

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

Thalles Nathan Bezerra de França

**DESENVOLVIMENTO DE UM PROGRAMA COMPUTACIONAL EM LINGUAGEM
PYTHON PARA CÁLCULO E GERAÇÃO DE DIAGRAMA DE FASORES DE
MÁQUINAS ELÉTRICAS CA DE POLOS LISOS**

Ilha Solteira
2024

Thalles Nathan Bezerra de França

**DESENVOLVIMENTO DE UM PROGRAMA COMPUTACIONAL EM LINGUAGEM
PYTHON PARA CÁLCULO E GERAÇÃO DE DIAGRAMA DE FASORES DE
MÁQUINAS ELÉTRICAS CA DE POLOS LISOS**

Trabalho de Graduação apresentado à Faculdade
de Engenharia do Câmpus de Ilha Solteira –
UNESP como parte dos requisitos para obtenção
do grau de Engenheiro Eletricista.

Prof. Dr. Jean Marcos de Souza Ribeiro
Orientador

Ilha Solteira
2024

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

F815d França, Thalles Nathan Bezerra de.
Desenvolvimento de um programa computacional em linguagem python para cálculo e geração de diagrama de fasores de máquinas elétricas CA de polos lisos / Thalles Nathan Bezerra de França. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2024
51 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Elétrica) -
Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2024

Orientador: Jean Marcos de Souza Ribeiro

Inclui bibliografia

1. Máquinas elétricas síncronas. 2. Diagrama de fasores. 3. Tensão eficaz. 4. Python.


Amanda Sertori dos Santos

Biblioteca - CRB08-9081
Seção Técnica de Referência, Atendimento ao
Usuário e Documentação
Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Aos dezenove dias do mês de dezembro do ano de dois mil e vinte e quatro, o discente Thalles Nathan Bezerra de França, matriculado sob o nº182055329, tendo como banca examinadora o seu orientador, o *Prof. Dr. Jean Marcos de Souza Ribeiro*, o Prof Dr Guilherme de Azevedo e Melo e o *Doutorando Rodrigo Serra Daltin*, apresentou o Trabalho de Graduação intitulado **"DESENVOLVIMENTO DE UM PROGRAMA COMPUTACIONAL EM LINGUAGEM PYTHON PARA CÁLCULO E GERAÇÃO DE DIAGRAMA DE FASORES DE MÁQUINAS ELÉTRICAS CA DE POLOS LISOS"**, obtendo a nota 7,5 (SETE E MEIO) e conceito aprovado.



Prof. Dr. Jean Marcos de Souza Ribeiro
- orientador -

Thalles Nathan Bezerra de França
- discente -

Prof. Dr. Guilherme de Azevedo e Melo
- Membro da Banca -

Doutorando Rodrigo Serra Daltin
- Membro da Banca -

DEDICATÓRIA

Agradeço ao Jean Marcos de Souza Ribeiro por ter aceitado me acompanhar neste projeto. Seu empenho, juntamente com o apoio da minha família e amigos, foi essencial para manter minha motivação à medida que as dificuldades surgiam ao longo do percurso.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha profunda gratidão aos meus familiares: Maria José da Silva e Silva, Francisco Apolônio da Silva, Sidney Rodrigo da Silva, Claudio Marcos da Silva, Victor Hugo da Silva e Maria Eduarda Santos Silva. Vocês foram meus motivadores e inspiradores, sempre me incentivando a seguir em frente, apoiando minhas decisões e prestando todo o suporte necessário concluir esta etapa. Além disso, a força, o apoio e os princípios que me transmitiram foram essenciais para que eu pudesse superar os obstáculos que surgiram ao longo dessa trajetória. Muito obrigado por estarem sempre ao meu lado.

À Ana Caroline Garcia Feltrini de Souza, e a seus familiares, por todo o carinho e compreensão em todos os momentos. Agradeço especialmente a ela pela participação ativa neste fechamento de ciclo acadêmico e na minha inserção no mercado de trabalho. O apoio de vocês foi essencial para que eu pudesse alcançar este objetivo.

Aos meus amigos Thiago Lombarde Vitoriano e Rhomulo Thiago Gouveia, que estiveram ao meu lado durante todo o meu desenvolvimento acadêmico. Agradeço profundamente pelo auxílio nos desafios e pela celebração das conquistas. A presença e o apoio de vocês foram fundamentais para que eu pudesse chegar até aqui.

Por fim, agradeço à República Cafarnaum, que me acolheu e me permitiu conhecer pessoas maravilhosas, proporcionando um ambiente incrível para meu desenvolvimento como pessoa. Vocês são uma segunda família para mim.

Sou grato a todos vocês. Este trabalho é resultado do esforço coletivo e do apoio inestimável que recebi de cada um.

“A felicidade é a pretensão ilusória de
converter um instante de alegria em
eternidade.” Clóvis de Barros Filho

LISTA DE SÍMBOLOS

$d\Phi$	Derivação do Fluxo Magnético por Polo
dt	Derivação do Tempo
E	Tensão Induzida
E_f	Tensão de Excitação
f	Frequência da Corrente Alternada
FP	Fator de Potência
I_a	Corrente de Armadura
j	Operador Imaginário
N	Número de Espiras
P	Potência Ativa
Q	Potência Reativa
R	Resistência
R_a	Resistência do Enrolamento de Armadura
S	Potência Aparente
V_t	Tensão do Terminal
X_s	Reatância Síncrona
δ	Ângulo de Carga
Φ	Ângulo da Corrente
ϕ	Fluxo Magnético por Polo

RESUMO

O presente trabalho propõe o desenvolvimento de um programa computacional em linguagem Python que calcula e gera diagramas de fasores para máquinas síncronas de corrente alternada (CA) de polos lisos. O objetivo é fornecer, principalmente aos acadêmicos de engenharia, uma ferramenta simples e visual que permita a análise do comportamento dinâmico de motores e geradores síncronos CA de polos lisos, considerando suas características construtivas e de operação. Então, o operador insere os valores das variáveis solicitados pelo programa que plota os diagramas de fasores baseado em modelos matemáticos que representam as tensões e correntes em termos de amplitudes complexas eficazes para motores e geradores síncronos. Possibilita-se um visual mais ágil e eficiente para interpretar parâmetros importantes no comportamento dos motores e geradores elétricos síncronos, como fator de potência.

Palavras-chave: *Máquinas elétricas síncronas, Diagrama de fasores, Tensão eficaz, Python.*

ABSTRACT

The present work proposes the development of a computer program in Python language that calculates and generates factor diagrams for synchronous alternating current (AC) machines with smooth poles. The objective is to provide, mainly to engineering students, a simple and visual tool that allows the analysis of the dynamic behavior of these machines, considering their construction and operational characteristics. To do this, the operator will enter the values of the variables requested by the program that will draw the factor diagrams based on mathematical models that represent the references and currents in terms of effective complex amplitudes for synchronous motors and generators. In this way, a more agile and efficient visual analysis is made possible to interpret important parameters in the behavior of synchronous electric motors and generators, such as power factor.

Keywords: Synchronous electric machines, Phasor diagram, Effective voltage, Python.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	12
1.1	Máquinas Elétricas Síncronas de Polos Lisos	12
1.2	Diagrama de Fasores	12
1.3	Modos de operação das Máquinas Síncronas de acordo com a posição Corrente de Armadura I_a em relação a Tensão terminal V_t	14
1.3.1	Operação com Fator de Potência Indutivo.....	15
1.3.2	Operação com Fator de Potência Capacitivo	15
1.3.3	Operação com Fator de Potência Unitário.....	15
1.4	Importância do Diagrama Fasorial na Determinação do Modo de Operação	16
1.4.1	Visualização das Relações de Fase	16
1.4.2	Análise da Tensão Interna E_f	16
1.4.3	Análise do Ângulo de Carga δ	17
1.5	Circuito Equivalente por Fase de Máquinas Síncronas	17
1.5.1	Máquina Síncrona Operando como Gerador	17
1.5.2	Máquina Síncrona Operando como Motor	18
1.6	Equações da Máquina Síncrona.....	18
1.6.1	Equação da Tensão Induzida	18
1.6.2	Equação da Corrente de Armadura	19
1.6.3	Ângulo de Carga.....	19
1.6.4	Equações de Potência e Fator de Potência.....	20
1.6.5	Lei de Faraday e Lei de Ohm	20
1.6.6	Tensão de Excitação E_f	21
2.	METODOLOGIA.....	22
2.1	Importação de Bibliotecas.....	22
2.2	Entrada de dados.....	22
2.3	Conversão de Coordenadas	23
2.4	Cálculo dos Fasores	23
2.4.2	Referência de Fase.....	24
2.5	Determinação do tipo de máquina	24
2.6	Geração do Diagrama.....	24
2.7	Fluxograma Ilustrativo.....	26

3.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	27
3.1	Validação da ferramenta desenvolvida	27
3.1.1	Caso 1: Máquinas Síncronas em modo de operação com fator de potência Capacitivo.....	27
3.1.2	Caso 2: Máquinas Síncronas em modo de operação com fator de potência Indutivo.....	33
3.1.3	Caso 3: Máquinas Síncronas em modo de operação com fator de potência Unitário	38
4.	CONCLUSÕES.....	44
5.	REFERÊNCIAS	45
6.	APÊNDICE A – ALGORITMO DIAGRAMA DE FASORES DE MÁQUINAS SÍNCRONAS DE POLOS LISOS EM PYTHON	46

1. INTRODUÇÃO

O presente trabalho de graduação aborda a disciplina de Máquinas Elétricas através do desenvolvimento de um software capaz de traçar diagramas fasoriais de máquinas síncronas de polos lisos, para o caso de formas de onda de tensão e fluxo puramente senoidais e em sistema de unidades por unidade (p.u.). Para qual é realizada uma pesquisa aprofundada baseada em referências teóricas importantes, como Fitzgerald et al. (2014), Chapman (2013), Guru e Hizioglu (2003), Hayt (2019), Carvalho (2006), Kosow (1983), Hubert (2002) e Jordão (1984).

1.1 Máquinas Elétricas Síncronas de Polos Lisos

As máquinas elétricas síncronas são amplamente utilizadas em diversas aplicações de conversão eletromecânica de energia, o que inclui usinas hidrelétricas, termelétricas e eólicas (Chapman, 2013; Fitzgerald et al., 2014). Destacam-se máquinas de polos lisos por sua estrutura relativamente simples.

1.2 Diagrama de Fasores

O diagrama de fasores é um ferramentas interessante para a análise do comportamento das máquinas síncronas de corrente alternada de polos lisos (Chapman, 2013). O recurso gráfico representa as relações de fase entre as tensões e correntes em um sistema elétrico, no contexto de máquinas síncronas o que auxilia no entendimento do comportamento dinâmico da máquina, na realização de análises de estabilidade e controle, uma vez que permite a visualização entre $\widehat{E}_f$, $\widehat{V}_t$ e $\widehat{I}_a$. A equação (1) pode ser representada de forma equivalente pelo diagrama fasorial ilustrado na Figura 1, ao oferecer visualização gráfica para melhor entendimento dos conceitos matemáticos envolvidos.

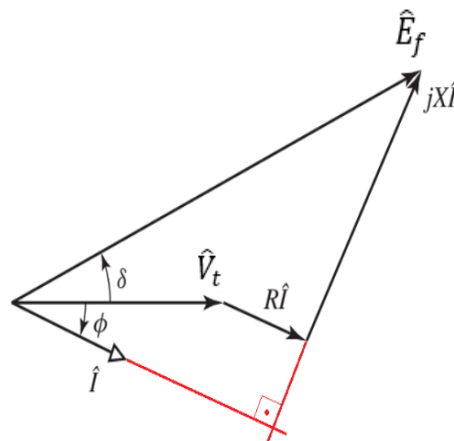
$$\widehat{E}_f = \widehat{V}_t + R_a \cdot \widehat{I}_a + j \cdot X_s \cdot \widehat{I}_a \quad (1)$$

Sendo:

- $\hat{E}_f$ Tensão de Excitação do Gerador;
- $\hat{V}_t$ Tensão Terminal;
- R_a Resistência do Enrolamento de Armadura;
- $\hat{I}_a$ Corrente de Armadura;
- X_s Reatância Síncrona;
- j Operador Imaginário.

A equação permite a visualização e compreensão de grandezas fundamentais, como a tensão terminal, a corrente de armadura e o ângulo de carga, que informa o desempenho das máquinas em diferentes situações, ilustrado na Figura 1.

Figura 1: Representação do Diagrama Fasorial de um gerador síncrono de polos lisos, operando com fator de potência Indutivo.



Fonte: adaptado de Fitzgerald *et al.* (2014).

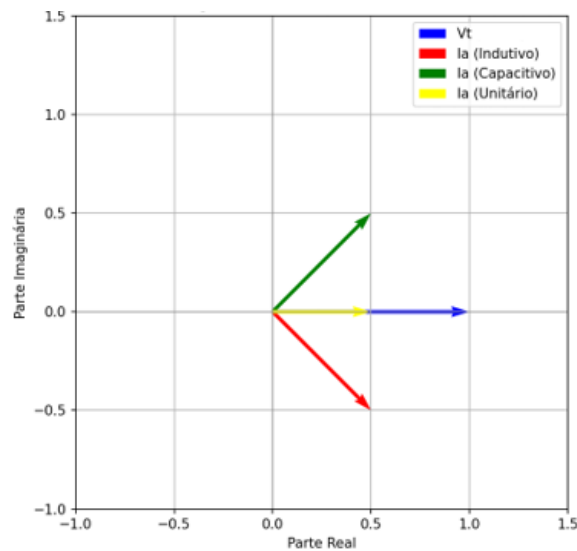
A elaboração e interpretação dos diagramas de fasores requerem a aplicação de conceitos de análise de circuitos elétricos, como a lei de Ohm e a análise de triângulos de impedâncias (FITZGERALD *et al.*, 2014). A abordagem visual utilizando vetores facilita a compreensão dos fenômenos relacionados à operação das máquinas

síncronas, como o fator de potência, a potência ativa e reativa, e o ângulo de carga.

1.3 Modos de operação das Máquinas Síncronas de acordo com a posição Corrente de Armadura (I_a) em relação a Tensão terminal (V_t).

As máquinas síncronas, que incluem tanto motores quanto geradores, operam de acordo com a relação entre a corrente de armadura (I_a) e a tensão terminal (V_t). Dependendo da relação, a máquina pode operar em modos capacitivo, indutivo ou unitário. Assim, é possível compreender o comportamento dos fasores seguindo tais condições, conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 2: Representação gráfica da Corrente de Amadura (I_a) de Máquinas elétricas síncronas em diferentes modos de operação.



Fonte: Elaborado pelo autor.

1.3.1 Operação com Fator de Potência Indutivo

Em Operação com Fator de Potência Indutivo, a corrente de armadura (I_a) está atrasada em relação à tensão terminal (V_t). O que faz com que a corrente de excitação se comporte de forma diferente dependendo do tipo de máquina. Em termos práticos:

- **Motor Síncrono:** Está subexcitado, isto é, apresenta uma corrente de excitação pequena. Ou seja, troca reativo indutivo com a rede.
- **Gerador Síncrono:** Está sobreexcitado, isto é, apresenta uma corrente de excitação grande. Ou seja, troca reativo capacitivo com a rede.

1.3.2 Operação com Fator de Potência Capacitivo

Em operação com Fator de Potência Capacitivo, a corrente de armadura (I_a) está adiantada em relação à tensão terminal (V_t). O que faz com que a corrente de excitação se comporte de forma diferente dependendo do tipo de máquina. Em termos práticos:

- **Motor Síncrono:** Está sobreexcitado troca reativo capacitivo com a rede.
- **Gerador Síncrono:** Está subexcitado troca reativo indutivo com a rede.

1.3.3 Operação com Fator de Potência Unitário

Em Operação com Fator de Potência Unitário, a corrente de armadura (I_a) está em fase com a tensão terminal (V_t). O que ocorre quando não há troca de Potência Reativa com a rede. Em termos práticos:

- **Motor Síncrono:** Não troca reativo com a rede.
- **Gerador Síncrono:** Não troca reativo com a rede.

1.4 Importância do Diagrama Fasorial na Determinação do Modo de Operação

O Diagrama Fasorial é utilizado na análise de máquinas elétricas, pois permite visualizar as relações de fase entre as tensões e correntes. Possibilita-se determinar o modo de operação da máquina, seja ele indutivo, capacitivo ou unitário.

1.4.1 Visualização das Relações de Fase

O Diagrama Fasorial mostra claramente a posição relativa dos fasores de tensão e corrente. Por exemplo:

- **Modo Indutivo:** A corrente de armadura (I_a) está atrasada em relação à tensão terminal (V_t).
- **Modo Capacitivo:** A corrente de armadura (I_a) está adiantada em relação à tensão terminal (V_t).
- **Modo Unitário:** A corrente de armadura (I_a) está em fase com a tensão terminal (V_t). No diagrama, (I_a) e a tensão terminal (V_t) estão alinhados.

1.4.2 Análise da Tensão Interna (E_f)

A Tensão de Excitação (E_f) é um parâmetro fundamental na operação de Máquinas Síncronas. Sua posição relativa à Tensão do Terminal (V_t) indica o modo de operação da máquina:

- **Gerador:** Se E_f está adiantada em relação a tensão terminal (V_t), a máquina está operando como Motor.
- **Motor:** Se E_f está atrasada em relação a tensão terminal (V_t), a máquina está operando como Gerador.

1.4.3 Análise do Ângulo de Carga (δ)

O ângulo de carga (δ) é o ângulo entre E_f e V_t . No Diagrama Fasorial, o ângulo δ é facilmente visualizado e medido. O valor de δ medido indica a quantidade de Potência Ativa que a máquina está gerando ou consumindo:

- Um ângulo δ positivo indica que a máquina está gerando Potência Ativa.
- Um ângulo δ negativo indica que a máquina está consumindo Potência Ativa.

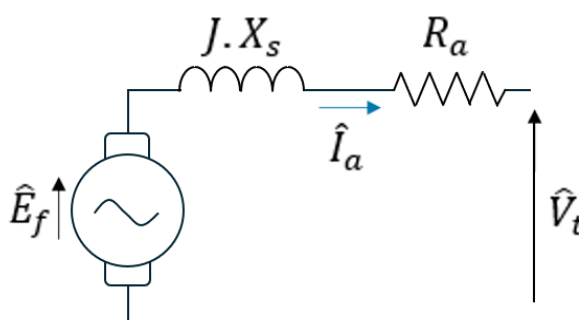
1.5 Circuito Equivalente por Fase de Máquinas Síncronas

Os circuitos equivalentes por fase são representações simplificadas que ajudam a entender o comportamento elétrico das máquinas síncronas em diferentes modos de operação. Tais circuitos são fundamentais para a análise e construção de Diagramas Fasoriais.

1.5.1 Máquina Síncrona Operando como Gerador

No circuito equivalente da Máquina Síncrona operando como Gerador, a Tensão de Excitação (E_f) é representada em série com a reatância síncrona (X_s) e a resistência de Armadura (R_a). A Corrente de Armadura (I_a) flui através dos elementos, neste caso, flui de E_f para V_t . Conforme a Figura 3:

Figura 3: Circuito equivalente Máquina Síncrona operando como Gerador.

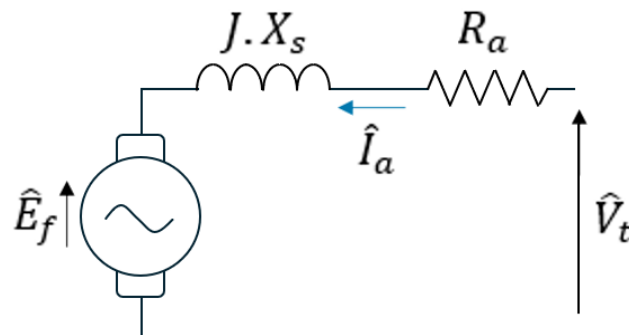


Fonte: Elaborado pelo autor.

1.5.2 Máquina Síncrona Operando como Motor

No circuito equivalente da Máquina Síncrona operando como Motor, a Tensão de Excitação (E_f) é representada em série com a reatância síncrona (X_s) e a resistência de Armadura (R_a). A Corrente de Armadura (I_a) flui através dos elementos, neste caso, flui de V_t para E_f . Conforme a Figura 4:

Figura 4: Circuito equivalente Máquina Síncrona operando como Motor.



Fonte: Elaborado pelo autor.

1.6 Equações da Máquina Síncrona

A análise das máquinas elétricas síncronas de polos lisos requer uma compreensão detalhada das equações que governam seu comportamento eletromecânico. Neste tópico, serão apresentadas e contextualizadas as principais equações utilizadas neste estudo com base no Fitzgerald et al. (2014) e Chapman (2013).

1.6.1 Equação da Tensão Induzida

O valor médio da tensão induzida, para o caso de formas de onda de tensão e fluxo puramente senoidais em uma máquina síncrona pode ser expressa pela equação:

$$E = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot f \cdot N \cdot \phi \quad (2)$$

Sendo:

- E Valor Médio da Tensão Induzida;
- f Frequência da Corrente Alternada;
- N Número de Espiras;
- ϕ Fluxo Magnético por Polo.

A equação (2) é fundamental para entender como a tensão é gerada nas máquinas síncronas e é amplamente discutida em Fitzgerald et al. (2014) e Chapman (2013).

1.6.2 Equação da Corrente de Armadura

A corrente de armadura (I_a) pode ser determinada pela seguinte equação, descrita em (3):

$$\hat{I}_a = \frac{\hat{V}_t - \hat{E}_f}{(R_a + j \cdot X_s)} \quad (3)$$

Tal equação é relevante para a análise do desempenho das máquinas síncronas em diferentes condições de carga e é detalhada em Jordão (1984).

1.6.3 Ângulo de Carga

O ângulo de carga (δ) é a diferença angular entre a Tensão Terminal (V_t) e a Tensão de Excitação (E_f), conforme representado na Figura 1. Então, é possível expressar a relação, matematicamente, em (4):

$$\delta = \angle(E_f) - \angle(V_t) \quad (4)$$

Ademais, o sinal do Ângulo de Carga (δ) determina o modo de operação da máquina síncrona:

- **Modo Gerador:** Quando $\delta > 0$, a máquina opera como gerador, fornecendo Potência Ativa para a rede elétrica.

- **Modo Motor:** Quando $\delta < 0$, a máquina opera como motor, consumindo Potência Ativa da rede.

Portanto, é possível afirmar que quanto maior for o ângulo δ , maior a potência transferida para a rede pelo Gerador ou maior é a carga no eixo do Motor.

1.6.4 Equações de Potência e Fator de Potência

As Potências Aparente (S), Ativa (P) e Reativa (Q) podem ser expressas pelas seguintes equações (5), (6) e (7), respectivamente:

$$S = I_a \cdot V \quad (5)$$

$$P = I_a \cdot V \cdot \cos(\Phi) \quad (6)$$

$$Q = I_a \cdot V \cdot \sin(\Phi) \quad (7)$$

Através da relação entre as potências, é obtido:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (8)$$

Para um sistema puramente senoidal o Fator de Potência (FP) é igual ao Fator de Deslocamento (FD), então:

$$FP = \cos(\Phi) \quad (9)$$

Portanto, ao isolar o Φ , é obtido:

$$\Phi = \arccos(FP) \quad (10)$$

As equações permitem a análise do fluxo de potência em máquinas síncronas e são discutidas em Fitzgerald et al. (2014).

1.6.5 Lei de Faraday e Lei de Ohm

A Lei de Faraday expressa por (11) é um princípio fundamental do eletromagnetismo que tem aplicações diretas na análise de circuitos que contêm componentes com indutores e transformadores, em que desempenha a Força Eletromotriz Induzida (FEM).

$$E = -N \cdot \frac{d\Phi}{dt} \quad (11)$$

A Lei de Ohm expressa em (12) afirma que a tensão (V) em um resistor (R) é diretamente proporcional à corrente (I) conduzida através do componente resistivo:

$$V = R \cdot I \quad (12)$$

1.6.6 Tensão de Excitação $\vec{E}_f$

A Tensão de Excitação ($\vec{E}_f$) é um parâmetro relevante para a compreensão de máquinas síncronas, como geradores e motores. Tendo em que representa a tensão induzida no enrolamento do rotor devido ao campo magnético gerado pela corrente de excitação (FITZGERALD et al., 2014). A magnitude de $\vec{E}_f$ é diretamente proporcional à corrente de excitação e ao número de espiras do enrolamento do rotor. O ângulo de carga (δ) é formado entre a tensão de excitação ($\vec{E}_f$) e a tensão do terminal (V_t) da máquina síncrona. δ indica o modo a operação da máquina, pois ele determina o fluxo de potência ativa entre a máquina e a rede elétrica.

Para a determinação da equação de tensão fasorial da Tensão de excitação (E_f), em motores (13) e em geradores (1).

$$\hat{E}_f = \hat{V}_t - R_a \cdot \hat{I}_a - j \cdot X_s \cdot \hat{I}_a \quad (13)$$

Com base nos conceitos apresentados, no próximo capítulo é detalhado a metodologia empregada no estudo. Descreve-se os passos para o desenvolvimento do programa computacional, destacando a importância dos métodos utilizados e sugerindo possíveis melhorias e aplicações futuras para a ferramenta.

2. METODOLOGIA

Nesta seção, os procedimentos e ferramentas utilizados para o desenvolvimento do programa é descrita em detalhes de modo que permita a reprodutibilidade e a clareza dos métodos empregados.

2.1 Importação de Bibliotecas

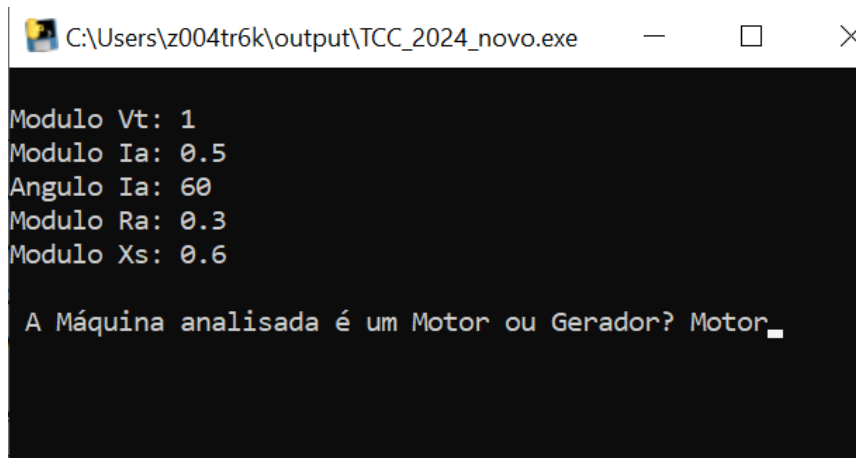
Para o desenvolvimento do programa, foram utilizadas as seguintes bibliotecas Python:

- math: Para operações matemáticas básicas.
- cmath: Para conversões entre coordenadas polares e retangulares.
- numpy: Para operações matemáticas avançadas, especialmente com vetores e arrays.
- matplotlib.pyplot: Para geração de gráficos.

2.2 Entrada de dados

Ao executar o programa, o *prompt* de comando se abre e solicita ao usuário a entrada dos módulos e ângulos das variáveis (V_t) , (I_a) , (R_a) e (X_s) , considerando (V_t) e (I_a) como grandezas vetoriais e (R_a) e (X_s) como grandezas escalares, conforme o exemplo da Figura 5, que são valores essenciais para os cálculos subsequentes.

Figura 5: Interface de Entrada de Dados do programa.



Fonte: Elaborado pelo autor.

2.3 Conversão de Coordenadas

Os ângulos fornecidos pelo usuário são inicialmente em graus, mas para realizar operações matemáticas, é necessário convertê-los para radianos. A conversão é feita utilizando a equação (14):

$$\hat{\text{Angulo em radianos}} = \left(\frac{\hat{\text{Angulo em graus}} \cdot \pi}{180} \right) \quad (14)$$

2.4 Cálculo dos Fasores

Os valores em coordenadas polares são convertidos para coordenadas retangulares utilizando a função `rect` da biblioteca `cmath`. Em seguida, são realizados os cálculos necessários para determinar os fasores $(R_a \cdot I_a)$ e $(j \cdot X_s \cdot I_a)$.

2.4.2 Referência de Fase

A Tensão do Terminal (V_t) é determinada como referência e é representada como um fasor horizontal no diagrama, com um ângulo de fase de 0 graus, para que os demais fasores sejam desenhados em relação à V_t . Então, ao utilizar a Tensão do Terminal (V_t) como ponto de partida simplifica a análise e a elaboração do diagrama.

2.5 Determinação do tipo de máquina

O usuário deve especificar o tipo de máquina analisada, conforme a Figura 5, pois, dependendo do tipo, os cálculos para o fasor E_{af} variam. O que traz a necessidade de utilizar a equação (13) para motores e a equação (1) para os geradores.

2.6 Geração do Diagrama

Os fasores V_t , I_a , $j.X_s.I_a$, $R_a.I_a$ e E_f são calculados e plotados utilizando a função `quiver` da biblioteca `matplotlib.pyplot`. A função `quiver` é utilizada para criar gráficos de vetores que representam os fasores, sendo cada vetor é definido por seu ponto de origem e seu destino.

Por fim, cada vetor é dimensionado com base em suas coordenadas de origem e destino, o que permite uma representação visual clara das magnitudes e direções dos fasores. Para facilitar a visualização, cada fasor é representado por uma cor diferente: azul para (V_t), amarelo para corrente de armadura (I_a), verde para ($j.X_s.I_a$), vermelho para ($R_a.I_a$) e preto para a tensão interna (E_f).

A montagem do Diagrama Fasorial é uma etapa importante na análise de máquinas síncronas, o que possibilita a visualização das relações de fase entre as tensões e correntes. Então, é descrito o procedimento genérico para a construção do Diagrama Fasorial:

- **Desenho da Tensão Terminal (V_t):** É indicado que se inicie por meio do desenho o fasor de tensão terminal (V_t) como um vetor horizontal, uma vez que

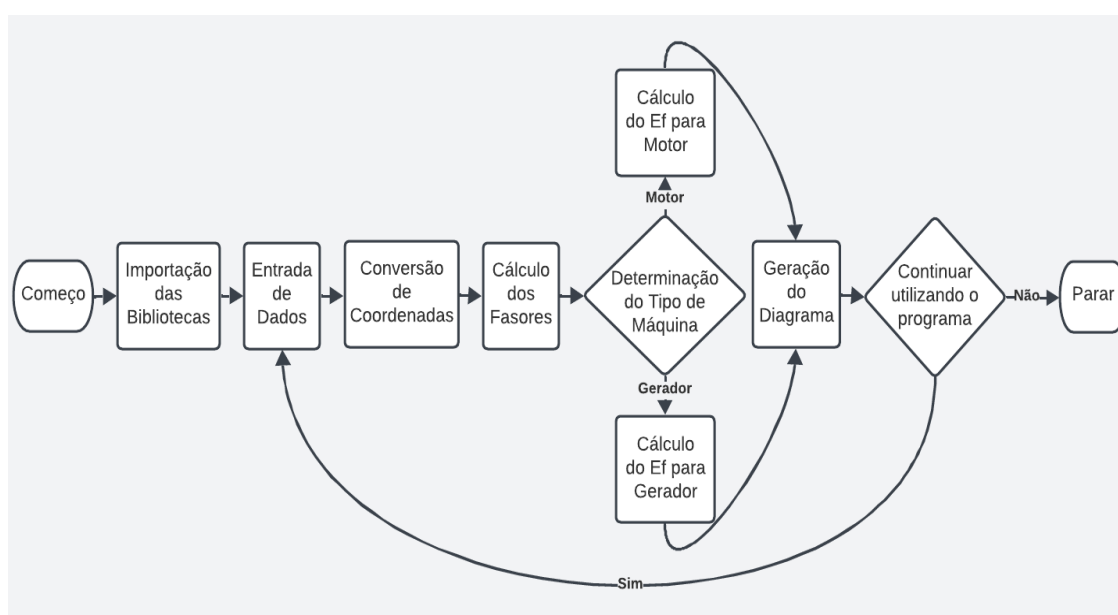
serve ela como referência para os demais fasores.

- **Desenho da Corrente de Armadura (I_a):** Deve-se desenhar o fasor de corrente de armadura (I_a). com o ângulo de atraso ou avanço apropriado em relação a V_t . Por exemplo, se I_a está atrasada em 30° em relação a V_t , é desenhado I_a com um ângulo de -30° .
- **Cálculo e Desenho da Tensão na resistência ($R_a \cdot I_a$):** Deve ser calculado a tensão na resistência ($R_a \cdot I_a$) e desenhado este fasor em fase com a corrente de armadura (I_a).
- **Cálculo e Desenho da Tensão na reatância ($j \cdot X_s \cdot I_a$):** Deve ser calculado a tensão na reatância ($j \cdot X_s \cdot I_a$) e desenhado este fasor perpendicular a I_a . Se I_a está atrasada, $j \cdot X_s \cdot I_a$ é adiantada em 90° em relação a I_a .
- **Soma Fasorial para Encontrar a Tensão Interna (E_f):** Deve ser somado os Fasores V_t , $R_a \cdot I_a$ e $j \cdot X_s \cdot I_a$ para encontrar a tensão interna (E_f). A soma pode ser feita graficamente no Diagrama Fasorial ou analiticamente utilizando coordenadas retangulares ou polares.

2.7 Fluxograma Ilustrativo

Para complementar a metodologia, foi criado um fluxograma ilustrativo do algoritmo, Figura 6. Este fluxograma ajuda a visualizar o fluxo do programa de forma clara e estruturada, destacando cada etapa do processo desde a importação das bibliotecas até a geração do diagrama final.

Figura 6: Fluxograma ilustrativo do algoritmo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com os fundamentos estabelecidos, no capítulo seguinte, é detalha-se os procedimentos práticos utilizados para elaboração da ferramenta. Ademais, é abordada a lógica utilizada na elaboração do programa em linguagem de programação Python.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para o desenvolvimento da ferramenta de cálculo, optou-se pelo Python devido à acessibilidade gratuita da linguagem de programação Python e conteúdo disponível para estudo.

Foi necessário determinar alguns parâmetros para a realização do cálculo, como referência de fase comum 0° para (V_t).

Foi permitido uma análise mais direta e intuitiva dos fasores no domínio da frequência e, segundo (Chapman, 2011), uma prática comum em análises de circuitos CA.

Para simplificar o cálculo matemático entre coordenadas polares e retangulares também se definiu como 0° os ângulos dos fasores. Recurso útil ao utilizar ferramentas computacionais para simulação e análise (Hayt, et al., 2019).

3.1 Validação da ferramenta desenvolvida

Para validar a ferramenta desenvolvida, são abordadas seis situações que simulam o comportamento da máquina síncrona. São resolvidos três exercícios para cada um dos seguintes casos: sistemas capacitivo, indutivo e unitário, tanto para Máquinas de Motor quanto para Gerador.

3.1.1 Caso 1: Máquinas Síncronas em modo de operação com fator de potência Capacitivo

Um motor síncrono, de polos lisos, com $X_s = 0,600 \text{ p.u.}$ e $R_a = 0,300$, é alimentado por uma tensão de terminal $V_t = 1,000 \angle 0^\circ \text{ p.u.}$ e $I_a = 0,500 \angle 60^\circ \text{ p.u.}$

- a) Determine a tensão de excitação $\vec{E}_f$ e o respectivo ângulo de carga. Faça o Diagrama Fasorial.
- b) Refaça a) para o caso de Gerador Síncrono.

Dados fornecidos:

$$V_t = 1,000 \angle 0^\circ \text{ p.u.};$$

$$I_a = 0,500 \angle 60^\circ \text{ p.u.};$$

$$R_a = 0,300 \text{ p.u.};$$

$$X_s = 0,600 \text{ p.u.}$$

- a) Para o caso de um Motor Síncrono, deve-se utilizar a equação (13). Ademais, são identificados o ângulo Φ formado entre $\hat{V}_t$ e $\hat{I}_a$ e δ o ângulo formado entre $\hat{E}_f$ e $\hat{V}_t$.

Ao substituir os dados informados na equação (13), é obtido:

$$\hat{E}_f = 1,000 \angle 0^\circ - 0,300 \angle 0^\circ . 0,500 \angle 60^\circ - j . 0,600 \angle 0^\circ . 0,500 \angle 60^\circ \rightarrow$$

$$\rightarrow \hat{E}_f = 1,000 \angle 0^\circ - 0,150 \angle 60^\circ - 0,300 \angle (150^\circ) \rightarrow$$

$$\therefore \hat{E}_f = 1,217 \angle (-13,29^\circ).$$

Assim, é obtido os valores dos módulos e ângulos dos fasores:

$$\hat{V}_t = 1,000 \angle 0^\circ \text{ p.u.};$$

$$R_a . \hat{I}_a = 0,150 \angle 60^\circ \text{ p.u.};$$

$$j . X_s . \hat{I}_a = 0,300 \angle (150^\circ) \text{ p.u.};$$

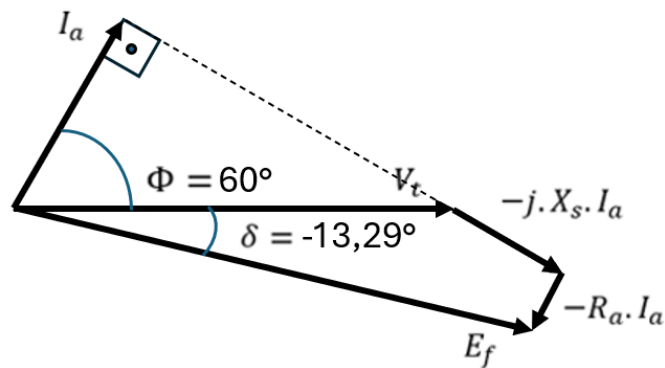
$$\hat{E}_f = 1,217 \angle (-13,29^\circ) \text{ p.u.};$$

$$\Phi = 60^\circ;$$

$$\delta = -13,29^\circ.$$

Assim, com os valores obtidos, foi possível a elaboração do Diagrama Fasorial, representado na Figura 7:

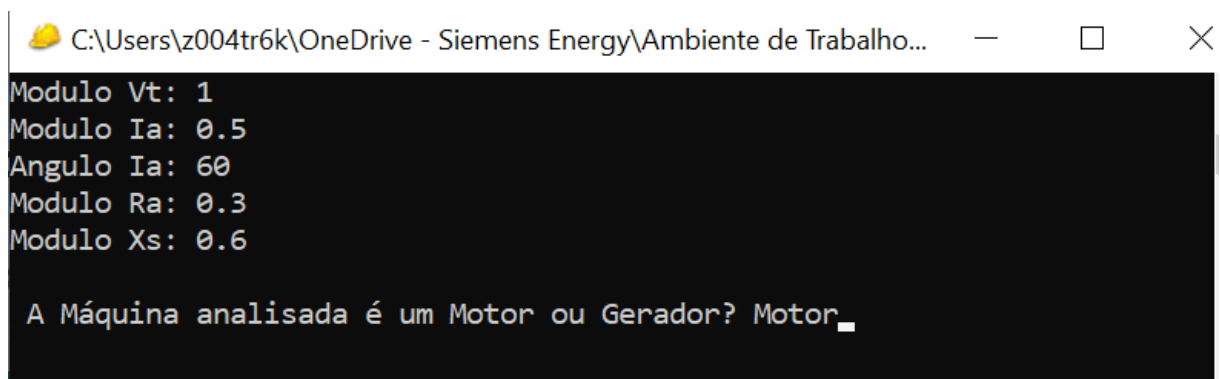
Figura 7: Diagrama Fasorial de um Motor Síncrono operando com um fator de potência Capacitivo elaborado manualmente referente ao Caso 1, questão a).



Fonte: elaborado pelo autor.

Após resolver o problema manualmente e desenhar o diagrama, os valores indicados pelo exercício foram inseridos na ferramenta desenvolvida. Ao utilizar os mesmos dados fornecidos pelo enunciado no programa, Figura 8, a ferramenta gerou o Diagrama Fasorial, indicando o módulo e o ângulo de cada fasor, conforme ilustrado na Figura 9.

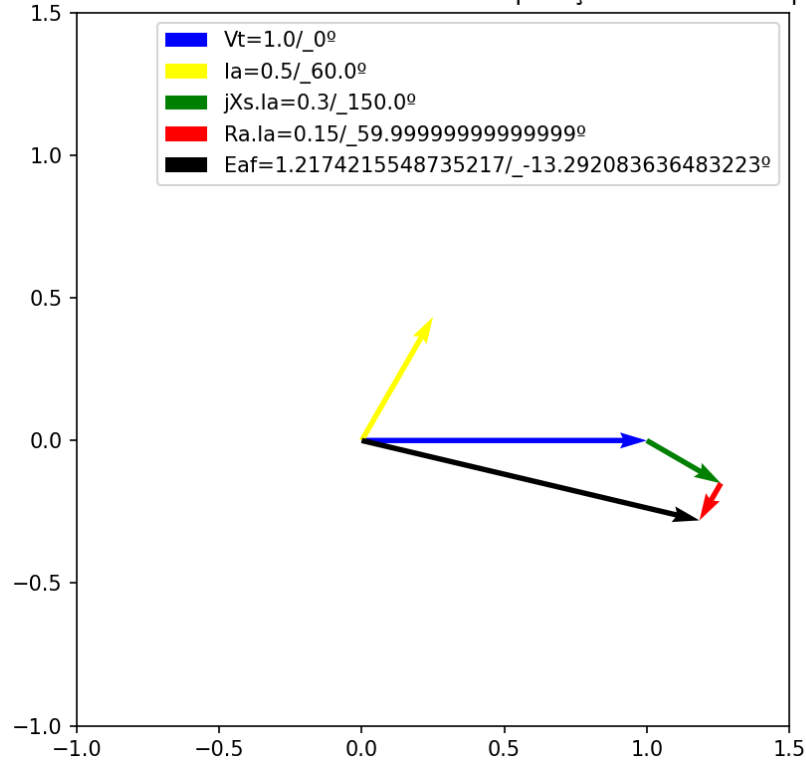
Figura 8: Interface de Entrada de Dados do programa- Caso 1, questão a).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 9: Diagrama Fasorial de Motor Síncrono operando com um fator de potência Capacitivo gerado pela ferramenta desenvolvida referente ao Caso 1, questão a).

DIAGRAMA FASORIAL - MOTOR Síncrono em modo de operação com fator de potência Capacitivo



Fonte: Elaborado pelo autor.

- b) Para o caso de um Gerador Síncrono, é necessário a utilização da equação (1). Sendo, o ângulo Φ formado entre $\hat{V}_t$ e $\hat{I}_a$ e δ o ângulo formado entre $\hat{E}_f$ e $\hat{V}_t$.

Ao substituir os dados informados na equação (1), é obtido:

$$\hat{E}_f = 1,000 \angle 0^\circ + 0,300 \angle 0^\circ . 0,500 \angle 60^\circ + j . 0,600 \angle 0^\circ . 0,500 \angle 60^\circ \rightarrow$$

$$\rightarrow \hat{E}_f = 1,000 \angle 0^\circ + 0,150 \angle 60^\circ + 0,300 \angle (150^\circ) \rightarrow$$

$$\therefore \hat{E}_f = 0,862 \angle (18,950^\circ).$$

Assim, é obtido os valores dos módulos e ângulos dos fasores:

$$\hat{V}_t = 1,000 \angle 0^\circ \text{ p.u.};$$

$$R_a \cdot \hat{I}_a = 0,150 \angle 60^\circ \text{ p.u.};$$

$$j \cdot X_s \cdot \hat{I}_a = 0,300 \angle (150^\circ) \text{ p.u.};$$

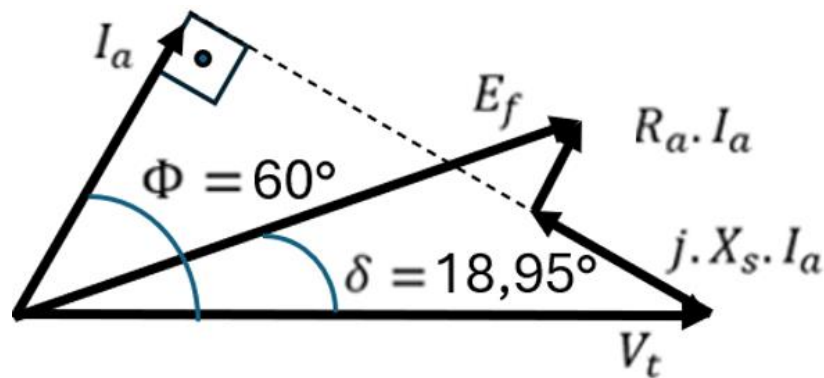
$$\hat{E}_f = 0,862 \angle (18,950^\circ) \text{ p.u.};$$

$$\Phi = 60^\circ;$$

$$\delta = 18,950^\circ.$$

Então, com os valores obtidos, foi possível a elaboração do Diagrama Fasorial, representado na Figura 10:

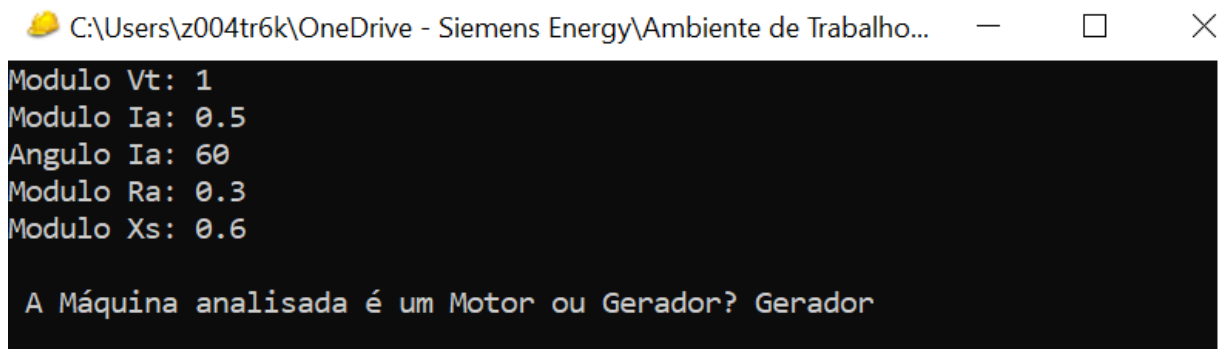
Figura 10: Diagrama Fasorial de um Gerador Síncrono operando com um fator de potência Capacitivo elaborado manualmente referente ao Caso 2, questão b).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Após resolver o problema manualmente e desenhar o diagrama, os valores indicados pelo exercício foram inseridos na ferramenta desenvolvida. Ao utilizar os mesmos dados fornecidos pelo enunciado no programa, Figura 11, a ferramenta gerou o Diagrama Fasorial, indicando o módulo e o ângulo de cada fasor, conforme ilustrado na Figura 12.

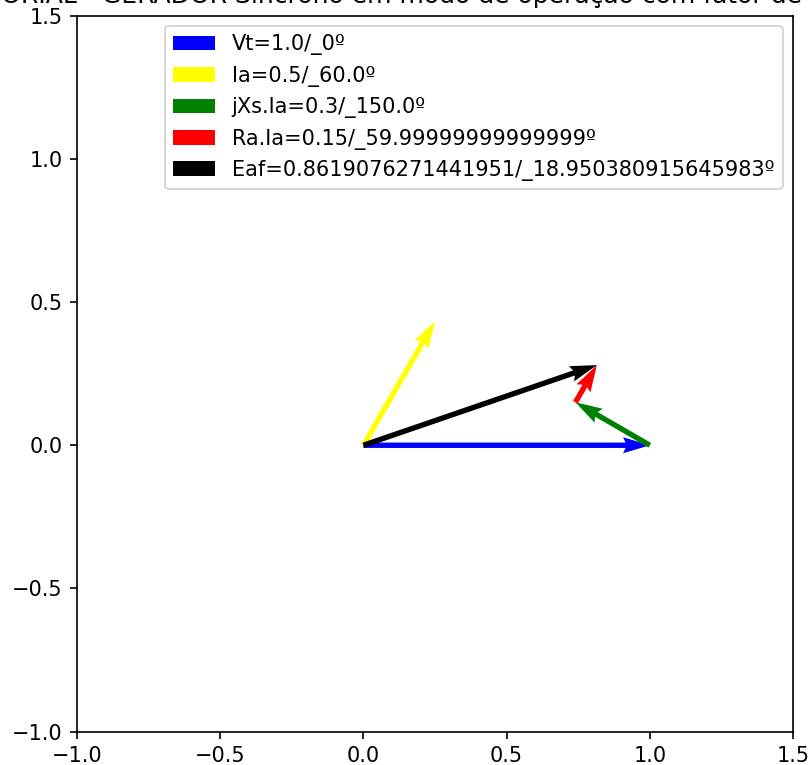
Figura 11: Interface de Entrada de Dados do programa - Caso 1, questão b).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 12: Diagrama Fasorial de um Gerador Síncrono operando com um fator de potência Capacitivo gerado pela ferramenta desenvolvida referente ao Caso 1, questão b).

DIAGRAMA FASORIAL - GERADOR Síncrono em modo de operação com fator de potência Capacitivo



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.1.2 Caso 2: Máquinas Síncronas em modo de operação com fator de potência Indutivo

Um motor síncrono, de polos lisos, com $X_s = 0,8 \text{ p.u.}$ e $R_a = 0,3$, é alimentado por uma tensão de terminal $V_t = 1 \angle 0^\circ \text{ p.u.}$ e $I_a = 0,5 \angle -30^\circ \text{ p.u.}$

- Determine a tensão de excitação $\vec{E}_f$ e o respectivo ângulo de carga. Faça o Diagrama Fasorial.
- Refaça a) para o caso de Gerador Síncrono.

Dados fornecidos:

$$X_s = 0,800 \text{ p.u.};$$

$$R_a = 0,300 \text{ p.u.};$$

$$V_t = 1,000 \angle 0^\circ \text{ p.u.};$$

$$I_a = 0,500 \angle -30^\circ \text{ p.u.};$$

$$\Phi = -30^\circ.$$

- Para o caso de um Motor Síncrono, é necessário utilizar a equação (13). Sendo, o ângulo Φ formado entre $\hat{V}_t$ e $\hat{I}_a$ e δ o ângulo formado entre $\hat{E}_f$ e $\hat{V}_t$.

Então, ao substituir os dados informados em (13):

$$\hat{E}_f = 1,000 \angle 0^\circ - 0,300 \angle 0^\circ \cdot 0,500 \angle -30^\circ - j \cdot 0,800 \angle 0^\circ \cdot 0,500 \angle 60^\circ \rightarrow$$

$$\rightarrow \hat{E}_f = 1,000 \angle 0^\circ - 0,150 \angle -30^\circ - 0,400 \angle (150^\circ) \rightarrow$$

$$\therefore \hat{E}_f = 0,723 \angle (-22,050^\circ).$$

Assim, é determinado os módulos e ângulos dos fasores, então:

$$\hat{V}_t = 1,000 \angle 0^\circ \text{ p.u.};$$

$$R_a \cdot \hat{I}_a = 0,150 \angle -30^\circ \text{ p.u.};$$

$$j \cdot X_s \cdot \hat{I}_a = 0,400 \angle (60^\circ) \text{ p.u.};$$

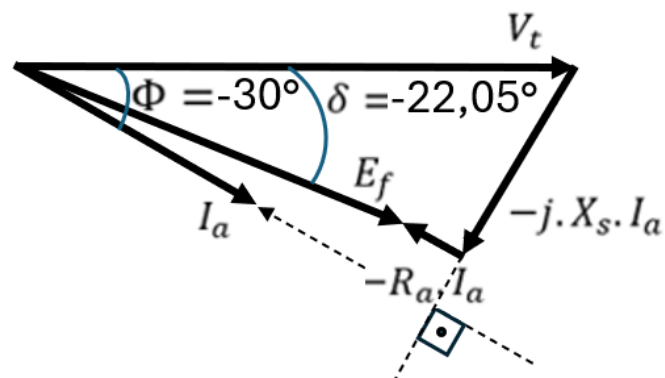
$$\hat{E}_f = 0,723 \angle (-22,050^\circ) \text{ p.u.};$$

$$\Phi = -30^\circ;$$

$$\delta = -22,050^\circ.$$

Então, com os valores obtidos, foi possível a elaboração do diagrama fasorial, representado na Figura 13:

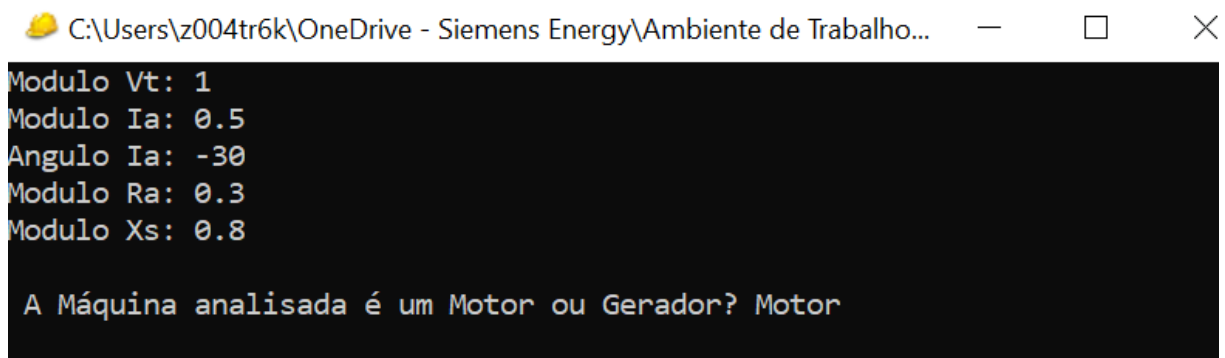
Figura 13: Diagrama Fasorial de um Motor Síncrono operando com um fator de potência Indutivo elaborado manualmente referente ao Caso 2, questão a).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Após resolver o problema manualmente e desenhar o diagrama, os valores indicados pelo exercício foram inseridos na ferramenta desenvolvida. Ao utilizar os mesmos dados fornecidos pelo enunciado no programa, Figura 14, a ferramenta gerou o Diagrama Fasorial, indicando o módulo e o ângulo de cada fasor, conforme ilustrado na Figura 15.

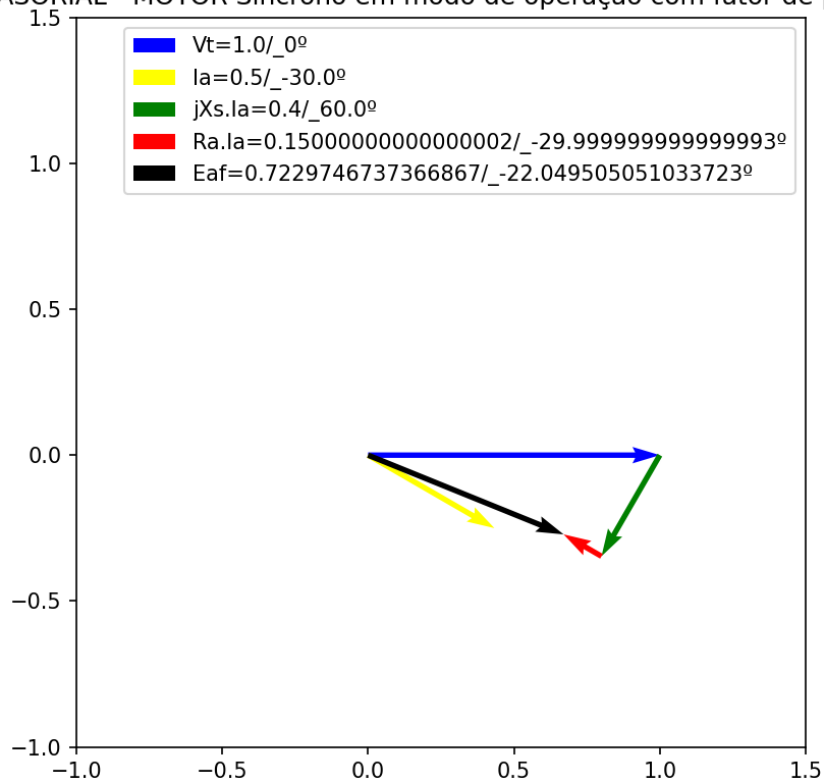
Figura 14: Interface de Entrada de Dados do programa - Caso 2, questão a).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 15: Diagrama Fasorial de um Motor Síncrono operando com um fator de potência Indutivo elaborado pela ferramenta desenvolvida referente ao Caso 2, questão a)

DIAGRAMA FASORIAL - MOTOR Síncrono em modo de operação com fator de potência Indutivo



Fonte: Elaborado pelo autor.

- b) Para o caso de um Gerador Síncrono deve ser utilizada a equação (1). Sendo, o ângulo Φ formado entre $\hat{V}_t$ e $\hat{I}_a$ e δ o ângulo formado entre $\hat{E}_f$ e $\hat{V}_t$.

Então, ao substituir os dados informados em (1):

$$\begin{aligned}\hat{E}_f &= 1,000 \angle 0^\circ + 0,300 \angle 0^\circ \cdot 0,500 \angle (-30^\circ) + j \cdot 0,800 \angle 0^\circ \cdot 0,500 \angle 60^\circ \rightarrow \\ &\rightarrow \hat{E}_f = 1,000 \angle 0^\circ + 0,150 \angle (-30^\circ) + 0,400 \angle (150^\circ) \rightarrow \\ &\therefore \hat{E}_f = 1,357 \angle (11,535^\circ).\end{aligned}$$

Assim, é possível determinar os módulos e ângulos dos fasores, então:

$$\hat{V}_t = 1,000 \angle 0^\circ \text{ p.u.};$$

$$R_a \cdot \hat{I}_a = 0,150 \angle -30^\circ \text{ p.u.};$$

$$j \cdot X_s \cdot \hat{I}_a = 0,400 \angle (150^\circ) \text{ p.u.};$$

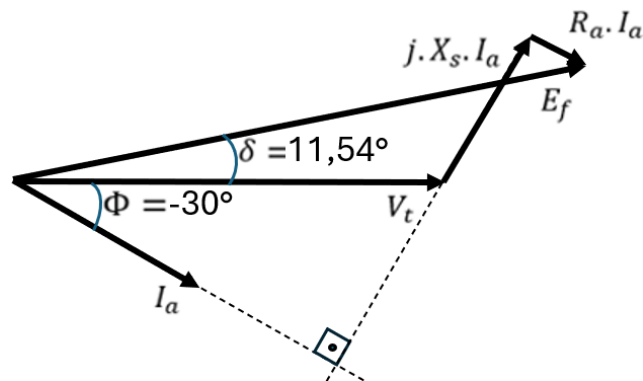
$$\hat{E}_f = 1,357 \angle (11,535^\circ) \text{ p.u.};$$

$$\Phi = -30^\circ;$$

$$\delta = 11,535^\circ.$$

Então, com os valores obtidos, foi possível a elaboração do diagrama fasorial, representado na Figura 16:

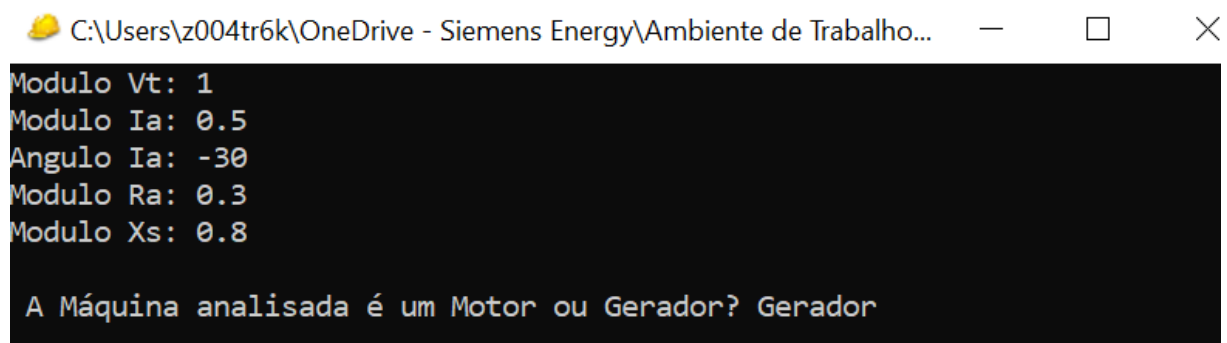
Figura 16: Diagrama Fasorial de um Gerador Síncrono operando com um fator de potência Indutivo elaborado manualmente referente ao Caso 2, questão b).



Fonte: Elaborado pelo autor.

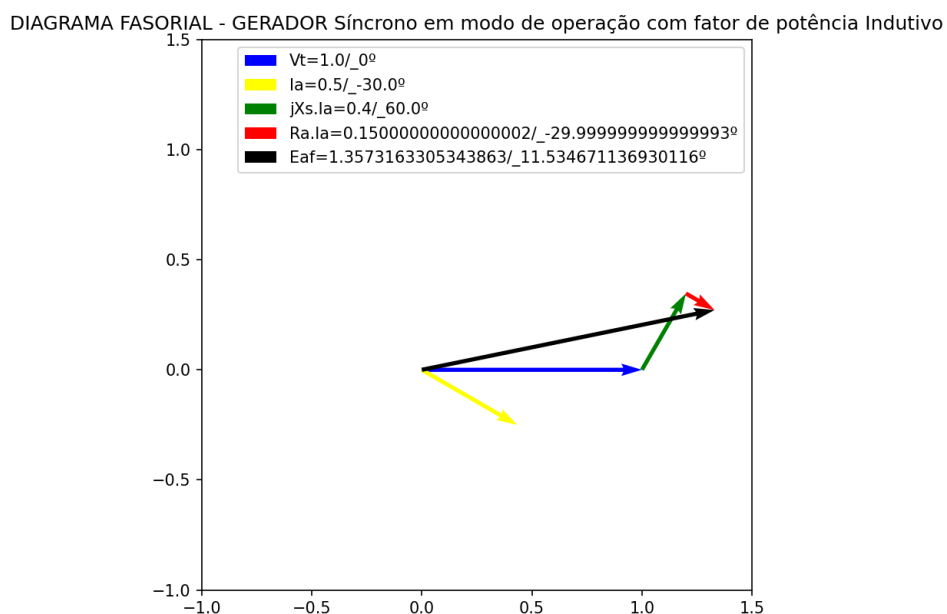
Após resolver o problema manualmente e desenhar o diagrama, os valores indicados pelo exercício foram inseridos na ferramenta desenvolvida. Ao utilizar os mesmos dados fornecidos pelo enunciado no programa, Figura 17, a ferramenta gerou o Diagrama Fasorial, indicando o módulo e o ângulo de cada fasor, conforme ilustrado na Figura 18.

Figura 17: Interface de Entrada de Dados do programa - Caso 2, questão b).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 18: Diagrama Fasorial de um Gerador Síncrono operando com um fator de potência Indutivo elaborado pela ferramenta desenvolvida referente ao Caso 2, questão b).



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.1.3 Caso 3: Máquinas Síncronas em modo de operação com fator de potência Unitário

Um motor síncrono, de polos lisos, com $X_s = 0,8 \text{ p.u.}$ e $R_a = 0,3$, é alimentado por uma tensão de terminal $V_t = 1 \angle 0^\circ \text{ p.u.}$ e $I_a = 0,5 \angle 0^\circ \text{ p.u.}$

- Determine a tensão de excitação $\vec{E}_f$ e o respectivo ângulo de carga. Faça o Diagrama Fasorial.
- Refaça a) para o caso de Gerador Síncrono.

Dados fornecidos:

$$X_s = 0,800 \text{ p.u.};$$

$$R_a = 0,300 \text{ p.u.};$$

$$V_t = 1,000 \angle 0^\circ \text{ p.u.};$$

$$I_a = 0,500 \angle 0^\circ \text{ p.u.}$$

- Para o caso de um Motor Síncrono, deve-se utilizar a equação (13). Sendo, o ângulo Φ formado entre $\hat{V}_t$ e $\hat{I}_a$ e δ o ângulo formado entre $\hat{E}_f$ e $\hat{V}_t$.

Então, ao substituir os dados informados em (13):

$$\hat{E}_f = 1,000 \angle 0^\circ - 0,300 \angle 0^\circ \cdot 0,500 \angle 0^\circ - j \cdot 0,800 \angle 0^\circ \cdot 0,500 \angle 0^\circ \rightarrow$$

$$\rightarrow \hat{E}_f = 1,000 \angle 0^\circ - 0,150 \angle 0^\circ - 0,400 \angle (90^\circ) \rightarrow$$

$$\therefore \hat{E}_f = 0,939 \angle (-25,201^\circ).$$

Assim, é possível determinar os módulos e ângulos dos fasores, então:

$$\hat{V}_t = 1,000 \angle 0^\circ \text{ p.u.};$$

$$R_a \cdot \hat{I}_a = 0,150 \angle 0^\circ \text{ p.u.};$$

$$j \cdot X_s \cdot \hat{I}_a = 0,400 \angle (90^\circ) \text{ p.u.};$$

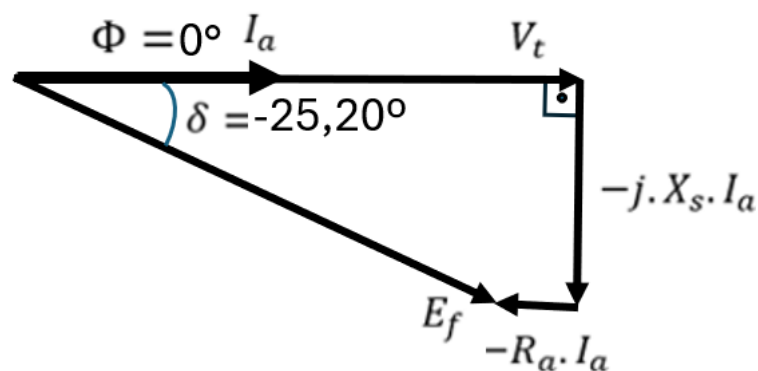
$$\hat{E}_f = 0,939 \angle (-25,201^\circ) \text{ p.u.};$$

$$\Phi = 0^\circ;$$

$$\delta = -25,201^\circ.$$

Então, com os valores obtidos, foi possível a elaboração do Diagrama Fasorial, representado na Figura 19:

Figura 19: Diagrama Fasorial de um Motor Síncrono operando com um fator de potência Unitário elaborado manualmente referente ao Caso 3, questão a).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Após resolver o problema manualmente e desenhar o diagrama, os valores indicados pelo exercício foram inseridos na ferramenta desenvolvida. Ao utilizar os mesmos dados fornecidos pelo enunciado no programa, Figura 20, a ferramenta gerou o Diagrama Fasorial, indicando o módulo e o ângulo de cada fasor, conforme ilustrado na Figura 21.

Figura 20: Interface de Entrada de Dados do programa - Caso 3, questão a).

```

C:\Users\z004tr6k\OneDrive - Siemens Energy\Ambiente de Traba...
Modulo Vt: 1
Modulo Ia: 0.5
Angulo Ia: 0
Modulo Ra: 0.3
Modulo Xs: 0.8

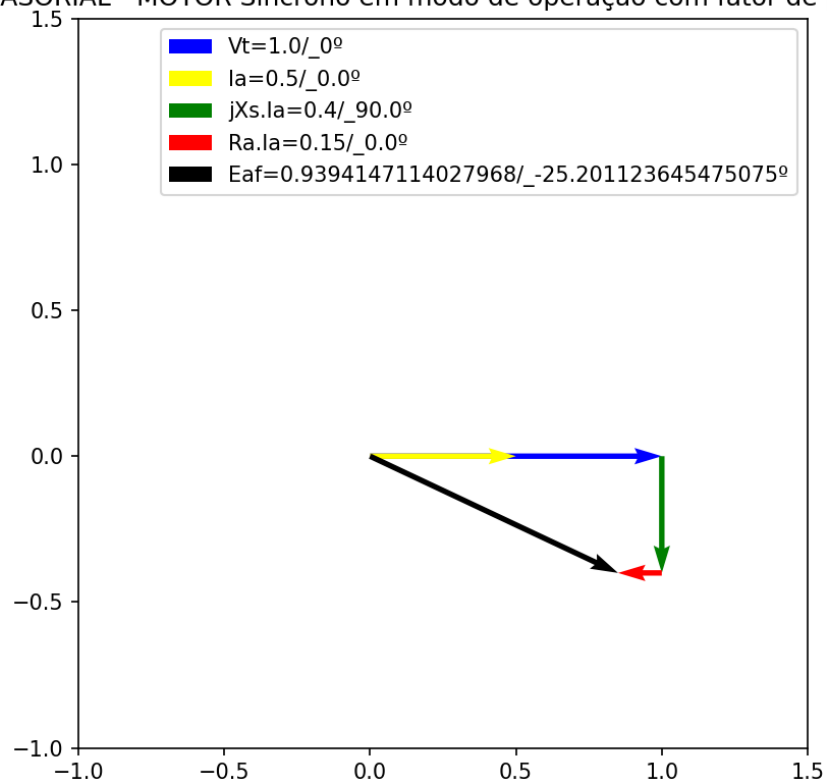
A Máquina analisada é um Motor ou Gerador? Motor

```

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 21: Diagrama Fasorial de um Motor Síncrono operando com um fator de potência Unitário elaborado pela ferramenta desenvolvida referente ao Caso 3, questão a).

DIAGRAMA FASORIAL - MOTOR Síncrono em modo de operação com fator de potência Unitário



Fonte: Elaborado pelo autor.

- b) Para o caso de um Gerador Síncrono, deve-se utilizar a equação (1). Sendo, o ângulo Φ formado entre $\hat{V}_t$ e $\hat{I}_a$ e δ o ângulo formado entre $\hat{E}_f$ e $\hat{V}_t$.

Então, ao substituir os dados informados em (1):

$$\begin{aligned}\hat{E}_f &= 1,000 \angle 0^\circ + 0,300 \angle 0^\circ \cdot 0,500 \angle (0^\circ) + j \cdot 0,800 \angle 0^\circ \cdot 0,500 \angle 0^\circ \rightarrow \\ &\rightarrow \hat{E}_f = 1,000 \angle 0^\circ + 0,150 \angle (0^\circ) + 0,400 \angle (90^\circ) \rightarrow \\ &\therefore \hat{E}_f = 1,218 \angle (19,179^\circ).\end{aligned}$$

Assim, é possível obter os módulos e ângulos dos fasores, então:

$$\hat{V}_t = 1,000 \angle 0^\circ \text{ p.u.};$$

$$R_a \cdot \hat{I}_a = 0,150 \angle 0^\circ \text{ p.u.};$$

$$j \cdot X_s \cdot \hat{I}_a = 0,400 \angle (90^\circ) \text{ p.u.};$$

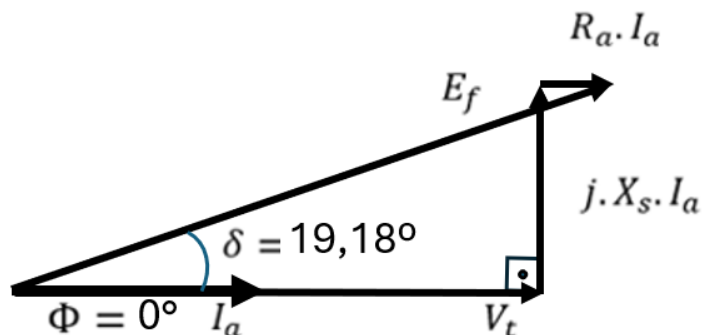
$$\hat{E}_f = 1,218 \angle (19,179^\circ) \text{ p.u.};$$

$$\Phi = 0^\circ;$$

$$\delta = 19,179^\circ.$$

Então, com os valores obtidos, foi possível a elaboração do Diagrama Fasorial, representado na Figura 22:

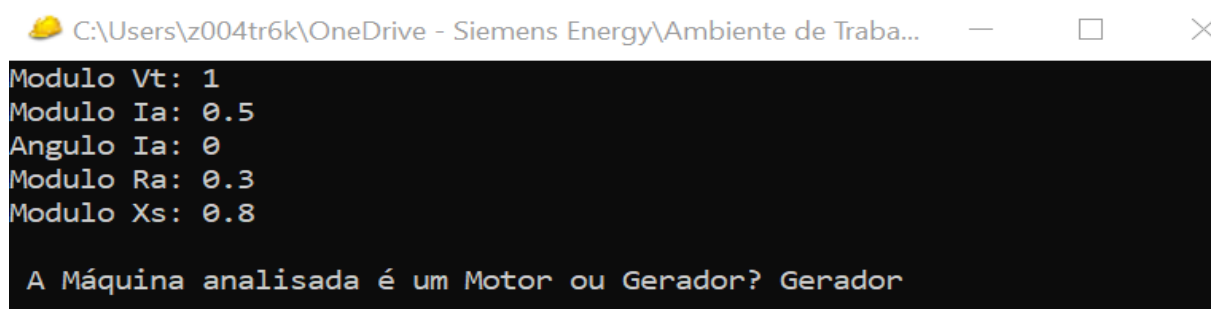
Figura 22: Diagrama de fasores para Gerador Síncrono operando com um fator de potência Unitário.



Fonte: Elaborado pelo autor.

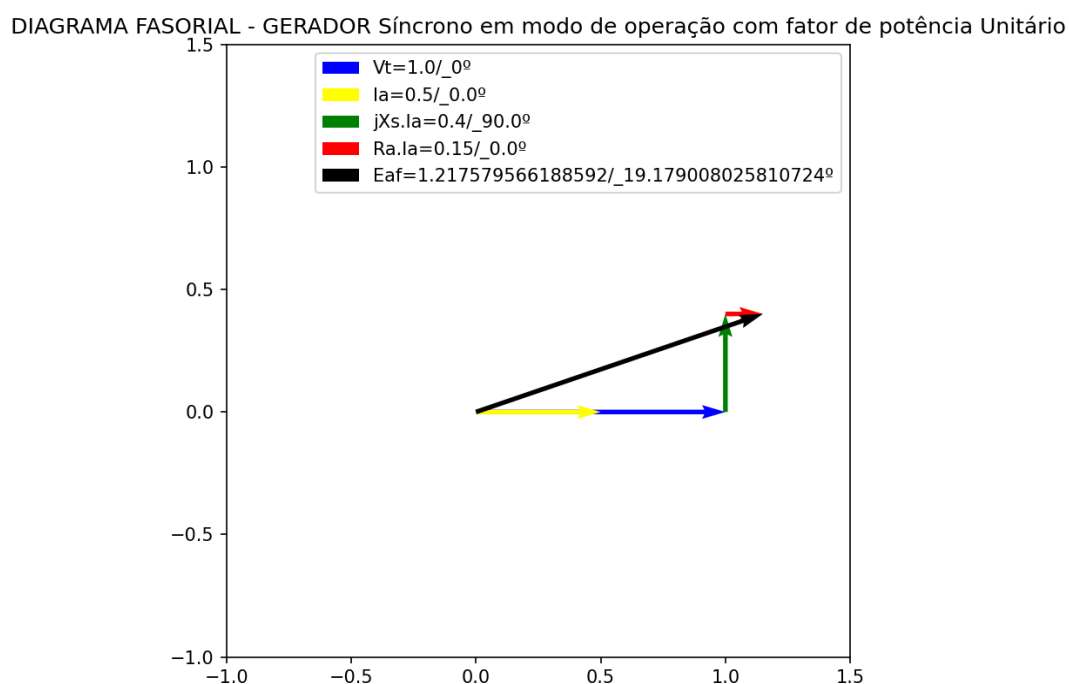
Após resolver o problema manualmente e desenhar o diagrama, os valores indicados pelo exercício foram inseridos na ferramenta desenvolvida. Ao utilizar os mesmos dados fornecidos pelo enunciado no programa, Figura 23, a ferramenta gerou o Diagrama Fasorial, indicando o módulo e o ângulo de cada fasor, conforme ilustrado na Figura 24.

Figura 23: Interface de Entrada de Dados do programa - Caso 3, questão b)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 24: Diagrama Fasorial de um Gerador Síncrono operando com um fator de potência Unitário elaborado pela ferramenta desenvolvida referente ao Caso 3, questão b).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com base nos resultados, o capítulo seguinte é abordada as principais conclusões e implicações do estudo, destacando a importância dos métodos utilizados e sugerindo possíveis melhorias e aplicações futuras para a ferramenta.

4. CONCLUSÕES

O desenvolvimento do programa computacional em linguagem Python para cálculo e geração de diagramas de fasores para máquinas síncronas de corrente alternada (CA) de polos lisos tem alto caráter educacional, pois facilita a compreensão do conteúdo ao abordar a representação gráfica do diagrama de forma interativa e visual. O que a torna mais didática no quesito de identificação e interpretação do comportamento do sistema especificado pelo operador. Assim, é possibilitada a redução da curva de aprendizado dos alunos.

O programa demonstra precisão ao calcular de forma precisa e respeitar as proporções dos fasores. Garantindo as representações gráficas fiel às condições reais de operação.

Portanto, a ferramenta é versátil, intuitiva e adaptável. Para trabalhos futuros, é sugerido a implementação o programa para o cálculo de máquinas elétricas síncronas de polos salientes; O desenvolvimento de aplicativos para celulares, e o aprimoramento da interface do programa. De modo que a complemente e a torne mais prática, interativa e útil para estudantes e profissionais.

5. REFERÊNCIAS

FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, C.; UMANS, S. D. Máquinas elétricas. 7. ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

CHAPMAN, Stephen J. Fundamentos de máquinas elétricas. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

JORDÃO, R. G. “Máquinas Síncronas”, Livros Técnicos e Científicos Editora S/A, 1984.

HAYT, W. H.; KEMMERLY, J. E.; DURBIN, S. M. Análise de Circuitos Elétricos. 8. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2019.

GURU, Bhag S.; HIZIROGLU, Huseyin R. Máquinas eléctricas y transformadores. 3. ed. Oxford: Universidad de Oxford, 2003.

CARVALHO, Geraldo. Máquinas elétricas: teoria e ensaios - transformadores, geradores e motores. 2. ed. revisada. São Paulo: Editora Érica, 2006

KOSOW, Irving. Máquinas elétricas e transformadores. Vol. 2. Rio de Janeiro: Globo, 1983

HUBERT, C. I. Máquinas Elétricas: Princípios de Operação, Análise e Controle. Pearson, 2002.

6. APÊNDICE A – ALGORITMO DIAGRAMA DE FASORES DE MÁQUINAS SÍNCRONAS DE POLOS LISOS EM PYTHON

```
import math as mt#biblioteca para operações matemáticas simples
import cmath as cmt#biblioteca para conversoes polar/retangular
import numpy as np#biblioteca para operações matemáticas simples -> engloba
mais funções relacionado a vetores/arrays/arraylist/vector
import matplotlib.pyplot as plt #biblioteca que permite gerar gráficos

#sabe-se que os vetores Vt, Ra e Xs quando em polar terão sempre angulo igual a
0°
Vt_pol_ang=0
Ra_pol_ang=0
Xs_pol_ang=0

print("Programa Auxiliar: Segunda Etapa da Disciplina (Máquinas Síncronas)-
Máquinas Elétricas \n\nATENÇÃO: Para facilitar a análise e comparação,
utilizaremos o sistema de unidades por unidade (p.u.) e em coordenadas polares
nesta ferramenta.\n\n")

while True:
#####      ENTRADA DE
DADOS#####

#Montando Vt polar
Vt_pol_mod=float(input("Modulo Vt: "))
#conversão angulo polar: Graus para Radianos. Porque na conversão de polar para
retangular o angulo deve ser em radianos
Vt_pol_ang_rad=(Vt_pol_ang*mt.pi)/180
#conversão polar para retangular
Vt_ret=cmt.rect(Vt_pol_mod,Vt_pol_ang_rad)#Vt Retangular

#Montando Ia polar
Ia_pol_mod=float(input("Modulo Ia: "))
Ia_pol_ang=float(input("Angulo Ia em graus: "))
#conversão angulo polar: Graus para Radianos.Porque na conversão de polar para
retangular o angulo deve ser em radianos
Ia_pol_ang_rad=(Ia_pol_ang*mt.pi)/180
#conversão polar para retangular
Ia_ret=cmt.rect(Ia_pol_mod,Ia_pol_ang_rad)#Ia Retangular

#Montando Ra polar
Ra_pol_mod=float(input("Modulo Ra: "))
#conversão angulo polar: Graus para Radianos.Porque na conversão de polar para
retangular o angulo deve ser em radianos
Ra_pol_ang_rad=(Ra_pol_ang*mt.pi)/180
```

```

#conversão polar para retangular
Ra_ret=cmt.rect(Ra_pol_mod,Ra_pol_ang_rad)#Ra Retangular

#Montando Xs polar
Xs_pol_mod=float(input("Modulo Xs: "))
#conversão angulo polar: Graus para Radianos.Porque na conversão de polar para
retangular o angulo deve ser em radianos
Xs_pol_ang_rad=(Xs_pol_ang*mt.pi)/180
#conversão polar para retangular
Xs_ret=cmt.rect(Xs_pol_mod,Xs_pol_ang_rad)#Xs Retangular

#####Ra.Ia#####
#####

Ra_la_ret=Ra_ret*Ia_ret
Ra_la_pol=cmt.polar(Ra_la_ret)
Ra_la_pol_mod=Ra_la_pol[0]
Ra_la_pol_ang_rad=Ra_la_pol[1]
Ra_la_pol_ang=Ra_la_pol_ang_rad*180/mt.pi

#####Eaf
Gerador/Motor#####

#operações matemáticas são feitas com os dados de entrada retangulares para
depois serem convertidos novamente e polares
Mot_or_Ger=str(input("\n A Máquina analisada é um Motor ou Gerador? "))
Mot_or_Ger=Mot_or_Ger.upper()
if Mot_or_Ger=="MOTOR":
    #jXs.Ia é uma variável que varia de acordo com o tipo de maquina pois ora o
jXs.Ia é positivo ora é negativo influenciando
    #se será somado ou subtraído 90 do seu fasor resultante
    jXs_la_ret=Xs_ret*Ia_ret #operação em retangular
    jXs_la_pol=cmt.polar(jXs_la_ret) #transformação de retangular para polar
    jXs_la_pol_mod=jXs_la_pol[0] #extraíndo o valor do modulo
    jXs_la_pol_ang_rad=jXs_la_pol[1]+(mt.pi/2) #extraíndo o valor do fasor em
radianos
    jXs_la_pol_ang=jXs_la_pol_ang_rad*180/mt.pi #transformado o fasor de
radianos para graus
    jXs_la_pol_ang=(Ia_pol_ang+90) #j negativo (subtrai 90)
    jXs_la_pol=((Xs_pol_mod*Ia_pol_mod),(Ia_pol_ang+90)) #Polar: jXs.Ia/_?º ->
Xs.Ia/_?º-90º
    Xs_la_ret=cmt.rect(Xs_pol_mod*Ia_pol_mod,Ia_pol_ang_rad+(mt.pi/2))
#Retangular: Xs_la
#Eaf final retangular
Eaf_ret=Vt_ret -(Ra_ret*Ia_ret) - (Xs_la_ret)
#convesão Eaf retangular para polar
Eaf_pol=cmt.polar(Eaf_ret)
#identificando Angulo e módulo do Eaf polar (gerar pontos)

```



```

Eaf_pol_mod=Eaf_pol[0]
Eaf_pol_ang_rad=Eaf_pol[1]
Eaf_pol_ang=Eaf_pol_ang_rad*180/mt.pi
#conversão angulo polar: Graus para Radianos. Porque na conversão de polar
para retangular o angulo deve ser em radianos
Eaf_pol_ang_rad=(Eaf_pol_ang*mt.pi)/180
#Ponto Ra.la(origem Eaf_x,Eaf_y)

Ra_la_x=np.cos(Ra_la_pol_ang_rad)*(-Ra_la_pol_mod)
Ra_la_y=np.sin(Ra_la_pol_ang_rad)*(-Ra_la_pol_mod)
print("\nRa.la polar: {}/_{}° p.u.".format(Ra_la_pol_mod,Ra_la_pol_ang))

#Ponto jXs.la (origem Vt_x,Vt_y) ok
jXs_la_x=np.cos(jXs_la_pol_ang_rad)*(-jXs_la_pol_mod)
jXs_la_y=np.sin(jXs_la_pol_ang_rad)*(-jXs_la_pol_mod)
print("\njXs.la polar: {}/_{}° p.u.".format(jXs_la_pol_mod,jXs_la_pol_ang))

print("\n\nEaf_pol={}/_{}°-{}/_{}°-
{}/_{}°".format(Vt_pol_mod,Vt_pol_ang,Ra_la_pol_mod,Ra_la_pol_ang,jXs_la_pol_m
od,jXs_la_pol_ang))
if la_pol_ang < 0:
    modo_operacao = "Indutivo"
elif la_pol_ang > 0:
    modo_operacao = "Capacitivo"
else:
    modo_operacao = "Unitário"
elif Mot_or_Ger=="GERADOR":
    #jXs.la é uma variável que varia de acordo com o tipo de maquina pois ora o
jXs.la é positivo ora é negativo influenciando
    #se será somado ou subtraído 90 do seu fasor resultante
    jXs_la_ret=Xs_ret*la_ret#operação em retangular
    jXs_la_pol=cmt.polar(jXs_la_ret)#transformação de retangular para polar
    jXs_la_pol_mod=jXs_la_pol[0]#extraindo o valor do modulo
    jXs_la_pol_ang_rad=jXs_la_pol[1]+(mt.pi/2)#extraindo o valor do fasor em
radianos
    jXs_la_pol_ang=jXs_la_pol_ang_rad*180/mt.pi#tranformado o fasor de
radianos para graus
    jXs_la_pol_ang=(la_pol_ang+90)#j positivo (soma 90)
    jXs_la_pol=((Xs_pol_mod*la_pol_mod),(la_pol_ang+90))#Polar: jXs.la/_?° ->
Xs.la/_?°+90°
    Xs_la_ret=cmt.rect(Xs_pol_mod*la_pol_mod,la_pol_ang_rad+(mt.pi/2))#Retang
ular: Xs_la
    #Eaf final retangular
    Eaf_ret=Vt_ret +(Ra_ret*la_ret) + (Xs_la_ret)
    #convesão Eaf retangular para polar
    Eaf_pol=cmt.polar(Eaf_ret)
    #identificando Angulo e módulo do Eaf polar (gerar pontos)
    Eaf_pol_mod=Eaf_pol[0]#extraindo o valor do modulo

```

```

Eaf_pol_ang_rad=Eaf_pol[1]#extraindo o valor do fasor em radianos
Eaf_pol_ang=Eaf_pol_ang_rad*180/mt.pi#transformado o fasor de radianos para
graus
print("\n\nEaf_pol={}/_{}_°+{}_/_{}_°+{}_/_{}_°".format(Vt_pol_mod,Vt_pol_ang,Ra_la_
pol_mod,Ra_la_pol_ang,jXs_la_pol_mod,jXs_la_pol_ang))
#Ponto Ra.la(origem Eaf_x,Eaf_y)
Ra_la_x=np.cos(Ra_la_pol_ang_rad)*(Ra_la_pol_mod)
Ra_la_y=np.sin(Ra_la_pol_ang_rad)*(Ra_la_pol_mod)
print("\nRa.la polar: {}/_{}_° p.u.".format(Ra_la_pol_mod,Ra_la_pol_ang))

#Ponto jXs.la (origem Vt_x,Vt_y) ok
jXs_la_x=np.cos(jXs_la_pol_ang_rad)*(jXs_la_pol_mod)
jXs_la_y=np.sin(jXs_la_pol_ang_rad)*(jXs_la_pol_mod)
print("\njXs.la polar: {}/_{}_° p.u.".format(jXs_la_pol_mod,jXs_la_pol_ang))
if la_pol_ang < 0:
    modo_operacao = "Indutivo"
elif la_pol_ang > 0:
    modo_operacao = "Capacitivo"
else:
    modo_operacao = "Unitário"
else:
    print("Erro na determinação da Máquina Síncrona, tente novamente e certifique
que está indicando Motor ou Gerador")
    break
#####PONTOS#####
#####

#Ponto VT(origem 0,0) ok
Vt_x=Vt_pol_mod
Vt_y=0
print("\nVt polar: {}/_{}_° p.u.".format(Vt_pol_mod,Vt_pol_ang))

#Ponto la (origem 0,0) ok
la_x=np.cos(la_pol_ang_rad)*(la_pol_mod)
la_y=np.sin(la_pol_ang_rad)*(la_pol_mod)
print("\nla polar: {}/_{}_° p.u.".format(la_pol_mod,la_pol_ang))

#Ponto Eaf(origem 0,0)
Eaf_x=np.cos(Eaf_pol_ang_rad)*(Eaf_pol_mod)
Eaf_y=np.sin(Eaf_pol_ang_rad)*(Eaf_pol_mod)
print("\nEaf polar: {}/_{}_° p.u.".format(Eaf_pol_mod,Eaf_pol_ang))

#####PLOTANDO FASORES COM BASE NOS
PONTOS#####
#quiver
#Vt (Azul)

```

```

plt.quiver(0,0,Vt_x,Vt_y,scale_units='xy',angles='xy',scale=1,color='blue')#(origem,
módulo(projeção),cor)
#Ia (Amarelo)
plt.quiver(0,0,Ia_x,Ia_y,scale_units='xy',angles='xy',scale=1,color='yellow')#(origem,
módulo(projeção),cor)
#jXs.Ia (Verde) ok
plt.quiver(Vt_x,Vt_y,jXs_la_x,jXs_la_y,scale_units='xy',angles='xy',scale=1,color='
green')#(origem(modulo que parte da origem+modulo que parte do phasor sucessor
a origem),Destino(projeção),cor)
#Ra.Ia(vermelho)
plt.quiver(jXs_la_x+Vt_x,jXs_la_y+Vt_y,Ra_la_x,Ra_la_y,scale_units='xy',angles=
'xy',scale=1,color='red')
#Eaf (preto)
plt.quiver(0,0,Eaf_x,Eaf_y,scale_units='xy',angles='xy',scale=1,color='black')#(origem,
Destino(projeção),cor)

```

```

##### _____ ESTRUTURA DO
GRÁFICO _____ #####

```

#ENQUADRAMENTO DO DIAGRAMA (escala fixa de visualização)

```

plt.xlim(-1,1.5)#limite do eixo X
plt.ylim(-1,1.5)#limite do eixo y

```

#TÍTULO

```

plt.title("DIAGRAMA FASORIAL - {} Síncrono em modo de operação com fator de
potência {}".format(Mot_or_Ger.upper(),modo_operacao))

```

#LEGENDAS com os valores dos phasores (polar)

#round(valor,casas decimais do arredondamento)

```

plt.legend(["Vt={}/_{}° p.u.".format(Vt_pol_mod,Vt_pol_ang),"Ia={}/_{}°
p.u.".format(Ia_pol_mod,Ia_pol_ang),"jXs.Ia={}/_{}°
p.u.".format(jXs_la_pol_mod,jXs_la_pol_ang),"Ra.Ia={}/_{}°
p.u.".format(Ra_la_pol_mod,Ra_la_pol_ang),"Eaf={}/_{}°
p.u.".format(Eaf_pol_mod,Eaf_pol_ang)])

```

plt.gca().set_aspect('equal', adjustable='box') # Garantir que os eixos X e Y tenham a mesma escala

#MOSTRAR ESTRUTURA

```

plt.show()
cont=input(str("\n Deseja utilizar o programa novamente? "))
if cont=="não":
    print("Programa finalizado!")
    break

```