



**Universidade Federal de Uberlândia**  
Faculdade de Engenharia Elétrica  
FEELT

## **CIRCUITOS TRIFÁSICOS DESEQUILIBRADOS**

Relatório da Disciplina de Experimental de Circuitos Elétricos II  
por

Lesly Viviane Montúfar Berrios  
11811ETE001

Prof. Wellington Maycon Santos Bernardes  
Uberlândia, Novembro / 2019

# Sumário

<b>1</b>	<b>Objetivos</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Introdução teórica</b>	<b>2</b>
2.1	Método dos 3 Wattímetros . . . . .	2
<b>3</b>	<b>Preparação</b>	<b>3</b>
3.1	Materiais e ferramentas . . . . .	3
3.2	Montagem . . . . .	4
3.2.1	Carga em estrela com neutro conectado . . . . .	4
3.2.2	Carga em estrela com neutro isolado . . . . .	5
3.2.3	Carga em triângulo desequilibrado . . . . .	5
<b>4</b>	<b>Dados Experimentais</b>	<b>6</b>
4.1	Carga em estrela com neutro conectado . . . . .	6
4.2	Carga em estrela com neutro isolado . . . . .	6
4.3	Carga em triângulo desequilibrado . . . . .	7
<b>5</b>	<b>Análise sobre segurança</b>	<b>7</b>
<b>6</b>	<b>Cálculos, análise dos resultados e questões</b>	<b>8</b>
6.1	Análise teórica do circuito . . . . .	8
6.1.1	Carga em estrela com neutro conectado . . . . .	8
6.1.2	Carga em estrela com neutro isolado . . . . .	8
6.1.3	Carga em triângulo desequilibrado . . . . .	8
6.2	Análise comparativa: experimento <i>vs.</i> teoria . . . . .	8
6.2.1	Sobre a presença do neutro no circuito desequilibrado . . . . .	8
6.2.2	Sobre a ausência do neutro no circuito desequilibrado . . . . .	9
6.2.3	Ilustrando as medidas experimentais na forma de fasores . . . . .	9
6.2.4	Sobre a configuração no medidor <i>Kron</i> . . . . .	9
<b>7</b>	<b>Simulação computacional</b>	<b>10</b>
7.1	Carga em estrela com neutro conectado . . . . .	10
7.2	Carga em estrela com neutro isolado . . . . .	10
7.3	Carga em triângulo desequilibrado . . . . .	10
<b>8</b>	<b>Conclusões</b>	<b>10</b>

# 1 Objetivos

Pretende-se investigar-se experimentalmente acerca do efeito da presença do fio neutro em circuitos trifásicos desequilibrados, ligados em estrela.

## 2 Introdução teórica

Um sistema trifásico equilibrado é o ideal para geração, transmissão e distribuição de energia elétrica em corrente alternada. O uso de tensões e correntes trifásicas igualmente defasadas permite uma transferência de potência de forma igualitária e evita sobrecargas na rede. Entretanto, o desequilíbrio em circuitos polifásicos é comum e podem ocorrer devido a presença de cargas trifásicas desequilibradas, distribuição de cargas monofásicas sem planejamento e pela variação nos ciclos de demanda de cada fase, como observa-se na Figura 1.

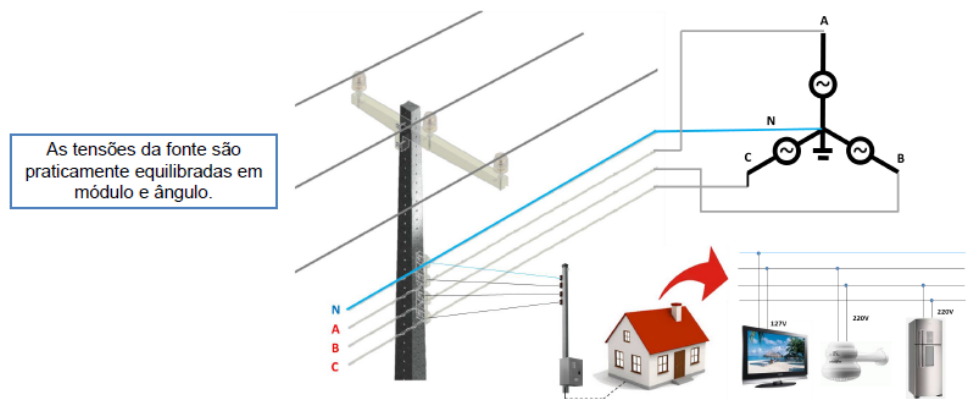


Figura 1: Distribuição desuniforme de cargas entre as fases [1].

Nesse contexto, é de interesse estudar circuitos elétricos desequilibrados, com o intuito de verificar os efeitos do deslocamento do neutro na rede elétrica.

### 2.1 Método dos 3 Wattímetros

O método dos 3 wattímetros, no qual é conectado um wattímetro por fase, é pouco comum, a menos que se deseje as potências de cada fase. É aplicável em circuitos onde o fator de potência varia continuamente como, por exemplo, no caso da obtenção das características de um motor síncrono, que graças a seu fator de potência elevado e variável são usados na correção de fator de potência e precisam de uma fonte de corrente contínua ou retificada para sua excitação, além de exigirem um complexo equipamento de controle.

Para circuitos elétricos a 4 Fios (Y com neutro) necessariamente, deve-se utilizar esse método, como no circuito da primeira montagem desse experimento (Figura 7). A medição de potência de cada wattímetro por fase referente a um ponto **P**, como mostrado na Figura 2. Ainda é possível provar a indepência da medição de cada wattímetro com o ponto **P**, que pode ligar-se a qualquer uma das fases caso não haja neutro (sistema a 3 fios). Assim, o wattímetro correspondente à fase ligada ao ponto **P** será desnecessário para a medição da potência trifásica pois medirá com  $V_L = 0V$ , recaindo se, portanto, no método dos dois wattímetros

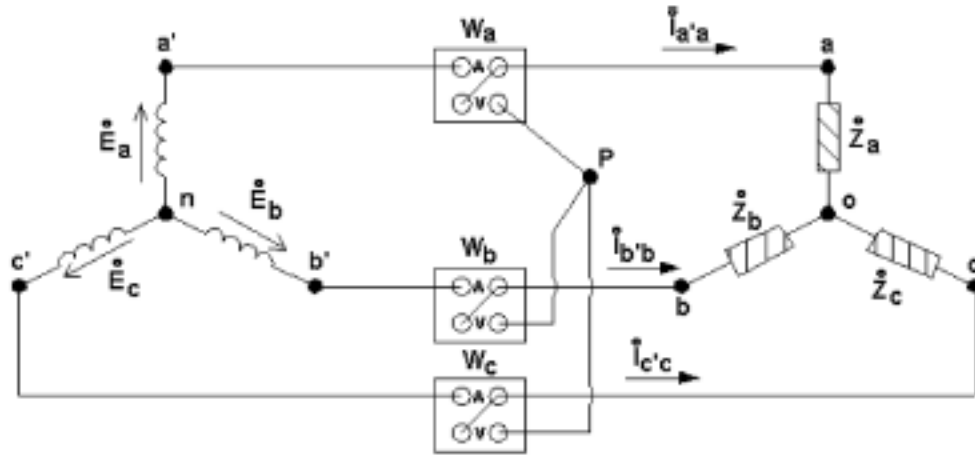


Figura 2: Ligação de wattímetros no sistema trifásico [1].

### 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 ( $\cos\theta$ ) ou o ângulo da impedância  $\theta$  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 200 mH:** Foram utilizados 3, para compor a carga do circuito trifásico. Sendo  $L = 200mH$  e  $R_L = 3,8\Omega$ .
- 7 - **Resistores de  $50\Omega$ :** Foram utilizados 3, para compor a carga do circuito trifásico.
- 8 - **Capacitores de  $45,9\mu F$ :** Foram utilizados 3, para compor a carga do circuito trifásico. Sendo  $C = 45,9\mu F$ . 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 7, 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  $C = 45,9\mu F$ .

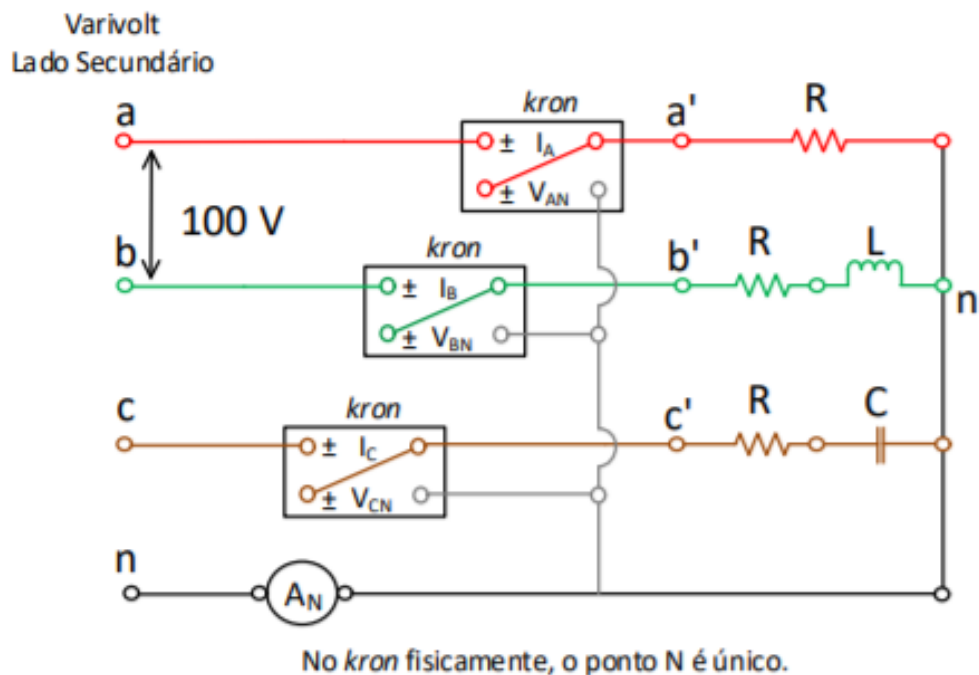


Figura 3: Circuito esquemático da montagem 1.

### 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,  $V_{n'n} \neq 0$ .

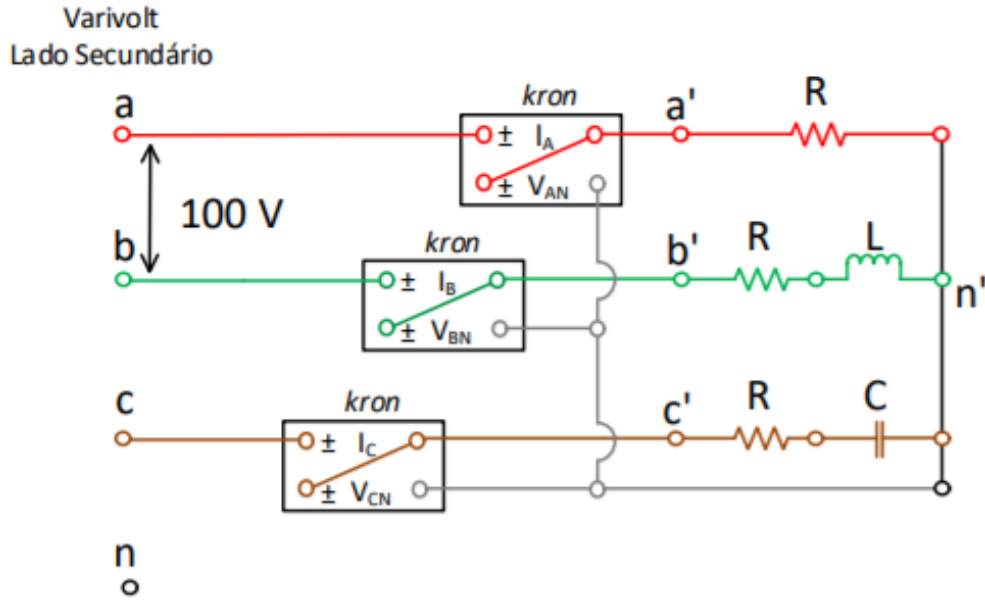


Figura 4: Circuito esquemático da montagem 2.

### 3.2.3 Carga em triângulo desequilibrado

Agora, na conexão em triângulo e sem neutro, a configuração TL é diferente (TL=0048, 3 $\phi$  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*.

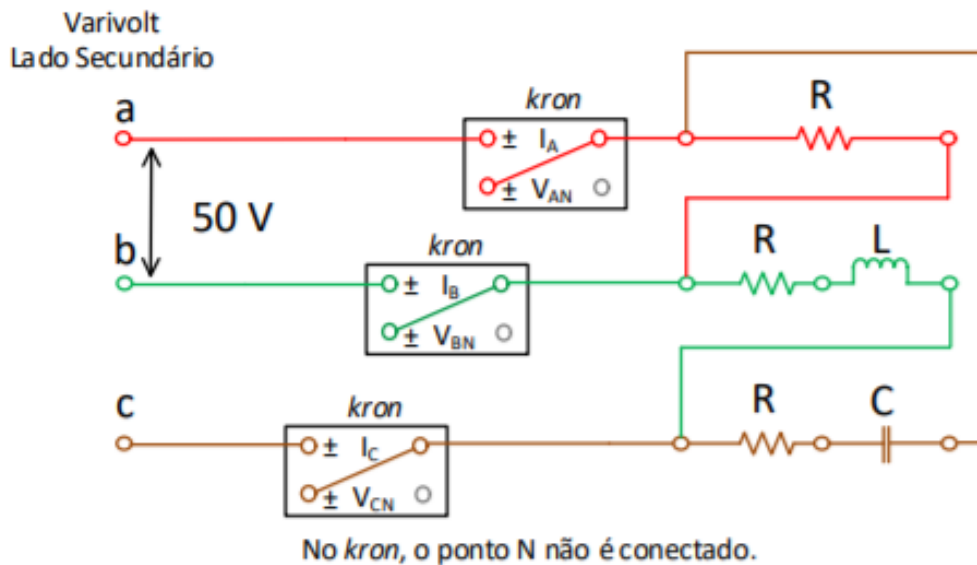


Figura 5: Circuito esquemático da montagem 3.

## 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	10,07	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)
C	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		
A	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)
C	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	
A	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
C	1,018	29,56	3,584	29,81	0,993
B	0,963	28,35	0,628	28,35	1
A	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 [3]. 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:

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

#### 6.1.1 Carga em estrela com neutro conectado

Primeiramente, é possível descrever as impedâncias como abaixo:

$$\begin{cases} Z_A = 50 \, [\Omega] \\ Z_B = 50 + j 75,40 \, [\Omega] \\ Z_C = 50 - j 57,79 \, [\Omega] \end{cases} \quad \text{e também} \quad \begin{cases} Y_A = 0,02 \, [S] \\ Y_B = 0,0108 \angle -54,49 \, [S] \\ Y_C = 0,0131 \angle 49,13 \, [S] \end{cases}$$

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.

#### 6.1.2 Carga em estrela com neutro isolado

#### 6.1.3 Carga em triângulo desequilibrado

### 6.2 Análise comparativa: experimento *vs.* teoria

#### 6.2.1 Sobre a presença do neutro no circuito desequilibrado

Como visto na análise teórica e experimental, a ligação do neutro da fonte com o da carga provocou  $V_{n'n} = 0$ , fazendo com que a tensão fornecida pela fonte seja completamente recaída sobre a carga. Entretanto, o fio neutro tbm funciona como fuga para a corrente resultante, sendo  $I_N = I_A + I_B + I_C$ , já que no circuito desequilibrado as correntes não se anulam.

### 6.2.2 Sobre a ausência do neutro no circuito desequilibrado

### 6.2.3 Ilustrando as medidas experimentais na forma de fasores

### 6.2.4 Sobre a configuração no medidor *Kron*

Na Figura 6

<b>TL 00</b>	<b>Trifásico Equilibrado ou Desequilibrado Estrela (3F + N)</b> 3 elementos 4 fios
<b>Aplicação:</b>	Medição de circuitos trifásicos estrela (3F + N). O uso de transformadores de corrente e potencial somente é necessário caso a corrente ou tensão do sistema exceda os limites especificados no capítulo <i>Características Técnicas</i> . É imprescindível que a sequência das fases esteja em sentido horário (R-S-T).

(a)

<b>TL 03</b>	<b>Trifásico Equilibrado (3F + N)</b> 1 elemento 2 fios
<b>Aplicação:</b>	Medição de circuitos trifásicos estrela (3F + N) em que ocorre equilíbrio de tensões e correntes (por exemplo: um motor, pelo fato da impedância de seus enrolamentos ser praticamente igual, é uma carga equilibrada). Desta forma, bastará o medidor receber os sinais de uma tensão e uma corrente para proceder ao cálculo das grandezas trifásicas. O uso de transformadores de corrente e potencial somente é necessário caso a corrente ou tensão do sistema exceda os limites especificados no capítulo <i>Características Técnicas</i> .

(b)

<b>TL 48</b>	<b>Trifásico Desequilibrado Delta (3F) – 3 elementos</b> 3 elementos 3 fios – 2TPs
<b>Aplicação:</b>	Medição de circuitos trifásicos delta (3F), com uso de 3 (três) transformadores de corrente (elementos) e 2 (dois) transformadores de potencial. O uso de transformadores de corrente e potencial somente é necessário caso a corrente ou tensão do sistema exceda os limites especificados no capítulo <i>Características Técnicas</i> . É imprescindível que a sequência das fases esteja em sentido horário (R-S-T).

(c)

<b>TL 49</b>	<b>Trifásico Equilibrado Delta (3F) – 2 elementos</b> 2 elementos 3 fios – 2TPs
<b>Aplicação:</b>	Medição de circuitos trifásicos delta (3F), com uso de 2 (dois) transformadores de corrente (elementos) e 2 (dois) transformadores de potencial. O uso de transformadores de corrente e potencial somente é necessário caso a corrente ou tensão do sistema exceda os limites especificados no capítulo <i>Características Técnicas</i> . É imprescindível que a sequência das fases esteja em sentido horário (R-S-T).

(d)

Figura 6: Informação do manual do usuário do medidor *Kron* para as configurações de Tipo de Ligação (a) TL00, (b) TL03, (c) TL48 e (d) TL49 [2].

## 7 Simulação computacional

### 7.1 Carga em estrela com neutro conectado

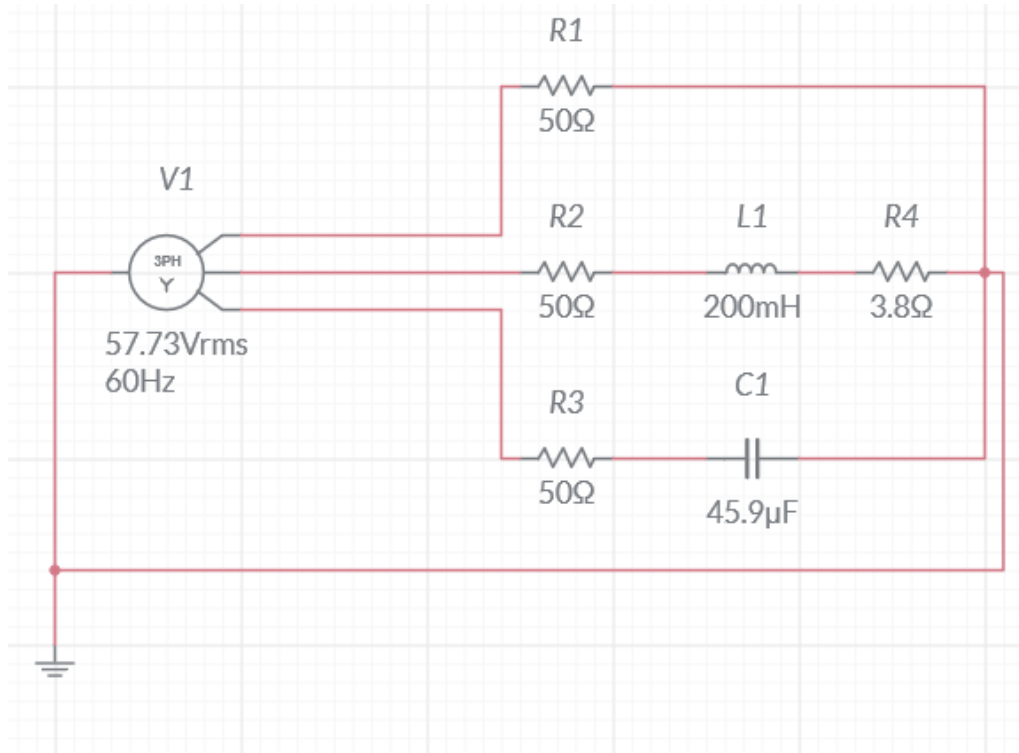


Figura 7: Circuito esquemático da montagem 1.

### 7.2 Carga em estrela com neutro isolado

### 7.3 Carga em triângulo desequilibrado

## 8 Conclusões

## Referências

- [1] P. H. O. Rezende, "Circuitos Polifásicos Desequilibrados", 2018.
- [2] KRON Instrumentos Elétricos, "Mult-K 05 e Mult-K 120: Medidores de Energia e Transdutores Digitais de Grandezas Elétricas", Kron Medidores., 2018.
- [3] 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.