

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Escola de Engenharia
Engenharia de Controle e Automação

Eduardo Henrique Basilio de Carvalho, Renan Neves da Silva

Trabalho 2 - Motor de Indução

Belo Horizonte
2025

Eduardo Henrique Basilio de Carvalho, Renan Neves da Silva

Trabalho 2 - Motor de Indução

Versão 1.0

Orientador: Prof. Rodrigo Rodrigues Bastos

Belo Horizonte
2025

Resumo

O trabalho apresenta a determinação e a análise do desempenho de motores de indução trifásicos por meio do circuito equivalente de regime permanente. São obtidos parâmetros elétricos a partir de modelos pré-definidos no Simulink e, com eles, calculam-se grandezas fundamentais no ponto nominal, como escorregamento, velocidade, corrente, torque, potências e eficiência. Em seguida, são geradas curvas características em função do escorregamento e da potência mecânica, permitindo avaliar comportamento em partida, torque máximo e operação a vazio. O estudo inclui ainda a análise da operação em frequência variável, destacando como a variação proporcional tensão-frequência altera as curvas torque-velocidade.

Palavras-chave: conversores, motor de indução

Abstract

This work presents the determination and analysis of the performance of three-phase induction motors using the steady-state equivalent circuit. Electrical parameters are obtained from predefined models in Simulink, and fundamental quantities at the nominal point, such as slip, speed, current, torque, power, and efficiency, are calculated using them. Subsequently, characteristic curves are generated as a function of slip and mechanical power, allowing for the evaluation of behavior during starting, maximum torque, and no-load operation. The study also includes an analysis of variable frequency operation, highlighting how the proportional voltage-frequency variation alters the torque-speed curves.

Keywords: converters, induction motor

Sumário

1 Parâmetros do Circuito Equivalente	6
2 Operação em Condições Nominais	8
2.1 Escorregamento	8
2.2 Velocidade Mecânica	10
2.3 Corrente do Estator	10
2.4 Torque	11
2.5 Potência Ativa de Entrada	12
2.6 Potência Reativa de Entrada	12
2.7 Potência Aparente de Entrada	12
2.8 Fator de Potência	13
2.9 Eficiência	13
2.10 Características Nominais	13
3 Curvas	15
3.1 Faixa Completa de Velocidade	15
3.1.1 $\tau \times n_{mec}$	15
3.1.2 $ I_s \times n_{mec}$	16
3.2 Operação Nominal, Faixa de Carga	16
3.2.1 $\eta \times P_{mec}$	17
3.2.2 $fp \times P_{mec}$	17
3.2.3 $s \times P_{mec}$	17
3.2.4 $ I_s \times P_{mec}$	18
3.3 Tabela de Partida e Máximos	19
3.4 Operação a Vazio	20
3.4.1 Corrente a Vazio	20
3.4.2 Fator de Potência a Vazio	20
3.5 Análise dos Valores Obtidos	21
3.5.1 Corrente de Estator acima da Nominal	21
3.5.2 Fator de Potência em Vazio	21
3.5.3 Fator de Serviço	22
4 Frequência Variável	23

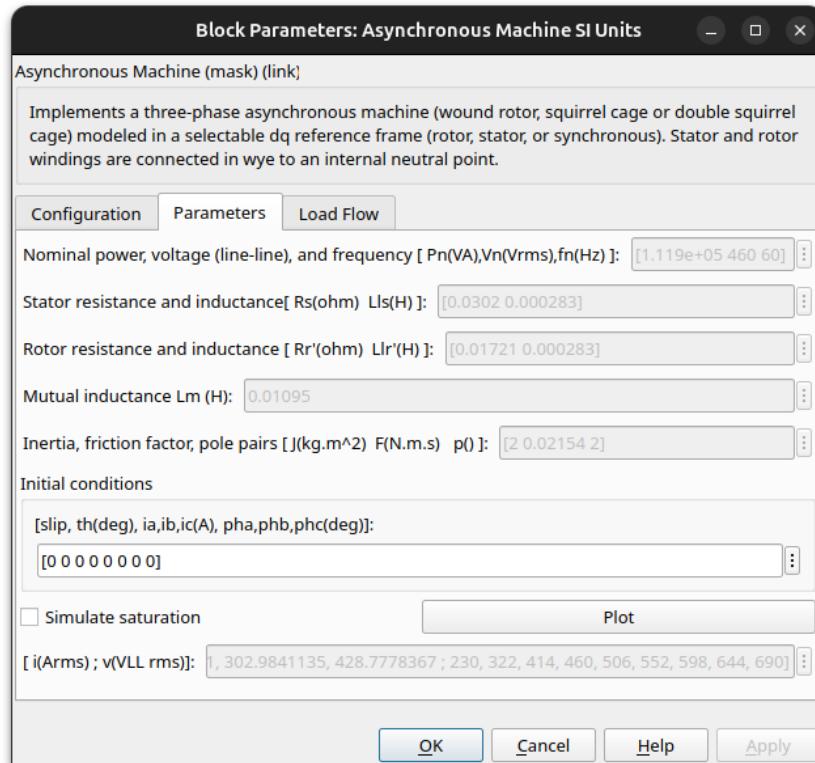
4.1	Curvas de Torque versus Velocidade Mecânica para Diferentes Escalas de Tensão e Frequência	23
4.2	Vantagens da Operação em Velocidade Variável	24
4.2.1	Eficiência Energética	24
4.2.2	Controle de Partida e Redução de Estresse Mecânico	24
4.2.3	Desempenho Dinâmico e Flexibilidade	25
	Referências Bibliográficas	26
	Apêndice A Código MATLAB 2024b para a Questão 3	27
	Apêndice B Código MATLAB 2024b para a Questão 4	33

Capítulo 1

Parâmetros do Circuito Equivalente

Figura 1.1 mostra os parâmetros do modelo predefinido de número 6 do bloco *Asynchronous Machine SI Units* do Simulink, para tipo de rotor *Squirrel Cage*.

Figura 1.1: Parâmetros do modelo predefinido 6 do bloco *Asynchronous Machine SI Units*.



Fonte: captura de tela do programa Simulink na versão R2024b.

Tais parâmetros são transcritos em Tabela 1.1.

Destes, os parâmetros do circuito equivalente são calculados em Equações (1.2) – (1.7).

Tabela 1.1: Parâmetros do modelo predefinido 6 do bloco *Asynchronous Machine SI Units*.

Parâmetro	Símbolo	Valor
Potência nominal	P_n	111.9 kVA
Tensão nominal de linha	V_n	460 V _{rms}
Frequência nominal	f_n	60 Hz
Resistência do estator	R_s	0.0302 Ω
Indutância do estator	L_s	0.000283 H
Resistência do rotor	R'_r	0.01721 Ω
Indutância do rotor	L'_r	0.000283 H
Indutância mútua	L_m	0.01095 H
Inércia	J	2 kg.m ²
Fator de fricção	F	0.02154 Nms
Número de pares de polos	p	2

$$w_e = 2\pi f_n = 2\pi \cdot 60 = 376.99 \text{ rad/s} \quad (1.1)$$

$$V_{ph} = \frac{V_n}{\sqrt{3}} = \frac{460}{\sqrt{3}} = 265.58 \text{ V} \quad (1.2)$$

$$R_s = 0.0302 \Omega \quad (1.3)$$

$$X_s = w_e L_s = 376.99 \cdot 0.000283 = 0.1067 \Omega \quad (1.4)$$

$$X_m = w_e L_m = 376.99 \cdot 0.01095 = 4.126 \Omega \quad (1.5)$$

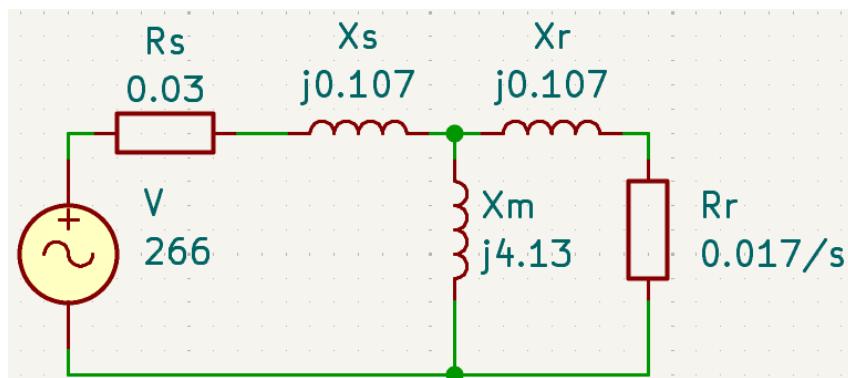
$$X'_r = w_e L'_r = 376.99 \cdot 0.000283 = 0.1067 \Omega \quad (1.6)$$

$$R_r = \frac{R'_r}{s} = \frac{0.01721}{s} \Omega \quad (1.7)$$

Este trabalho considera $P_n = P_{out}$.

Figura 1.2 mostra o circuito equivalente do motor de indução.

Figura 1.2: Circuito equivalente do motor de indução.



Fonte: captura de tela do programa KiCad na versão 9.0.x.

Capítulo 2

Operação em Condições Nominais

2.1 Escorregamento

Do circuito,

$$Z'_r(s) = \frac{R'_r}{s} + jX'_r \quad (2.1)$$

$$Z_s = R_s + jX_s \quad (2.2)$$

$$Z_m = jX_m \quad (2.3)$$

$$Z_{par}(s) = \frac{Z_m Z'_r(s)}{Z_m + Z'_r(s)} \quad (2.4)$$

$$Z_{eq}(s) = Z_s + Z_{par}(s) \quad (2.5)$$

$$I_s(s) = \frac{V_{ph}}{Z_{eq}(s)} \quad (2.6)$$

$$I'_r(s) = I_s(s) \frac{Z_m}{Z_m + Z'_r(s)} \quad (2.7)$$

$$|I'_r(s)| = \frac{V_{ph} X_m}{\sqrt{\text{Re}^2 + \text{Im}^2}} \quad (2.8)$$

$$P_n = 3 |I'_r(s)|^2 R'_r \frac{1 - s}{s} \quad (2.9)$$

para

$$\text{Re} = \frac{R_s R'_r}{s} - X_s (X_m + X'_r) - X_m X'_r \quad (2.10)$$

$$\text{Im} = R_s (X_m + X'_r) + \frac{R'_r}{s} (X_s + X_m) \quad (2.11)$$

$$(2.12)$$

No motor estudado,

$$\text{Re} = \frac{0.0302 \cdot 0.01721}{s} - 0.1067(4.126 + 0.1067) - 4.126 \cdot 0.1067 \quad (2.13)$$

$$= \frac{0.000519742}{s} - 0.891873 \quad (2.14)$$

$$\text{Im} = 0.0302(4.126 + 0.1067) + \frac{0.01721}{s}(0.1067 + 4.126) \quad (2.15)$$

$$= 0.127828 + \frac{0.0728448}{s} \quad (2.16)$$

$$\text{Re}^2 + \text{Im}^2 = \left(\frac{0.000519742}{s} - 0.891873 \right)^2 + \left(0.127828 + \frac{0.0728448}{s} \right)^2 \quad (2.17)$$

$$= \frac{0.812s^2 + 0.0177s + 0.00531}{s^2} \quad (2.18)$$

$$(2.19)$$

Assim,

$$111900 = 3 \left(\frac{265.58 \cdot 4.126}{\sqrt{\frac{0.812s^2 + 0.0177s + 0.00531}{s^2}}} \right)^2 0.01721 \frac{1-s}{s} \quad (2.20)$$

$$111900 = 0.05163 \frac{1200740}{\frac{0.812s^2 + 0.0177s + 0.00531}{s^2}} \frac{1-s}{s} \quad (2.21)$$

$$111900 = 61994 \frac{s(1-s)}{0.812s^2 + 0.0177s + 0.00531} \quad (2.22)$$

$$1.805 = \frac{s - s^2}{0.812s^2 + 0.0177s + 0.00531} \quad (2.23)$$

$$s - s^2 = 1.466s^2 + 0.0319s + 0.00959 \quad (2.24)$$

$$0 = 2.466s^2 - 0.9681s + 0.00959 \quad (2.25)$$

$$(2.26)$$

Cujas soluções são

$$s_0 = 0.0102 \quad (2.27)$$

$$s_1 = 0.3824 \quad (2.28)$$

Conforme [1],

$$s_{\max} = \frac{R'_r}{\sqrt{R_s^2 \left(\frac{X_m}{X_s + X_m} \right)^4 + (X_s + X'_r)^2}} \quad (2.29)$$

Para os valores considerados,

$$s_{\max} = \frac{0.01721}{\sqrt{0.0302^2 \left(\frac{4.126}{0.1067+4.126}\right)^4 + (0.1067 + 0.1067)^2}} \quad (2.30)$$

$$\approx 0.08 \quad (2.31)$$

Por operar em condições nominais, $s < s_{\max}$. Portanto,

$$s = s_0 = 0.0102 = 1.02\% \quad (2.32)$$

2.2 Velocidade Mecânica

$$n_{sinc} = \frac{60 \cdot f_n}{p} \quad (2.33)$$

$$n_{sinc} = \frac{60 \cdot 60}{2} \quad (2.34)$$

$$= 1800 \text{ rpm} \quad (2.35)$$

$$n = n_{sinc}(1 - s) \quad (2.36)$$

$$= 1800(1 - 0.0102) \quad (2.37)$$

$$= 1781.64 \text{ rpm} \quad (2.38)$$

2.3 Corrente do Estator

Sob escorregamento nominal,

$$Z'_r = \frac{0.01721}{0.0102} + j0.1067 \quad (2.39)$$

$$= 1.687 + j0.1067 \Omega \quad (2.40)$$

$$Z_{par} = \frac{j4.126(1.687 + j0.1067)}{j4.126 + 1.687 + j0.1067} \quad (2.41)$$

$$= 1.384 + j0.655 \Omega \quad (2.42)$$

$$Z_{eq} = (0.0302 + j0.1067) + (1.384 + j0.655) \quad (2.43)$$

$$= 1.414 + j0.762 \Omega \quad (2.44)$$

$$= 1.606\angle 28.3^\circ \Omega \quad (2.45)$$

$$(2.46)$$

Então,

$$I_s = \frac{265.58}{1.606\angle 28.3^\circ} \quad (2.47)$$

$$= 165.4\angle -28.3^\circ \text{ A} \quad (2.48)$$

2.4 Torque

Na velocidade mecânica nominal,

$$w_m = \frac{2\pi n}{60} \quad (2.49)$$

$$= \frac{2\pi \cdot 1781.64}{60} \quad (2.50)$$

$$= 186.7 \text{ rad/s} \quad (2.51)$$

$$T_n = \frac{P_n}{w_m} \quad (2.52)$$

$$= \frac{111900}{186.7} \quad (2.53)$$

$$= 599.5 \text{ Nm} \quad (2.54)$$

2.5 Potência Ativa de Entrada

Pelas grandezas de linha,

$$P_{\text{in}} = \sqrt{3}V_n I_s \cos \phi \quad (2.55)$$

$$= \sqrt{3} \cdot 460 \cdot 165.4 \cdot \cos 28.3^\circ \quad (2.56)$$

$$= 116030 \text{ W} \quad (2.57)$$

2.6 Potência Reativa de Entrada

Pelas grandezas de linha,

$$Q_{\text{in}} = \sqrt{3}V_n I_s \sin \phi \quad (2.58)$$

$$= \sqrt{3} \cdot 460 \cdot 165.4 \cdot \sin 28.3^\circ \quad (2.59)$$

$$= 62476 \text{ var} \quad (2.60)$$

2.7 Potência Aparente de Entrada

Por definição,

$$S_{\text{in}} = P_{\text{in}} + jQ_{\text{in}} \quad (2.61)$$

$$= 116030 + j62476 \text{ VA} \quad (2.62)$$

$$|S_{\text{in}}| = \sqrt{P_{\text{in}}^2 + Q_{\text{in}}^2} \quad (2.63)$$

$$= \sqrt{116030^2 + 62476^2} \quad (2.64)$$

$$= 131.8 \text{ kVA} \quad (2.65)$$

2.8 Fator de Potência

Por definição,

$$fp = \cos \phi \text{ característica} \quad (2.66)$$

$$= \cos 28.3^\circ \text{ atrasado} \quad (2.67)$$

$$= 0.880 \text{ atrasado} \quad (2.68)$$

2.9 Eficiência

Pelas potências,

$$\eta = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} \quad (2.69)$$

$$= \frac{111900}{116030} \quad (2.70)$$

$$= 0.9645 \quad (2.71)$$

$$= 96.45\% \quad (2.72)$$

2.10 Características Nominais

Tabela 2.1 apresenta as características nominais calculadas.

Tabela 2.1: Características nominais calculadas.

Grandezas	Símbolo	Valor
Escorregamento	s	1.02%
Velocidade mecânica	n	1781.64 rpm
Corrente de linha do estator	I_s	165.4 A
Torque nominal	T_n	599.5 Nm
Potência ativa de entrada	P_{in}	116030 W
Potência reativa de entrada	Q_{in}	62476 var
Potência aparente de entrada	$ S_{in} $	131.8 kVA
Fator de potência	fp	0.880 atrasado
Eficiência	η	96.45%

Capítulo 3

Curvas

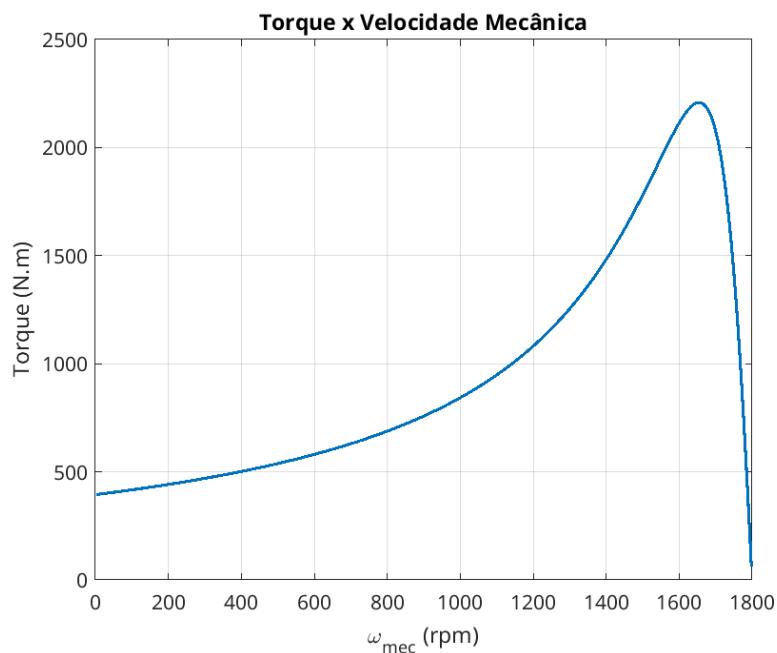
As curvas e valores nesta questão são obtidos por Apêndice A

3.1 Faixa Completa de Velocidade

3.1.1 $\tau \times n_{mec}$

Figura 3.1 mostra a curva de torque versus velocidade mecânica do motor de indução considerado.

Figura 3.1: Curva de torque versus velocidade mecânica.

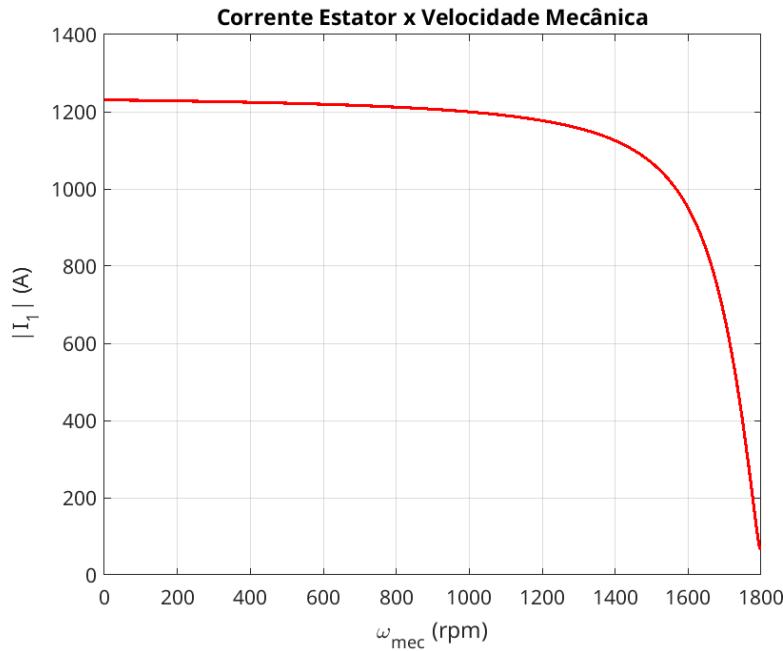


Fonte: elaboração própria.

3.1.2 $|I_s| \times n_{mec}$

Figura 3.2 mostra a curva de corrente de linha do estator versus velocidade mecânica do motor de indução considerado.

Figura 3.2: Curva de corrente de linha do estator versus velocidade mecânica.



Fonte: elaboração própria.

3.2 Operação Nominal, Faixa de Carga

Por busca de máximo no vetor de torque calculado na faixa completa de velocidade, o torque máximo e o escorregamento correspondente são:

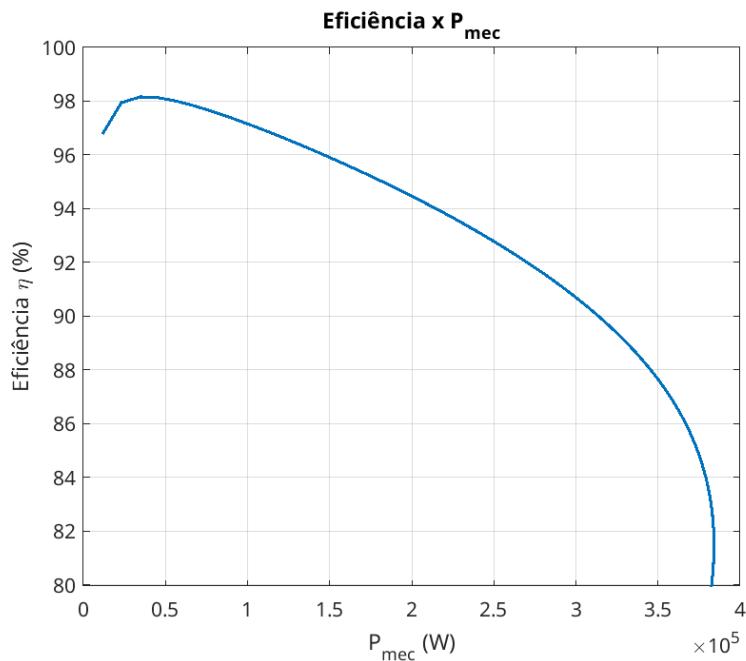
$$\tau_{\max} = 2208.12 \text{ Nm} \quad (3.1)$$

$$s_{\tau_{\max}} = 0.0810 = 8.10\% \quad (3.2)$$

3.2.1 $\eta \times P_{mec}$

Figura 3.3 mostra a curva de eficiência versus potência mecânica do motor de indução na faixa de operação.

Figura 3.3: Curva de eficiência versus potência mecânica.



Fonte: elaboração própria.

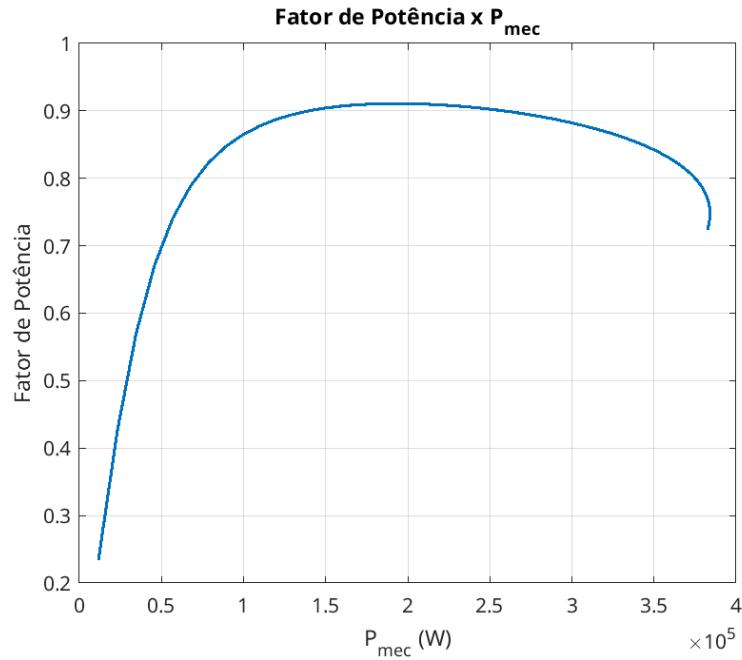
3.2.2 $fp \times P_{mec}$

Figura 3.4 mostra a curva de fator de potência versus potência mecânica do motor de indução na faixa de operação.

3.2.3 $s \times P_{mec}$

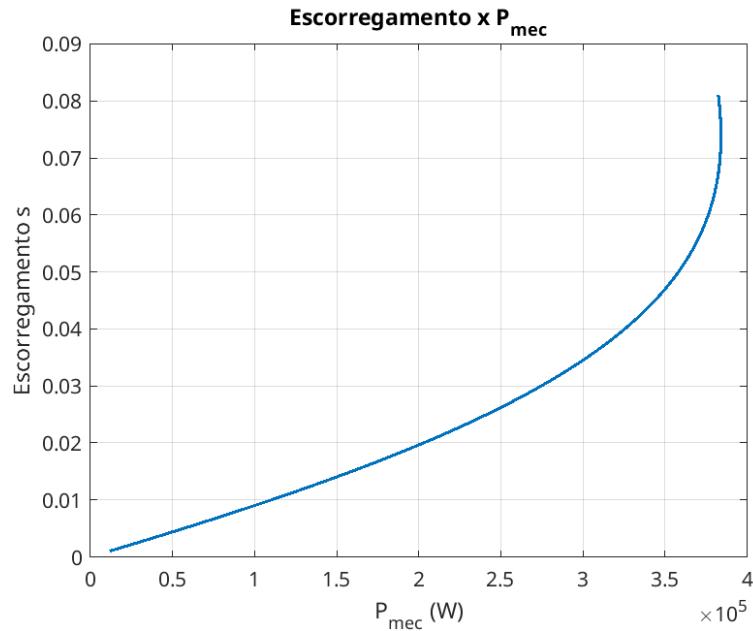
Figura 3.5 mostra a curva de escorregamento versus potência mecânica do motor de indução na faixa de operação.

Figura 3.4: Curva de fator de potência versus potência mecânica.



Fonte: elaboração própria.

Figura 3.5: Curva de escorregamento versus potência mecânica.

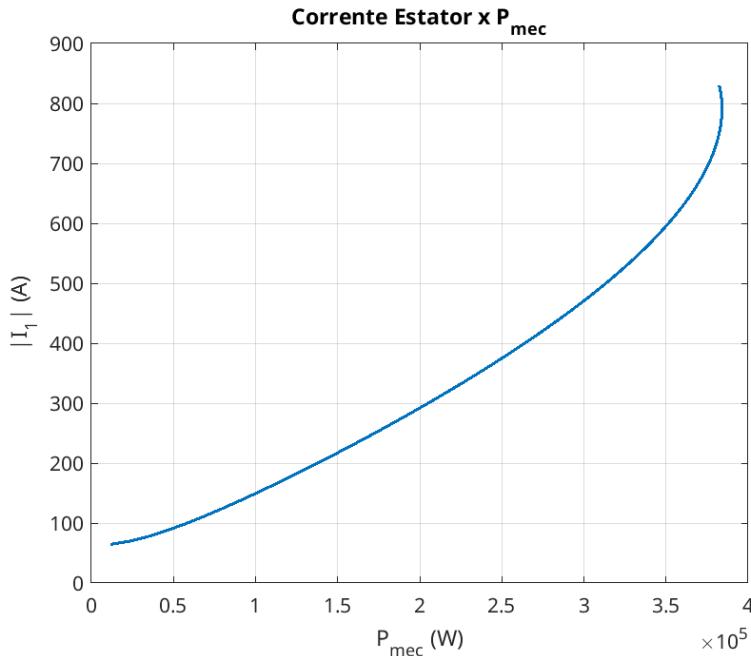


Fonte: elaboração própria.

3.2.4 $|I_s| \times P_{mec}$

Figura 3.6 mostra a curva de corrente de linha do estator versus potência mecânica do motor de indução na faixa de operação.

Figura 3.6: Curva de corrente de linha do estator versus potência mecânica.



Fonte: elaboração própria.

3.3 Tabela de Partida e Máximos

Tabela 3.1 apresenta os valores de corrente de partida, razão entre corrente de partida e corrente nominal, torque de partida, razão entre torque de partida e torque nominal, corrente no torque máximo, razão entre corrente no torque máximo e corrente nominal, torque máximo, escorregamento no torque máximo e razão entre torque máximo e torque nominal.

Tabela 3.1: Valores de partida e máximos do motor de indução.

Grandezas	Valor
Corrente de partida	1231 A
Razão entre corrente de partida e corrente nominal	7.44
Torque de partida	394 Nm
Razão entre torque de partida e torque nominal	0.65
Corrente no torque máximo	830 A
Razão entre corrente no torque máximo e corrente nominal	5
Torque máximo	2208.12 Nm
Escorregamento no torque máximo	8.10%
Razão entre torque máximo e torque nominal	3.67

3.4 Operação a Vazio

Na operação a vazio, este trabalho considera $s = 0.001$.

3.4.1 Corrente a Vazio

$$Z'_r = \frac{0.01721}{0.001} + j0.1067 \quad (3.3)$$

$$= 17.21 + j0.1067 \Omega \quad (3.4)$$

$$Z_{par} = \frac{j4.126(17.21 + j0.1067)}{j4.126 + 17.21 + j0.1067} \quad (3.5)$$

$$= 0.933 + j3.897 \Omega \quad (3.6)$$

$$Z_{eq} = (0.0302 + j0.1067) + (0.933 + j3.897) \quad (3.7)$$

$$= 0.963 + j4.004 \Omega \quad (3.8)$$

$$= 4.118\angle 76.48^\circ \Omega \quad (3.9)$$

$$I_s = \frac{265.58}{4.118\angle 76.48^\circ} \quad (3.10)$$

$$= 64.48\angle -76.48^\circ A \quad (3.11)$$

3.4.2 Fator de Potência a Vazio

$$\phi = 76.48^\circ \quad (3.12)$$

$$fp = \cos \phi \text{ característica} \quad (3.13)$$

$$= \cos 76.48^\circ \text{ atrasado} \quad (3.14)$$

$$= 0.234 \text{ atrasado} \quad (3.15)$$

3.5 Análise dos Valores Obtidos

3.5.1 Corrente de Estator acima da Nominal

A operação contínua do motor de indução com corrente de estator acima da nominal resulta em:

- **Aquecimento excessivo:** O aumento das perdas Joule (I^2R) nos enrolamentos do estator eleva a temperatura, podendo degradar o isolamento dos condutores e reduzir a vida útil do motor.
- **Sobrecarga térmica:** A temperatura excessiva pode causar deterioração dos materiais isolantes, levando a curtos-circuitos e falhas permanentes.
- **Aumento das perdas:** Perdas no cobre do estator aumentam proporcionalmente ao quadrado da corrente, reduzindo a eficiência do motor.
- **Desmagnetização:** Em casos extremos, o aquecimento pode afetar as propriedades magnéticas do núcleo ferromagnético.
- **Necessidade de proteção:** Requer sistemas de proteção adequados (relés térmicos, disjuntores) para evitar danos permanentes ao equipamento.

Por estas razões, a operação em condições nominais é fundamental para garantir a confiabilidade e longevidade do motor de indução.

3.5.2 Fator de Potência em Vazio

O fator de potência em vazio é significativamente menor que o fator de potência nominal devido à natureza da corrente consumida pelo motor nas duas condições:

- **Operação a vazio:** A corrente é predominantemente reativa, destinada principalmente à magnetização do entreferro. Com escorregamento muito baixo ($s \approx 0.001$), a impedância do rotor refletida é muito alta ($Z'_r \approx 17.21 + j0.1067 \Omega$), fazendo com que a maior parte da corrente circule pelo ramo magnetizante ($X_m = 4.126 \Omega$). O ângulo de fase $\phi = 76.48^\circ$ indica que a corrente está quase em quadratura com a tensão.

- **Operação nominal:** A corrente possui uma componente ativa significativa para fornecer a potência mecânica de saída. Com escorregamento nominal ($s = 0.0102$), a impedância do rotor refletida diminui ($Z'_r \approx 1.687 + j0.1067 \Omega$), permitindo maior circulação de corrente pelo rotor e, consequentemente, maior conversão de potência elétrica em mecânica. O ângulo de fase $\phi = 28.3^\circ$ resulta em maior componente ativa da corrente.

A vazio, o motor consome potência principalmente para estabelecer o campo magnético (potência reativa), enquanto com carga nominal há significativa conversão de potência ativa em trabalho mecânico, elevando o fator de potência.

3.5.3 Fator de Serviço

Segundo [1], o fator de serviço (FS) é uma medida da capacidade do motor de operar acima de sua potência nominal sem danos. É definido como a razão entre a potência máxima que o motor pode suportar **em regime contínuo** e sua potência nominal.

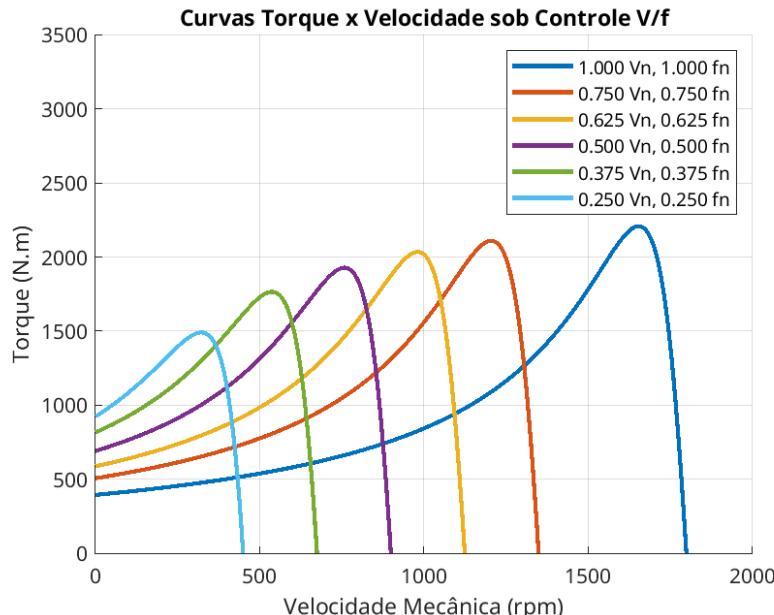
Capítulo 4

Frequência Variável

4.1 Curvas de Torque versus Velocidade Mecânica para Diferentes Escalas de Tensão e Frequência

Apêndice B apresenta o código MATLAB 2024b utilizado para gerar as curvas de torque versus velocidade mecânica para diferentes escalas de tensão e frequência. Figura 4.1 mostra como a relação entre torque e velocidade mecânica varia conforme a escala de tensão e frequência aplicada ao motor de indução.

Figura 4.1: Curva de torque versus velocidade mecânica para diferentes escalas de tensão e frequência.



Fonte: elaboração própria.

4.2 Vantagens da Operação em Velocidade Variável

A operação de motores de indução em velocidade variável, viabilizada principalmente pelo avanço dos acionamentos eletrônicos de potência, transformou a aplicação dessas máquinas na indústria. Tradicionalmente, os motores de indução eram vistos como máquinas de velocidade constante, limitados pela frequência da rede de alimentação [2]. No entanto, a implementação de estratégias de controle moderno trouxe benefícios significativos.

4.2.1 Eficiência Energética

Uma das principais vantagens é a melhoria na eficiência energética. Em muitas aplicações industriais, como bombas centrífugas e ventiladores, a potência consumida varia com o cubo da velocidade. [1] destaca que o ajuste da velocidade do motor para atender exatamente à demanda da carga é muito mais eficiente do que métodos mecânicos de controle de fluxo, como o uso de válvulas ou amortecedores. Isso permite uma redução substancial no consumo de energia quando o sistema não opera em capacidade máxima.

4.2.2 Controle de Partida e Redução de Estresse Mecânico

A partida direta de motores de indução pode resultar em correntes de partida extremamente elevadas, frequentemente excedendo a corrente nominal em muitas vezes, o que causa quedas de tensão na rede e estresse térmico nos enrolamentos [1]. O uso de variadores de velocidade permite uma partida suave, onde a tensão e a frequência são aumentadas gradualmente. Isso limita a corrente de partida a níveis seguros e reduz o choque mecânico no eixo e na carga acoplada, prolongando a vida útil do equipamento [2].

4.2.3 Desempenho Dinâmico e Flexibilidade

Com o advento de técnicas avançadas como o controle vetorial, os motores de indução podem atingir um desempenho dinâmico comparável ao dos motores de corrente contínua. [2] explicam que essas técnicas permitem o controle desacoplado do fluxo e do conjugado, oferecendo respostas rápidas a variações de carga e precisão no controle de velocidade, inclusive em baixas rotações. Além disso, os acionamentos modernos permitem a operação acima da velocidade síncrona nominal através do enfraquecimento de campo, aumentando a flexibilidade operacional da máquina [1].

Referências Bibliográficas

- [1] Stephen J. Chapman. *Fundamentos de Máquinas Elétricas*. AMGH Editora, Porto Alegre, 5 edition, 2013.
- [2] Stephen D. Umans. *Máquinas Elétricas de Fitzgerald e Kingsley*. AMGH Editora Ltda, Porto Alegre, 7 edition, 2014.

Apêndice A

Código MATLAB 2024b para a Questão 3

```

1 %% Dados do Motor (Modelo 6)
2 Pn_watt = 111900; % Potencia mecnica nominal (W)
3 Vn_line = 460; % Tenso nominal de linha (V)
4 fn = 60; % Frequncia nominal (Hz)
5 p = 2; % Pares de polos
6
7 %% Parmetros do Circuito Equivalente
8 Rs = 0.0302; % Resistncia do estator (Ohms)
9 Lls = 0.000283; % Indutncia de disperso do estator (H)
10 Rr_linha = 0.01721; % Resistncia do rotor referida (Ohms)
11 Llr_linha = 0.000283; % Indutncia de disperso do rotor (H)
12 Lm = 0.01095; % Indutncia mtua (H)
13
14 %% 1. Clculos Preliminares
15 omega_e = 2 * pi * fn; % Frequncia angular eltrica (rad/s)
16 Xs = omega_e * Lls; % Reatncia do estator
17 Xr_linha = omega_e * Llr_linha; % Reatncia do rotor
18 Xm = omega_e * Lm; % Reatncia de magnetizao
19 Vph = Vn_line / sqrt(3); % Tenso de fase (V)
20 n_sinc = (60 * fn) / p; % Velocidade sncrona (rpm)
21 omega_sinc = (2 * pi * n_sinc) / 60; % Vel. sncrona (rad/s)
22
23 %% 2. Definio do Ponto Nominal
24 % Vamos usar o escorregamento nominal calculado no Cap 2 do relatrio: 1.02%
25 s_nom = 0.0102;
26
27 % Funo auxiliar para calcular circuito
28 calc_motor = @(s, Vph, Rs, Xs, Rr_linha, Xr_linha, Xm, omega_sinc) ...
29     deal( ...

```

```

30     Vph ./ ((Rs + 1j*Xs) + (1j*Xm .* (Rr_linha./s + 1j*Xr_linha)) ./ (1j*Xm
31         + (Rr_linha./s + 1j*Xr_linha))), ... % I1 (Fasor)
32     (3 * abs(Vph ./ ((Rs + 1j*Xs) + (1j*Xm .* (Rr_linha./s + 1j*Xr_linha)))
33         ./ (1j*Xm + (Rr_linha./s + 1j*Xr_linha))).^2 .* (abs(1j*Xm ./ (1j*
34             Xm + (Rr_linha./s + 1j*Xr_linha))).^2 .* (Rr_linha./s)) ./
35             omega_sinc ... % Torque
36 );
37
38 % Calcular valores nominais de referencia
39 [I1_nom_phasor, T_nom] = calc_motor(s_nom, Vph, Rs, Xs, Rr_linha, Xr_linha, Xm,
40                                     omega_sinc);
41 I1_nom = abs(I1_nom_phasor);
42
43 %% 3. Questo 3 - Parte A e B (Curvas Completas)
44 % Vetor de escorregamento completo
45 s_full = 0.001:0.001:1;
46
47 % Inicializar vetores
48 I1_full_abs = zeros(size(s_full));
49 Torque_full = zeros(size(s_full));
50 nmecc_full = n_sinc * (1 - s_full); % Velocidade em RPM
51 wmecc_full = omega_sinc * (1 - s_full); % Velocidade em rad/s
52
53 % Loop de clculo para curva completa
54 for k = 1:length(s_full)
55     % Impedncia do Rotor
56     Zr = (Rr_linha / s_full(k)) + 1j*Xr_linha;
57     % Impedncia de Magnetizao
58     Zm = 1j*Xm;
59     % Impedncia Paralela (Rotor // Magnetizao)
60     Zpar = (Zm * Zr) / (Zm + Zr);
61     % Impedncia Equivalente Total
62     Zeq = (Rs + 1j*Xs) + Zpar;
63
64     % Corrente do Estator (Fasor)
65     I1 = Vph / Zeq;
66     I1_full_abs(k) = abs(I1);
67
68     % Divisor de corrente para achar I2 (Corrente do rotor)
69     I2 = I1 * (Zm / (Zm + Zr));
70
71 end
72
73 % Plotar resultados
74 plot(s_full, I1_full_abs, 'r');
75 plot(s_full, Torque_full, 'b');
76 plot(s_full, nmecc_full, 'g');
77 plot(s_full, wmecc_full, 'm');
78
79 % Salvar resultados
80 save('motor.mat', 'I1_full_abs', 'Torque_full', 'nmecc_full', 'wmecc_full');
81
82 % Fim do script
83

```

```

66 % Potncia convertida e Torque
67 P_conv = 3 * abs(I2)^2 * Rr_linha * (1 - s_full(k)) / s_full(k);
68 if s_full(k) == 0 % Evitar diviso por zero se s=0
69     Torque_full(k) = 0;
70 else
71     Torque_full(k) = P_conv / wmech_full(k);
72 end
73 end
74
75 % Plotagem Curvas (a) e (b)
76 fig0 = figure('Name', 'Torque x Velocidade Mecnica');
77 plot(nmec_full, Torque_full, 'LineWidth', 1.5);
78 grid on;
79 xlabel('n_{mec} (rpm)'); ylabel('Torque (N.m)');
80 title('Torque x Velocidade Mecnica');
81 saveas(fig0, 'a_torque_vs_velocidade.png');
82
83 fig1 = figure('Name', 'Corrente Estator x Velocidade Mecnica');
84 plot(nmec_full, I1_full_abs, 'r', 'LineWidth', 1.5);
85 grid on;
86 xlabel('n_{mec} (rpm)'); ylabel('|I_1| (A)');
87 title('Corrente Estator x Velocidade Mecnica');
88 saveas(fig1, 'b_correnteestator_vs_velocidade.png');
89
90 %% 4. Questo 3 - Parte C a F (Regio de Operao)
91 % Encontrar Torque Mximo e Escorregamento Correspondente
92 [T_max, idx_max] = max(Torque_full);
93 s_Tmax = s_full(idx_max);
94
95 fprintf('Torque Mximo (Tmax): %.2f N.m em s = %.4f\n', T_max, s_Tmax);
96
97 % Novo vetor de escorregamento
98 s_op = 0.001:0.001:s_Tmax;
99
100 % Inicializar vetores de operao
101 eta_op = zeros(size(s_op)); % Eficincia
102 fp_op = zeros(size(s_op)); % Fator de potncia
103 Pmec_op = zeros(size(s_op)); % Potncia Mecnica de Sada
104 I1_op_abs = zeros(size(s_op));
105
106 for k = 1:length(s_op)

```

```

107 s = s_op(k);
108 nme = n_sinc * (1 - s);
109 wme = omega_sinc * (1 - s);
110
111 % Recalcular das impedâncias
112 Zr = (Rr_linha / s) + 1j*Xr_linha;
113 Zm = 1j*Xm;
114 Zpar = (Zm * Zr) / (Zm + Zr);
115 Zeq = (Rs + 1j*Xs) + Zpar;
116
117 % Correntes
118 I1 = Vph / Zeq;
119 I1_op_abs(k) = abs(I1);
120 I2 = I1 * (Zm / (Zm + Zr));
121
122 % Potências
123 Pin = 3 * real(Vph * conj(I1)); % Potência ativa de entrada
124 P_conv = 3 * abs(I2)^2 * Rr_linha * (1 - s) / s;
125
126 % Considerando P_mec = P_conv (desprezando perdas rotacionais)
127 Pmec_op(k) = P_conv;
128
129 % Eficiência e Fator de Potência
130 eta_op(k) = (Pmec_op(k) / Pin) * 100; % Em %
131 fp_op(k) = cos(angle(Vph) - angle(I1));
132 end
133
134 % Plotagem Curvas (c) a (f)
135 fig2 = figure('Name', 'Eficiência x P_{mec}');
136 plot(Pmec_op, eta_op, 'LineWidth', 1.5); grid on;
137 xlabel('P_{mec} (W)'), ylabel('Eficiência \eta (%)'), title('Eficiência x P_{mec}');
138 saveas(fig2, 'c_eficiencia_vs_pmece.png');
139
140 fig3 = figure('Name', 'Fator de Potência x P_{mec}');
141 plot(Pmec_op, fp_op, 'LineWidth', 1.5); grid on;
142 xlabel('P_{mec} (W)'), ylabel('Fator de Potência'), title('Fator de Potência x P_{mec}');
143 saveas(fig3, 'd_fp_vs_pmece.png');
144
145 fig4 = figure('Name', 'Escorregamento x P_{mec}');

```

```

146 plot(Pmec_op, s_op, 'LineWidth', 1.5); grid on;
147 xlabel('P_{mec} (W)'); ylabel('Escorregamento s'); title('Escorregamento x P_{mec}');
148 saveas(fig4, 'e_s_vs_pmec.png');
149
150 fig5 = figure('Name', 'Corrente Estator x P_{mec}');
151 plot(Pmec_op, I1_op_abs, 'LineWidth', 1.5); grid on;
152 xlabel('P_{mec} (W)'); ylabel('|I_1| (A)'); title('Corrente Estator x P_{mec}')
153 ;
154 saveas(fig5, 'f_corrente_vs_pmec.png');
155
156 %% 5. Questo 3 - Dados Tabulados (G a O)
157 % Partida (s = 1)
158 [I_start_phasor, T_start] = calc_motor(1, Vph, Rs, Xs, Rr_linha, Xr_linha, Xm,
159 omega_sinc);
160 I_start_abs = abs(I_start_phasor);
161
162 % Torque Maximo (j calculado anteriormente como T_max e s_Tmax)
163 % Corrente no Torque Maximo
164 [I_Tmax_phasor, ~] = calc_motor(s_Tmax, Vph, Rs, Xs, Rr_linha, Xr_linha, Xm,
165 omega_sinc);
166 I_Tmax_abs = abs(I_Tmax_phasor);
167
168 % Exibir Tabela no Command Window
169 fprintf('\n--- Tabela de Resultados (g a o) ---\n');
170 fprintf('(g) Corrente de partida (|I1,p|): %.2f A\n', I_start_abs);
171 fprintf('(h) Razo Ip/Inom: %.2f\n', I_start_abs / I1_nom);
172 fprintf('(i) Torque de partida (Tp): %.2f N.m\n', T_start);
173 fprintf('(j) Razo Tp/Tnom: %.2f\n', T_start / T_nom);
174 fprintf('(k) Corrente no Torque Mximo: %.2f A\n', I_Tmax_abs);
175 fprintf('(l) Razo I_Tmax/Inom: %.2f\n', I_Tmax_abs / I1_nom);
176 fprintf('(m) Torque Mximo (Tmax): %.2f N.m\n', T_max);
177 fprintf('(n) Escorregamento de Tmax: %.4f\n', s_Tmax);
178 fprintf('(o) Razo Tmax/Tnom: %.2f\n', T_max / T_nom);
179
180 %% 6. Questo 3 - A Vazio (P a Q)
181 s_vazio = 0.001;
182 Zr_vazio = (Rr_linha / s_vazio) + 1j*Xr_linha;
183 Zm_vazio = 1j*Xm;

```

```
183 Zpar_vazio = (Zm_vazio * Zr_vazio) / (Zm_vazio + Zr_vazio);
184 Zeq_vazio = (Rs + 1j*Xs) + Zpar_vazio;
185
186 I1_vazio_phasor = Vph / Zeq_vazio;
187 I1_vazio_abs = abs(I1_vazio_phasor);
188 I1_vazio_angle_deg = angle(I1_vazio_phasor) * (180/pi);
189 fp_vazio = cos(angle(Vph) - angle(I1_vazio_phasor));
190
191 fprintf('\n--- Operao a Vazio (p a q) ---\n');
192 fprintf('(p) Fasor Corrente a Vazio: %.2f /_ %.2f A\n', I1_vazio_abs,
193           I1_vazio_angle_deg);
194 fprintf('(q) Fator de Potncia a Vazio: %.4f\n', fp_vazio);
```

Apêndice B

Código MATLAB 2024b para a Questão 4

```

1 %% Dados do Motor (Modelo 6)
2 Pn_watt = 111900; % Potência mecânica (W)
3 Vn_line = 460; % Tensão nominal de linha (V)
4 fn = 60; % Freqüência nominal (Hz)
5 p = 2; % Pares de polos
6
7 % Parâmetros (Indutâncias e Resistências são constantes)
8 Rs = 0.0302; % Resistência estator (Ohms)
9 Rr_linha = 0.01721; % Resistência rotor referida (Ohms)
10 Lls = 0.000283; % Indutância disperso estator (H)
11 Llr_linha = 0.000283; % Indutância disperso rotor (H)
12 Lm = 0.01095; % Indutância mutua (H)
13
14 %% Configuração da Simulação V/f
15 escalas = [1, 0.75, 0.625, 0.5, 0.375, 0.25];
16 legendas = cell(length(escalas), 1);
17
18 % Preparar a figura
19 fig = figure('Name', 'Torque x Velocidade (V/f Varivel)');
20 hold on;
21 cores = lines(length(escalas)); % Gerar cores diferentes para cada curva
22
23 %% Loop de Cálculo para cada Freqüência
24 for k = 1:length(escalas)
25     fator = escalas(k);
26
27     % 1. Atualizar Tensão e Freqüência Proporcionalmente
28     f_op = fn * fator; % Nova freqüência
29     V_line_op = Vn_line * fator; % Nova tensão de linha
30     Vph_op = V_line_op / sqrt(3); % Nova tensão de fase

```

```

31
32 % 2. Recalcular Velocidade Sncrona e Reatncias
33 % Importante: As reatncias ( $X = 2\pi f L$ ) mudam com a frequncia!
34 omega_e_op = 2 * pi * f_op;
35
36 Xs_op = omega_e_op * Lls;
37 Xr_linha_op = omega_e_op * Llr_linha;
38 Xm_op = omega_e_op * Lm;
39
40 ns_op = (60 * f_op) / p; % Nova velocidade sncrona (rpm)
41 omega_sinc_op = (2 * pi * ns_op) / 60; % Rad/s
42
43 % 3. Vetor de Velocidade para a curva atual
44 % Vamos variar de 0 at a velocidade sncrona atual
45 nmec_vec = 0:1:ns_op;
46
47 % Inicializar vetor de torque
48 Torque_vec = zeros(size(nmec_vec));
49
50 % 4. Clculo do Torque ponto a ponto
51 for i = 1:length(nmec_vec)
52     nmec = nmec_vec(i);
53
54     % Calcular escorregamento para esta velocidade
55     s = (ns_op - nmec) / ns_op;
56
57     if s == 0
58         Torque_vec(i) = 0;
59         continue;
60     end
61
62     % Impedncias ajustadas para a nova frequncia
63     Zr = (Rr_linha / s) + 1j*Xr_linha_op;
64     Zm = 1j*Xm_op;
65     Zpar = (Zm * Zr) / (Zm + Zr);
66     Zeq = (Rs + 1j*Xs_op) + Zpar;
67
68     % Corrente
69     I1 = Vph_op / Zeq;
70
71     % Divisor de corrente para I2

```

```

72     I2 = I1 * (Zm / (Zm + Zr));
73
74 % Potncia convertida e Torque
75 P_conv = 3 * abs(I2)^2 * Rr_linha * (1 - s) / s;
76 wmech = omega_sinc_op * (1 - s);
77
78 if wmech > 0
79     Torque_vec(i) = P_conv / wmech;
80 elseif wmech == 0 && s == 1 % Torque de partida
81     % Frmula alternativa direta para partida ou limite
82     Torque_vec(i) = (3 * abs(I2)^2 * Rr_linha) / omega_sinc_op;
83 end
84
85
86 % 5. Plotar a curva
87 plot(nmec_vec, Torque_vec, 'LineWidth', 2, 'Color', cores(k,:));
88
89 % Criar texto para legenda
90 legendas{k} = sprintf('%.3f Vn, %.3f fn', fator, fator);
91 end
92
93 %% Formatao do Grfico
94 grid on;
95 title('Curvas Torque x Velocidade sob Controle V/f');
96 xlabel('Velocidade Mecnica (rpm)');
97 ylabel('Torque (N.m)');
98 legend(legendas, 'Location', 'northeast');
99 xlim([0 2000]); % Fixar eixo X para ver o deslocamento das curvas
100 ylim([0 3500]); % Ajustar conforme o pico mximo do motor
101
102 saveas(fig, '4_torque_vs_velocidade_vf_variavel.png');
103
104 hold off;

```