0,6997 \angle -169,3^\circ + 0,756 \angle 169,1^\circ \\ I_N &= 0,275 \angle 177,3^\circ \end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,155 \angle 0^\circ \\ 0,6997 \angle -169,3^\circ \\ 0,756 \angle 169,1^\circ \end{bmatrix}$$

$$S_A = I_A \cdot V_{AN} = 1,155 \angle 0^\circ \cdot 57,74 \angle 0^\circ = 66,69 \angle 0^\circ [VA]$$

$$S_B = I_B \cdot V_{BN} = 0,6997 \angle -169,3^\circ \cdot 57,74 \angle 120^\circ = 40,4 \angle 70,7^\circ [VA]$$

$$S_C = I_C \cdot V_{CN} = 0,756 \angle 169,1^\circ \cdot 57,74 \angle 120^\circ = 43,65 \angle -70,9^\circ [VA]$$

$$\cos \theta_A = \cos 0^\circ = 1$$

$$\cos \theta_B = \cos 70,7^\circ = 0,331$$

$$\cos \theta_C = \cos (-70,9^\circ) = 0,327$$

A partir dos cálculos acima é possível montar uma tabela (Tabela 7) com os dados teóricos das grandezas de tensão e corrente no circuito. O cálculo é análogo para sequências de fases CBA, e os resultados são contemplados pela Tabela 8.

Tabela 7: Dados teóricos para a montagem 1, em sequência ABC.

	V_L (V)	V_F (V)	I_L (A)	P (W)	Q (VAr)	S (VA)	FP	A_N (A)	$V_{N'N}$ (V)
A	100,0	57,74	1,155	66,69	0	66,69	1	0,275	0
B	100,0	57,74	0,699	13,37	38,13	40,4	0,331		
C	100,0	57,74	0,756	14,27	41,25	43,65	0,327		

Tabela 8: Dados teóricos para a montagem 1, em sequência CBA.

	V_L (V)	V_F (V)	I_L (A)	P (W)	Q (VAr)	S (VA)	FP	A_N (A)	$V_{N'N}$ (V)
A	100,0	57,74	1,155	66,69	0	66,69	1	1,610	0
B	100,0	57,74	0,663	24,96	29,03	38,28	0,652		
C	100,0	57,74	0,716	27,04	31,26	41,34	0,654		

6.1.2 Carga em estrela com neutro isolado

Para esta montagem, como não há presença do fio neutro, haverá deslocamento de neutro, ou seja $V_{n'n} \neq 0$, como é mostrado nos cálculos abaixo.

$$V_{N'N} = \frac{E_{AN} \cdot Y_A + E_{BN} + Y_B + E_{CN} \cdot Y_C}{Y_A + Y_B + Y_C}$$

$$V_{N'N} = \frac{57,74 \angle 0^\circ \cdot 0,02 + 57,74 \angle -120^\circ \cdot 0,0122 \angle -49,31 + 57,74 \angle 120^\circ \cdot 0,0131 \angle 49,13^\circ}{0,02 + 0,0122 \angle -49,31^\circ + 0,0131 \angle 49,13^\circ}$$

$$V_{N'N} = 7,678 \angle 176,5^\circ$$

Assim, é possível realizar o cálculos das grandezas de tensão e corrente para seqüências de fase ABC. A Tabela 9 contempla os resultados teóricos obtidos.

Tabela 9: Dados teóricos para a montagem 2, em seqüência ABC.

	V_L (V)	V_F (V)	I_L (A)	P (W)	Q (VAr)	S (VA)	FP	$V_{N'N}$ (V)
A	100,0	65,41	1,308	85,56	0	85,56	1	7,678
B	100,0	54,75	0,668	23,84	27,73	36,57	0,652	
C	100,0	53,88	0,706	24,88	28,77	38,04	0,654	

Analogamente, faz-se os cálculo para seqüência de fases CBA, e obtém-se os resultados da Tabela 10.

$$V_{N'N} = \frac{E_{AN} \cdot Y_A + E_{BN} + Y_B + E_{CN} \cdot Y_C}{Y_A + Y_B + Y_C}$$

$$V_{N'N} = \frac{57,74 \angle 0^\circ \cdot 0,02 + 57,74 \angle 120^\circ \cdot 0,0122 \angle -49,31 + 57,74 \angle -120^\circ \cdot 0,0131 \angle 49,13^\circ}{0,02 + 0,0122 \angle -49,31^\circ + 0,0131 \angle 49,13^\circ}$$

$$V_{N'N} = 43,15 \angle -2,839^\circ$$

Tabela 10: Dados teóricos para a montagem 2, em seqüência CBA.

	V_L (V)	V_F (V)	I_L (A)	P (W)	Q (VAr)	S (VA)	FP	$V_{N'N}$ (V)
A	100,0	11,84	0,237	2,086	0	2,806	1	43,15
B	100,0	86,14	1,051	44,54	78,79	90,53	0,492	
C	100,0	83,76	1,097	38,13	83,61	91,88	0,415	

6.1.3 Carga em triângulo desequilibrado

Para carga em triângulo, tem-se as impedâncias e admitâncias descritas abaixo.

$$\begin{cases} Z_{AB} = 50 \text{ } [\Omega] \\ Z_{BC} = 53,8 + j 62,58 \text{ } [\Omega] \\ Z_{CA} = 50 - j 57,79 \text{ } [\Omega] \end{cases} \quad \text{e também} \quad \begin{cases} Y_{AB} = 0,02 \text{ } [S] \\ Y_{BC} = 0,0122 \angle -49,31 \text{ } [S] \\ Y_{CA} = 0,0131 \angle 49,13 \text{ } [S] \end{cases}$$

Ademais, com o intuito de manter as correntes de linha com módulos inferiores a 2A, a tensão de linha passa a ser de 50V. Logo tem-se:

$$\begin{bmatrix} E_{AB} \\ E_{BC} \\ E_{CA} \end{bmatrix} = 50V \begin{bmatrix} 1 \\ \alpha^2 \\ \alpha \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad \begin{bmatrix} E_{AN} \\ E_{BN} \\ E_{CN} \end{bmatrix} = 28,87V \angle -30^\circ \begin{bmatrix} 1 \\ \alpha^2 \\ \alpha \end{bmatrix}$$

Assim, é possível calcular e organizar os dados teóricos para as sequências ABC e CBA, respectivamente, nas Tabelas 11 e 12.

$$I_{AB} = \frac{V_{AB}}{Z_{AB}} = \frac{50 \angle 0^\circ}{50} = 1 \angle 0^\circ$$

$$I_{BC} = \frac{V_{BC}}{Z_{BC}} = \frac{50 \angle 120^\circ}{53,8 + j 62,58} = 0,929 \angle 57,4^\circ$$

$$I_{AC} = \frac{V_{CA}}{Z_{CA}} = \frac{50 \angle -120^\circ}{50 - j 57,79} = 0,654 \angle -70,87^\circ$$

$$I_A = I_{AB} - I_{CA} = 1 \angle 38,18^\circ$$

$$I_B = I_{BC} - I_{AB} = 0,928 \angle 122,5^\circ$$

$$I_C = I_{CA} - I_{BC} = 1,429 \angle -101,5^\circ$$

Tabela 11: Dados teóricos para a montagem 3, em sequência ABC.

	I_L (A)	P (W)	Q (VAr)	S (VA)	FP
A	1,647	39,28	-26,80	47,55	0,826
B	1,599	41,50	20,24	46,16	0,899
C	0,241	6,828	-1,352	6,96	0,981

Tabela 12: Dados teóricos para a montagem 3, em sequência CBA.

	I_L (A)	P (W)	Q (VAr)	S (VA)	FP
A	1	10,74	-26,80	28,87	0,372
B	0,928	22,58	-14,39	26,79	0,843
C	1,429	27,36	-30,9	41,26	0,663

6.2 Reflexão

6.2.1 E na ausência de um voltímetro? ...

6.2.2 Mas porque encontrar a correta sequência de fase em um circuito elétrico?

7 Simulação computacional

Para sequência de fases ABC tem-se:

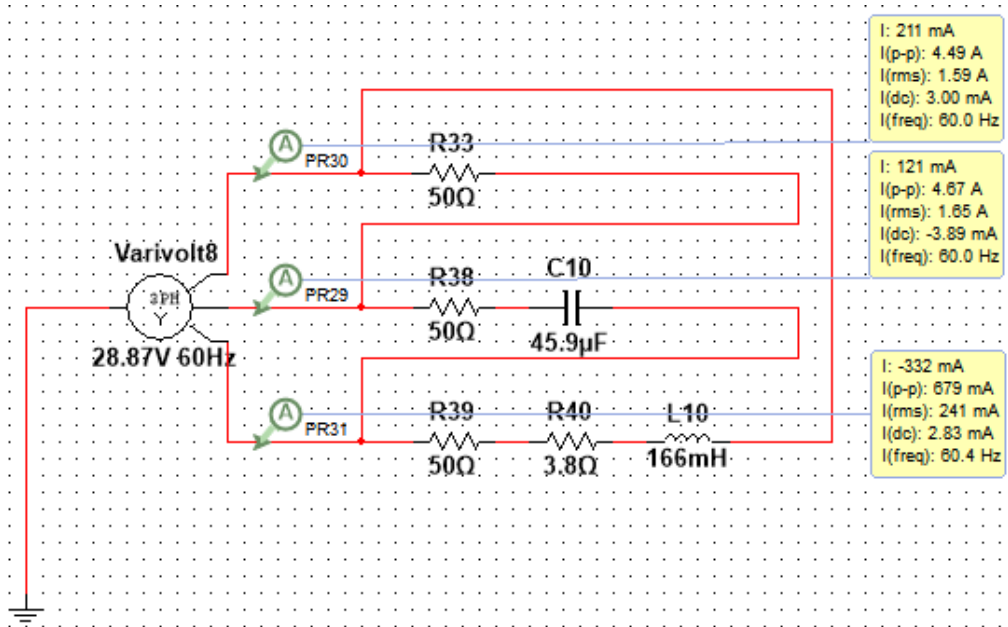


Figura 4: Correntes de linha da montagem 3 em sequência de fases ABC.

Para sequência de fases CBA tem-se:

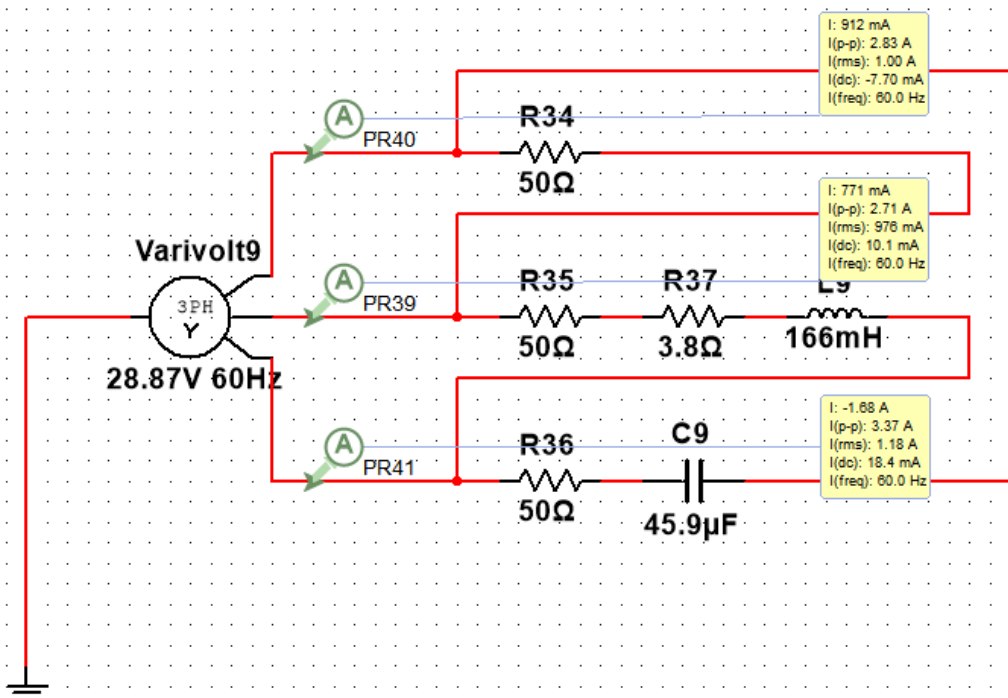


Figura 5: Correntes de linha da montagem 3 em sequência de fases CBA.

8 Conclusões

Referências

- [1] P. H. O. Rezende, "Circuitos Polifásicos Desequilibrados", 2018.
- [2] 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.
- [3] B. M. Nascimento, J. Carneiro, P. Viecilli, "Sequencímetro de Baixo Custo", Fundação Universidade Federal de Rondônia - UNIR. Disponível em: <https://brunomarquesunir.wixsite.com/sequencimetro>. Acesso em: dez. 2019.