

| | | |
|---|---|------------------|
|  | Universidade Federal Rural de Pernambuco Unidade Acadêmica de Belo Jardim Engenharia de Controle e Automação | |
| | Relatório da Simulação 1 – Circuitos Trifásicos | |
| Disciplina: | Circuitos Elétricos 2 | |
| Professor: | Henrique Patriota | |
| Alunos: | Pedro Henrique de Almeida Santos | |
| Bancada: | Simulação | Data: 12/12/2024 |

1. Introdução

No dia 12 de dezembro de 2024 foi realizada a 1ª Prática simulada da disciplina de Circuitos 2, instruída pelo professor Henrique Patriota. Essa atividade consistiu em montar um circuito trifásico em diferentes formatos como Estrela-Delta, Estrela-Estrela, Delta-Estrela e Delta-Delta, para compreender com funciona relação de tensão e corrente em cada um dos sistemas mencionados.

Sobre a prática, foi realizada a análise do comportamento das formas de onda de corrente e tensão sobre os circuitos descritos no guia da atividade. Para isso, foi utilizado o simulador *LTspice* para a montagem dos circuitos e também para a análise comportamental da ondas de tensão e corrente em cada caso afim de verificar a teoria apresentada na sala de aula.

2. Objetivos

2.1. Objetivo Geral

Apresentar aos alunos o uso do simulador *LTspice* e verificar o comportamento dos circuitos trifásicos com diferentes configurações.

2.2. Objetivos Específicos

2.2.1. Verificar o comportamento da tensão e corrente nas configurações com estrela.

2.2.2. Verificar o comportamento da tensão e corrente nas configurações com delta.

3. Metodologia

A metodologia utilizada para realização da prática contou com um guia disponibilizado pelo professor Henrique Patriota com os conceitos sobre circuitos trifásicos e suas aplicações, além disso no início da prática houve um breve momento sobre como montar o circuito trifásico na protoboard com o auxílio de um gerador de função e osciloscópio.

Nesse guia está apresentado 4 circuitos conforme as Figura 1,2,3 e 4 utilizado como base para montagem e simulação no *LTspice*.

Figura 1 - Circuito trifásico Estrela-Estrela

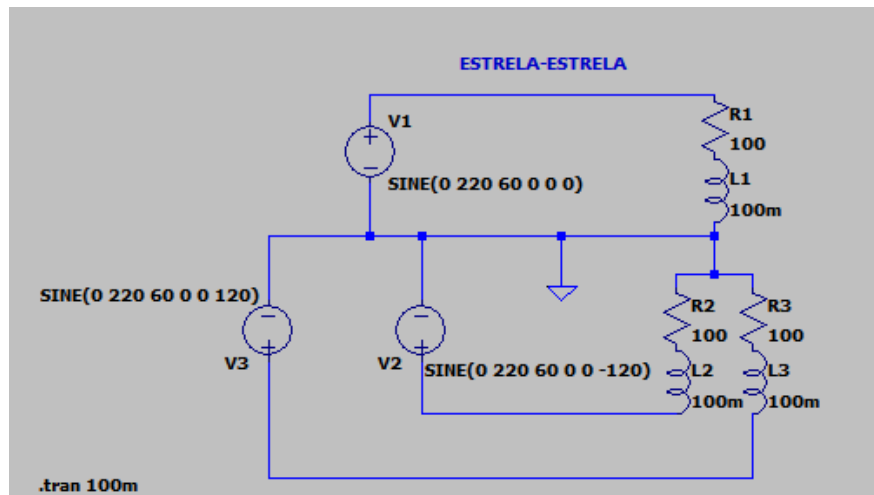


Figura 2 - Circuito trifásico Estrela-Delta

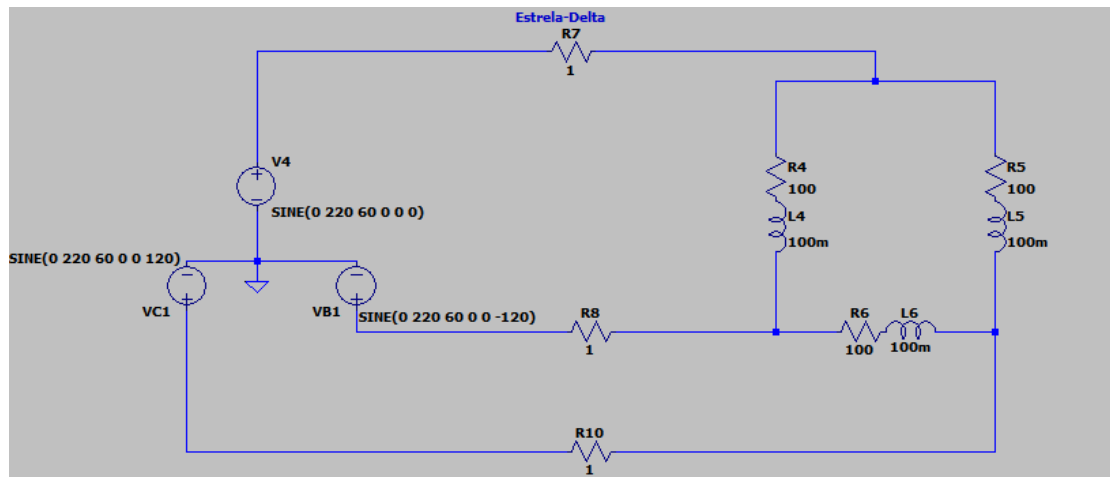


Figura 3 - Circuito trifásico Delta-Estrela

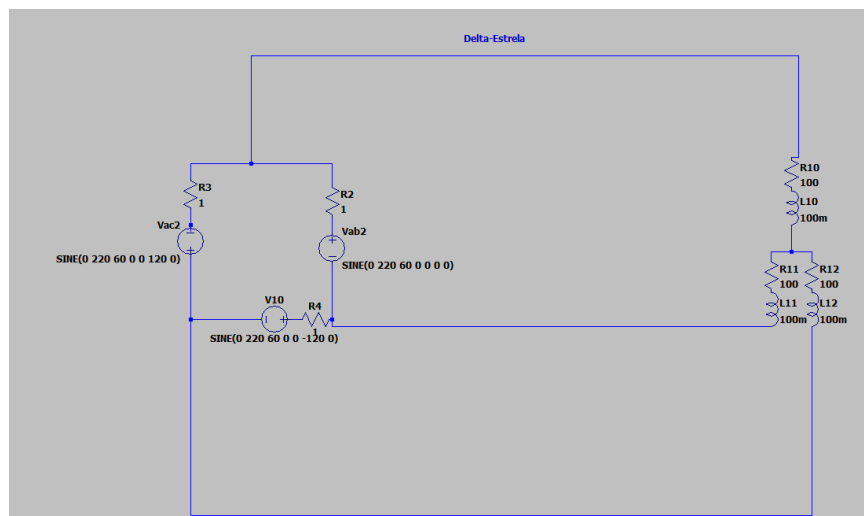
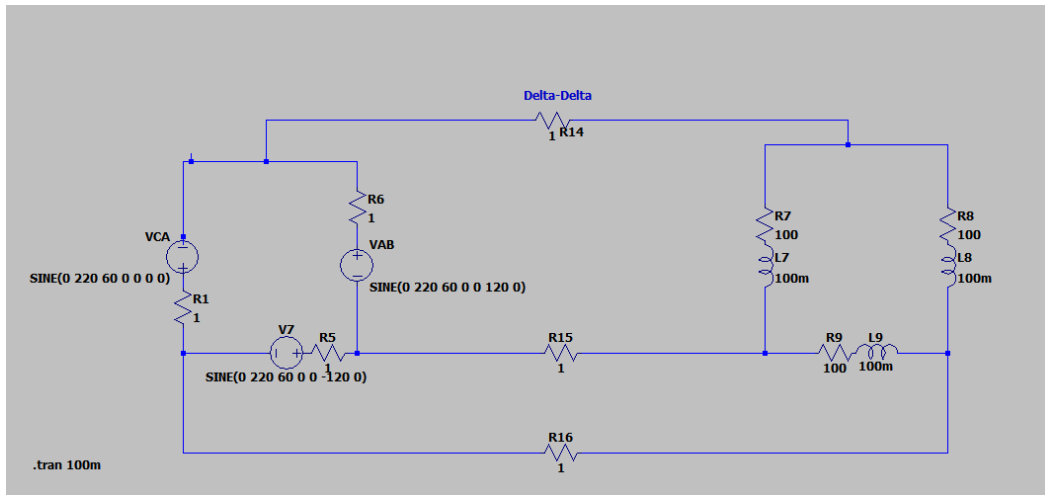


Figura 4 - Circuito trifásico Delta-Delta



A partir dessas 4 configurações é possível compreender o funcionamento e a importância de circuitos trifásicos para a engenharia. Vale lembrar que para circuitos trifásicos as fontes de tensão estão com o mesmo valor de amplitude, porém estão com fases diferentes respectivamente para cada fonte as fases são 0° , 120° , -120° .

3.1. Cálculos teóricos sobre circuitos trifásicos

3.1.1. Estrela-Estrela

Um dos resultados para a configuração Estrela-Estrela é que a tensão em cada linha V_L é $\sqrt{3}$ vezes a magnitude das tensões das fases V_p , ou seja:

$$X_L = 2 * \pi * j * 100 * 10^{-3} * 60$$

$$X_L = 37,7j$$

$$Z_y = Z_\Delta = 100 + 37,7j$$

$$V_L = \sqrt{3} * V_p$$

$$V_p = |V_{an}| = |V_{bn}| = |V_{cn}|$$

$$V_L = |V_{ab}| = |V_{bc}| = |V_{ca}|$$

$$V_{ab} = 381,05 \angle 0^\circ$$

$$V_{bc} = 381,05 \angle -120^\circ$$

$$V_{ca} = 381,05 \angle 120^\circ$$

Outro resultado importante é que nessa configuração as tensões de linha são adiantadas 30° . Ademais, para as correntes de linha nesse circuito trifásico obter-se os seguintes resultados:

$$Z_y I_a - V_{an} = 0$$

$$I_a = \frac{V_{an}}{Z_y}$$

$$I_a = \frac{220 \angle 0}{100 + 37,7j}$$

$$I_a = 2,06 \angle -20,65 \text{ A}$$

$$Z_y I_b - V_{bn} = 0$$

$$I_b = \frac{V_{bn}}{Z_y}$$

$$I_b = \frac{V_{an} \angle -120^\circ}{Z_y}$$

$$I_b = \frac{220 \angle -120}{100 + 37,7j}$$

$$I_b = 2,06 \angle -140,65 \text{ A}$$

$$Z_y I_c - V_{cn} = 0$$

$$I_c = \frac{V_{cn}}{Z_y}$$

$$I_c = \frac{V_{an} \angle -240^\circ}{Z_y}$$

$$I_c = \frac{220 \angle -240}{100 + 37,7j}$$

$$I_c = 2,06 \angle 99,34 \text{ A}$$

Nó n, pode-se obter o seguinte resultado:

$$I_n = 0$$

3.1.2. Estrela-Delta

Um dos resultados para a configuração Estrela-Delta é que a tensão em cada linha V_L são dadas por:

$$V_{ab} = V_{AB} = \sqrt{3} * V_p \angle 30^\circ$$

$$V_{ab} = V_{AB} = \sqrt{3} * 220 \angle 30^\circ$$

$$V_{ab} = V_{AB} = 381,05 \angle 30^\circ \text{ V}$$

$$V_{bc} = V_{BC} = \sqrt{3} * V_p \angle -90^\circ$$

$$V_{bc} = V_{BC} = 381,05 \angle -90^\circ \text{ V}$$

$$V_{ca} = V_{CA} = \sqrt{3} * V_p \angle -210^\circ$$

$$V_{ca} = V_{CA} = 381,05 \angle -210^\circ \text{ V}$$

As correntes de fase são obtidas utilizando-se Lei de Kirchhof das Tensões, então:

$$I_{ab} = \frac{V_{ab}}{Z_\Delta}$$

$$I_{ab} = \frac{381,05 \angle 30^\circ}{100 + 37,7j}$$

$$I_{ab} = 3,56 \angle 9,34^\circ \text{ A}$$

$$I_{bc} = \frac{V_{bc}}{Z_\Delta}$$

$$I_{bc} = \frac{381,05 \angle -90^\circ}{100 + 37,7j}$$

$$I_{bc} = 3,56 \angle -110,65^\circ \text{ A}$$

$$I_{ca} = \frac{V_{ca}}{Z_{\Delta}}$$

$$I_{ca} = \frac{381,05 \angle -210^\circ}{100 + 37,7j}$$

$$I_{ca} = 3,56 \angle 129,34^\circ \text{ A}$$

As correntes de linha são obtidas utilizando-se Lei de Kirchhof das correntes, então:

- Nó A:

$$I_a + I_{ca} = I_{ab}$$

$$I_a = I_{ab} - I_{ac}$$

$$I_a = 3,56 \angle 9,34^\circ - (3,56 \angle 129,34^\circ)$$

$$I_a = 6,16 \angle -20,66^\circ \text{ A}$$

- Nó B:

$$I_b + I_{AB} = I_{BC}$$

$$I_b = I_{BC} - I_{AB}$$

$$I_b = 3,56 \angle -110,65^\circ - (3,56 \angle 9,34^\circ)$$

$$I_b = 6,16 \angle -140,65^\circ \text{ A}$$

- Nó C:

$$I_c + I_{BC} = I_{CA}$$

$$I_c = I_{CA} - I_{BC}$$

$$I_c = 3,56 \angle 129,34^\circ - (3,56 \angle -110,65^\circ)$$

$$I_c = 6,16 \angle 99,39^\circ \text{ A}$$

Relacionando-se as equações acima, consegue-se obter o seguinte resultado:

$$I_L = \sqrt{3} * I_p$$

$$I_p = |I_{AB}| = |I_{BC}| = |I_{CA}|$$

$$I_L = |I_a| = |I_b| = |I_c|$$

3.1.3. Delta-Estrela

As tensões de Fase são as seguintes:

$$V_{ab} = V_{AB} = 220 \angle 0^\circ \text{ V}$$

$$V_{bc} = V_{BC} = 220 \angle -120^\circ \text{ V}$$

$$V_{ca} = V_{CA} = 220 \angle 120^\circ \text{ V}$$

Um dos resultados para a configuração Delta-Estrela é que as correntes de linha são dadas por:

$$I_a = \frac{\frac{V_p}{\sqrt{3}} \angle -30^\circ}{Z_y}$$

$$I_a = \frac{\frac{220}{\sqrt{3}} \angle -30^\circ}{100 + 37,7j}$$

$$I_a = 1,188 \angle -50,65^\circ \text{ A}$$

$$I_b = \frac{\frac{V_p}{\sqrt{3}} \angle -150^\circ}{Z_y}$$

$$I_b = \frac{\frac{220}{\sqrt{3}} \angle -150^\circ}{100 + 37,7j}$$

$$I_b = 1,188 \angle -170,6^\circ \text{ A}$$

$$I_c = \frac{\frac{V_p}{\sqrt{3}} \angle 90^\circ}{Z_y}$$

$$I_c = \frac{\frac{V_p}{\sqrt{3}} \angle 90^\circ}{Z_y}$$

$$I_c = 1,88 \angle 69,34^\circ \text{ A}$$

3.1.4. Delta-Delta

Um dos resultados para a configuração Delta-Delta é que não se tem impedâncias de linha, então as tensões são:

$$V_{ab} = V_{AB} = 220 \angle 0^\circ \text{ V}$$

$$V_{bc} = V_{BC} = 220 \angle -120^\circ \text{ V}$$

$$V_{ca} = V_{CA} = 220 \angle 120^\circ \text{ V}$$

Consequentemente as correntes de linha são dadas por:

$$I_{AB} = \frac{V_{AB}}{Z_\Delta}$$

$$I_{AB} = \frac{220 \angle 0^\circ}{100 + 37,7j}$$

$$I_{AB} = 2,06 \angle -20,6^\circ \text{ A}$$

$$I_{BC} = \frac{V_{BC}}{Z_\Delta}$$

$$I_{BC} = \frac{220 \angle -120^\circ}{100 + 37,7j}$$

$$I_{BC} = 2,06 \angle -140,6^\circ \text{ A}$$

$$I_{CA} = \frac{V_{CA}}{Z_\Delta}$$

$$I_{CA} = \frac{220 \angle 120^\circ}{100 + 37,7j}$$

$$I_{CA} = 2,06 \angle 99,34^\circ \text{ A}$$

As correntes de linha são dadas por:

$$I_a = I_{AB} - I_{CA}$$

$$I_a = 2,06\angle -20,6^\circ - (2,06\angle 99,34^\circ)$$

$$I_a = 3,56\angle -50,63^\circ A$$

$$I_b = I_{BC} - I_{AB}$$

$$I_b = 2,06\angle -140,6^\circ - (2,06\angle -20,6^\circ)$$

$$I_b = 3,56\angle -170,6^\circ A$$

$$I_c = I_{CA} - I_{BC}$$

$$I_c = 2,06\angle 99,34^\circ - (2,06\angle -140,6^\circ)$$

$$I_c = 3,56\angle 69,37^\circ A$$

Além disso,

$$I_L = \sqrt{3} * I_p$$

$$I_p = |I_{AB}| = |I_{BC}| = |I_{CA}|$$

$$I_L = |I_a| = |I_b| = |I_c|$$

3.2. Ltspice

LTspice é um software de simulação de circuitos eletrônicos amplamente utilizado por estudantes, engenheiros e pesquisadores na área de eletrônica. Desenvolvido pela *Analog Devices*, ele permite a análise de circuitos analógicos e digitais por meio de simulações SPICE (*Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis*). No contexto de circuitos trifásicos, o *LTspice* oferece ferramentas para modelar e simular sistemas complexos, como fontes de alimentação, inversores, motores e outros dispositivos de potência. Durante a simulação, é possível visualizar formas de onda, calcular tensões e correntes em diferentes pontos do circuito e validar o comportamento dinâmico dos componentes. Essa funcionalidade torna o *LTspice* um recurso essencial para projetar, otimizar e validar circuitos antes de sua implementação prática.

3.3. Montagem do circuito

Após a realização dos cálculos teóricos sobre os circuitos foi realizada a montagem dentro da plataforma de simulação de circuitos *LTspice* que contou com os seguintes materiais:

1. 3x Fonte CA
2. 3x Resistor de $1\ \Omega$
3. 3x Resistor de $100\ \Omega$
4. 3x Indutor de $100\ mH$

Primeiramente, foi montado os circuitos com as configurações Estrela, ou seja, os circuitos Estrela-Estrela e Estrela-Delta como apresentados nas Figuras 1 e 2 neste relatório e posteriormente foi montado os circuitos com as configurações Delta, ou seja, os circuitos Delta-Delta e Delta-Estrela. Um detalhe importante para a montagem dos circuitos com configuração Delta nas fontes é que foi necessário a criação de um circuito resistivo simples para conseguir realizar a simulação dos circuitos delta de maneira correta sem o uso de um fio terra para o circuito.

Figura 5 – Configuração Estrela-Estrela Tensões V_{ab} , V_{bc} e V_{ca}

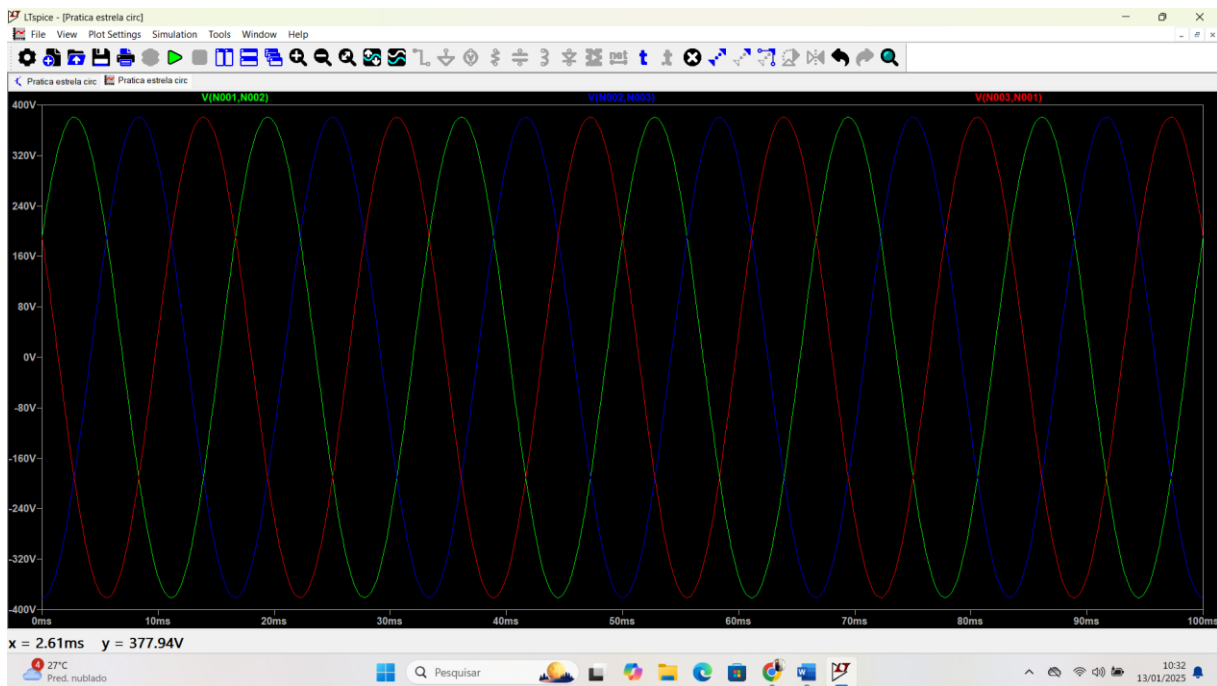


Figura 6 - Configuração Estrela-Estrela Correntes I_a , I_b e I_c

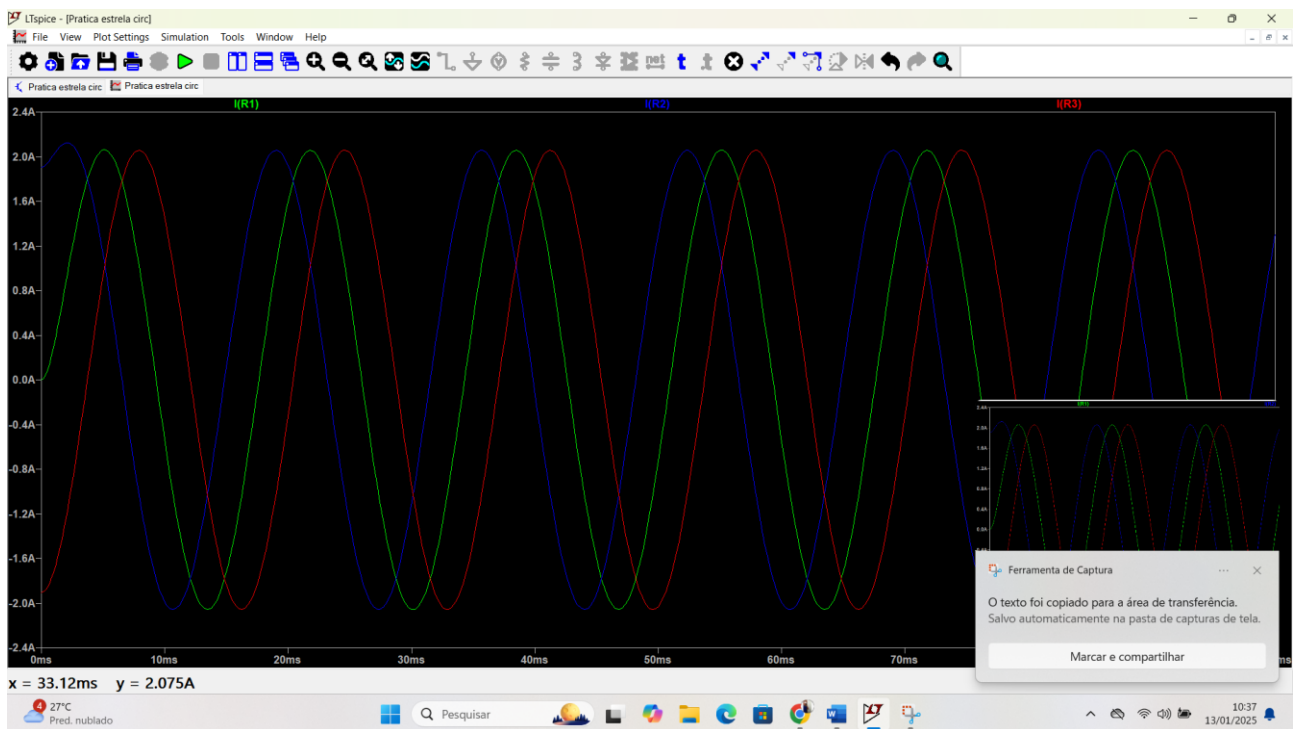


Figura 7 - Configuração Estrela-Delta Tensões V_{ab} , V_{bc} e V_{ca}

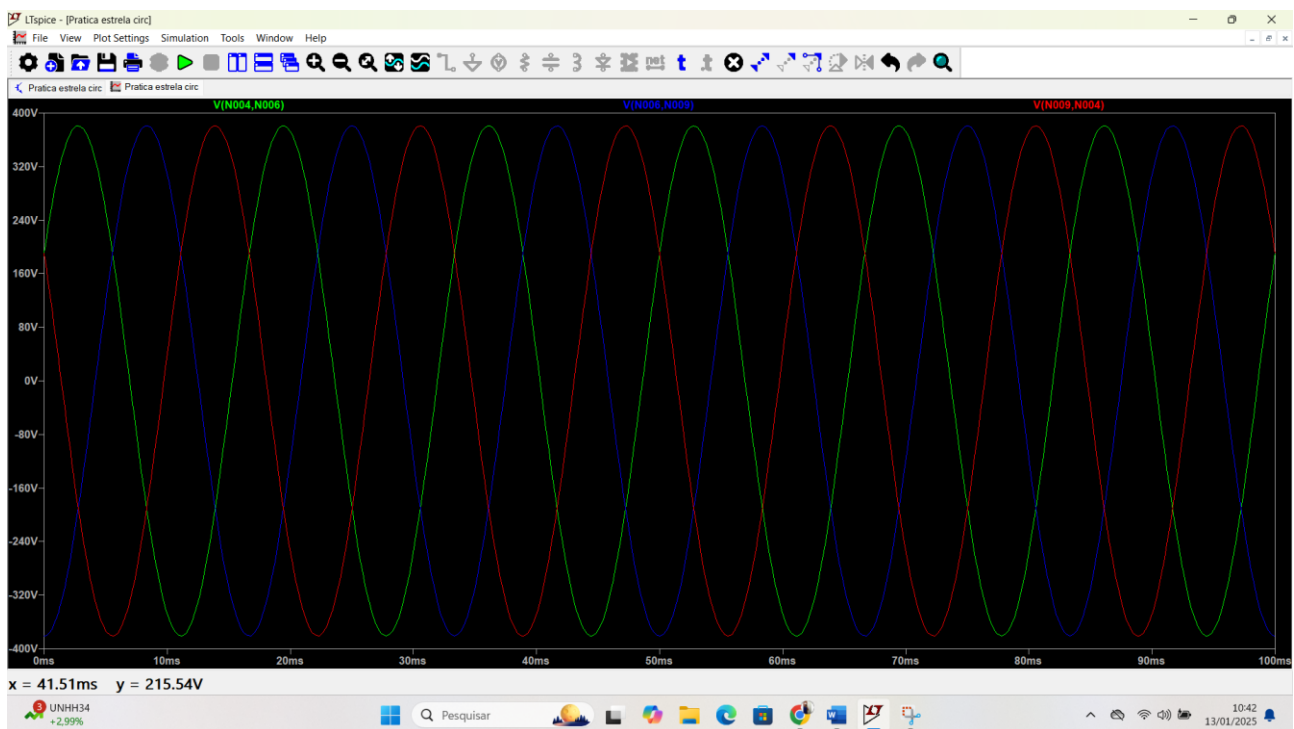


Figura 8 - Configuração Estrela-Delta Correntes I_a , I_b e I_c

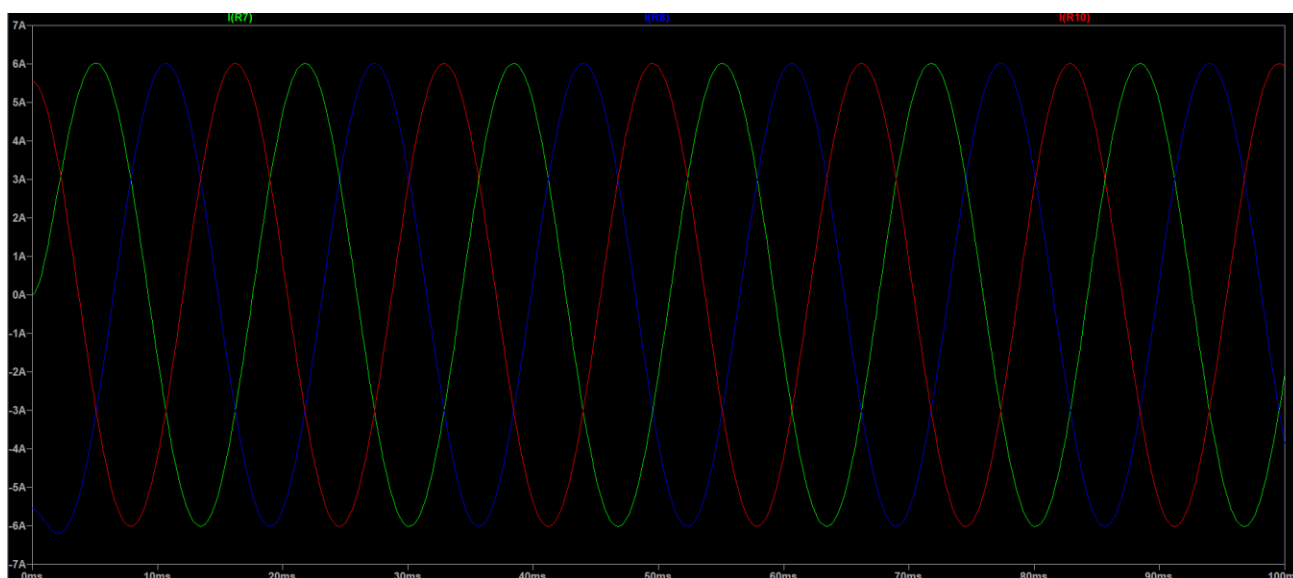


Figura 9 - Configuração Delta-Estrela Tensões V_{ab} , V_{bc} e V_{ca}

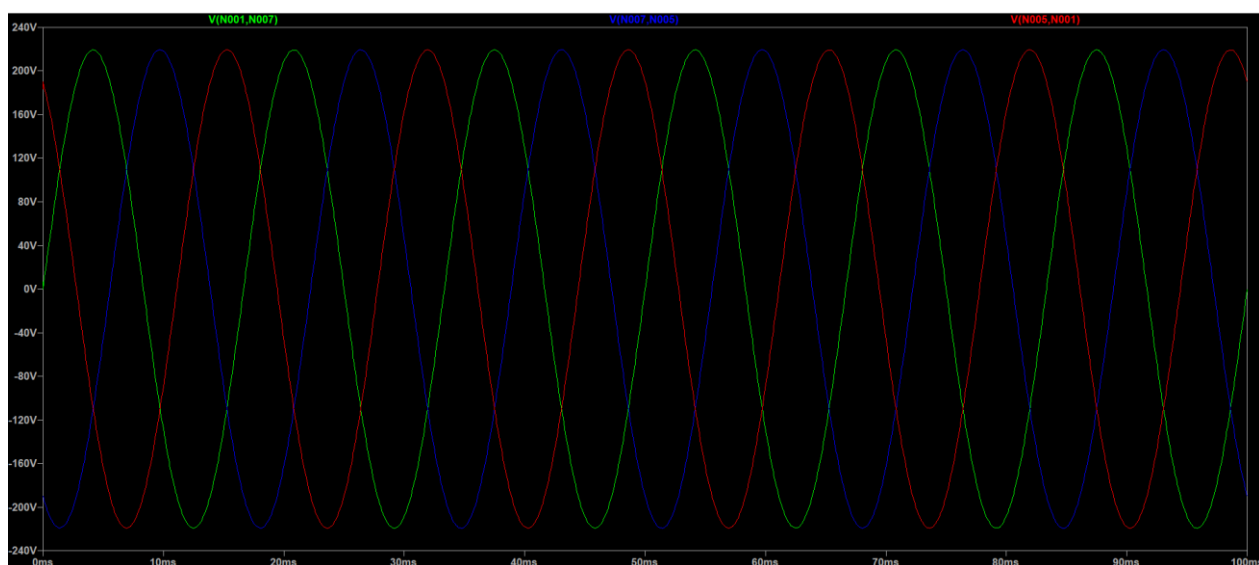


Figura 10 - Configuração Delta-Estrela Correntes I_a , I_b e I_c

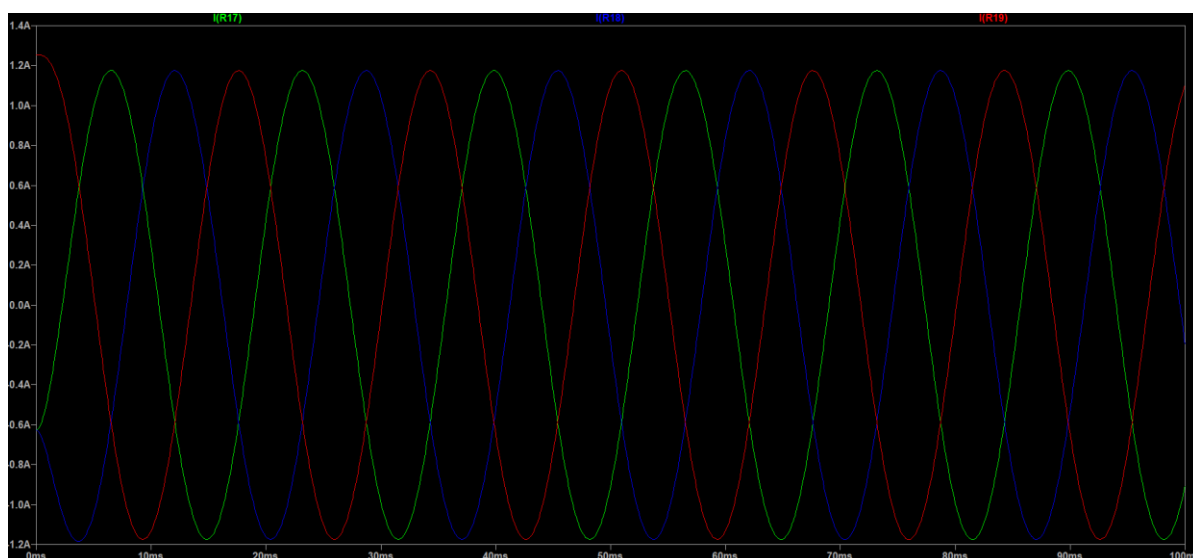


Figura 11 - Configuração Delta-Delta Tensões V_{ab} , V_{bc} e V_{ca}

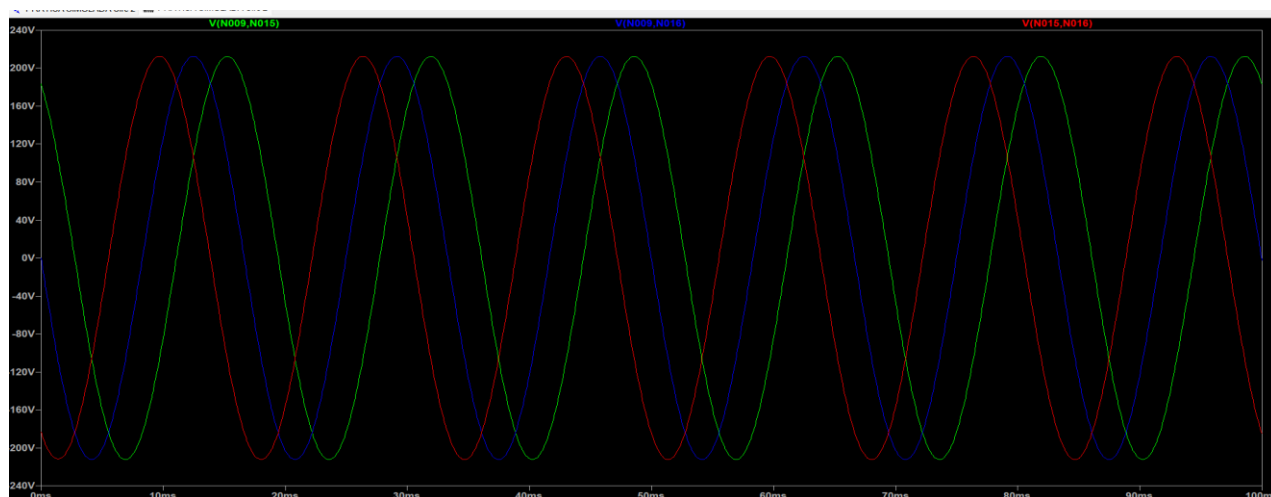
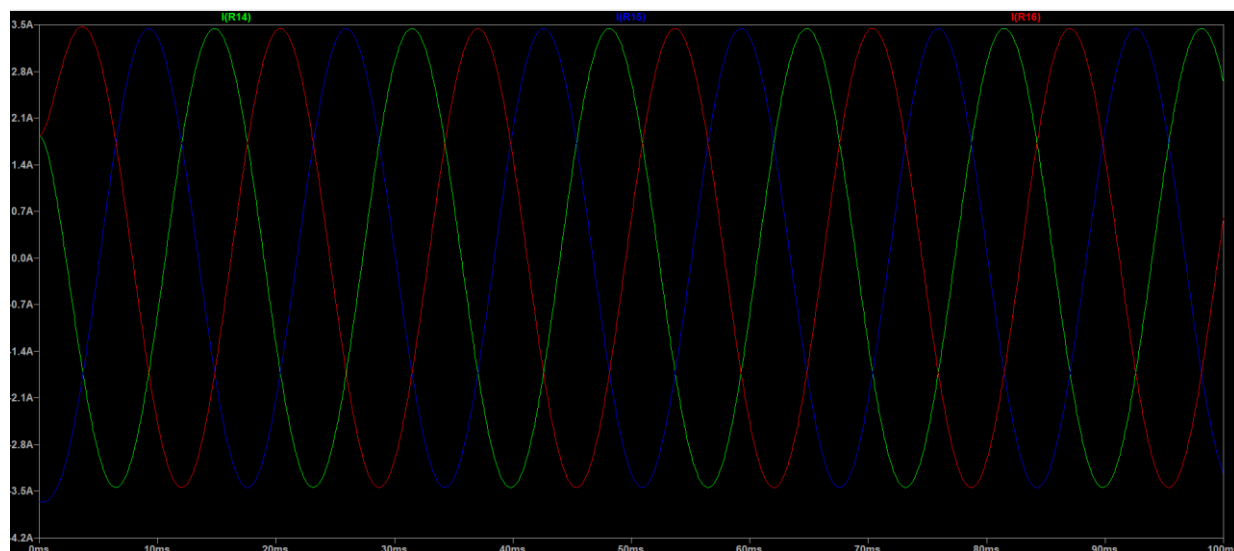


Figura 12 - Configuração Delta-Delta Correntes I_a , I_b e I_c



4. Resultados e Discussões

Com os resultados das simulações em todas as configurações, é possível preencher as respectivas tabelas presentes no guia (Tabela 1.1, Tabela 1.2, Tabela 1.3 e Tabela 1.4). Essas tabelas têm como objetivo mensurar as diferenças entre os valores teóricos e os obtidos nas simulações. Para compreender melhor essas discrepâncias, é necessário calcular o erro relativo (1ª Equação) e, em seguida, discutir os resultados de forma mais aprofundada.

1ª Equação: Erro relativo

$$Erro (\%) = 100 \cdot \frac{|Valor Teórico - Valor Medido|}{Valor Teórico}$$

4.1. Configuração Estrela-Estrela

4.1.1. Cálculo da Fase da Corrente I_a

$$\theta = \Delta x * 360 * Frequência da Fonte$$

$$\theta = (-13,37 + 12,36) * 10^{-3} * 360 * 60$$

$$\theta = -21,86^\circ$$

4.1.2. Cálculo da Fase da Corrente I_b

$$\theta = \Delta x * 360 * Frequência da Fonte$$

$$\theta = (-6,59) * 10^{-3} * 360 * 60$$

$$\theta = -142,8^\circ$$

4.1.3. Cálculo da Fase da Corrente I_c

$$\theta = \Delta x * 360 * Frequência da Fonte$$

$$\theta = 4,6 * 10^{-3} * 360 * 60$$

$$\theta = 99,36^\circ$$

Tabela 1.1: Tabela relativa à configuração Estrela-Estrela

| | V_{ab} | V_{bc} | V_{ca} | I_a | I_b | I_c |
|------------------------------|----------------------------|-------------------------------|------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|
| Valores eficazes (Teóricos) | 381,05 $\angle 0^\circ$ | 381,05 $\angle -120^\circ$ | 381,05 $\angle 120^\circ$ | 2,06 $\angle -20,65^\circ$ | 2,06 $\angle -140,65^\circ$ | 2,06 $\angle 99,34^\circ$ |
| Valores eficazes (Simulados) | 380,71 $\angle 0^\circ$ | 380,71 $\angle -120^\circ$ | 380,71 $\angle 120^\circ$ | 2,045 $\angle -21,816^\circ$ | 2,045 $\angle -142,8^\circ$ | 2,045 $\angle 99,36^\circ$ |

4.1.4. Erro relativo V_{ab} , V_{bc} e V_{ca}

$$V_{ab}(\text{Erro}(\%)) = 100 \cdot \frac{|381,05\angle 0^\circ - 380,71\angle 0^\circ|}{381,05\angle 0^\circ}$$

$$V_{ab}(\text{Erro}(\%)) = 0,09\%$$

$$V_{bc}(\text{Erro}(\%)) = 100 \cdot \frac{|381,05\angle -120^\circ - 380,71\angle -120^\circ|}{381,05\angle -120^\circ}$$

$$V_{bc}(\text{Erro}(\%)) = 0,09\%$$

$$V_{ca}(\text{Erro}(\%)) = 100 \cdot \frac{|381,05\angle 120^\circ - 380,71\angle 120^\circ|}{381,05\angle 120^\circ}$$

$$V_{ca}(\text{Erro}(\%)) = 0,09\%$$

4.1.5. Erro relativo 1ª Prática- I_a , I_b e I_c

$$I_a(\text{Erro}(\%)) = 100 \cdot \frac{|2,06\angle -20,65^\circ - 2,045\angle -21,816^\circ|}{2,06\angle -20,65^\circ}$$

$$I_a(\text{Erro}(\%)) = 2,15\%$$

$$I_b(\text{Erro}(\%)) = 100 \cdot \frac{|2,06\angle -140,65^\circ - 2,045\angle -142,8^\circ|}{2,06\angle -140,65^\circ}$$

$$I_a(Erro (\%)) = 3,80\%$$

$$I_c(Erro (\%)) = 100 \cdot \frac{|2,06\angle 99,34 - 2,045\angle 99,36|}{2,06\angle 99,34}$$

$$I_a(Erro (\%)) = 0,72\%$$

4.2. Configuração Estrela-Delta

4.2.1. Cálculo da Fase da Corrente I_a

$$\theta = \Delta x * 360 * \text{Frequência da Fonte}$$

$$\theta = -0,96 * 10^{-3} * 360 * 60$$

$$\theta = -20,736^\circ$$

4.2.2. Cálculo da Fase da Corrente I_b

$$\theta = \Delta x * 360 * \text{Frequência da Fonte}$$

$$\theta = (-6,45) * 10^{-3} * 360 * 60$$

$$\theta = -139,32^\circ$$

4.2.3. Cálculo da Fase da Corrente I_c

$$\theta = \Delta x * 360 * \text{Frequência da Fonte}$$

$$\theta = 4,6 * 10^{-3} * 360 * 60$$

$$\theta = 99,36^\circ$$

Tabela 1.2: Tabela relativa à configuração Estrela-Delta

| | V_{ab} | V_{bc} | V_{ca} | I_a | I_b | I_c |
|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|
| Valores eficazes (Teóricos) | 381,05 $\angle 30^\circ$ | 381,05 $\angle -90^\circ$ | 381,05 $\angle -210^\circ$ | 6,16 $\angle -20,66^\circ$ | 6,16 $\angle -140,65^\circ$ | 6,16 $\angle 99,39^\circ$ |
| Valores eficazes (Simulados) | 371,58 $\angle 30^\circ$ | 371,58 $\angle -90^\circ$ | 371,58 $\angle -210^\circ$ | 6,026 $\angle -20,736^\circ$ | 6,026 $\angle -139,32^\circ$ | 6,026 $\angle 99,36^\circ$ |

4.2.4. Erro relativo Estrela-Delta V_{ab} , V_{bc} e V_{ca}

$$V_{ab}(\text{Erro}(\%)) = 100 \cdot \frac{|381,05\angle 30^\circ - 371,52\angle 30^\circ|}{381,05\angle 30^\circ}$$

$$V_{ab}(\text{Erro}(\%)) = 2,5\%$$

$$V_{bc}(\text{Erro}(\%)) = 100 \cdot \frac{|381,05\angle -90^\circ - 371,52\angle -90^\circ|}{381,05\angle -90^\circ}$$

$$V_{bc}(\text{Erro}(\%)) = 2,5\%$$

$$V_{ca}(\text{Erro}(\%)) = 100 \cdot \frac{|381,05\angle -210^\circ - 371,52\angle -210^\circ|}{381,05\angle -210^\circ}$$

$$V_{ca}(\text{Erro}(\%)) = 2,5\%$$

4.2.5. Erro relativo Estrela-Delta - I_a , I_b e I_c

$$I_a(\text{Erro}(\%)) = 100 \cdot \frac{|6,16\angle -20,66^\circ - 6,026\angle -20,736^\circ|}{6,16\angle -20,66^\circ}$$

$$I_a(\text{Erro}(\%)) = 2,17\%$$

$$I_b(\text{Erro}(\%)) = 100 \cdot \frac{|6,16\angle -140,65^\circ - 6,026\angle -139,32^\circ|}{6,16\angle -140,65^\circ}$$

$$I_b(\text{Erro}(\%)) = 3,16\%$$

$$I_c(\text{Erro}(\%)) = 100 \cdot \frac{|6,16\angle 99,39^\circ - 6,026\angle 99,36^\circ|}{6,16\angle 99,39^\circ}$$

$$I_c(\text{Erro}(\%)) = 2,17\%$$

4.3. Configuração Delta-Estrela

4.3.1. Cálculo da Fase da Corrente I_a

$$\theta = \Delta x * 360 * \text{Frequência da Fonte}$$

$$\theta = -2,36 * 10^{-3} * 360 * 60$$

$$\theta = -50,976^\circ$$

4.3.2. Cálculo da Fase da Corrente I_b

$$\theta = \Delta x * 360 * \text{Frequência da Fonte}$$

$$\theta = -7,9 * 10^{-3} * 360 * 60$$

$$\theta = -170,64^\circ$$

4.3.3. Cálculo da Fase da Corrente I_c

$$\theta = \Delta x * 360 * \text{Frequência da Fonte}$$

$$\theta = 3,22 * 10^{-3} * 360 * 60$$

$$\theta = 69,552^\circ$$

Tabela 1.3: Tabela relativa à configuração Delta-Estrela

| | V_{ab} | V_{bc} | V_{ca} | I_a | I_b | I_c |
|------------------------------|-------------------------|----------------------------|---------------------------|----------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|
| Valores eficazes (Teóricos) | 220 $\angle 0^\circ$ | 220 $\angle -120^\circ$ | 220 $\angle 120^\circ$ | 1,188 $\angle -50,65^\circ$ | 1,188 $\angle -170,6^\circ$ | 1,188 $\angle 69,34^\circ$ |
| Valores eficazes (Simulados) | 220 $\angle 0^\circ$ | 220 $\angle -120^\circ$ | 220 $\angle 120^\circ$ | 1,1752 $\angle -50,976^\circ$ | 1,1752 $\angle -170,64^\circ$ | 1,1752 $\angle 69,552^\circ$ |

4.3.4. Erro relativo Delta-Estrela V_{ab} , V_{bc} e V_{ca}

$$V_{ab}(\text{Erro}(\%)) = 100 \cdot \frac{|220 \angle 0^\circ - 220 \angle 0^\circ|}{220 \angle 0^\circ}$$

$$V_{ab}(\text{Erro}(\%)) = 0\%$$

$$V_{bc}(\text{Erro}(\%)) = 100 \cdot \frac{|220 \angle -120^\circ - 220 \angle -120^\circ|}{220 \angle -120^\circ}$$

$$V_{bc}(\text{Erro}(\%)) = 0\%$$

$$V_{ca}(\text{Erro}(\%)) = 100 \cdot \frac{|220 \angle 120^\circ - 220 \angle 120^\circ|}{220 \angle 120^\circ}$$

$$V_{ca}(\text{Erro}(\%)) = 0\%$$

4.3.5. Erro relativo Delta-Estrela - I_a , I_b e I_c

$$I_a(\text{Erro}(\%)) = 100 \cdot \frac{|1,188 \angle -50,65^\circ - 1,1752 \angle -50,976^\circ|}{1,188 \angle -50,65^\circ}$$

$$\text{Erro}(\%) = 1,21\%$$

$$I_b(\text{Erro}(\%)) = 100 \cdot \frac{|1,188 \angle -170,6^\circ - 1,1752 \angle -170,64^\circ|}{1,188 \angle -170,6^\circ}$$

$$\text{Erro}(\%) = 1,07\%$$

$$I_c(\text{Erro}(\%)) = 100 \cdot \frac{|1,188 \angle 69,34^\circ - 1,1752 \angle 69,552^\circ|}{1,188 \angle 69,34^\circ}$$

$$\text{Erro}(\%) = 1,13\%$$

4.4. Configuração Delta-Delta

4.4.1. Cálculo da Fase da Corrente I_a

$$\theta = \Delta x * 360 * \text{Frequência da Fonte}$$

$$\theta = -2,32 * 10^{-3} * 360 * 60$$

$$\theta = -50,11^\circ$$

4.4.2. Cálculo da Fase da Corrente I_b

$$\theta = \Delta x * 360 * \text{Frequência da Fonte}$$

$$\theta = -7,87 * 10^{-3} * 360 * 60$$

$$\theta = -169,9^\circ$$

4.4.3. Cálculo da Fase da Corrente I_c

$$\theta = \Delta x * 360 * \text{Frequência da Fonte}$$

$$\theta = 3,2 * 10^{-3} * 360 * 60$$

$$\theta = 69,12^\circ$$

Tabela 1.4: Tabela relativa à configuração Delta-Delta

| | V_{ab} | V_{bc} | V_{ca} | I_a | I_b | I_c |
|------------------------------|-------------------------|----------------------------|---------------------------|-------------------------------|-------------------------------|------------------------------|
| Valores eficazes (Teóricos) | 220 $\angle 0^\circ$ | 220 $\angle -120^\circ$ | 220 $\angle 120^\circ$ | 3,56 $\angle -50,63^\circ$ | 3,56 $\angle -170,6^\circ$ | 3,56 $\angle 69,37^\circ$ |
| Valores eficazes (Simulados) | 220 $\angle 0^\circ$ | 220 $\angle -120^\circ$ | 220 $\angle 120^\circ$ | 3,46 $\angle -50,11^\circ$ | 3,46 $\angle -169,9^\circ$ | 3,46 $\angle 69,12^\circ$ |

4.4.4. Erro relativo Delta-Delta - V_{ab} , V_{bc} e V_{ca}

$$V_{ab}(\text{Erro}(\%)) = 100 \cdot \frac{|220\angle 0^\circ - 220\angle 0^\circ|}{220\angle 0^\circ}$$

$$V_{ab}(\text{Erro}(\%)) = 0\%$$

$$V_{bc}(\text{Erro}(\%)) = 100 \cdot \frac{|220\angle -120^\circ - 220\angle -120^\circ|}{220\angle -120^\circ}$$

$$V_{bc}(\text{Erro}(\%)) = 0\%$$

$$V_{ca}(\text{Erro}(\%)) = 100 \cdot \frac{|220\angle 120^\circ - 220\angle 120^\circ|}{220\angle 120^\circ}$$

$$V_{ca}(\text{Erro}(\%)) = 0\%$$

4.4.5. Erro relativo Delta-Delta - I_a , I_b e I_c

$$I_a(\text{Erro}(\%)) = 100 \cdot \frac{|3,56\angle -50,63^\circ - 3,46\angle -50,11^\circ|}{3,56\angle -50,63^\circ}$$

$$I_a(\text{Erro}(\%)) = 2,94\%$$

$$I_b(\text{Erro}(\%)) = 100 \cdot \frac{|3,56\angle -170,6^\circ - 3,46\angle -169,9^\circ|}{3,56\angle -170,6^\circ}$$

$$I_b(\text{Erro}(\%)) = 3,05\%$$

$$I_c(\text{Erro}(\%)) = 100 \cdot \frac{|3,56 \angle 69,37^\circ - 3,46 \angle 69,12^\circ|}{3,56 \angle 69,37^\circ}$$

$$I_c(\text{Erro}(\%)) = 2,84\%$$

Dessa forma, é possível observar que os resultados de V_{ab} , V_{bc} e V_{ca} , mostram perfeita concordância com os valores teóricos na simulação, com erro relativo abaixo de 5%, indicando que os circuitos estão montados corretamente, seguindo o padrão que foi apresentado nas aulas teóricas. Com a configuração Estrela-Estrela com uma tensão de linha aproximadamente $\sqrt{3}$ * tensão de fase. Para a configuração Estrela-Delta a tensão de linha é também uma aproximadamente $\sqrt{3}$ * tensão de fase com uma mudança na fase que agora possuem 30° a mais para cada tensão de linha. Ademais, a configuração Delta-Estrela e Delta-Delta mantém a tensão de linha em relação a tensão de fase, pois não possuem impedâncias nas linhas, o que facilita os cálculos para V_{ab} , V_{bc} e V_{ca} .

Seguindo a análise sobre as correntes de linha I_a , I_b e I_c , mostram perfeita concordância com os valores teóricos na simulação, com erro relativo abaixo de 5%, indicando que os circuitos estão montados corretamente, seguindo o padrão que foi apresentado nas aulas teóricas. É possível notar que na configuração Estrela-Estrela as correntes de linha são iguais em valor absoluto, o que diferencia cada corrente de linha é a sua fase que seguem com a mesma fase da fonte seja em 0° , -120° ou 120° . Para a configuração Estrela-Delta as correntes de linha possuem o valor de aproximadamente $\sqrt{3}$ * corrente de fase em valor absoluto, ou seja, as correntes de linhas I_a , I_b e I_c têm o mesmo valor de módulo e se analisarmos a fase de cada linha mantém com mesma da tensão de linha na mesma configuração.

Por fim, as configurações Delta-Estrela e Delta-Delta possuem diferenças quanto a corrente linha, pois no primeiro caso a corrente de linha segue o padrão de ser aproximadamente $\sqrt{3}$ * corrente de fase em valor absoluto e a fase de corrente de linha segue a mesma fase da tensão de linha da configuração. Entretanto, a corrente de linha para a configuração Delta-Delta é aproximadamente corrente de fase dividido por $\sqrt{3}$ com uma mudança na fase da corrente de linha que agora possui -30° para cada fase, ou seja, a corrente linha que estava seguindo a fase da tensão de linha de 0° agora possui um a fase -30° , por exemplo. Dessa forma, também acontece para os outros dois casos.

5. Conclusões

Portanto, pode-se concluir que a realização dessa prática foi essencial para entender o funcionamento de circuitos trifásicos em diversas configurações de maneira prática. Além disso, a simulação permitiu não apenas reforçar o entendimento teórico, mas também desenvolver habilidades práticas com o uso do software *Ltspice* e analisar dentro da plataforma, antes de gerar o protótipo da aplicação, o que é de extrema importância porque pode-se notar defeitos e realizar ajustes antes de

iniciar o modelo físico do circuito. Essa prática contribuiu, portanto, para melhorar a compreensão sobre circuitos trifásicos, evidenciando como funciona as correntes e tensões de linha cada configuração.