



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

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Objetivos | 2 |
| 2 | Introdução teórica | 2 |
| 2.1 | Método dos 3 Wattímetros | 2 |
| 3 | Preparação | 3 |
| 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 |
| 4 | Dados Experimentais | 6 |
| 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 |
| 5 | Análise sobre segurança | 7 |
| 6 | Cálculos, análise dos resultados e questões | 8 |
| 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 |
| 7 | Simulação computacional | 11 |
| 7.1 | Carga em estrela com neutro conectado | 11 |
| 7.2 | Carga em estrela com neutro isolado | 11 |
| 7.3 | Carga em triângulo desequilibrado | 11 |
| 8 | Conclusões | 11 |

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.

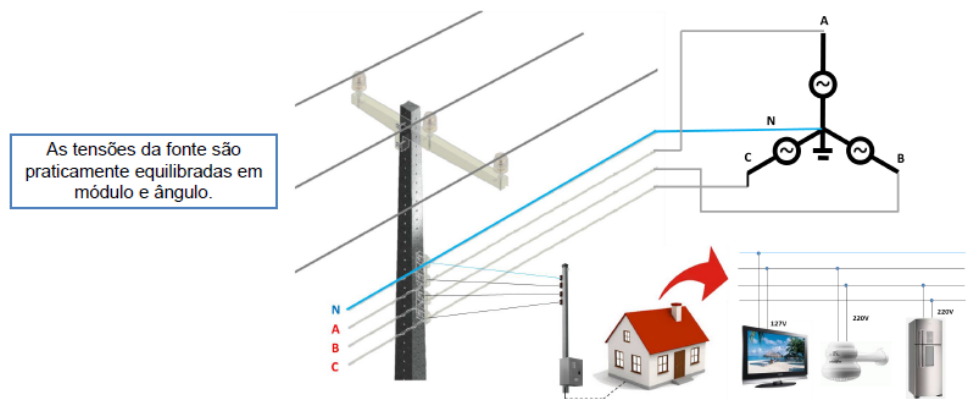


Figura 1: Distribuição desuniforme de cargas entre as fases [1].

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

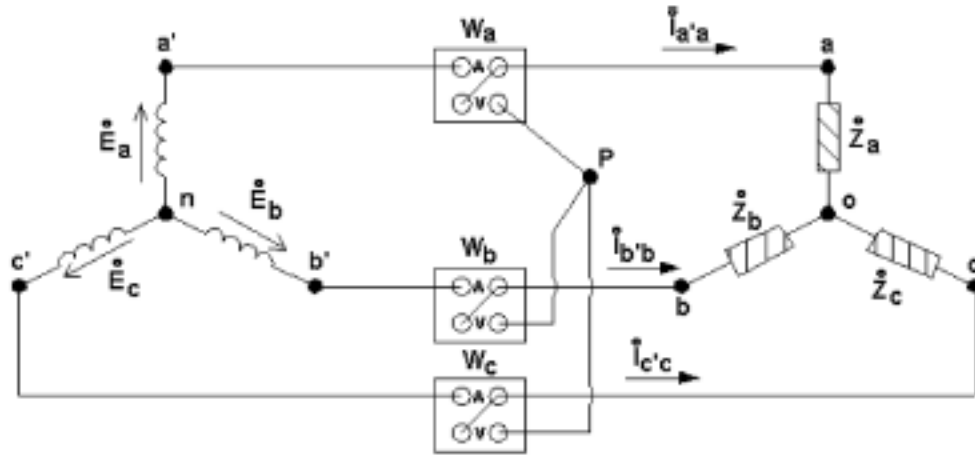


Figura 2: Ligação de wattímetros no sistema trifásico [1].

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 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 200 mH:** Foram utilizados 3, para compor a carga do circuito trifásico. Sendo $L = 200mH$ e $R_L = 3,8\Omega$.
- 7 - **Resistores de 50Ω :** 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 $C = 45,9\mu F$.

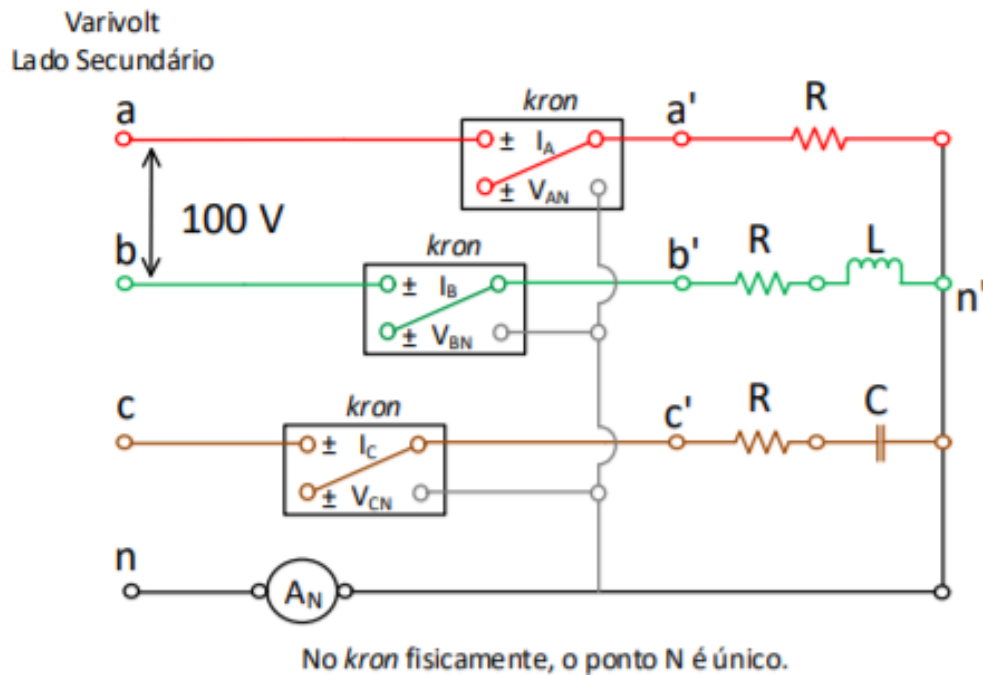


Figura 3: Circuito esquemático da montagem 1.

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

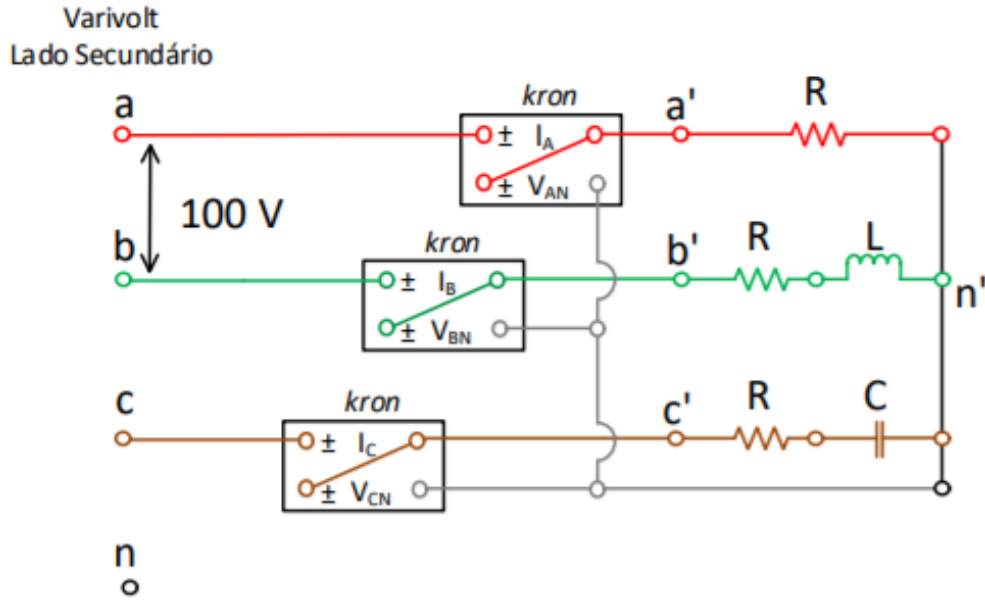


Figura 4: Circuito esquemático da montagem 2.

3.2.3 Carga em triângulo desequilibrado

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

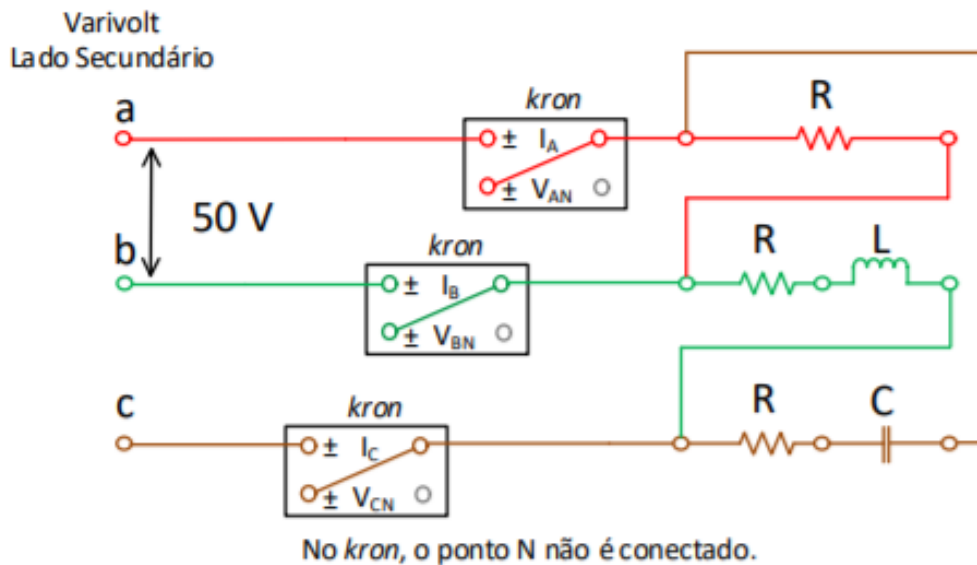


Figura 5: Circuito esquemático da montagem 3.

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 | 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) |
|---|-----------|-----------|-----------|-------|---------|--------|-------|-----------|---------------|
| C | 100,70 | 58,34 | 0,767 | 30,57 | 32,61 | 55,52 | 0,683 | 1,6 | 0 |
| B | 99,25 | 57,45 | 0,641 | 23,94 | 27,85 | 36,76 | 0,652 | | |
| A | 100,50 | 57,60 | 1,096 | 63,25 | 0,24 | 63,51 | 1 | | |

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 tem-se a aplicação apropriada para cada configuração TL, logo se a configuração TL=0003 tivesse sido usada na montagem 1, ou seja, em um circuito desequilibrado, não se obteria os valores de interesse, já que o medidor *Kron* assume que a carga seja trifásica e procede os cálculos das grandezas trifásicas, por meio de somente os sinais de tensão e uma corrente. Assim, a impedância de uma fase qualquer é facilmente calculada pela Lei de Ohm, a qual o *Kron* considerará erroneamente como a mesma impedância para as outras duas fases.

Com relação a segunda configuração (TL=0049), para as outras duas montagens, também não é possível, já que nessa configuração assume-se cargas equilibradas, assim o *Kron* fará o cálculo da terceira a partir da aritmética das outras duas obtidas medainte, o que é erróneo, pois dado que as cargas são desenquiliadas, as corrente também deveriam ser, à tensão de linha equilibrada.

| | |
|-------------------|--|
| TL 00 | Trifásico Equilibrado ou Desequilibrado Estrela (3F + N) 3 elementos 4 fios |
| Aplicação: | 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)

| | |
|-------------------|--|
| TL 03 | Trifásico Equilibrado (3F + N) 1 elemento 2 fios |
| Aplicação: | 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)

| | |
|-------------------|---|
| TL 48 | Trifásico Desequilibrado Delta (3F) – 3 elementos 3 elementos 3 fios – 2TPs |
| Aplicação: | 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)

| | |
|-------------------|---|
| TL 49 | Trifásico Equilibrado Delta (3F) – 2 elementos 2 elementos 3 fios – 2TPs |
| Aplicação: | 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

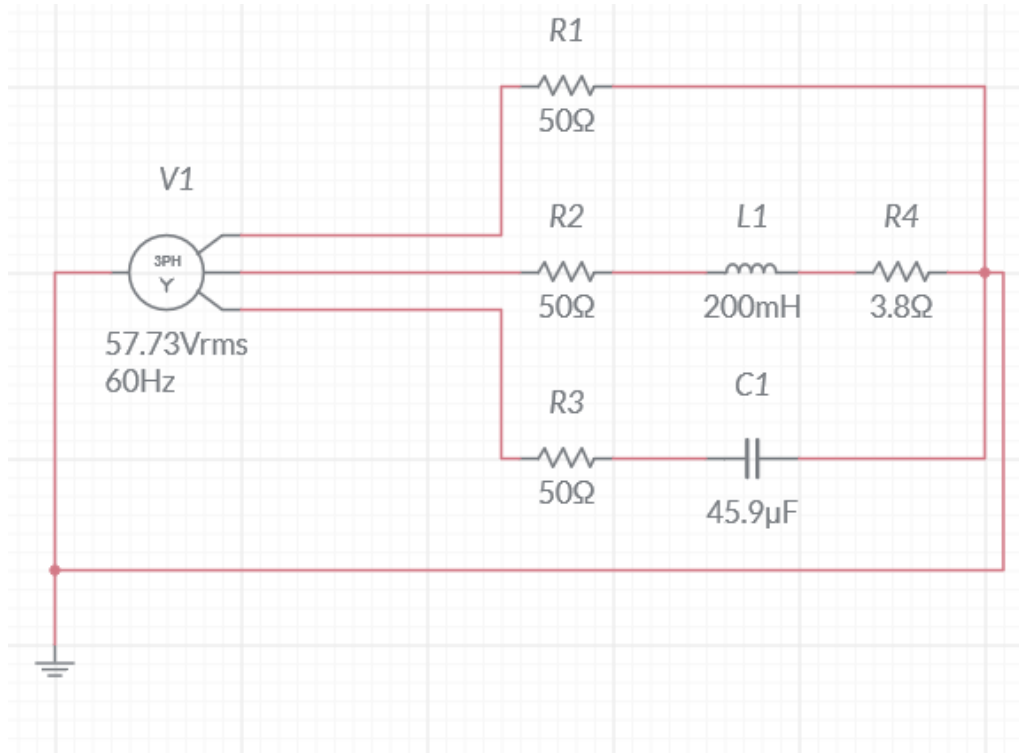


Figura 7: Circuito esquemático da montagem 1.

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.