



Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA
Engenharia de Energia

Obtenção dos Parâmetros do Motor de Indução Trifásico Utilizando Matlab/Simulink

Autor: Vinicius Tadeu Ciurlino
Orientador: Dr. Flávio Henrique J. R. Da Silva

Brasília, DF
2021



Vinicius Tadeu Ciurlino

Obtenção dos Parâmetros do Motor de Indução Trifásico Utilizando Matlab/Simulink

Monografia submetida para o título de graduação em Engenharia de Energia na Universidade de Brasília, como parte do requerimento para o título de bacharelado em (Engenharia de Energia).

Universidade de Brasília - UnB

Faculdade UnB Gama - FGA

Orientador: Dr. Flávio Henrique J. R. Da Silva

Brasília, DF

2021

Vinicius Tadeu Ciurlino

Obtenção dos Parâmetros do Motor de Indução Trifásico Utilizando Matlab/Simulink/ Vinicius Tadeu Ciurlino. – Brasília, DF, 2021-
84 p. : il.

Orientador: Dr. Flávio Henrique J. R. Da Silva

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA , 2021.

I. Dr. Flávio Henrique J. R. Da Silva. II. Universidade de Brasília. III.
Faculdade UnB Gama. IV. Obtenção dos Parâmetros do Motor de Indução
Trifásico Utilizando Matlab/Simulink

CDU 02:141:005.6

Vinicius Tadeu Ciurlino

Obtenção dos Parâmetros do Motor de Indução Trifásico Utilizando Matlab/Simulink

Monografia submetida para o título de graduação em Engenharia de Energia na Universidade de Brasília, como parte do requerimento para o título de bacharelado em (Engenharia de Energia).

Trabalho aprovado. Brasília, DF, 24 de maio de 2021:

Dr. Flávio Henrique J. R. Da Silva
Orientador

Dr. Alex Reis
Convidado 1

Dr. Rudi Henri vans Els
Convidado 2

Brasília, DF
2021

Agradecimentos

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus por ter me abençoado em toda essa trajetória.

Aos meus pais, Paulo e Paula, que me incentivaram a retornar para os estudos e me deram todo suporte sempre, principalmente nos momentos difíceis que passei.

Ao meu irmão, Victor, que caminhou boa parte desse caminho comigo.

Ao Professor Dr. Flávio Henrique J. R. Da Silva, por me orientar e auxiliar não só com esse trabalho, mas também com outras disciplinas importantes para minha formação.

Aos professores da FGA que sempre foram atentos e cordiais, sempre dispostos a me ensinar da melhor maneira possível.

A todos os colegas que por algum momento estiveram presentes dentro deste percurso.

*“Seja você quem for, seja qual for a posição social que você tenha na vida,
a mais alta ou a mais baixa, tenha sempre como meta muita força,
e sempre faça tudo com muito amor e com muita fé em Deus,
que um dia você chega lá. De alguma maneira você chega lá.”*

(Ayrton Senna)

Resumo

Motores de indução trifásicos são amplamente utilizados em instalações industriais. Esta aplicação intensifica a procura por máquinas de indução com características que atendam da melhor forma a demanda necessária. O estudo do circuito equivalente do motor de indução trifásico, e como ele é obtido, é importante para o entendimento dos fatores que ocorrem no processo de conversão da energia elétrica em energia mecânica. O objetivo deste trabalho é propor uma modelagem computacional utilizando o *software Matlab / Simulink* para realização do ensaio CC, do ensaio a vazio e do ensaio de rotor bloqueado de um motor de indução trifásico. Nestes ensaios são realizadas medições de grandezas e a partir destas grandezas é desenvolvido o equacionamento para obtenção do circuito equivalente por fase do motor de indução trifásico. Este trabalho realiza a comparação dos parâmetros fornecidos pelo *software* com os parâmetros obtidos após a realização dos ensaios e os resultados validam a modelagem computacional como uma alternativa para a realização de ensaios de forma didática.

Palavras-chaves: motor de indução, circuito equivalente, ensaio, *Matlab*.

Abstract

Three-phase induction motors are widely used in industrial installations, this application intensifies the demand for induction machines with characteristics that best meet the required demand. The study of the equivalent circuit of the three-phase induction motor, and how it is obtained, is important for understanding the factors that occur in the process of converting electrical energy into mechanical energy. The objective of this work is to propose a computational modeling using *software Matlab / Simulink* to perform the CC test, the empty test and the blocked rotor test of a three-phase induction motor. In these tests, measurements of quantities are made and from these quantities the equation is developed to obtain the equivalent circuit per phase of the three-phase induction motor. In this work it is possible to compare the parameters provided by *Matlab / Simulink* with the parameters obtained after the tests and the results validate the computational modeling as an alternative for conducting tests in a didactic way.

Key-words: Induction Motor, Equivalent Circuit, Test, *Matlab*.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Motor de indução (WEG, 2020)	25
Figura 2 – Rotor gaiola de esquilo (BIM, 2012)	26
Figura 3 – Rotor bobinado (BIM, 2012)	27
Figura 4 – Tensão (pu) x Tempo (UMANS, 2014)	27
Figura 5 – Estator (CHAPMAN, 2013)	28
Figura 6 – Diagrama fasorial (CHAPMAN, 2013)	29
Figura 7 – Diagramas fasoriais (CHAPMAN, 2013)	31
Figura 8 – Produção de conjugado induzido (CHAPMAN, 2013)	34
Figura 9 – conjugado × velocidade (UMANS, 2014)	35
Figura 10 – Curvas Conjugado × Velocidade categorias (MAMEDE, 2007)	36
Figura 11 – Modelo transformador para motor de indução (CHAPMAN, 2013)	37
Figura 12 – Circuito equivalente (CHAPMAN, 2013)	39
Figura 13 – Fluxo de potência (CHAPMAN, 2013)	39
Figura 14 – Circuito equivalente aberto (CHAPMAN, 2013)	42
Figura 15 – Circuito equivalente aberto (CHAPMAN, 2013)	42
Figura 16 – Circuito equivalente simplificado (CHAPMAN, 2013)	43
Figura 17 – Circuito de ligação ensaio a vazio (CHAPMAN, 2013)	45
Figura 18 – Circuito final ensaio a vazio	45
Figura 19 – Circuito de ligação ensaio CC (CHAPMAN, 2013)	46
Figura 20 – Circuito de ligação ensaio rotor bloqueado (CHAPMAN, 2013)	47
Figura 21 – Circuito equivalente ensaio rotor bloqueado (CHAPMAN, 2013)	47
Figura 22 – Biblioteca Simulink	52
Figura 23 – Parâmetros do motor de indução	52
Figura 24 – Bloco: Powergui	53
Figura 25 – Bloco: Fonte CC	53
Figura 26 – Bloco: Voltímetro	54
Figura 27 – Bloco: Amperímetro	54
Figura 28 – Bloco: Wattímetro	54
Figura 29 – Bloco: Resistência do núcleo	55
Figura 30 – Bloco: Fonte de tensão trifásica programável	55
Figura 31 – Bloco: Constante	55
Figura 32 – Bloco: <i>Display</i>	55
Figura 33 – Bloco: Terminal	56
Figura 34 – Bloco: Terra	56
Figura 35 – Bloco: RMS	56
Figura 36 – Bloco: Barramento seletor	56

Figura 37 – Bloco: Ganho	57
Figura 38 – Configuração bloco Fonte CC	58
Figura 39 – Configuração bloco Constante	58
Figura 40 – Configuração bloco Ramo RLC	59
Figura 41 – Diagrama de ligação ensaio CC	60
Figura 42 – Diagrama de ligação ensaio CC após a execução do ensaio	60
Figura 43 – Configuração bloco Fonte de tensão trifásica programável	62
Figura 44 – Configuração bloco Medidor de potência	62
Figura 45 – Configuração bloco Barramento seletor	63
Figura 46 – Configuração bloco Ganho	63
Figura 47 – Diagrama de ligação ensaio a vazio	64
Figura 48 – Diagrama de ligação ensaio a vazio após o ensaio	65
Figura 49 – Configuração bloco Motor de indução trifásico para ensaio de rotor bloqueado	66
Figura 50 – Configuração bloco Motor de indução trifásico para ensaio de rotor bloqueado sem escolha do motor	67
Figura 51 – Configuração bloco Motor de indução trifásico para ensaio de rotor bloqueado aplicando condição de inércia infinita	67
Figura 52 – Diagrama de ligação ensaio de rotor bloqueado	68
Figura 53 – Diagrama de ligação ensaio de rotor bloqueado após o ensaio	68
Figura 54 – Configuração bloco Soma	70
Figura 55 – Configuração bloco Step	70
Figura 56 – Diagrama do ensaio com torque mecânico variável	71
Figura 57 – Curva bloco Scope torque mecânico \times tempo	72
Figura 58 – Curva bloco Scope velocidade \times tempo	72
Figura 59 – Curva bloco Scope corrente fase A \times tempo	73
Figura 60 – Curva bloco Scope torque eletromagnético \times tempo	73
Figura 61 – Curvas de conjugado \times velocidade a partir dos parâmetros fornecidos pelo Bloco do motor de indução e dos parâmetros calculados	80

Lista de tabelas

Tabela 1 – Valores de corrente, tensão e potência dos ensaios	75
Tabela 2 – Comparação dos parâmetros obtidos com os dados do bloco do motor de indução trifásico	77
Tabela 3 – Comparação dos parâmetros obtidos com os dados do bloco do motor de indução trifásico	80

Lista de abreviaturas e siglas

MIT	Motor de indução trifásico
CC	Corrente contínua
CA	Corrente alternada
t	Tempo
ω	Velocidade angular
s	Escorregamento
p	Número de polos
n_{sinc}	Velocidade síncrona
n_{esc}	Velocidade de escorregamento
n_m	Velocidade do motor
f	Frequência
f_r	Frequência do rotor
f_s	Frequência do estator
e_{ind}	Tensão induzida
v	Velocidade
l	comprimento do condutor
τ_{ind}	Conjugado induzido
τ_{max}	Conjugado máximo
$\tau_{partida}$	Conjugado de partida
n	Relação de espiras
X_M	Reatância de magnetização
R_C	Resistor de perdas do núcleo
R_1	Resistência do enrolamento do estator

R_2	Resistência do enrolamento do rotor
X_1	Reatância de dispersão
X_R	Reatância do rotor
R_{RB}	Resistência de rotor bloqueado
X_{RB}	Reatância de rotor bloqueado
R_{TH}	Resistência de Thévenin
X_{TH}	Reatância de Thévenin
V_{TH}	Tensão de Thévenin
$P_{entrada}$	Potência de entrada
$P_{saída}$	Potência de saída
P_{EF}	Potência de entreferro
P_{conv}	Potência convertida
P_{PCE}	Perdas no cobre do estator
P_{PCR}	Perdas no cobre do rotor
$P_{núcleo}$	Perdas no núcleo
$P_{atritoevent}$	Perdas por atrito e ventilação
P_{suplem}	Perdas suplementares
H	Intensidade do campo magnético
B	Densidade de fluxo magnético

Sumário

1	INTRODUÇÃO	23
1.1	OBJETIVO	24
1.2	ESTRUTURA DO TRABALHO	24
2	REFERENCIAL TEÓRICO	25
2.1	ASPECTOS CONSTRUTIVOS	25
2.1.1	Estator	25
2.1.2	Rotor	25
2.1.3	Tipos de rotor	26
2.1.3.1	Rotor gaiola de esquilo	26
2.1.3.2	Rotor bobinado	27
2.2	CAMPO GIRANTE	27
2.3	VELOCIDADE SÍNCRONA	32
2.4	ESCORREGAMENTO	33
2.5	FREQUÊNCIA	33
2.6	CONJUGADO INDUZIDO	34
2.7	CONJUGADO \times VELOCIDADE	35
2.8	CIRCUITO EQUIVALENTE	36
2.8.1	Modelo de circuito do rotor	37
2.8.2	Circuito equivalente final	38
2.9	FLUXO DE POTÊNCIA	39
2.9.1	Potência de entrada	39
2.9.2	Perdas no cobre estator	40
2.9.3	Perdas no núcleo	40
2.9.4	Perdas no cobre do rotor	40
2.9.5	Perdas por atrito, ventilação e suplementares	40
2.9.6	Perdas rotacionais	40
2.9.7	Potência de entreferro	40
2.9.8	Potência mecânica desenvolvida	41
2.9.9	Potência de saída	41
2.10	CONJUGADO E POTÊNCIA UTILIZANDO O TEOREMA DE THÉVENIN	41
2.11	ENSAIOS	44
2.11.1	Ensaio a vazio	44
2.11.2	Ensaio CC	46

2.11.3	Ensaio de rotor bloqueado	46
3	METODOLOGIA	51
3.1	ENSAIOS UTILIZANDO O <i>MATLAB</i> / <i>SIMULINK</i>	51
3.1.1	Escolha do motor	52
3.1.2	Blocos utilizados no ensaio	53
3.1.2.1	Powergui	53
3.1.2.2	Fonte de tensão CC	53
3.1.2.3	Medidores	53
3.1.2.4	Ramo em série RLC	54
3.1.2.5	Fonte de tensão trifásica programável	55
3.1.2.6	Demais blocos	55
3.1.3	Ensaio CC	57
3.1.3.1	Blocos utilizados no ensaio CC	57
3.1.3.2	Configuração dos blocos	57
3.1.3.2.1	Fonte CC	58
3.1.3.2.2	Constante	58
3.1.3.2.3	Ramo RLC	58
3.1.3.3	Diagrama do ensaio CC	59
3.1.3.4	Resultado ensaio CC	60
3.1.4	Ensaio a vazio	61
3.1.4.1	Blocos utilizados no ensaio a vazio	61
3.1.4.2	Configuração dos blocos	61
3.1.4.2.1	Fonte de tensão trifásica programável	62
3.1.4.2.2	Bloco de medição de potência	62
3.1.4.2.3	Barramento Seletor	62
3.1.4.2.4	Bloco Ganho	63
3.1.4.3	Diagrama do ensaio a vazio	63
3.1.4.4	Resultado ensaio a vazio	65
3.1.5	Ensaio de rotor bloqueado	65
3.1.5.1	Blocos utilizados no ensaio de rotor bloqueado	65
3.1.5.2	Configuração dos blocos	66
3.1.5.2.1	Motor de indução trifásico	66
3.1.5.3	Diagrama do ensaio de rotor bloqueado	67
3.1.5.4	Resultado do ensaio de rotor bloqueado	68
3.1.6	Ensaio com torque mecânico variável	69
3.1.6.1	Blocos utilizados no ensaio com torque mecânico variável	69
3.1.6.2	Configuração dos blocos	69
3.1.6.2.1	Soma	69
3.1.6.2.2	Step	70

3.1.6.3	Diagrama do ensaio com torque mecânico variável	71
3.1.6.4	Curvas geradas pelo bloco Scope	71
4	RESULTADOS	75
4.1	MEDIÇÕES REALIZADAS NOS ENSAIOS	75
4.1.1	Cálculo dos conjugados através do circuito equivalente de Thévenin	78
5	CONCLUSÃO	81
	REFERÊNCIAS	83

1 INTRODUÇÃO

No final do século XIX, Nikola Tesla exibiu uma forma elementar de um motor de indução polifásico. Em 1889, o engenheiro eletricista Michael von Dolivo Dobrowolsky realizou pedido de patente de um motor trifásico com rotor de gaiola e em 1891 iniciou a fabricação em série de motores assíncronos. Desde então os motores de indução vêm sendo desenvolvidos para melhora de eficiência energética (WEG, 2018).

Atualmente a quantidade de motores de indução na indústria pode ultrapassar os 90% dos motores instalados (FALCONE, 1995). O motor de indução trifásico é capaz de utilizar 95% do seu consumo total para gerar força motriz, e é uma máquina com construção simples, robusta, apresentando baixo custo de manutenção e simplicidade de comandos (ELETROBRÁS, 2009).

O grande uso de motores de indução trifásico nas indústrias gera uma demanda por ensino para que estes motores sejam corretamente dimensionados. Maior corrente de partida, redução de rendimento e redução de fator de potência são problemas ocasionados por um mal dimensionamento da máquina (ELETROBRÁS, 2009).

O circuito equivalente, obtido através da análise de ensaios, pode ser utilizado para determinar uma extensa variedade de características de desempenho de um motor de indução trifásico em regime permanente. Os seguintes métodos de ensaios, ensaio de rotor bloqueado, ensaio a vazio e o ensaio de corrente contínua são os ensaios relacionados à tomada de parâmetros para construção do circuito equivalente (UMANS, 2014).

Os ensaios previamente citados, usualmente, são realizados em laboratórios experimentais, porém, no dia 11 de março de 2020, a Organização Mundial de Saúde elevou a situação de emergência de saúde pública ocasionada pela COVID-19 para pandemia internacional. Com o intuito de diminuir a disseminação do vírus, muitos países começaram a adotar medidas de distanciamento social, entre elas a substituição do ensino presencial por ensino remoto (SANZ; GONZÁLEZ; CAPILLA, 2020).

Devido à importância dos motores de indução e da situação da pandemia, o uso de ferramentas de simulação computacional pode suprir, parcialmente, a limitação do acesso aos laboratórios de ensaios no ambiente das universidades.

Dentre os recursos de simulação computacional, o *Matlab* é uma poderosa ferramenta que combina um ambiente *desktop* para análise interativa com linguagem de programação que expressa matemática. O *Matlab* possui um ambiente chamado *Simulink*, para a diagramação de blocos para simulação de múltiplos domínios e com uma diversificada gama de funcionalidades (MATHWORKS, 2020).

1.1 OBJETIVO

Este trabalho é dedicado a propor uma simulação computacional, para cálculo de parâmetros do circuito equivalente de um motor de indução trifásico por meio de ensaios. Os ensaios realizados no *software Matlab* possibilitam a obtenção dos conjugados de partida, dos conjugados máximo e do escorregamento do motor de indução trifásico.

Este trabalho possibilita aos acadêmicos o contato com a simulação computacional de motores de indução, com restrição ao ambiente virtual para tal prática em virtude da pandemia de COVID-19, iniciada no ano de 2020, que limitou o acesso aos ambientes laboratoriais para a realização de experimentações físicas.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho possui mais 4 capítulos. Sendo o segundo capítulo dedicado a apresentação, operação e o desenvolvimento de equações referentes ao motor de indução trifásico.

O terceiro capítulo é destinado a apresentar a metodologia adotada para a realização dos ensaios utilizando *Matlab / Simulink*.

No quarto capítulo, são apresentados os resultados por meio dos cálculos para encontrar os parâmetros, o conjugado máximo, o conjugado de partida e o escorregamento referente ao conjugado máximo são descritos. Os resultados são apresentados e comparados com os valores presentes no motor de escolha para os ensaios.

Por fim, o quinto capítulo é dedicado a apresentar as conclusões e a sugestão para trabalhos futuros.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo serão apresentados conceitos do motor de indução trifásico e como ocorre o seu funcionamento.

2.1 ASPECTOS CONSTRUTIVOS

O motor de indução trifásico é composto fundamentalmente de duas partes: estator e rotor. A Figura 1 representa um motor trifásico de indução (MAMEDE, 2007).

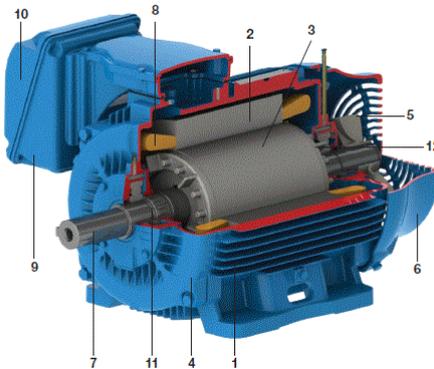


Figura 1 – Motor de indução (WEG, 2020)

2.1.1 Estator

- Carcaça (1) - é a estrutura suporte do conjunto de construção robusta em ferro fundido, aço ou alumínio injetado, resistente à corrosão e normalmente com aletas.
- Núcleo de chapas (2) - as chapas são de aço magnético.
- Enrolamento trifásico (8) - três conjuntos iguais de bobinas, uma para cada fase, formando um sistema trifásico equilibrado ligado à rede trifásica de alimentação.

2.1.2 Rotor

- Eixo (7) - transmite a potência mecânica desenvolvida pelo motor.
- Núcleo de chapas (3) - as chapas possuem as mesmas características das chapas do estator.

- Barras e anéis de curto-circuito (12) - são de alumínio injetado sob pressão numa única peça. Outras partes do motor de indução trifásico.
- Tampa (4) - Componente para fechamento lateral.
- Ventilador (5) - Responsável pela troca de calor acumulado na carcaça.
- Tampa defletora (6) - Componente mecânico instalado na parte traseira do motor.
- Caixa de ligação (9) Local onde estão fixados os terminais de ligação do motor.
- Terminais (10) - Componentes que recebem os condutores de alimentação.
- Rolamentos (11) - Componente responsável pela fixação do eixo.

2.1.3 Tipos de rotor

Os dois tipos de rotores presentes em motores de indução trifásico podem ser o rotor do tipo gaiola de esquilo e o rotor bobinado.

2.1.3.1 Rotor gaiola de esquilo

No rotor do tipo gaiola de esquilo os conectores estão curto circuitados em cada terminal. Em rotores maiores, os anéis dos terminais são soldados aos condutores, em vez de serem moldados na construção do rotor. As barras do rotor gaiola de esquilo nem sempre são paralelas ao eixo do rotor. Essas barras podem ser deslocadas ou colocadas segundo um pequeno ângulo em relação ao eixo. Tal alteração proporciona um torque mais uniforme e permite a diminuição do ruído magnético durante a operação do motor (KOSOW, 1982).

Se os conectores forem analisados isoladamente, eles serão similares àquelas rodas nas quais os esquilos se exercitam, por esse motivo o rotor possui essa nomenclatura (CHAPMAN, 2013).

Um rotor do tipo gaiola de esquilo está ilustrado na Figura 2.

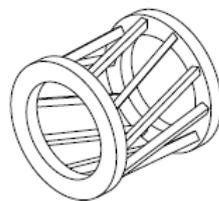


Figura 2 – Rotor gaiola de esquilo (BIM, 2012)

2.1.3.2 Rotor bobinado

De acordo com (CHAPMAN, 2013), um rotor bobinado tem um conjunto completo de enrolamentos trifásicos. As 3 fases do enrolamento do rotor são usualmente ligadas em Y e suas 3 terminações são conectadas aos anéis deslizantes no eixo do rotor. Os enrolamentos do rotor são colocados em curto-circuito por meio de escovas que se apoiam nos anéis deslizantes. Portanto, nos motores que possuem rotor bobinado, as correntes no rotor podem ser acessadas por meio de escovas nas quais as correntes podem ser examinadas e resistências extras podem ser inseridas no circuito do rotor. É possível tirar proveito desses atributos para modificar a característica conjugado \times velocidade.

Um rotor bobinado está ilustrado na Figura 3.

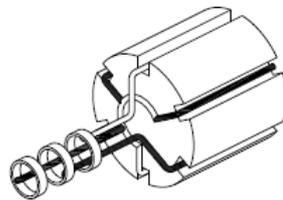


Figura 3 – Rotor bobinado (BIM, 2012)

2.2 CAMPO GIRANTE

Em um motor de indução trifásico, os enrolamentos das fases individuais estão espaçados entre si por 120 graus elétricos no espaço ao redor da superfície do motor e estes enrolamentos são alimentados por correntes elétricas trifásicas defasadas em 120 graus elétricos e com mesma amplitude, representadas graficamente na Figura 4 (UMANS, 2014).

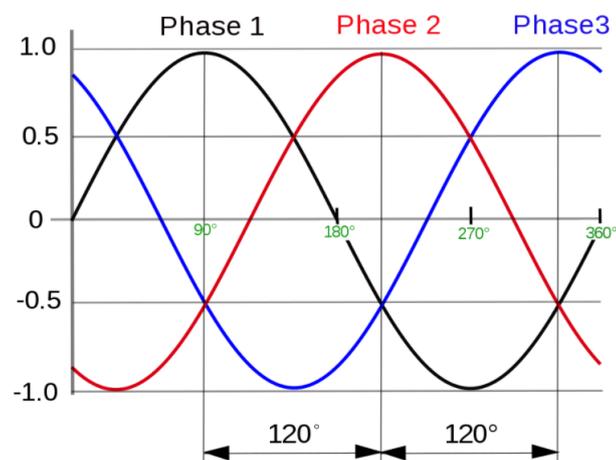


Figura 4 – Tensão (pu) \times Tempo (UMANS, 2014)

Segundo (CHAPMAN, 2013), se correntes trifásicas, todas de mesma intensidade e defasadas de 120° entre si, estiverem fluindo em um enrolamento trifásico, um campo magnético girante de intensidade constante será produzido.

Considerando um estator trifásico simples representado na Figura 5 e aplicando um conjunto de correntes nas bobinas do estator representadas pelas Eq.(2.1), Eq.(2.2) e Eq.(2.3).

$$i_{aa'}(t) = I_{max} \sin(\omega t) \quad (2.1)$$

$$i_{bb'}(t) = I_{max} \sin(\omega t - 120^\circ) \quad (2.2)$$

$$i_{cc'}(t) = I_{max} \sin(\omega t + 120^\circ) \quad (2.3)$$

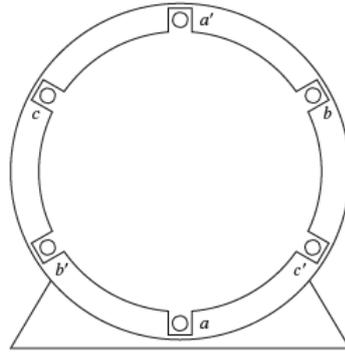


Figura 5 – Estator (CHAPMAN, 2013)

Na bobina aa' a corrente entra pelo terminal a e sai pelo terminal a' . Deste modo, é gerado um campo magnético com intensidade $H_{aa'}$ representado na Eq.(2.4).

$$H_{aa'}(t) = H_{max} \sin \omega t \angle 0^\circ \quad (2.4)$$

Em que 0° é o ângulo espacial do vetor de intensidade de campo magnético, ilustrado na Figura 6. Na mesma figura é possível a visualização dos vetores $H_{bb'}$ e $H_{cc'}$ que são dados pelas Eq.(2.5) e Eq.(2.6).

$$H_{bb'}(t) = H_{max} \sin(\omega t - 120^\circ) \angle 120^\circ \quad (2.5)$$

$$H_{cc'}(t) = H_{max} \sin(\omega t - 240^\circ) \angle 240^\circ \quad (2.6)$$

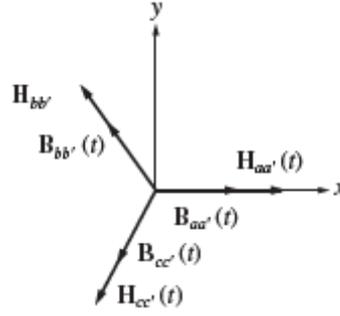


Figura 6 – Diagrama fasorial (CHAPMAN, 2013)

A densidade de campo magnético é obtido através da equação $B = \mu H$ e as densidades de fluxos resultantes são representadas pelas Eq.(2.7), Eq.(2.8) e Eq.(2.9)

$$B_{aa'}(t) = B_{max} \sin \omega t \angle 0^\circ \quad (2.7)$$

$$B_{bb'}(t) = B_{max} \sin(\omega t - 120^\circ) \angle 120^\circ \quad (2.8)$$

$$B_{cc'}(t) = B_{max} \sin(\omega t - 240^\circ) \angle 240^\circ \quad (2.9)$$

Para determinar o campo magnético resultante no estator, são analisados instantes específicos. No instante em que $\omega t = 0$, os valores dos campos magnético das bobinas são representados pelas Eq.(2.10), Eq.(2.11) e Eq.(2.12).

$$B_{aa'} = 0 \quad (2.10)$$

$$B_{bb'} = B_{max} \sin(-120^\circ) \angle 120^\circ \quad (2.11)$$

$$B_{cc'} = B_{max} \sin(-240^\circ) \angle 240^\circ \quad (2.12)$$

O campo resultante resultante das 3 bobinas será a soma dos campos $B_{aa'}$, $B_{bb'}$ e $B_{cc'}$ dado pela resolução da Eq.(2.13).

$$B_{total} = B_{aa'} + B_{bb'} + B_{cc'} \quad (2.13)$$

$$B_{total} = 0 + B_{max} \sin(-120^\circ) \angle 120^\circ + B_{max} \sin(-240^\circ) \angle 240^\circ \quad (2.14)$$

$$B_{total} = \left(-\frac{\sqrt{3}}{2}B_{max}\right) \angle 120^\circ + \left(\frac{\sqrt{3}}{2}B_{max}\right) \angle 240^\circ \quad (2.15)$$

$$B_{total} = \left(\frac{\sqrt{3}}{2}B_{max}\right) [-(\cos 120^\circ \mathbf{i} + \sin 120^\circ \mathbf{j})] + [(\cos 240^\circ \mathbf{i} + \sin 240^\circ \mathbf{j})] \quad (2.16)$$

$$B_{total} = \left(\frac{\sqrt{3}}{2}B_{max}\right) \left(\frac{1}{2}\mathbf{i} - \frac{\sqrt{3}}{2}\mathbf{j} - \frac{1}{2}\mathbf{i} - \frac{\sqrt{3}}{2}\mathbf{j}\right) \quad (2.17)$$

$$B_{total} = \left(\frac{\sqrt{3}}{2}B_{max}\right) (-\sqrt{3}\mathbf{j}) \quad (2.18)$$

$$B_{total} = -1,5B_{max}\mathbf{j} \quad (2.19)$$

$$B_{total} = 1,5B_{max} \angle -90 \quad (2.20)$$

Em que \mathbf{i} é o vetor unitário na direção x e \mathbf{j} é o vetor unitário na direção y. O campo magnético resultante está representado na Figura 7.

Para a segunda análise, o instante a ser analisado será o instante em que $\omega t = 90^\circ$. Os valores das correntes neste instante são apresentadas nas Eq.(2.21), Eq.(2.22) e Eq.(2.23).

$$i_{aa'}(t) = I_{max} \sin(90^\circ) \quad (2.21)$$

$$i_{bb'}(t) = I_{max} \sin(-30^\circ) \quad (2.22)$$

$$i_{cc'}(t) = I_{max} \sin(-150^\circ) \quad (2.23)$$

Aplicando a relação $B = \mu H$, os valores das densidades de fluxo são representados a seguir.

$$B_{aa'}(t) = B_{max} \sin(90) \angle 0^\circ \quad (2.24)$$

$$B_{bb'}(t) = B_{max} \sin(-30^\circ) \angle 120^\circ \quad (2.25)$$

$$B_{cc'}(t) = B_{max} \sin(-150^\circ) \angle 240^\circ \quad (2.26)$$

O campo magnético resultante é obtido através da soma dos campos magnéticos.

$$B_{total} = B_{aa'} + B_{bb'} + B_{cc'} \quad (2.27)$$

$$B_{total} = B_{max}\angle 0^\circ + B_{max}\sin(-30)\angle 120^\circ + B_{max}\sin(-150)\angle 240^\circ \quad (2.28)$$

$$B_{total} = B_{max}\angle 0^\circ + \left(-\frac{1}{2}B_{max}\right)\angle 120^\circ + \left(-\frac{1}{2}B_{max}\right)\angle 240^\circ \quad (2.29)$$

$$B_{total} = B_{max}\left[\mathbf{i} - \frac{1}{2}(\cos 120^\circ\mathbf{i} + \sin 120^\circ\mathbf{j}) - \frac{1}{2}(\cos 240^\circ\mathbf{i} + \sin 240^\circ\mathbf{j})\right] \quad (2.30)$$

$$B_{total} = B_{max}\left(\mathbf{i} - \frac{1}{2}\mathbf{i} - \frac{\sqrt{3}}{2}\mathbf{j} - \frac{1}{2}\mathbf{i} - \frac{\sqrt{3}}{2}\mathbf{j}\right) \quad (2.31)$$

$$B_{total} = \left(\frac{\sqrt{3}}{2}B_{max}\right)(-\sqrt{3}\mathbf{j}) \quad (2.32)$$

$$B_{total} = -1,5B_{max}\mathbf{j} \quad (2.33)$$

$$B_{total} = 1,5B_{max}\angle -90 \quad (2.34)$$

Os campos magnéticos resultantes dos instantes, $\omega t = 0^\circ$ e $\omega t = 90^\circ$, estão ilustrados na Figura 7 por meio de fasores. É possível visualizar que o sentido do campo magnético resultante varia, porém a intensidade permanece constante. O sentido de rotação do campo magnético é anti-horário (CHAPMAN, 2013).

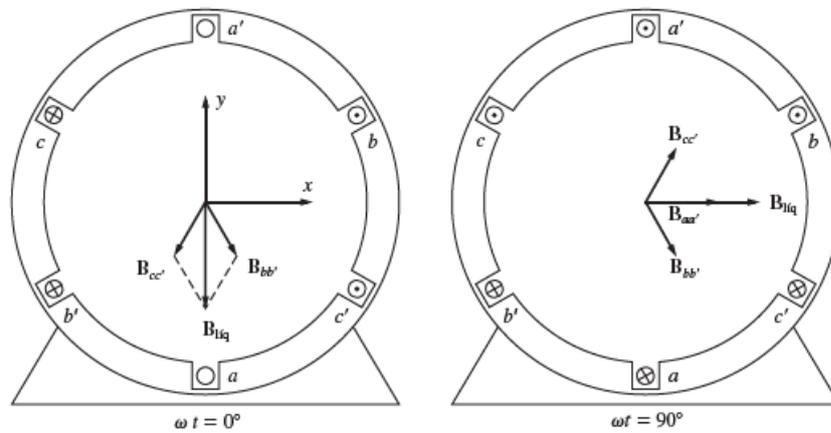


Figura 7 – Diagramas fasoriais (CHAPMAN, 2013)

A expressão da densidade de fluxo magnético total é dada pela Eq.(2.35).

$$B_{total}(t) = B_{aa'}(t) + B_{bb'}(t) + B_{cc'}(t) \quad (2.35)$$

Aplicando os valores dos fluxos magnéticos das bobinas na Eq.(2.35).

$$B_{total}(t) = B_{max} \sin(\omega t) \angle 0^\circ + B_{max} \sin(\omega t - 120^\circ) \angle 120^\circ + B_{max} \sin(\omega t - 240^\circ) \angle 240^\circ \quad (2.36)$$

Os 3 campos possuem componentes no eixo x e no eixo y e podem ser decompostos.

$$B_{total}(t) = B_{max} \sin(\omega t) \mathbf{i} - [0, 5B_{max} \sin(\omega t - 120^\circ)] \mathbf{i} + \left[\frac{\sqrt{3}}{2} B_{max} \sin(\omega t - 120^\circ) \right] \mathbf{j} \\ - [0, 5B_{max} \sin(\omega t - 240^\circ)] \mathbf{i} - \left[\frac{\sqrt{3}}{2} B_{max} \sin(\omega t - 240^\circ) \right] \mathbf{j} \quad (2.37)$$

Reorganizando os termos da Eq.(2.37) com os devidos vetores unitários

$$B_{total}(t) = [B_{max} \sin(\omega t) - 0, 5B_{max} \sin(\omega t - 120^\circ) - 0, 5B_{max} \sin(\omega t - 240^\circ)] \mathbf{i} \\ + \left[\frac{\sqrt{3}}{2} B_{max} \sin(\omega t - 120^\circ) - \frac{\sqrt{3}}{2} B_{max} \sin(\omega t - 240^\circ) \right] \mathbf{j} \quad (2.38)$$

Aplicando identidades trigonométricas na Eq.(2.38).

$$B_{total}(t) = \\ \left[B_{max} \sin(\omega t) + \frac{1}{4} B_{max} \sin(\omega t) + \frac{\sqrt{3}}{4} B_{max} \cos(\omega t) + \frac{1}{4} B_{max} \sin(\omega t) - \frac{\sqrt{3}}{4} B_{max} \cos(\omega t) \right] \mathbf{i} \\ + \left[-\frac{\sqrt{3}}{4} B_{max} \sin(\omega t) - \frac{3}{4} B_{max} \cos(\omega t) + \frac{\sqrt{3}}{4} B_{max} \sin(\omega t) - \frac{3}{4} B_{max} \cos(\omega t) \right] \mathbf{j} \quad (2.39)$$

Resolvendo a Eq.(2.39), obtém-se a expressão final da densidade líquida de fluxo magnético representada na Eq. (2.40).

$$B_{total}(t) = [1, 5B_{max} \sin(\omega t)] \mathbf{i} - [1, 5B_{max} \cos(\omega t)] \mathbf{j} \quad (2.40)$$

2.3 VELOCIDADE SÍNCRONA

A velocidade síncrona do motor é definida pela velocidade de rotação do campo girante, a qual depende do número de polos do motor e da frequência da rede, em Hertz. Os enrolamentos podem ser construídos com um ou mais pares de polos, que se distribuem alternadamente ao longo da periferia do núcleo magnético. O campo girante percorre um

par de polos a cada ciclo. Assim, como o enrolamento tem polos ou pares de polos, a velocidade do campo pode ser definida pela Eq. (2.41) (WEG, 2020).

$$n_{sinc} = \frac{60 \cdot f}{p} = \frac{120 \cdot f}{2p} (rpm) \quad (2.41)$$

2.4 ESCORREGAMENTO

De acordo com (CHAPMAN, 2013), a tensão induzida nas barras do rotor de um motor de indução depende da velocidade do rotor em relação aos campos magnéticos. Como o comportamento de um motor de indução depende da tensão e da corrente do rotor, muitas vezes é mais lógico falar em velocidade relativa. Um deles é a velocidade relativa de escorregamento que é encontrada a partir da Eq.(2.42).

$$n_{esc} = n_{sinc} - n_m \quad (2.42)$$

em que n_{esc} é a velocidade de escorregamento da máquina, n_{sinc} é a velocidade síncrona e n_m é a velocidade do motor.

O outro termo usado para descrever o movimento relativo é o escorregamento, que é a velocidade relativa expressa em uma base por unidade ou porcentagem e pode ser encontrado a partir da Eq.(2.43) (UMANS, 2014).

$$S = \frac{n_{sinc} - n_m}{n_{sinc}} (100\%) \quad (2.43)$$

O rotor estará estacionário quando o escorregamento for unitário, e, teoricamente, estará operando com rotação na mesma velocidade que a síncrona quando o fator de escorregamento for nulo. Segundo (UMANS, 2014), a velocidade de rotação do motor não pode ser igual à velocidade síncrona, uma vez que, desta forma, os condutores do rotor estariam estacionários em relação ao campo do estator. Assim, também não haveria corrente induzida nestes condutores, e por conseguinte, não haveria produção de conjugado.

Reorganizando a Eq.(2.43), é possível expressar a velocidade mecânica do motor em termos do escorregamento e a velocidade síncrona.

$$n_m = (1 - S)n_{sinc} \quad (2.44)$$

2.5 FREQUÊNCIA

O motor de indução trifásico trabalha induzindo tensões e correntes no rotor do motor, essa indução ocorre do estator para o rotor, porém a frequência do rotor não é

necessariamente a mesma frequência do estator (CHAPMAN, 2013).

Segundo (UMANS, 2014), o movimento relativo entre o fluxo do estator e os condutores do rotor induz tensões de frequência f_r obtida através da Eq.(2.45).

$$f_r = s f_e \quad (2.45)$$

Onde, f_r é a frequência do rotor, f_e é a frequência do estator e s é o escorregamento.

2.6 CONJUGADO INDUZIDO

De acordo com (CHAPMAN, 2013), a tensão induzida em uma barra do rotor é dada pela Eq.(2.46).

$$e_{ind} = (v \times B).l \quad (2.46)$$

onde v é a velocidade da barra em relação ao campo magnético, B é o vetor de fluxo magnético e l é o comprimento do condutor dentro do campo magnético.

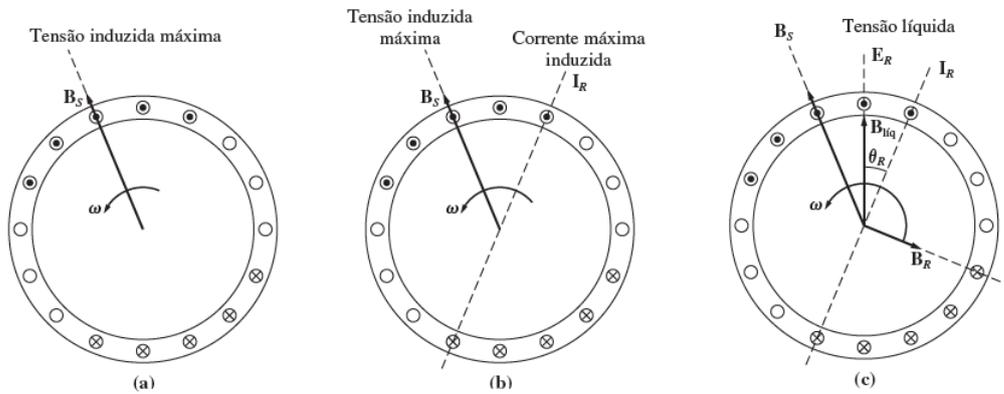


Figura 8 – Produção de conjugado induzido (CHAPMAN, 2013)

A Figura 8 ilustra a produção de conjugado induzido em um motor de indução. A Figura (a) representa o campo girante de estator B_s induz uma tensão nas barras do rotor. Na Figura (b) a tensão no rotor produz um fluxo de corrente no rotor, que está atrasado em relação à tensão devido à indutância do rotor. Na Figura (c) a corrente do rotor produz um campo magnético girante B_R que está atrasado 90° a própria corrente. O campo B_R interage com o campo líquido B_{liq} (CHAPMAN, 2013).

O conjugado induzido é encontrado a partir da Eq.(2.47).

$$\tau_{ind} = k B_r \times B_s \quad (2.47)$$

em que $k = \frac{K}{\mu}$, o conjugado induzido do rotor é anti-horário, o rotor acelera nesse sentido.

Se o rotor estiver girando na velocidade síncrona, as barras do rotor estariam estacionárias em relação ao campo magnético e então não existiria nenhum conjugado induzido (CHAPMAN, 2013).

2.7 CONJUGADO \times VELOCIDADE

A Figura 9 representa uma curva típica de conjugado \times velocidade de um motor de indução operando com tensão e frequência constantes. No gráfico é possível observar que, quando a velocidade chega a 100% da velocidade síncrona o conjugado é nulo (UMANS, 2014).

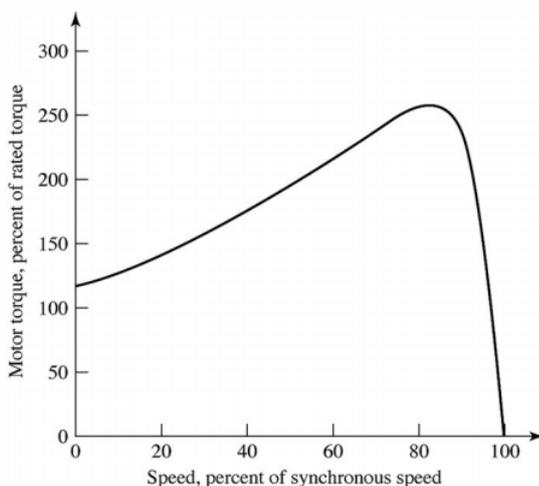


Figura 9 – conjugado \times velocidade (UMANS, 2014)

O motor de indução trifásico do tipo gaiola de esquilo pode ser classificado conforme suas características de conjugado em relação à velocidade e à corrente de partida, essas categorias são definidas pela norma NBR 17094. As curvas conjugado \times velocidade das respectivas categorias estão representadas na Figura 10 (MAMEDE, 2007).

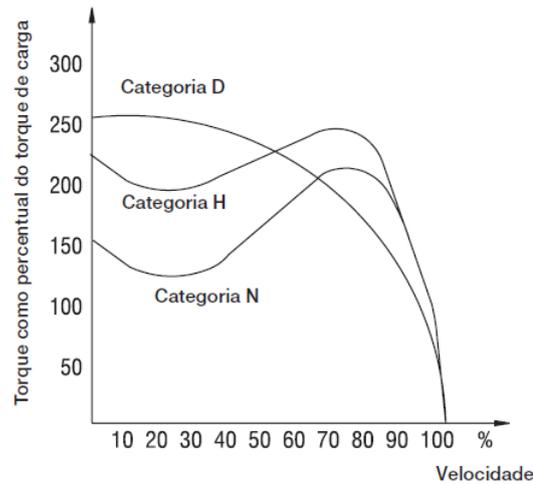


Figura 10 – Curvas Conjugado \times Velocidade categorias (MAMEDE, 2007)

A categoria N é constituída por máquinas com conjugado de partida normal, corrente de partida normal e baixo escorregamento. A maioria dos motores encontrados no mercado se encontram nessa categoria.

A categoria H é constituída por máquinas com conjugado de partida alto, corrente de partida normal e baixo escorregamento. As máquinas dessa categoria são usadas para cargas que exigem maior conjugado de partida.

A categoria D é constituída por máquinas com conjugado de partida alto, corrente de partida normal e alto escorregamento, mais de 5%. São usados em aplicações que apresentam picos periódicos de carga.

2.8 CIRCUITO EQUIVALENTE

O circuito equivalente de um motor de indução trifásico auxilia a realização do cálculo de desempenho e a análise de operação do motor (TORO, 1999).

Um motor de indução fundamenta-se na indução realizada pelo circuito do estator de tensões e correntes no circuito do rotor. As tensões e correntes no circuito do rotor são basicamente resultados de uma ação de transformador, então o circuito equivalente de um motor de indução trifásico será semelhante ao circuito de um transformador. A Figura 11 representa o modelo de transformador para motor de indução. No circuito, o rotor e o estator estão conectados por meio de um transformador ideal com relação de espiras n (CHAPMAN, 2013).

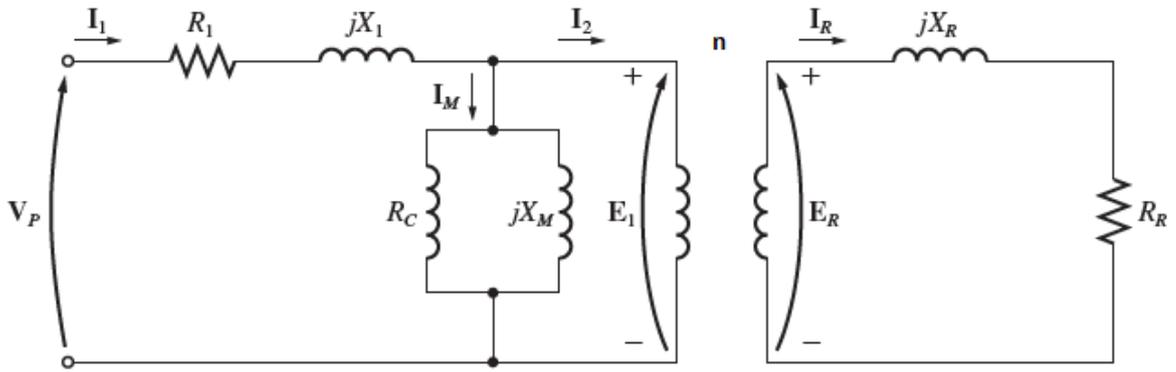


Figura 11 – Modelo transformador para motor de indução (CHAPMAN, 2013)

Onde, X_m é a reatância de magnetização, R_c resistor de perdas no núcleo, R_1 resistência do enrolamento do estator, jX_1 reatância de dispersão, I_m a corrente de magnetização, E_1 a tensão induzida, R_R resistência do rotor, jX_R reatância do rotor e E_R tensão induzida no rotor.

2.8.1 Modelo de circuito do rotor

Segundo (CHAPMAN, 2013), em um motor de indução, quando a tensão é aplicada aos enrolamentos do estator, uma tensão é induzida nos enrolamentos do rotor da máquina. Em geral, quanto maior o movimento relativo entre os campos magnéticos do rotor e do estator, maiores serão a tensão e a frequência do rotor. O movimento relativo máximo ocorre quando o rotor está parado. Essa condição é denominada rotor bloqueado ou travado, de modo que a maior tensão e a maior frequência do rotor são induzidas com o rotor nessa condição. A menor tensão (0 V) e a menor frequência (0 Hz) ocorrem quando o rotor está se movendo com a mesma velocidade que o campo magnético do estator, resultando um movimento relativo nulo. O valor e a frequência da tensão induzida no rotor para qualquer velocidade entre esses extremos é diretamente proporcional ao escorregamento do rotor. Portanto, se o valor da tensão induzida no rotor, estando este bloqueado, for denominada E_{R0} , então o valor da tensão induzida para qualquer escorregamento pode ser representada pela Eq.(2.48).

$$E_R = sE_{R0} \quad (2.48)$$

E a frequência dessa tensão induzida será dada pela Eq.(2.45).

A resistência R_R é constante independentemente do valor do escorregamento s , porém a reatância do rotor é afetada pelo escorregamento. O termo X_R é representado

pela Eq.(2.49).

$$X_R = \omega_r L_R = 2\pi f_r L_R \quad (2.49)$$

Onde L_R é a indutância do enrolamento do rotor. Aplicando a Eq.(2.45) na Eq.(2.49).

$$X_R = 2\pi s f_e L_R \quad (2.50)$$

Reorganizando a equação e adicionando o termo X_{R0} que é o valor da reatância do rotor quando o rotor está bloqueado.

$$X_R = sX_{R0} \quad (2.51)$$

Aplicando a segunda Lei de Kirchhoff, que indica que em uma malha em um dado sentido a soma algébrica das tensões é igual a zero, na parte do rotor indicado na Figura 11.

$$I_R = \frac{E_R}{R_R + jX_R} \quad (2.52)$$

Fazendo a substituição da Eq.(2.51) na Eq.(2.52) e multiplicando o numerador e o denominador por $1/s$.

$$I_R = \frac{E_{R0}}{\frac{R_R}{s} + jX_{R0}} \quad (2.53)$$

A partir da Eq.(2.53) é possível representar o valor da impedância equivalente do rotor pela Eq.(2.54).

$$Z_{eq} = \frac{R_R}{s} + jX_{R0} \quad (2.54)$$

2.8.2 Circuito equivalente final

Para obtenção do circuito equivalente final por fase de um motor de indução, é necessário que a parte do rotor seja referida ao lado do estator (CHAPMAN, 2013).

Referindo os parâmetros do lado do rotor para o lado do estator por meio da relação de espiras n , tem-se:

$$E_1 = nE_{R0} \quad (2.55)$$

$$I_2 = \frac{I_R}{n} \quad (2.56)$$

$$Z_2 = n^2 \left(\frac{R_R}{s} + jX_{R0} \right) \quad (2.57)$$

Adotando $R_2 = n^2 R_R$ e $X_2 = n^2 jX_{R0}$, o circuito final equivalente é representado pela Figura 12.

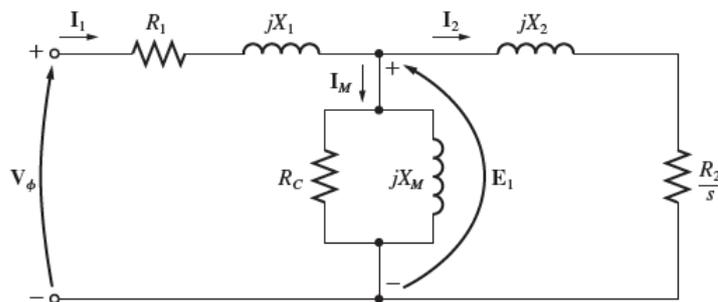


Figura 12 – Circuito equivalente (CHAPMAN, 2013)

2.9 FLUXO DE POTÊNCIA

O motor de indução trifásico é um conversor eletromecânico de energia que é alimentado pela rede elétrica, em que parte desta energia elétrica é convertida em energia mecânica. Durante esse processo de conversão ocorrem perdas por determinados fatores, essas perdas estão representadas na Figura 13.

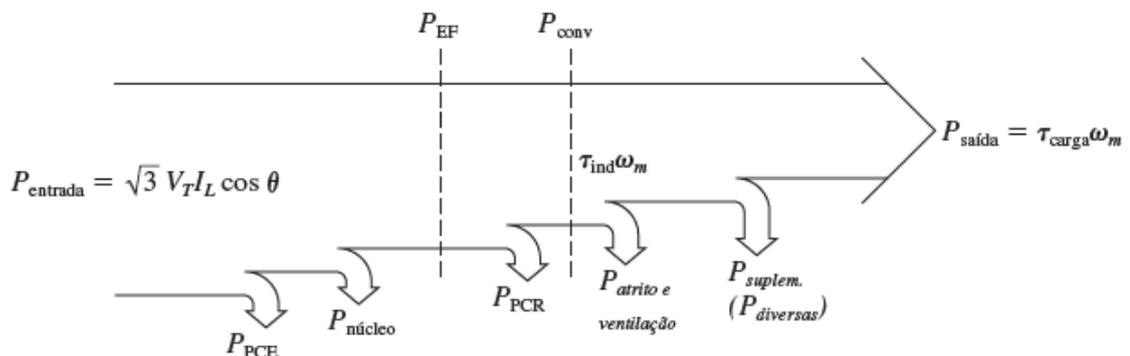


Figura 13 – Fluxo de potência (CHAPMAN, 2013)

2.9.1 Potência de entrada

O termo $P_{entrada}$ refere-se a potência de alimentação trifásica.

2.9.2 Perdas no cobre estator

O termo P_{PCE} se refere as perdas nos enrolamentos do estator, e os valores dessas perdas são encontrados a partir da Eq.(2.58).

$$P_{PCE} = 3R_1 I_1^2 \quad (2.58)$$

2.9.3 Perdas no núcleo

As perdas no núcleo ocorrem por meio de histerese e correntes parasitas no estator. Os valores das perdas do núcleo são obtidos através da Eq.(2.59).

$$P_{núcleo} = \frac{3E_1^2}{R_c} \quad (2.59)$$

2.9.4 Perdas no cobre do rotor

O termo P_{PCR} se refere às perdas nos enrolamentos do rotor, e os valores dessas perdas são encontrados a partir da Eq.(2.60).

$$P_{PCR} = 3R_2 I_2^2 \quad (2.60)$$

2.9.5 Perdas por atrito, ventilação e suplementares

As perdas de atrito e ventilação variam de acordo com a velocidade do motor de indução. Maiores velocidades acarretam maiores perdas por atrito, ventilação e suplementares. Por outro lado, menores velocidades acarretam maiores perdas no núcleo.

2.9.6 Perdas rotacionais

Por conta da relação direta entre velocidade do motor e as perdas por atrito, ventilação, suplementares e no núcleo com a velocidade do motor de indução, é possível combiná-las e denominá-las perdas rotacionais. Geralmente as perdas rotacionais são consideradas constantes.

2.9.7 Potência de entreferro

A potência de entreferro é a potência que resta após as perdas no cobre do estator e as perdas no núcleo. A potência do entreferro pode ser calculada a partir da Eq.(2.61).

$$P_{EF} = P_{entrada} - (P_{PCE} + P_{núcleo}) \quad (2.61)$$

A partir da Figura 12, é possível observar que o único elemento do circuito capaz de consumir a potência de entreferro é o resistor R_2/s . A potência do entreferro pode ser encontrada pela Eq.(2.62).

$$P_{EF} = 3I_2^2 \frac{R_2}{s} \quad (2.62)$$

2.9.8 Potência mecânica desenvolvida

A potência mecânica desenvolvida é a potência resultante da ação das perdas no cobre do rotor na potência de entreferro. A potência mecânica desenvolvida é encontrada a partir da Eq.(2.63).

$$P_{conv} = P_{EF} - P_{PCR} \quad (2.63)$$

Substituindo a Eq.(2.62) e a Eq.(2.60) na Eq.(2.63).

$$P_{conv} = 3I_2^2 \frac{R_2}{s} - 3R_2 I_2^2 \quad (2.64)$$

Realizando a simplificação da Eq.(2.64).

$$P_{conv} = 3I_2^2 R_2 \left(\frac{1-s}{s} \right) \quad (2.65)$$

2.9.9 Potência de saída

A potência de saída é a que exercida no eixo da máquina e pode ser encontrada a partir da Eq.(2.66).

$$P_{saída} = \tau_{carga} \omega_m \quad (2.66)$$

2.10 CONJUGADO E POTÊNCIA UTILIZANDO O TEOREMA DE THÉVENIN

O Teorema de Thévenin diz que um circuito linear de dois terminais pode ser substituído por um circuito formado por uma fonte de tensão em série com uma impedância equivalente. O Teorema de Thévenin é muito importante para análise de circuitos, pois ele permite realizar a simplificação do circuito (ALEXANDER; SADIKU, 2013).

Para encontrar o equivalente de Thévenin do circuito equivalente do motor de indução, ao lado esquerdo do ramo de magnetização, primeiramente é necessário abrir o

circuito do lado do rotor, o circuito aberto está representado na Figura 14, e calcular o valor da tensão de Thévenin na reatância jX_m por meio do divisor de tensão indicado na Eq.(2.67).

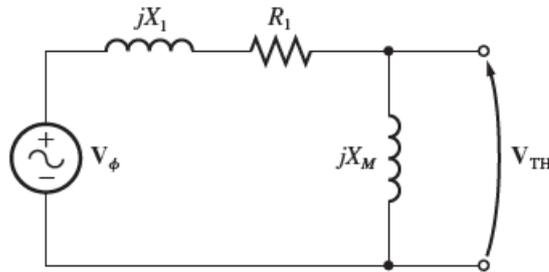


Figura 14 – Circuito equivalente aberto (CHAPMAN, 2013)

$$\mathbf{V}_{TH} = \frac{jX_M}{R_1 + j(X_1 + X_m)} \mathbf{V}_\phi \quad (2.67)$$

Representando a Eq.(2.67) em termos de magnitudes.

$$V_{TH} = \frac{X_M}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_m)^2}} V_\phi \quad (2.68)$$

A reatância de magnetização X_M é muito maior que X_1 e R_1 . O valor da tensão de Thévenin pode ser encontrado a partir da Eq.(2.69).

$$V_{TH} \approx V_\phi \frac{X_M}{X_1 + X_M} \quad (2.69)$$

Para o cálculo da impedância de Thévenin, a fonte de tensão é colocada em curto-circuito e é realizado o equivalente do circuito apresentado na Figura 15.

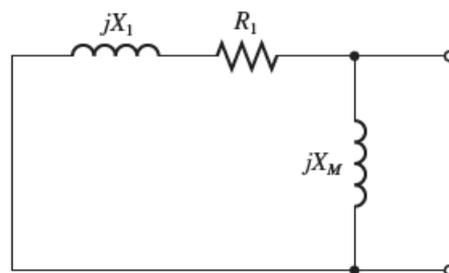


Figura 15 – Circuito equivalente aberto (CHAPMAN, 2013)

$$Z_{TH} = \frac{jX_M(R_1 + jX_1)}{R_1 + j(X_1 + X_m)} \quad (2.70)$$

A reatância de magnetização X_M é muito maior que X_1 e a soma $X_1 + X_M$ é muito maior que R_1 . O valor da resistência de Thévenin e da impedância de Thévenin pode ser encontrado das Eq.(2.71) e Eq.(2.72)

$$X_{TH} \approx X_1 \quad (2.71)$$

$$R_{TH} \approx R_1 \left(\frac{X_M}{X_1 + X_M} \right)^2 \quad (2.72)$$

O circuito equivalente simplificado está representado na Figura 16. Deste circuito é possível encontrar a equação que fornece o valor de I_2 através da segunda Lei de Kirchhoff, representado na Eq.(2.73).

$$\mathbf{I}_2 = \frac{\mathbf{V}_{TH}}{R_{TH} + R_2/s + j(X_{TH} + X_2)} \quad (2.73)$$

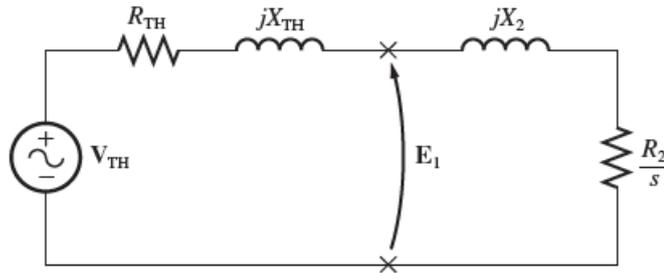


Figura 16 – Circuito equivalente simplificado (CHAPMAN, 2013)

Representando a Eq.(2.73) em termos de magnitude.

$$I_2 = \frac{V_{TH}}{\sqrt{(R_{TH} + R_2/s)^2 + (X_{TH} + X_2)^2}} \quad (2.74)$$

A potência do entreferro está representada na Eq.(2.62), substituindo a Eq.(2.74) na Eq.(2.62).

$$P_{EF} = \frac{3V_{TH}^2 R_2/s}{(R_{TH} + R_2/s)^2 + (X_{TH} + X_2)^2} \quad (2.75)$$

O conjugado induzido do rotor é representado pela Eq.(2.76), aplicando a Eq.(2.75) na equação do conjugado.

$$\tau_{ind} = \frac{P_{EF}}{\omega_{sinc}} \quad (2.76)$$

$$\tau_{ind} = \frac{3V_{TH}^2 R_2/s}{\omega_{sinc} [(R_{TH} + R_2/s)^2 + (X_{TH} + X_2)^2]} \quad (2.77)$$

O conjugado induzido máximo ocorre quando R_2/s possuir o valor de impedância igual ao valor da impedância da fonte, esse esta representado na Eq.(2.78).

$$\frac{R_2}{s} = \sqrt{R_{TH}^2 + (X_{TH} + X_2)^2} \quad (2.78)$$

Organizando a Eq.(2.78) em termo de s é possível definir que o escorregamento para o conjugado máximo do motor é encontrado através da Eq.(2.79).

$$s_{máx} = \frac{R_2}{\sqrt{R_{TH}^2 + (X_{TH} + X_2)^2}} \quad (2.79)$$

Manipulando a Eq.(2.78) para deixá-la em função de s e aplicando na Eq.(2.77), obtem-se o conjugado induzido máximo.

$$\tau_{max} = \frac{3V_{TH}^2}{2\omega_{sinc} [R_{TH} + \sqrt{R_{TH}^2 + (X_{TH} + X_2)^2}]} \quad (2.80)$$

Na partida do motor de indução trifásico, o valor do escorregamento é unitário. A partir desta informação é possível encontrar o conjugado de partida aplicando esta condição na Eq.(2.77)

$$\tau_{partida} = \frac{3V_{TH}^2 R_2}{\omega_{sinc} [(R_{TH} + R_2)^2 + (X_{TH} + X_2)^2]} \quad (2.81)$$

2.11 ENSAIOS

Os parâmetros do circuito equivalente, necessários para o cálculo de desempenho, de um motor de indução podem ser obtidos através de testes e ensaios. Os principais ensaios para análise de parâmetros de motor de indução polifásico são o ensaio a vazio, o ensaio de rotor bloqueado e o ensaio de corrente contínua (UMANS, 2014).

2.11.1 Ensaio a vazio

O ensaio a vazio fornece dados referentes à corrente de excitação e às perdas vazio. A realização desse ensaio, usualmente, ocorre com frequência nominal e com tensões equilibradas aplicadas no estator (UMANS, 2014).

Para a realização do ensaio a vazio é necessário o uso de dois wattímetros, um voltímetro e três amperímetros que são conectados a um motor de indução. O circuito de ligação está ilustrado na Figura 17 (CHAPMAN, 2013).

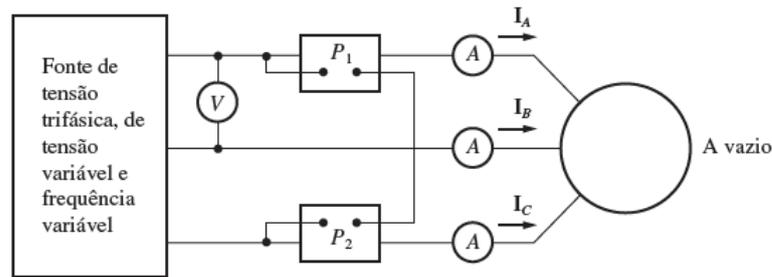


Figura 17 – Circuito de ligação ensaio a vazio (CHAPMAN, 2013)

Segundo (CARCASI, 2005), o valor do escorregamento em vazio é pequeno, da ordem de 1% do escorregamento nominal.

O escorregamento baixo implica que o valor da resistência que corresponde à potência convertida, representado por $R_{conv} = R_2(1 - s)/s$, seja muito maior do que a resistência R_2 que corresponde as perdas no cobre do rotor e muito maior que a reatância X_2 , isto ocasiona um valor muito baixo para I_2 (CHAPMAN, 2013).

O valor da relutância do entreferro é muito elevado. Desse modo, o valor reatância X_m é muito menor que o valor da resistência referente as perdas no núcleo. O circuito final do ensaio a vazio após as considerações é representado na Figura 18 (CARCASI, 2005).

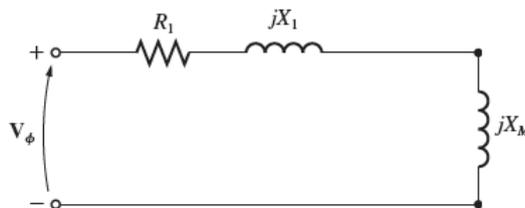


Figura 18 – Circuito final ensaio a vazio

Por conta da alta corrente, a queda de tensão ocorre principalmente sobre os componentes indutivos (CHAPMAN, 2013). Aplicando a segunda lei de Kirchhoff no circuito é possível encontrar a aproximação da impedância de entrada do circuito.

$$|Z_{eq}| = \frac{\hat{V}_\phi}{\hat{I}_{1,vz}} \approx X_1 + X_M \quad (2.82)$$

Durante o ensaio a vazio, os wattímetros indicam os valores das perdas do motor. Sabendo que a perda no cobre do estator é encontrada a partir da Eq.(2.58) e sabendo o valor da potência de entrada, é possível encontrar o valor das perdas rotacionais da

máquina a partir da Eq.(2.83).

$$P_{rot} = P_{entrada} - P_{PCE} \quad (2.83)$$

2.11.2 Ensaio CC

O ensaio CC é o responsável por encontrar o parâmetro R_1 do motor de indução. Como a corrente é contínua, não haverá tensão induzida no circuito do rotor e a reatância do motor é zero com corrente contínua (CHAPMAN, 2013);(UMANS, 2014).

Para a realização deste ensaio é necessário o uso de um voltímetro, um amperímetro e uma fonte de tensão CC. O circuito de ligação está representado na Figura 19 ligado a um motor de indução ligado em Y.

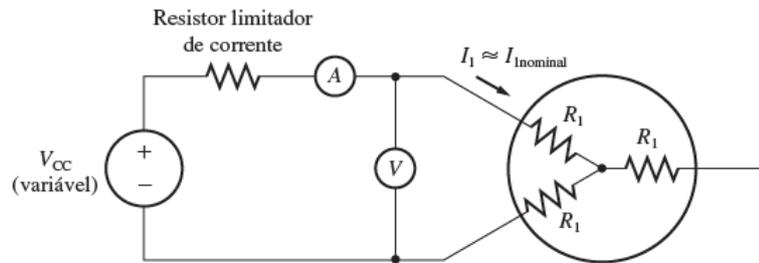


Figura 19 – Circuito de ligação ensaio CC (CHAPMAN, 2013)

A corrente CC circula através de 2 dos enrolamentos do motor, então a resistência equivalente é $2R_1$ e R_1 é representado pela Eq.(2.84).

$$R_1 = \frac{V_{cc}}{2I_{cc}} \quad (2.84)$$

De forma análoga, para o ensaio CC em um motor de indução ligado em Δ , a impedância equivalente é $(2R_1//R_1)$ e R_1 é representada pela Eq.(2.85).

$$R_1 = \frac{3V_{cc}}{2I_{cc}} \quad (2.85)$$

O valor encontrado de R_1 a partir do ensaio CC é um resultado aproximado porque o ensaio ignora os efeito da aplicação de tensão CA aplicada nos enrolamentos do motor de indução (CHAPMAN, 2013).

2.11.3 Ensaio de rotor bloqueado

O ensaio de rotor bloqueado de um motor de indução fornece dados sobre o parâmetro impedância de dispersão. Neste ensaio o rotor é impossibilitado de girar e tensões

equilibradas são aplicadas ao estator (UMANS, 2014).

Para a realização desse ensaio é necessário o uso de dois wattímetros, um voltímetro e três amperímetros. O circuito de ligação do ensaio de rotor bloqueado está ilustrado na Figura 20.

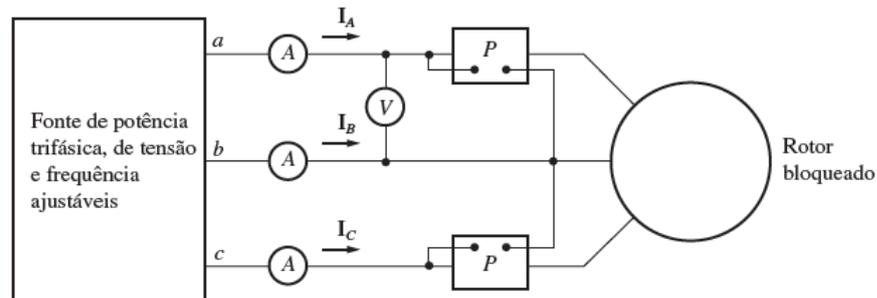


Figura 20 – Circuito de ligação ensaio rotor bloqueado (CHAPMAN, 2013)

O fato do rotor estar bloqueado implica em um valor unitário do escorregamento portanto a resistência R_2/s é simplesmente R_2 , ou seja, um valor pequeno. Quase toda corrente do circuito passa pela reatância X_2 e pelo resistor R_2 em vez de passar pela reatância de magnetização X_M , o circuito equivalente do ensaio de rotor bobinado está representado na Figura 21.

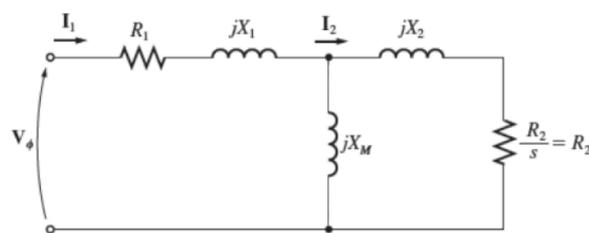


Figura 21 – Circuito equivalente ensaio rotor bloqueado (CHAPMAN, 2013)

A norma IEEE 112 sugere que, no ensaio de rotor bloqueado a frequência deve ser 25% da frequência nominal. A reatância de dispersão total em frequência normal pode ser obtida do valor desse ensaio considerando que a reatância seja proporcional à frequência (UMANS, 2014).

Quando a tensão e a frequência do ensaio estiverem ajustadas, a corrente do motor de indução é ajustada até apresentar um valor próximo ao da corrente nominal. As medidas

de corrente e tensão são tomadas antes do aquecimento do motor para encontrar o valor do fator de potência através da Eq.(2.86).

$$FP = \cos \theta = \frac{P_{entrada}}{\sqrt{3}V_T I_L} \quad (2.86)$$

O ângulo da impedância é o arco cosseno de FP.

No instante da tomada de medidas, o valor da impedância equivalente, com o rotor bloqueado, é representado pela Eq.(2.87).

$$|Z_{RB}| = \frac{V_T}{\sqrt{3}I_L} \quad (2.87)$$

Sabendo que o ângulo da impedância é θ , então a impedância do rotor bloqueado é representada pela Eq. (2.88).

$$Z_{RB} = |Z_{RB}| \cos \theta + j |Z_{RB}| \sin \theta \quad (2.88)$$

A reatância do rotor bloqueado é a soma de X'_1 e X'_2 , o termo X' representa o valor da reatância de acordo com a frequência do ensaio. A reatância do rotor bloqueado pode ser encontrada a partir da equação Eq.(2.89).

$$X_{RB} = \frac{f_{nominal}}{f_{ensaio}} X'_{RB} = X_1 + X_2 \quad (2.89)$$

Para o cálculo de R_2 , considera-se o valor da impedância de rotor bloqueado como uma associação em série dos parâmetros R_1 , R_2 , jX_1 e jX_2 em paralelo com a reatância de magnetização jX_M . Esta associação é resultante da análise da Figura 21 e está representada na Eq.(2.90) (UMANS, 2014).

$$Z_{RB} = R_1 + jX_1 + (R_2 + jX_2) // jX_M \quad (2.90)$$

Após realizar as operações de série, de paralelo, e organizando os termos da equação obtém-se a Eq.(2.91).

$$Z_{RB} = R_1 + \frac{R_2 X_M^2}{R_2^2 + (X_M + X_2)^2} + j \left[X_1 + \frac{X_M (R_2^2 + X_2 (X_M + X_2))}{R_2^2 + (X_M + X_2)^2} \right] \quad (2.91)$$

A resistência de rotor bloqueado corresponde à parte real da Eq.(2.91) e está representada na Eq.(2.92).

$$R_{RB} = R_1 + \frac{R_2 X_M^2}{R_2^2 + (X_M + X_2)^2} \quad (2.92)$$

Assumindo que o valor de R_2 é muito menor que o valor de X_M , a Eq.(2.92) pode ser simplificada. O resultado da simplificação é representado pela Eq.(2.93).

$$R_{RB} = R_1 + R_2 \left(\frac{X_M}{X_M + X_2} \right)^2 \quad (2.93)$$

Organizando a Eq.(2.93) para que a expressão fique em função de R_2 , obtém-se a equação que possibilita encontrar o valor da resistência do enrolamento do rotor.

$$R_2 = (R_{RB} - R_1) \left(\frac{X_M + X_2}{X_M} \right)^2 \quad (2.94)$$

Para a utilização da Eq.(2.94) é necessário que as reatâncias estejam com valores referentes à potência nominal.

3 METODOLOGIA

Foi utilizado o método explicativo, com a finalidade de analisar a importância dos motores de indução trifásico, partindo de uma revisão bibliográfica composta pelos principais autores da área de máquinas elétricas. A finalidade é expor a construção e o equacionamento que explicam o funcionamento dos motores de indução trifásico.

Para isso, o levantamento teórico é baseado em livros e artigos de autores, como por exemplo (BIM, 2012), (CHAPMAN, 2013), (TORO, 1999), (UMANS, 2014), entre outros autores que elaboram trabalhos pertinentes sobre o assunto.

Após a conclusão das pesquisas, são propostas simulações computacionais no *Matlab / Simulink* para criação de ensaios que possibilitam o cálculo dos parâmetros que permitem a obtenção de dados referentes a conjugados máximo, conjugados de partida e conjugados induzidos além dos escorregamentos, as principais referências para as simulações são (BENTOUNSI et al., 2011), (AYASUN; NWANKPA, 2005), (SHI; WONG; CHAN, 1999), (GUPTA; KUMAR, 1999) entre outros.

3.1 ENSAIOS UTILIZANDO O *MATLAB / SIMULINK*

O uso do *software Matlab / Simulink* para o curso de graduação permite que os estudantes consigam realizar experimentos de forma remota e simulando situações próximas às condições laboratoriais.

Nesse capítulo, será demonstrado como são realizados os ensaios de um motor de indução trifásico, detalhando informações sobre os blocos presentes em cada ensaio de acordo com o *software Matlab / Simulink*.

Para o acesso aos blocos que constituem os circuitos, é necessário abrir a biblioteca do *Matlab / Simulink*, representada na Figura 22, e efetuar a pesquisa referente ao bloco necessário. Esse processo também pode ser feito diretamente com um duplo clique no ambiente em que será implementado o circuito.

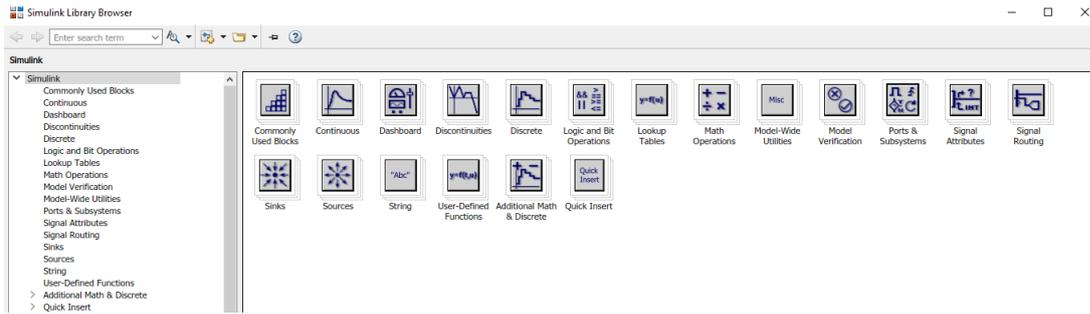


Figura 22 – Biblioteca Simulink

3.1.1 Escolha do motor

O motor escolhido, para a realização dos ensaios, é do tipo gaiola de esquilo classe A, isto implica que os valores de X_1 e X_2 são idênticos. Os parâmetros do motor de indução trifásico escolhido estão representados na Figura 23, a Figura 23 é proveniente do bloco motor de indução trifásico.

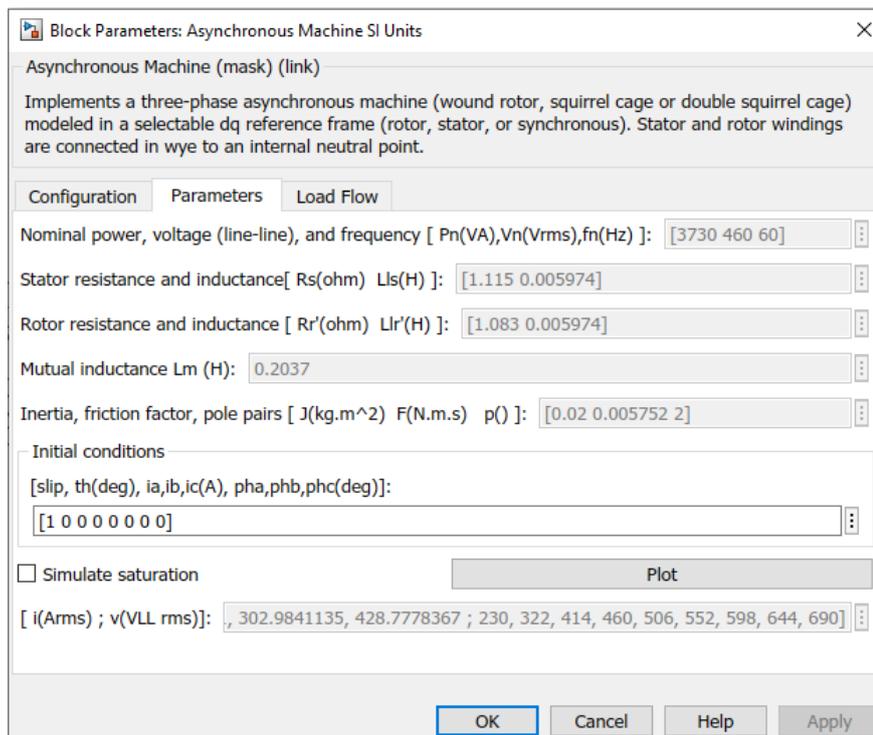


Figura 23 – Parâmetros do motor de indução

Os valores da resistência do rotor e do estator estão representados em ohms (Ω) e os valores das indutâncias do rotor, do estator e a de magnetização estão representados em Henry (H).

3.1.2 Blocos utilizados no ensaio

Nos ensaios são utilizados 17 blocos que representam materiais diferentes para a constituição do ensaio. Cada bloco possui uma função e estas funções são apresentadas nesse capítulo. Também é possível encontrar a descrição dos blocos no *Matlab / Simulink*. Para a utilização de cada bloco é necessário o uso do nome em inglês, que está entre parenteses, após o nome ilustrado em português, quando necessário.

3.1.2.1 Powergui

O bloco *Powergui* é necessário para simular modelos que apresentam blocos de energia especializados *Simscape Electrical Specialized Power Systems* e é responsável pela seleção do método de solução do experimento. Para a realização dos ensaios, o método escolhido foi o *Continuous*.



Figura 24 – Bloco: Powergui

3.1.2.2 Fonte de tensão CC

O bloco fonte de tensão CC (*Dc voltage source*) implementa uma tensão CC ideal, ou seja, a tensão não varia. É possível modificar o valor dessa tensão de acordo com a necessidade do experimento.

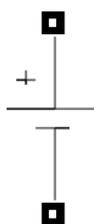


Figura 25 – Bloco: Fonte CC

3.1.2.3 Medidores

Nos ensaios são usados 3 blocos do tipo de medidor: o de tensão, o de corrente e o potência. Esses blocos de medidores precisam ser utilizados associados com um bloco *display* para que os valores sejam visíveis.

O bloco de medição de tensão (*Voltage measurement*) determina a tensão instantânea entre dois pontos podendo medir tensões de linha e de fase.

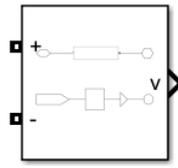


Figura 26 – Bloco: Voltímetro

Assim como o bloco de medição de tensão, o bloco medidor de corrente (*Current Measurement*) também mede um valor instantâneo. A medição de corrente pode ser realizada em qualquer bloco elétrico ou linha de conexão.

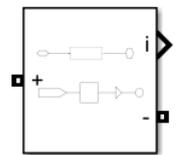


Figura 27 – Bloco: Amperímetro

O bloco de medição de potência (*Power measurement*) permite medir tanto a potência ativa quanto a reativa. Esse bloco está presente tanto para circuitos trifásicos como para circuitos monofásicos. Para o uso deste bloco é necessário realizar a configuração de frequência e adequar o medidor para medir a potência de acordo com a frequência fundamental através da configuração do número harmônico.

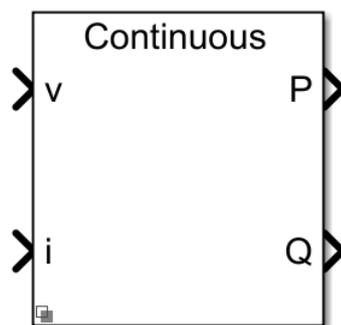


Figura 28 – Bloco: Wattímetro

3.1.2.4 Ramo em série RLC

O bloco ramo RLC (*Series RLC Branch*) implementa um único resistor, indutor ou capacitor, ou uma combinação em série destes. É possível programar o bloco para a escolha de quais funções usar e o valores de cada grandeza.



Figura 29 – Bloco: Resistência do núcleo

3.1.2.5 Fonte de tensão trifásica programável

O bloco fonte de tensão trifásica (*Three-phase programmable voltage source*) gera tensão senoidal com parâmetros variáveis no tempo de acordo com a programação do bloco. É possível programar a amplitude, a fase e a frequência fundamental da tensão emitida.

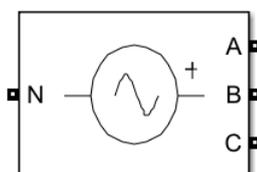


Figura 30 – Bloco: Fonte de tensão trifásica programável

3.1.2.6 Demais blocos

O bloco constante (*Constant*) emite um sinal de valor constante, podendo ser real ou complexo e gera saída escalar vetorial ou matriz dependendo da configuração do bloco.

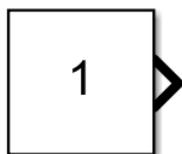
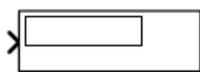


Figura 31 – Bloco: Constante

O bloco *display* imprime o valor dos dados de entrada. É possível alterar a frequência de exibição. Para entradas numéricas é possível alterar o modo de exibição de acordo com a necessidade.

Figura 32 – Bloco: *Display*

O bloco terminal (*Terminator*) é responsável por realizar a ligação final de blocos em que as portas de saídas não se conectam a outros blocos evitando, assim, alertas de advertência após a execução de simulações.



Figura 33 – Bloco: Terminal

O bloco terra (*Ground*) representa uma conexão de aterramento.



Figura 34 – Bloco: Terra

O bloco RMS calcula o valor da raiz quadrada média verdadeira do sinal de entrada. O bloco RMS precisa estar associado com um bloco *display* para que o valor seja mostrado.

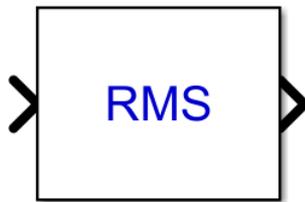


Figura 35 – Bloco: RMS

O bloco barramento seletor (*Bus selector*) produz um subconjunto especificado de acordo com o bloco em que ele está conectado, no caso de uma conexão com um motor de indução trifásico, o subconjunto será relacionado as medições no estator e no rotor, além de medidas mecânicas associadas ao motor.



Figura 36 – Bloco: Barramento seletor

O bloco ganho (*Gain*) multiplica a entrada por um número constante. Tanto a entrada quanto o ganho podem ser escalares, vetoriais ou matriciais.

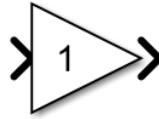


Figura 37 – Bloco: Ganho

3.1.3 Ensaio CC

O ensaio CC possibilita encontrar o valor da resistência do estator (R_1), através da aplicação de uma tensão CC no motor de indução trifásico e realizando a medição da respectiva tensão e corrente.

3.1.3.1 Blocos utilizados no ensaio CC

O ensaio CC é realizado utilizando 12 blocos.

- 1 bloco Powergui (*Powergui*)
- 2 blocos Display (*Display*)
- 1 bloco Fonte CC (*DC Voltage Source*)
- 1 bloco Motor de indução trifásico (*Asynchronous Machine*)
- 1 bloco Medição de tensão (*Voltage Measurement*)
- 1 bloco Medição de corrente (*Current Measurement*)
- 1 bloco Constante (*Constant*)
- 1 bloco Ramo RLC (*Series RLC Branch*)
- 2 blocos Terra (*Ground*)
- 1 bloco Terminal (*Terminator*)

3.1.3.2 Configuração dos blocos

No ensaio CC, 3 blocos devem ser configurados para a realização do ensaio e as configurações destes blocos estão definidas nesta seção.

3.1.3.2.1 Fonte CC

A tensão CC aplicada no motor de indução trifásico é de 5 volts, para aplicar esse valor, basta aplicar o número no campo da amplitude.

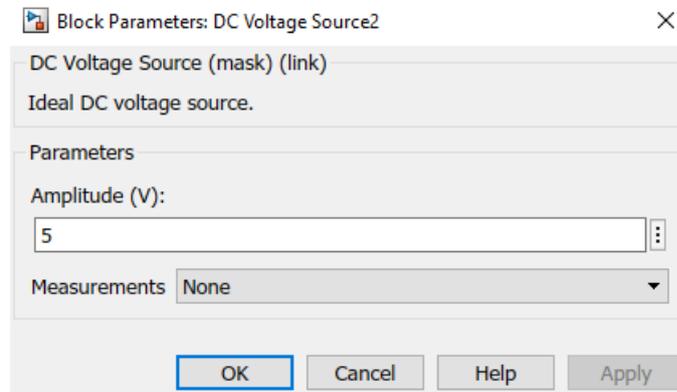


Figura 38 – Configuração bloco Fonte CC

3.1.3.2.2 Constante

O bloco constante é conectado ao ponto do motor de indução trifásico que representa a aplicação de torque mecânico no eixo do motor. No experimento CC, não há torque aplicado no eixo do motor, então é necessário configurar como valor constante 0 bloco.

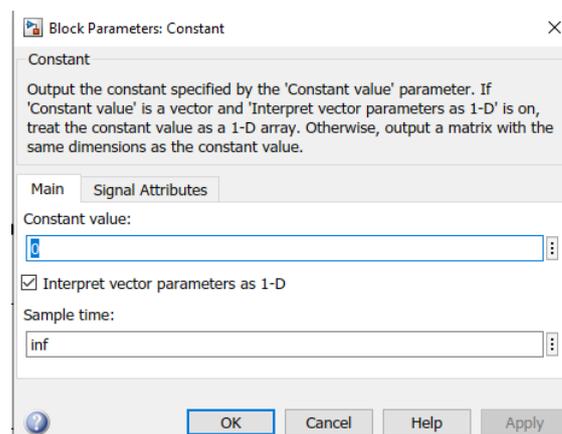


Figura 39 – Configuração bloco Constante

3.1.3.2.3 Ramo RLC

O bloco ramo RLC é responsável por representar a resistência de perdas do núcleo. A ligação deste bloco, em paralelo com a alimentação do motor, é requerida pelo *Matlab / Simulink* para que os experimentos sejam realizados com exatidão. Para a configuração do bloco é necessário configurar o tipo de ramo para R, o ramo irá se tornar apenas uma

resistência, e é necessário configurar o valor da resistência como $100\text{k}\Omega$, pelo fato de que as perdas no núcleo serem muito pequenas, então este valor, consideravelmente alto, é aplicado para que uma pequena corrente passe por esta resistência, simulando assim, as perdas no núcleo. Nos outros ensaios esta mesma configuração será necessária.

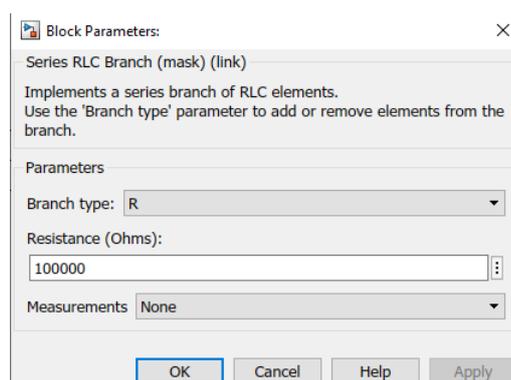


Figura 40 – Configuração bloco Ramo RLC

3.1.3.3 Diagrama do ensaio CC

Após as configurações dos blocos, é necessário realizar as ligações de acordo com o diagrama ilustrado na Figura 41.

A ligação da fonte de tensão CC é feita nos enrolamentos do bloco motor de indução trifásico A e B e o enrolamento C é conectado com o bloco ramo RLC, que representa a resistência do núcleo do motor de indução, em série com o bloco terra. A saída positiva da fonte de tensão CC é conectada com o enrolamento A, porém essa ligação ocorre após a ligação do bloco medição de corrente, que está em série com ambos os blocos. A saída negativa é conectada diretamente no enrolamento B.

O bloco medição de tensão é conectado em paralelo com as saídas positiva e negativa da fonte de tensão e é ligado ao *display*.

Nenhuma medição ocorre na saída do eixo do rotor no ensaio CC, portanto um bloco terminal é conectado ao mesmo para que não ocorra erro referente a saídas abertas.

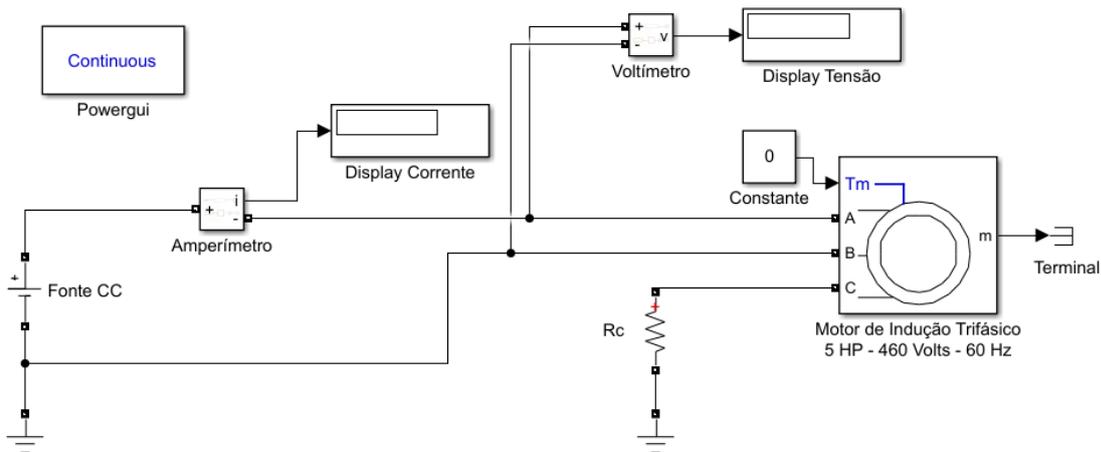


Figura 41 – Diagrama de ligação ensaio CC

3.1.3.4 Resultado ensaio CC

Com os blocos configurados e conectados é possível realizar o experimento clicando no ícone *run* e o diagrama, após a realização do experimento, está representado na Figura 42. Os valores de corrente e tensão CC estão apresentados nos respectivos *displays*. Com estes valores é possível encontrar o valor da resistência do enrolamento do estator através da Eq (2.84).

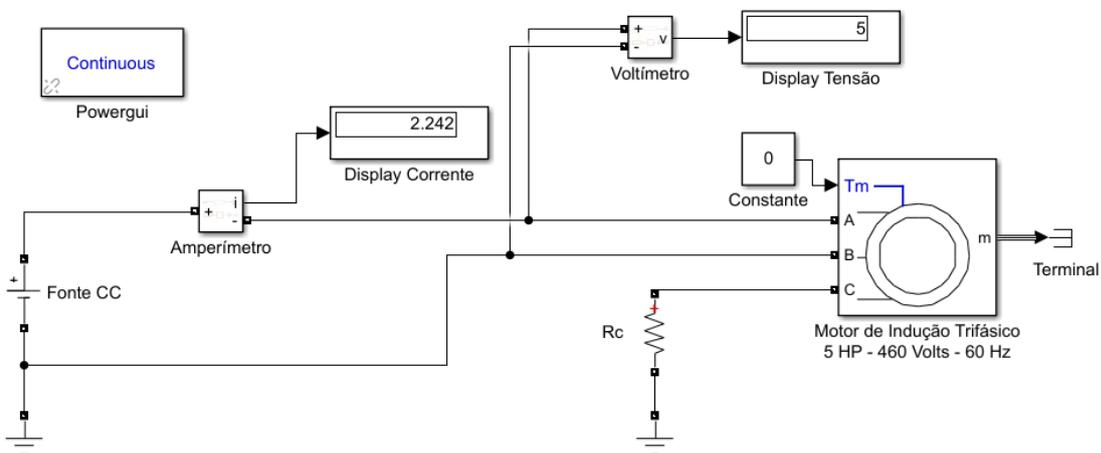


Figura 42 – Diagrama de ligação ensaio CC após a execução do ensaio

3.1.4 Ensaio a vazio

O ensaio a vazio consiste em alimentar o motor de indução com a tensão alternada trifásica e deixá-lo livre para que o eixo gire até próximo a velocidade síncrona. Quando o eixo do motor alcança esta velocidade, são tomadas medidas de tensão, corrente e potência.

3.1.4.1 Blocos utilizados no ensaio a vazio

O ensaio a vazio é realizado utilizando 30 blocos.

- 1 bloco Powergui (*Powergui*)
- 6 blocos Display (*Display*)
- 1 bloco Fonte de tensão trifásica programável (*Three-phase programmable voltage source*)
- 1 bloco Motor de indução trifásico (*Asynchronous Machine*)
- 1 bloco Medição de tensão (*Voltage Measurement*)
- 3 bloco Medição de corrente (*Current Measurement*)
- 1 bloco Medição de potência (*Power Measurement*)
- 1 bloco Constante (*Constant*)
- 3 bloco Ramo RLC (*Series RLC Branch*)
- 5 blocos Terra (*Ground*)
- 1 bloco Terminal (*Terminator*)
- 1 bloco Barramento seletor (*Bus selector*)
- 1 bloco Ganho (*Gain*)
- 4 Blocos RMS (*RMS*)

3.1.4.2 Configuração dos blocos

No ensaio a vazio, 5 blocos devem ser configurados para a realização do ensaio. O bloco Ramo RLC e o bloco Constante seguem as mesmas configurações do ensaio CC. As configurações dos demais blocos estão definidas nesta seção.

3.1.4.2.1 Fonte de tensão trifásica programável

O bloco fonte de tensão trifásica programável é responsável pela alimentação do circuito. Neste bloco é necessário configurar a amplitude da tensão e a frequência desta tensão de linha, os valores são 460 V e 60 Hz, respectivamente.

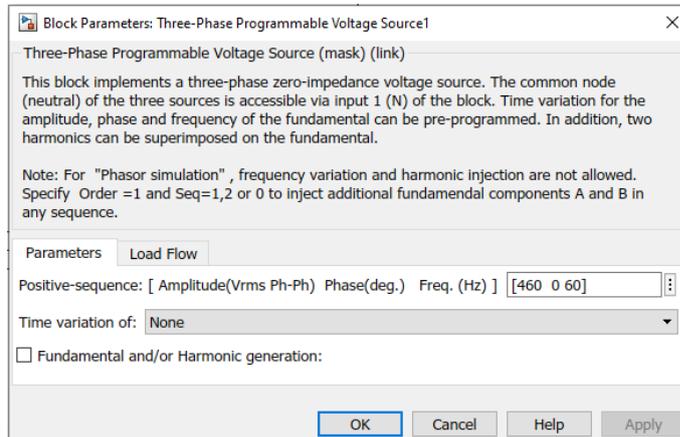


Figura 43 – Configuração bloco Fonte de tensão trifásica programável

3.1.4.2.2 Bloco de medição de potência

O bloco medidor de potência é responsável por aferir o valor de potência na fase em que ele está conectado. A configuração deste bloco é necessária para definir a frequência da medição, indicando o valor de 60 Hz e o número harmônico referente à frequência fundamental, para a representação da saída do bloco, com o valor 1.

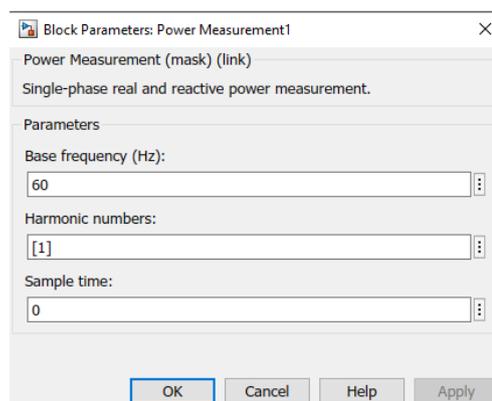


Figura 44 – Configuração bloco Medidor de potência

3.1.4.2.3 Barramento Seletor

Para a configuração do bloco barramento seletor é necessário conectá-lo à saída m do motor de indução trifásico. No ensaio a vazio o valor que será observado é o de

velocidade de rotação do eixo do motor. Para que o barramento seletor gere esse valor é necessário selecioná-lo e adicioná-lo a lista de sinais desejados.

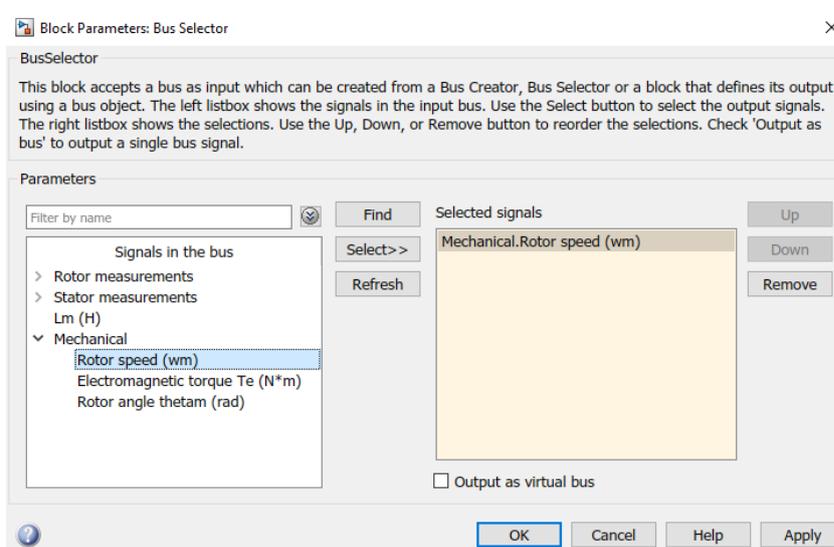


Figura 45 – Configuração bloco Barramento seletor

3.1.4.2.4 Bloco Ganho

No ensaio a vazio o bloco ganho é responsável por converter a unidade do valor que será mostrado no *display*. Na saída m do motor de indução trifásico, o valor referente às rotações do eixo do motor estão em rad/s, o bloco ganho possibilita realizar a conversão deste valor para RPM a partir da configuração ilustrada na Figura 46.

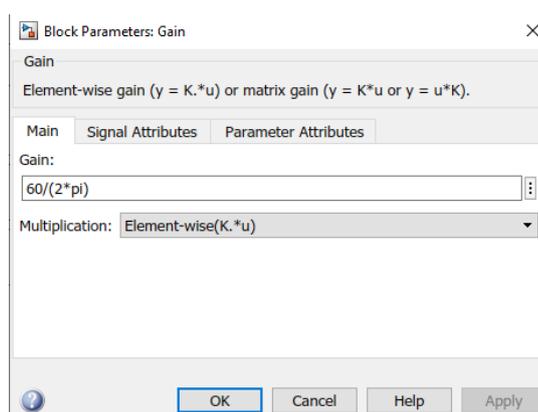


Figura 46 – Configuração bloco Ganho

3.1.4.3 Diagrama do ensaio a vazio

Após as configurações dos blocos, é necessário realizar as ligações de acordo com o diagrama ilustrado na Figura 47.

Os 3 ramos RLC são conectados em paralelo com as fases para representação da resistência do núcleo do motor de indução trifásico e em série com um bloco terra.

A bloco medidor de tensão é conectado em série com a fase A, porém o bloco é conectado ao terra, então ele mede o valor da tensão de fase do circuito. Na saída do bloco medidor de tensão ocorrem duas conexões, uma conexão com um bloco RMS e a outra com o bloco medidor de potência.

O bloco medidor de potência indica o valor da potência da fase A da fonte de tensão trifásica. Para a medição de potência da fase A, deve ser conectada a saída do bloco medidor de corrente da fase A ao bloco medidor de potência. O valor da potência reativa não é necessária no ensaio a vazio, portanto um bloco terminal deve ser conectado à respectiva saída para que não ocorra erros referentes à saídas sem conexões. A opção por utilizar apenas um bloco medidor de potência foi escolhida para deixar o circuito mais simples, facilitando a compreensão do diagrama.

O bloco medidor de corrente é conectado em série com cada fase da fonte de tensão e uma saída bloco é conectada com o enrolamento do estator do motor e ao bloco RMS que está em série com um bloco *display*.

No ensaio a vazio nenhuma força é exercida no eixo do motor, portanto o bloco constante é conectado a esta entrada. A saída do bloco motor de indução trifásico é conectada com o bloco barramento seletor que é conectado ao bloco ganho para a medição da velocidade de rotação do eixo do motor que será mostrada no bloco *display*.

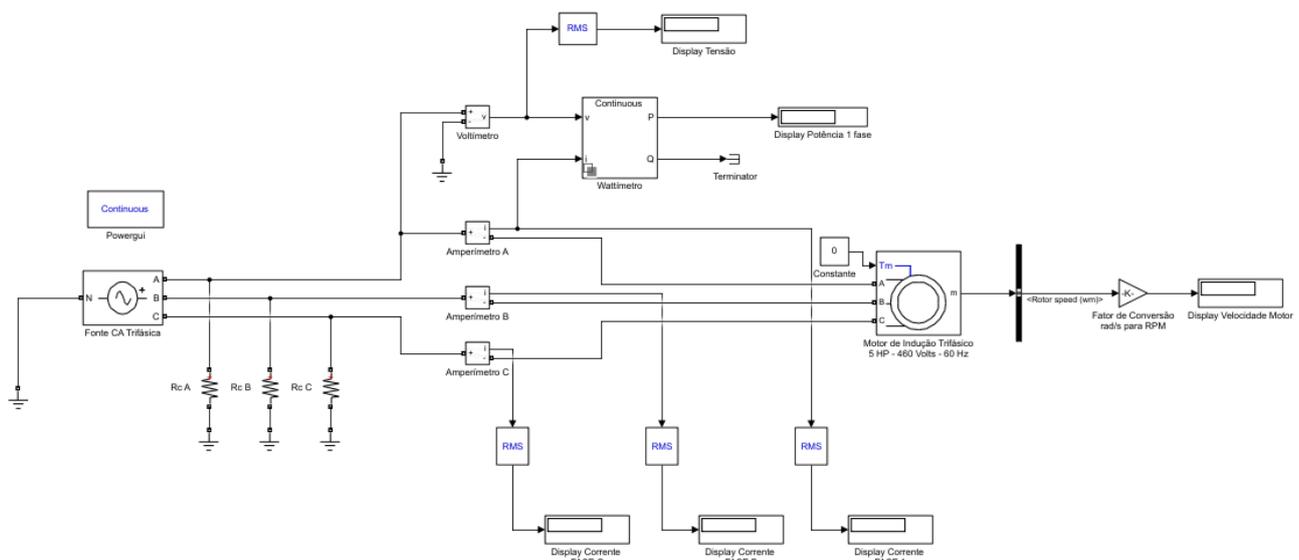


Figura 47 – Diagrama de ligação ensaio a vazio

3.1.4.4 Resultado ensaio a vazio

Com os blocos configurados e conectados é possível realizar o experimento clicando no ícone *run* e o diagrama, após a realização do experimento, está representado na Figura 48. Os valores de corrente, tensão de fase e potência estão apresentados nos respectivos *displays*.

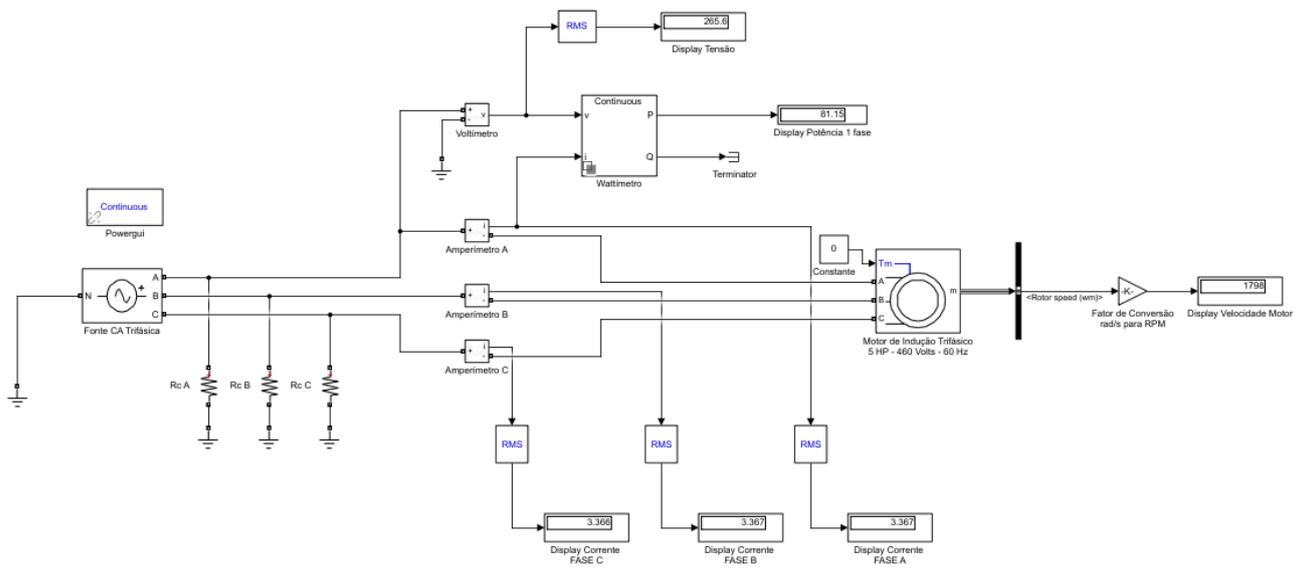


Figura 48 – Diagrama de ligação ensaio a vazio após o ensaio

3.1.5 Ensaio de rotor bloqueado

O ensaio de rotor bloqueado consiste, basicamente, em alimentar o motor de indução com a tensão alternada trifásica e travar o rotor do motor para que a velocidade de rotação seja 0 RPM.

No ensaio realizado em ambiente laboratorial, o valor de tensão aplicado no circuito durante o período inicial do experimento é baixo e gradualmente é aumentado até que a corrente alcance o valor nominal do motor de indução trifásico, no ensaio realizado no *Matlab / Simulink* o valor da tensão será o mesmo que o valor de tensão de alimentação do motor visto que este ensaio ocorre em condições ideais e o bloco do motor de indução trifásico não sofre danos como em ambiente laboratorial.

3.1.5.1 Blocos utilizados no ensaio de rotor bloqueado

O ensaio de rotor bloqueado é realizado utilizando 29 blocos.

- 1 bloco Powergui (*Powergui*)
- 6 blocos Display (*Display*)

- 1 bloco Fonte de tensão trifásica programável (*Three-phase programmable voltage source*)
- 1 bloco Motor de indução trifásico (*Asynchronous Machine*)
- 1 bloco Medição de tensão (*Voltage Measurement*)
- 3 bloco Medição de corrente (*Current Measurement*)
- 1 bloco Medição de potência (*Power Measurement*)
- 1 bloco Constante (*Constant*)
- 3 bloco Ramo RLC (*Series RLC Branch*)
- 5 blocos Terra (*Ground*)
- 1 bloco Terminal (*Terminator*)
- 1 bloco Barramento seletor (*Bus selector*)
- 4 Blocos RMS (*RMS*)

3.1.5.2 Configuração dos blocos

No ensaio de rotor bloqueado, 5 blocos devem ser configurados para a realização do ensaio. O bloco Ramo RLC, o bloco Constante, o bloco Barramento seletor e o bloco Fonte de tensão trifásica seguem as mesmas configurações do ensaios CC e do ensaio a vazio, quando utilizados.

3.1.5.2.1 Motor de indução trifásico

A configuração do motor de indução trifásico é a principal configuração do ensaio de rotor bloqueado. Para realizar essa configuração é necessário primeiramente escolher o motor de indução do tipo gaiola de esquilo e com 5HP e 460 V, como indicado na Figura 49.

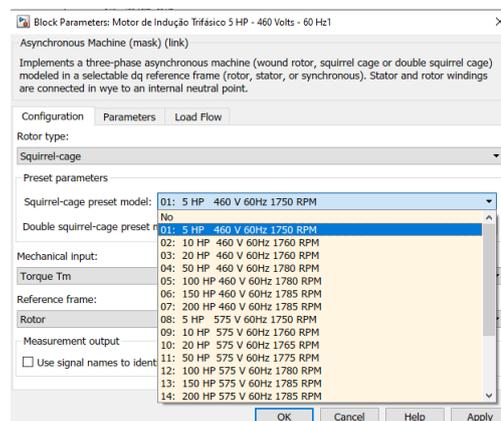


Figura 49 – Configuração bloco Motor de indução trifásico para ensaio de rotor bloqueado

Após realizar a escolha do motor, é necessário retornar para a opção *No*. Esta opção permite que o bloco continue com os mesmos parâmetros do motor previamente escolhidos, porém agora, estes parâmetros são editáveis.

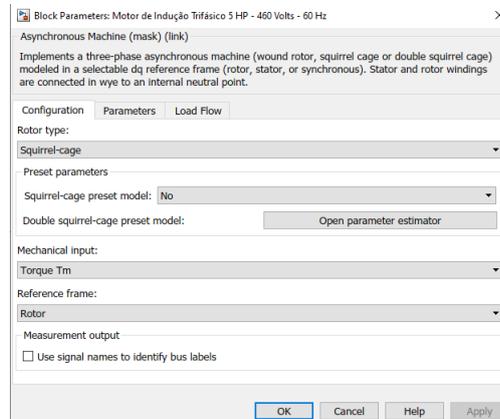


Figura 50 – Configuração bloco Motor de indução trifásico para ensaio de rotor bloqueado sem escolha do motor

Para realizar o bloqueio do rotor do motor de indução trifásico é necessário configurar o valor da inércia do eixo do motor, no ensaio de rotor bloqueado este valor será configurado como infinito, assim, ele permanecerá bloqueado independente das forças que atuem sobre ele. Para realizar esta configuração é necessário implementar *inf* como indicado na Figura 51.

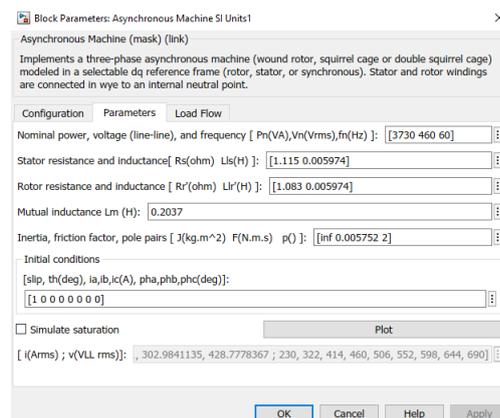


Figura 51 – Configuração bloco Motor de indução trifásico para ensaio de rotor bloqueado aplicando condição de inércia infinita

3.1.5.3 Diagrama do ensaio de rotor bloqueado

As ligações do diagrama do ensaio de rotor bloqueado são similares às ligações do ensaio a vazio, porém não há necessidade do bloco Ganho para conversão de rad/s para RPM do valor da velocidade de rotação do eixo do rotor, visto que este valor é 0.

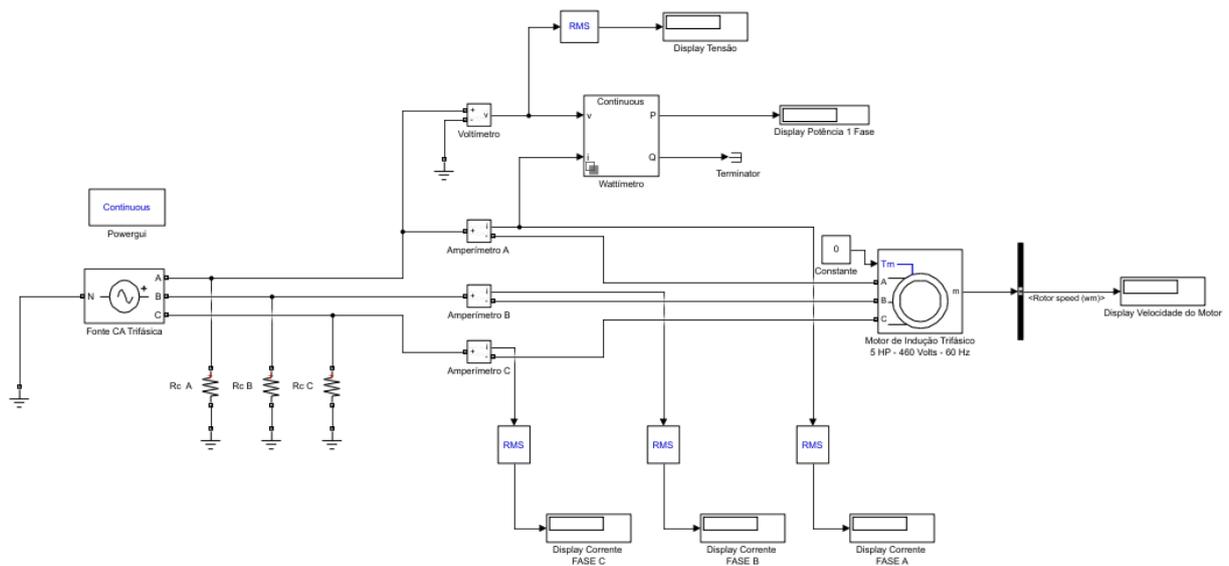


Figura 52 – Diagrama de ligação ensaio de rotor bloqueado

3.1.5.4 Resultado do ensaio de rotor bloqueado

Com os blocos configurados e conectados é possível realizar o experimento clicando no ícone *run* e o diagrama, após a realização do experimento, está representado na Figura 53. Os valores de corrente, tensão de fase e potência estão apresentados nos respectivos *displays*.

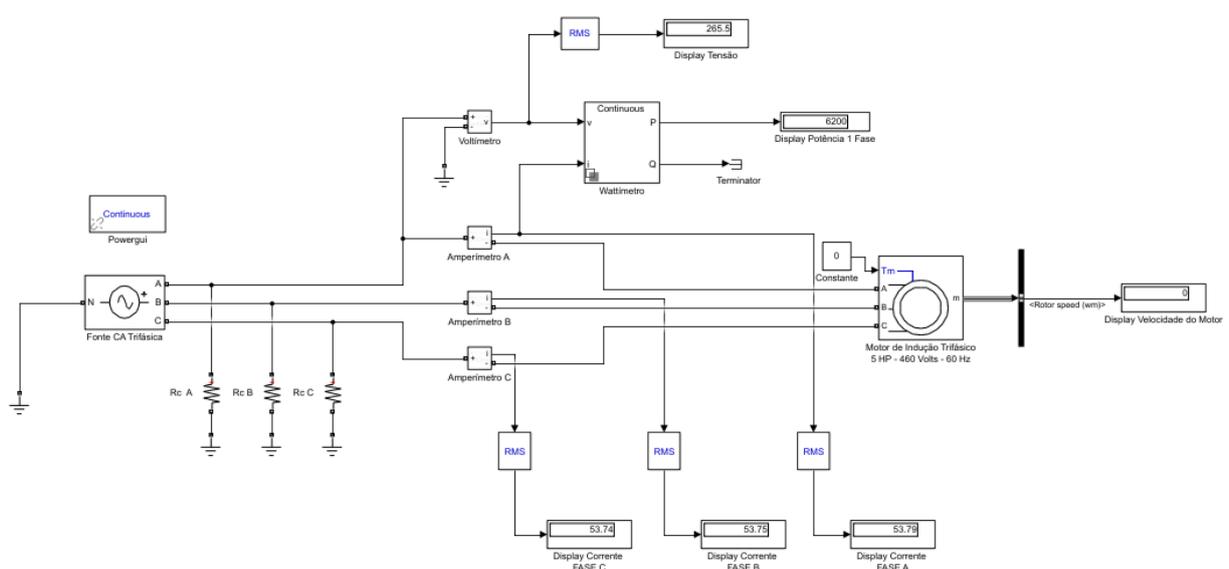


Figura 53 – Diagrama de ligação ensaio de rotor bloqueado após o ensaio

3.1.6 Ensaio com torque mecânico variável

O ensaio com torque mecânico variável no tempo permite observar a variação do torque eletromagnético e da corrente quando um torque mecânico é aplicado ao motor de indução trifásico

3.1.6.1 Blocos utilizados no ensaio com torque mecânico variável

O ensaio com torque mecânico variável realizado utilizando 24 blocos.

- 1 bloco Powergui (*Powergui*)
- 2 blocos Display (*Display*)
- 1 bloco Fonte de tensão trifásica programável (*Three-phase programmable voltage source*)
- 1 bloco Motor de indução trifásico (*Asynchronous Machine*)
- 1 bloco Ganho (*Gain*)
- 3 bloco Ramo RLC (*Series RLC Branch*)
- 4 blocos Terra (*Ground*)
- 4 bloco Scope (*Scope*)
- 1 bloco Barramento seletor (*Bus selector*)
- 4 bloco Step (*Step*)
- 1 Bloco Soma (*Sum*)
- 1 Blocos RMS (*RMS*)

3.1.6.2 Configuração dos blocos

Para ensaio com torque mecânico variável, grande parte dos blocos seguem as mesmas configurações dos ensaios passados, com exceção do bloco Soma e do bloco *step*.

3.1.6.2.1 Soma

O bloco soma representa a aplicação de valores constantes concentradas em um único bloco, no bloco soma é possível configurar se os valores vão sofrer acréscimo ou decréscimo em comparação com o valor anterior. No ensaio, um primeiro valor será aplicado e depois diminuirá em 3 passos.

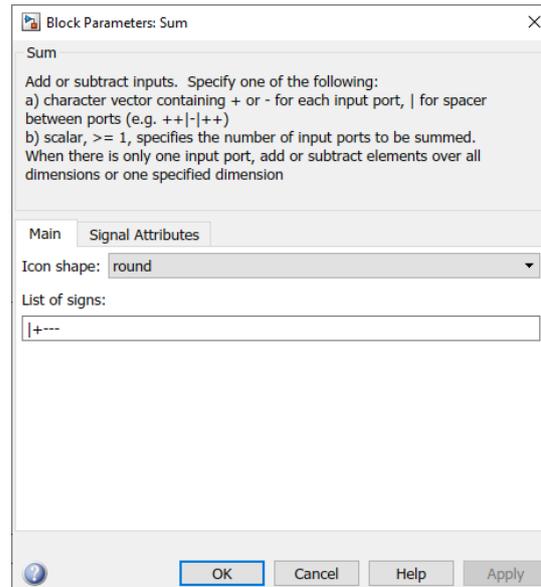


Figura 54 – Configuração bloco Soma

3.1.6.2.2 Step

O bloco *step* indica o intervalo de tempo e a magnitude da constante que será aplicada no bloco Soma. No ensaio com torque variável, são utilizados 4 blocos *step*, as configurações são em intervalos de 5 segundos e com a magnitude iniciando em 20,34, decrescendo para 10,17 e finalizando com 2 blocos *step* de 5,0884.

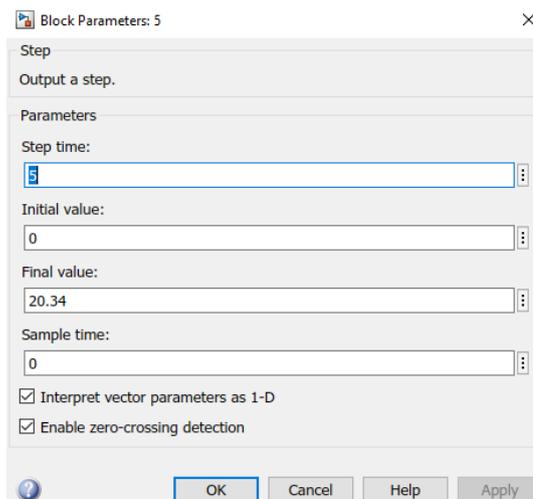


Figura 55 – Configuração bloco Step

O valor de 20,34 é obtido através da Eq.(3.1), que representa a equação do conjugado da carga. O valor da potência de saída em watts e de ω_m em rad/s, ambos os valores

são fornecidos pelo bloco motor de indução trifásico.

$$\tau_{carga} = \frac{P_{saída}}{\omega_m} = \frac{5 \cdot (745,7)}{183,25} = 20,34 \quad (3.1)$$

3.1.6.3 Diagrama do ensaio com torque mecânico variável

No ensaio com torque mecânico variável é importante observar a velocidade de rotação do motor, a corrente na fase e o torque eletromagnético do motor. Para realizar estas medições é necessário conectar um bloco de barramento seletor na saída m do motor de indução trifásico e selecionar os parâmetros, como já foi explicitado nos outros ensaios.

Os 4 blocos *step* estão conectadas ao bloco soma e este bloco soma é conectado à entrada Tm, que representa o torque mecânico, do motor de indução trifásico, além da ligação com Tm, o bloco soma também é conectado com um bloco scope.

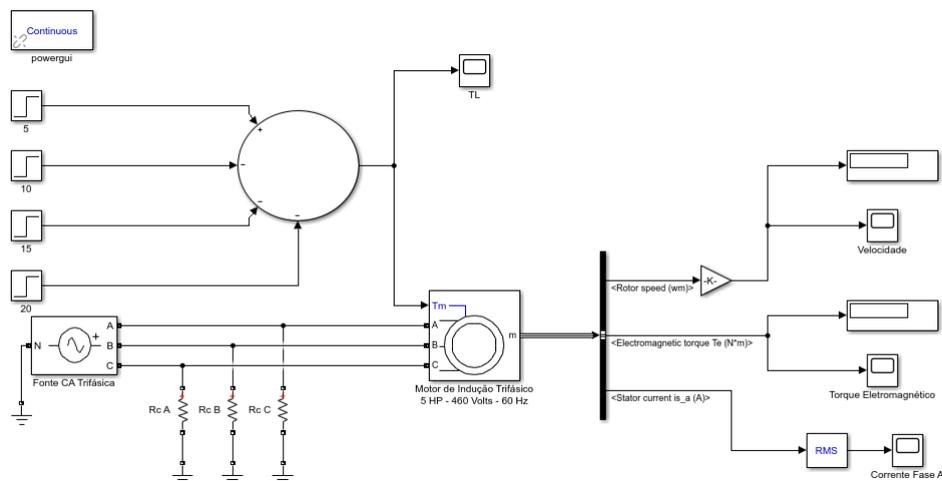


Figura 56 – Diagrama do ensaio com torque mecânico variável

3.1.6.4 Curvas geradas pelo bloco Scope

Os blocos scope utilizados no ensaio geram curvas dos respectivos parâmetros em que eles estão conectados. Nessas curvas é possível realizar a análise do que está ocorrendo no motor durante o período do ensaio.

A Figura 57 representa a curva gerada pelo scope TL que indica o torque mecânico aplicado ao motor durante o período do ensaio. No instante em que $t=5s$ o torque exercido é de 20,34 N.m, no instante $t=10s$ o torque é de 10,17 N.m e por fim, nos instantes $t=15s$ e $t=20s$ o torque é de 5,088 N.m

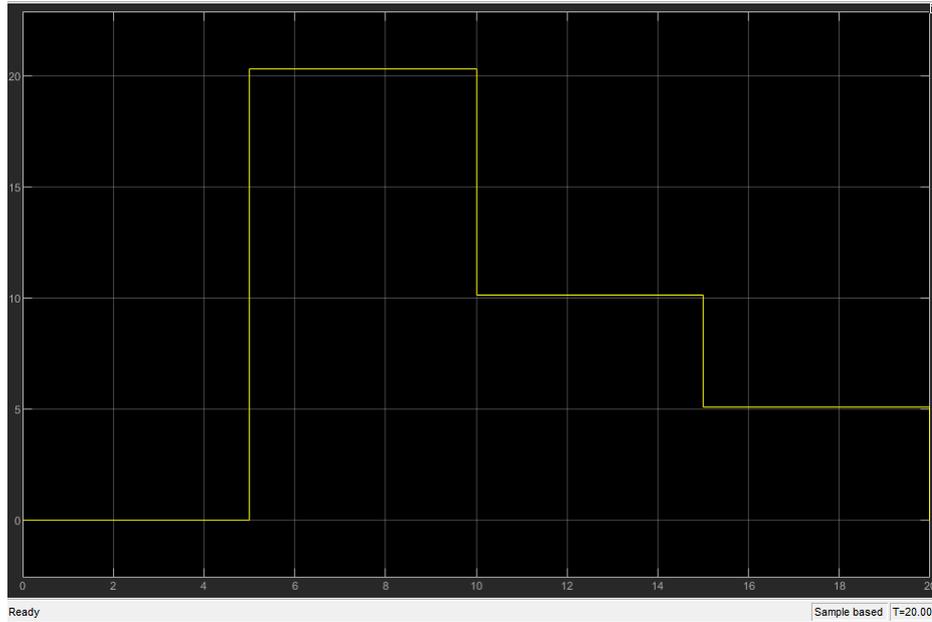


Figura 57 – Curva bloco Scope torque mecânico \times tempo

Na curva gerada pelo scope velocidade é possível observar o momento da partida do motor de indução e as variações de acordo com que o torque é exercido na entrada T_m . A velocidade varia de maneira oposta à incidência de torque mecânico, quando o torque aumenta, a velocidade diminui.

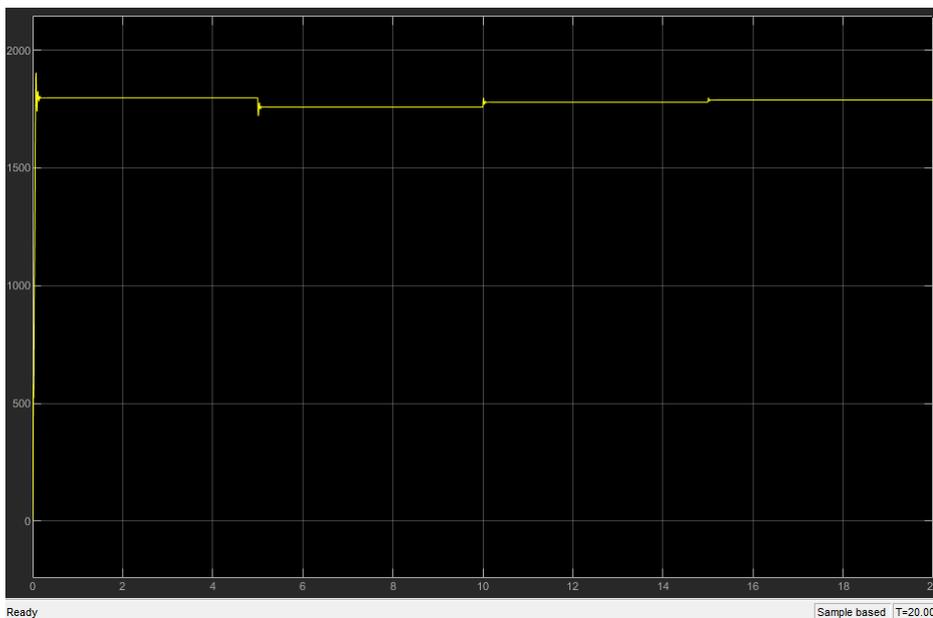


Figura 58 – Curva bloco Scope velocidade \times tempo

A decisão por plotar a curva de apenas uma das fases no scope foi tomada para um melhor entendimento de o que ocorre durante o tempo de ensaio, tanto no momento

da partida do motor, onde é possível observar um pico de corrente, quanto nas variações de torque mecânico.

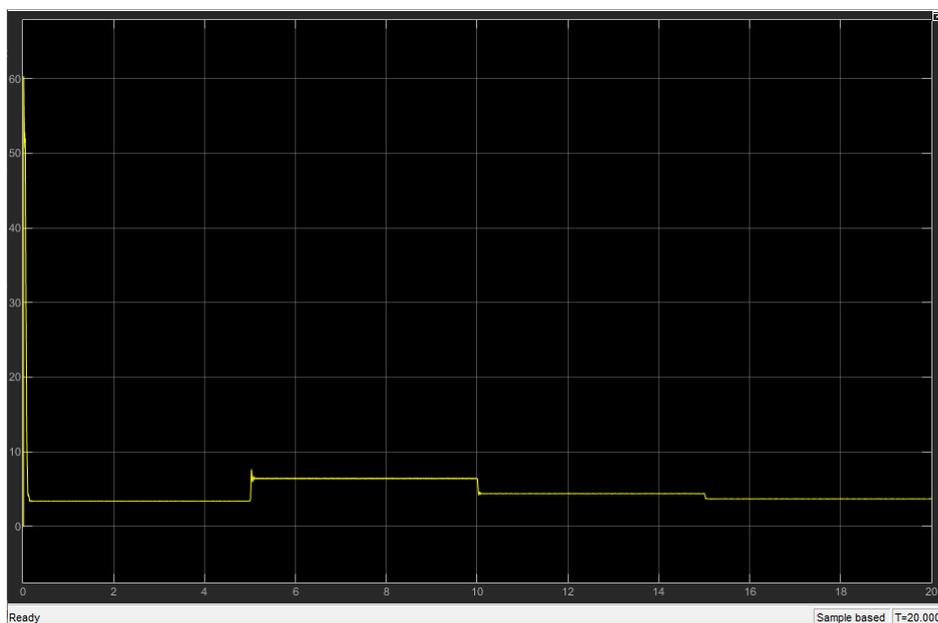


Figura 59 – Curva bloco Scope corrente fase A \times tempo

A curva gerada pelo scope referente ao torque eletromagnético demonstra, como a curva da corrente, a variação causada pela incidência de torque mecânico e pela partida do motor. É possível observar o intervalo entre a incidência de torque mecânico e o momento em que o motor atinge o regime permanente.

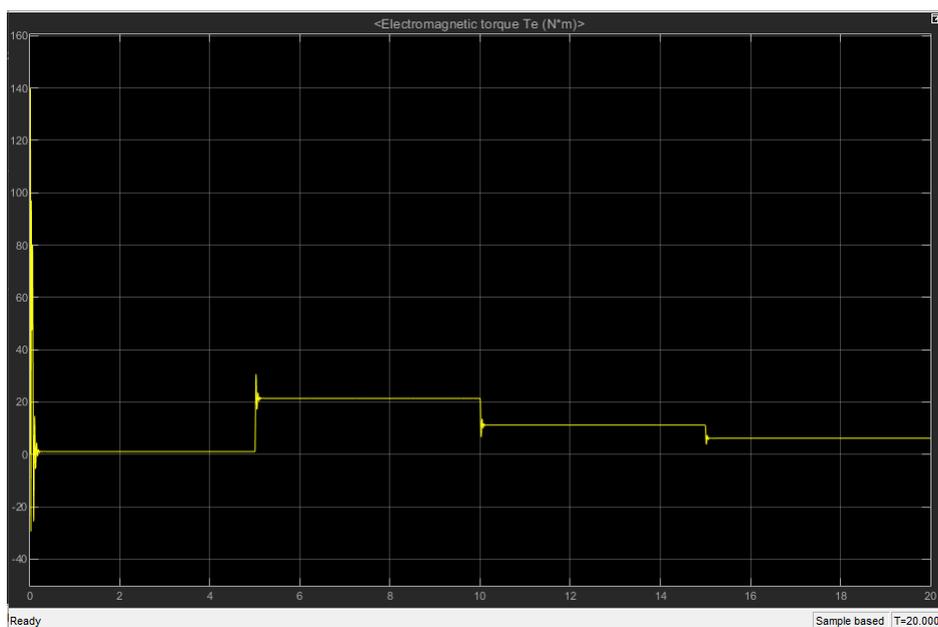


Figura 60 – Curva bloco Scope torque eletromagnético \times tempo

4 RESULTADOS

Neste capítulo estão apresentados os resultados obtidos a partir da aplicação da metodologia.

4.1 MEDIÇÕES REALIZADAS NOS ENSAIOS

Durante a execução das simulações, os dados de corrente, tensão e potência foram medidos e estão apresentados na tabela 1.

Ensaio	Corrente Fase A	Corrente Fase B	Corrente Fase C	Tensão	Potência
Ensaio CC	2,242 A	-	-	5 V_{cc}	-
Ensaio a vazio	3,366 A	3,367 A	3,367 A	265,6 V	81,15 W
Ensaio de rotor bloqueado	53,74 A	53,75 A	53,79 A	265,5 V	6200 W

Tabela 1 – Valores de corrente, tensão e potência dos ensaios

Primeiramente, para encontrar o valor da resistência do estator, é necessário utilizar a Eq.(2.84).

$$R_1 = \frac{V_{cc}}{2I_{cc}} = \frac{5}{2.2, 242} = 1, 115\Omega \quad (4.1)$$

Para o cálculo dos parâmetros a partir dos ensaios a vazio e de rotor bloqueado, é necessário realizar a média das medições de corrente das fases nos respectivos ensaios. A média das correntes do ensaio a vazio está representado na Eq.(4.2) e a média das correntes do ensaio de rotor bloqueado na Eq.(4.3).

$$I_{med,vz} = \frac{3, 366 + 3, 367 + 3, 367}{3} = 3, 3666A \quad (4.2)$$

$$I_{med, RB} = \frac{53, 74 + 53, 75 + 53, 76}{3} = 53, 76A \quad (4.3)$$

Com os valores das médias de corrente, utiliza-se a Eq.(2.87) para encontrar o valor da impedância do ensaio a vazio.

$$|Z_{vz}| = \frac{V_{\phi}}{I_{med,vz}} = \frac{265, 6}{3, 3667} = 78, 89\Omega \approx X_1 + X_M \quad (4.4)$$

O valor obtido através da Eq.(4.4) corresponde, aproximadamente, ao somatório das indutâncias de magnetização e da indutância do enrolamento do estator.

A impedância do ensaio de rotor bloqueado é encontrada de forma similar à impedância do ensaio a vazio e está representada na Eq.(4.5).

$$|Z_{RB}| = \frac{V_{\phi}}{I_{med,RB}} = \frac{265,6}{53,76} = 4,938\Omega \quad (4.5)$$

O valor da potência por fase no ensaio de rotor bloqueado é de 6200W. Como a alimentação do ensaio ocorre por uma fonte de tensão trifásica equilibrada, esse valor é multiplicado por 3 para obtenção da potência de entrada do ensaio de rotor bloqueado.

$$P_{in} = 3.6200 = 18600W \quad (4.6)$$

Através da equação da potência de entrada do ensaio, é calculado o ângulo da impedância através da Eq.(4.7).

$$P_{in} = \sqrt{3}V_T I_L \cos \theta \quad (4.7)$$

Após a aplicação de valores e resolvendo a Eq.(4.7) obtém-se o valor do ângulo representado pela Eq.(4.8).

$$\theta = \arccos\left(\frac{P_{in}}{\sqrt{3}V_T I_L}\right) = \arccos\left(\frac{18600}{\sqrt{3}.460.53,76}\right) = 64,26^\circ \quad (4.8)$$

Com a obtenção do valor do ângulo da impedância, é possível encontrar os valores da resistência de rotor bloqueado, representado na Eq.(4.9), e da reatância de rotor bloqueado, representada na Eq.(4.10).

$$R_{RB} = |Z_{RB}| \cos \theta = 4,938 \cos(64,26^\circ) = 2,1445\Omega \quad (4.9)$$

$$X_{RB} = |Z_{RB}| \sin \theta = 4,938 \sin 64,26^\circ = 4,448\Omega \quad (4.10)$$

A partir dos valores da resistência de rotor bloqueado e da reatância de rotor bloqueado são encontrados os valores da resistência do enrolamento do rotor e das reatâncias de dispersão e do rotor. As reatâncias de dispersão e do rotor possuem o mesmo valor, pois o motor é do tipo A, e a soma das reatâncias equivale ao valor da reatância de rotor bloqueado. O cálculo destas reatâncias é representado na Eq.(4.11).

$$X_{RB} = X_1 + X_2 \quad (4.11)$$

Utilizando o valor encontrado a partir da Eq.(4.10) e aplicando o fato de que $X_1 = X_2$.

$$4,448 = 2X \quad (4.12)$$

Então $X_1 = X_2 = 2,224\Omega$, para converter a reatância para indutância, como indicado no bloco do motor de indução trifásico, é necessário realizar a divisão por ω . Esta conversão está representada na Eq.(4.13).

$$L_1 = L_2 = \frac{X}{2\pi f} = \frac{2,224}{2\pi 60} = 0,00589H = L_1 = L_2 \quad (4.13)$$

Para calcular a reatância de magnetização X_M , é necessário retornar a Eq.(4.4). O cálculo da reatância de magnetização está representado na Eq.

$$X_M = |Z_{vz}| - X_1 = 78,89 - 2,224 = 76,66\Omega \quad (4.14)$$

O modo de conversão da reatância de magnetização para indutância é similar ao processo adotado com as indutâncias de dispersão e do rotor.

$$L_M = \frac{X_M}{2\pi f} = \frac{76,66}{2\pi 60} = 0,2033H \quad (4.15)$$

O ultimo parâmetro a ser calculado é a resistência é a resistência do rotor e este cálculo é realizado utilizando a Eq.(2.94).

$$R_2 = (R_{RB} - R_1) \left(\frac{X_M + X_2}{X_M} \right)^2 = (2,1445 - 1,115) \left(\frac{76,66 + 2,224}{76,66} \right)^2 = 1,09\Omega \quad (4.16)$$

A Tabela 2 apresenta os parâmetros do bloco motor de indução trifásico, os parâmetros calculados através dos ensaios e a precisão dos parâmetros encontrados em comparação com os parâmetros fornecidos pelo bloco.

Fonte	$R_1(\Omega)$	$R_2(\Omega)$	$X_1(H)$	$X_2(H)$	$X_M(H)$
Motor de Indução	1,115	1,083	0,005974	0,005974	0,2037
Ensaio	1,115	1,09	0,00589	0,00589	0,2033
Precisão	100%	99,35%	98,6%	98,6%	99,80%

Tabela 2 – Comparação dos parâmetros obtidos com os dados do bloco do motor de indução trifásico

4.1.1 Cálculo dos conjugados através do circuito equivalente de Thévenin

A partir dos parâmetros obtidos nos ensaios, é possível encontrar o conjugado máximo, o conjugado de partida e o escorregamento para o conjugado máximo deste motor de indução trifásico. Para a realização dos cálculos, deve-se encontrar a tensão, a resistência e a reatância de Thévenin através das Eq.(2.67), Eq.(2.71) e Eq.(2.72).

$$V_{TH} = V_{\phi} \frac{X_M}{\sqrt{R_1 + (X_1 + X_M)^2}} = 265,6 \frac{76,66}{\sqrt{1,115 + (2,224 + 76,66)^2}} = 258,07V \quad (4.17)$$

$$X_{TH} \approx X_1 = 2,224\Omega \quad (4.18)$$

$$R_{TH} = R_1 \left(\frac{X_M}{X_1 + X_M} \right)^2 = 1,115 \left(\frac{76,66}{2,224 + 76,66} \right)^2 = 1,053\Omega \quad (4.19)$$

Aplicando os valores de Thevenin na Eq.(2.80), tem-se o valor do conjugado máximo do motor de indução trifásico.

$$\tau_{\max} = \frac{3 \cdot (258,07)^2}{2 \cdot 188,5 [1,053 + \sqrt{(2,224 + 2,224)^2}]} = 94,23N.m \quad (4.20)$$

O conjugado de partida do motor de indução trifásico é obtido aplicando os resultados prévios na Eq.(2.81).

$$\tau_{partida} = \frac{3(258,07)^2 \cdot 1,09}{188,5[(1,053 + 1,09)^2 + (2,224 + 2,224)^2]} = 47,39N.m \quad (4.21)$$

O escorregamento para o conjugado máximo do motor é obtido através da Eq.(2.79).

$$s_{\max} = \frac{1,09}{\sqrt{1,053^2 + (2,224 + 2,224)^2}} = 0,2384 \quad (4.22)$$

A partir deste escorregamento, é possível definir a velocidade mecânica com que este escorregamento ocorre.

$$n_m = (1 - s)n_{sinc} = (1 - 0,2384) \cdot 1800 = 1370RPM \quad (4.23)$$

De forma similar, os valores do conjugado máximo, do conjugado de partida e do escorregamento para o conjugado máximo do motor escolhido para os ensaios, a partir dos dados fornecidos, são calculados.

$$V_{TH} = V_{\phi} \frac{X_M}{\sqrt{R_1 + (X_1 + X_M)^2}} = 265,6 \frac{76,79}{\sqrt{1,115 + (2,252 + 76,79)^2}} = 257,98V \quad (4.24)$$

$$X_{TH} \approx X_1 = 2,252\Omega \quad (4.25)$$

$$R_{TH} = R_1 \left(\frac{X_M}{X_1 + X_M} \right)^2 = 1,115 \left(\frac{76,79}{2,252 + 76,79} \right)^2 = 1,052\Omega \quad (4.26)$$

Aplicando os valores de Thevénin na Eq.(2.80), tem-se o valor do conjugado máximo do motor de indução trifásico.

$$\tau_{\max} = \frac{3 \cdot (257,98)^2}{2.188,5[1,052 + \sqrt{1,052^2 + (2,252 + 2,252)^2}]} = 93,28N.m \quad (4.27)$$

O conjugado de partida do motor de indução trifásico é obtido aplicando os resultados encontrados previamente na Eq.(2.81).

$$\tau_{partida} = \frac{3(257,98)^2 \cdot 1,08}{188,5[(1,052 + 1,08)^2 + (2,252 + 2,252)^2]} = 46,07N.m \quad (4.28)$$

O escorregamento para o conjugado máximo do motor é obtido através da Eq.(2.79).

$$s_{m\acute{a}x} = \frac{1,08}{\sqrt{1,052^2 + (2,252 + 2,252)^2}} = 0,2335 \quad (4.29)$$

A partir deste escorregamento, é possível definir a velocidade mecânica com que este escorregamento ocorre.

$$n_m = (1 - s)n_{sinc} = (1 - 0,2335) \cdot 1800 = 1379RPM \quad (4.30)$$

A tabela 3 apresenta uma comparação entre os resultados obtidos através dos cálculos dos valores do bloco Motor de indução trifásico com os valores obtidos através dos ensaios.

Fonte	Conjugado de Partida	Conjugado Máximo	Escorregamento Máximo
Motor de Indução	46,07 N.m	93,28 N.m	0,2335
Ensaio	47,39 N.m	94,23 N.m	0,2384
Precisão	97,21%	98,99%	97,94%

Tabela 3 – Comparação dos parâmetros obtidos com os dados do bloco do motor de indução trifásico

A Figura 61 apresenta um gráfico das características conjugado \times velocidade do bloco motor de indução trifásico e dos parâmetros do circuito equivalente resultante dos ensaios. É possível observar os pontos de conjugado máximo, em destaque, e de conjugado de partida e esses pontos estão de acordo com os valores apresentados através dos cálculos.

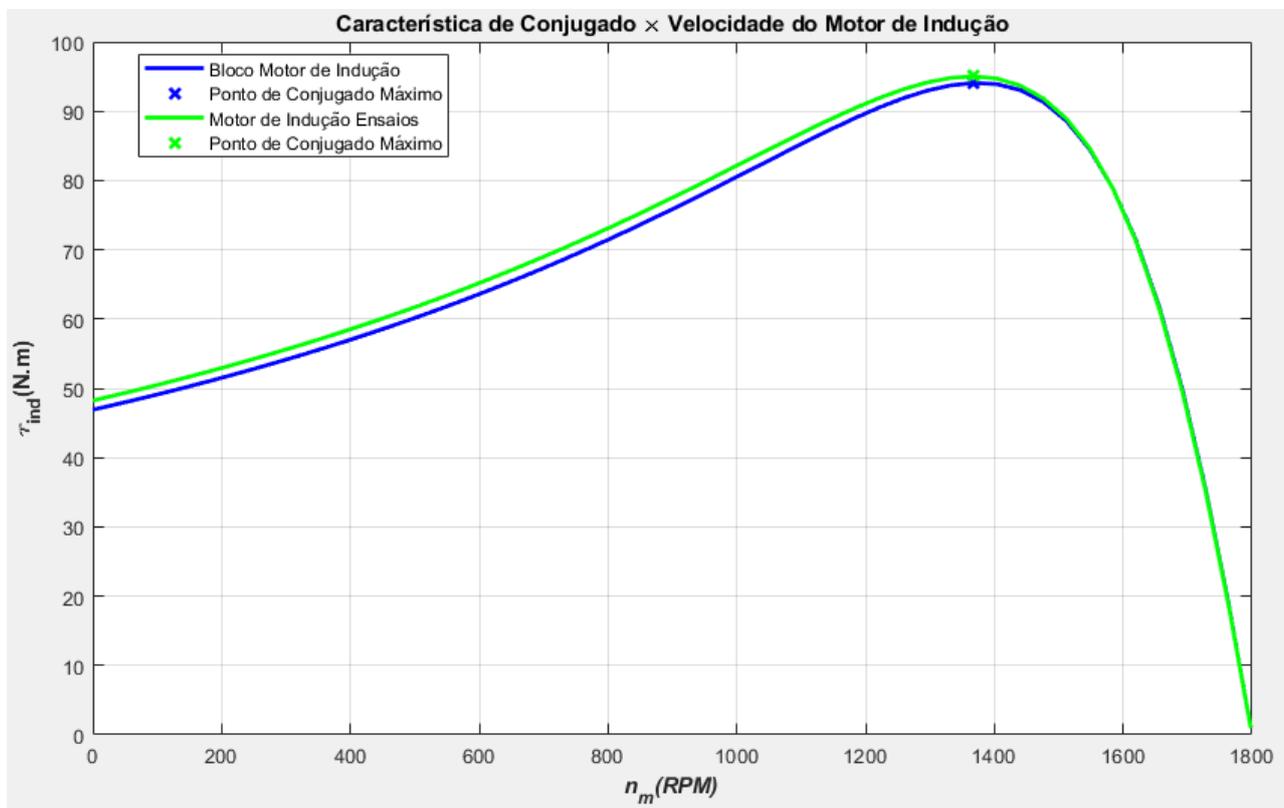


Figura 61 – Curvas de conjugado \times velocidade a partir dos parâmetros fornecidos pelo Bloco do motor de indução e dos parâmetros calculados

5 CONCLUSÃO

Os ensaios são de suma importância para o melhor entendimento de um motor de indução trifásico. Através dos ensaios é possível realizar a coleta de parâmetros que possibilitam encontrar o circuito equivalente. Com o circuito equivalente identificado, é possível realizar o cálculo do conjugado máximo, conjugado de partida e de outros parâmetros.

As simulações de ensaios utilizando o *Matlab / Simulink* apresentaram resultados com precisão considerável. Desta forma o *software* se mostra um grande aliado junto aos trabalhos experimentais em ambiente físico.

Para maior compreensão sobre os ensaios de motores de indução trifásico, este trabalho apresenta um roteiro explicativo, desde a introdução sobre o motor até os ensaios, tanto em ambiente laboratorial quanto em ambientes simulados no *Matlab / Simulink*.

A ferramenta *Matlab / Simulink* permite inúmeras variações experimentais, tensão de alimentação, tipo de motor, variação no tipo de medição e diversas configurações de motor são opções para gerar uma grande gama de experimentos, auxiliando assim o ensino remoto nas mais diversas aplicações dos motores de indução trifásico.

Para trabalhos futuros, pode-se propor 3 experimentos por meio da utilização do *Matlab / Simulink*. O primeiro experimento, uma análise da variação de velocidade de um motor de indução trifásico por mudança da resistência do rotor, visto que este parâmetro pode ser editável no *Matlab / Simulink*. O segundo experimento baseia-se em substituir o torque de entrada do ensaio de torque variável por um torque resultante de uma bomba ou de ventilador e analisar as curvas geradas comparando as curvas obtidas com a curva característica conjugado \times velocidade. Por fim, o terceiro experimento seria a utilização de um inversor de frequência para realizar o ensaio de rotor bloqueado com valores reduzidos de frequência.

Referências

- ALEXANDER, C.; SADIKU, M. *Fundamentos de Circuitos Elétricos - 5ed.* [S.l.]: AMGH, 2013. Cited on page 41.
- AYASUN, S.; NWANKPA, C. O. Induction motor tests using matlab/simulink and their integration into undergraduate electric machinery courses. *IEEE TRANSACTIONS ON EDUCATION, VOL. 48, NO. 1*, 2005. Cited on page 51.
- BENTOUNSI, A. et al. Computer-aided teaching using matlab/simulink for enhancing an im course with laboratory tests. *IEEE TRANSACTIONS ON EDUCATION, VOL. 3, NO. 3*, 2011. Cited on page 51.
- BIM, E. *Máquinas Elétricas e acionamentos - 2ed.* [S.l.]: Elsevier Editora Ltda, 2012. Cited 4 times on page 13, 26, 27 e 51.
- CARCASI, D. B. L. Modelagem matemática para avaliação do comportamento elétrico de motores de indução trifásicos em regime permanente: Um modelo neural - dissertação de mestrado. *Universidade Estadual de Campinas*, 2005. Cited on page 45.
- CHAPMAN, S. *Fundamentos de Máquinas Elétricas - 5ed.* [S.l.]: AMGH Editora, 2013. Cited 20 times on page 13, 26, 27, 28, 29, 31, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 42, 43, 44, 45, 46, 47 e 51.
- ELETROBRÁS. *Motor elétrico Guia Básico - 1ed.* Brasília, Brasil, 2009. 194 p. Cited on page 23.
- FALCONE, A. G. *Motores de Indução: Manutenção e Instalação.* [S.l.]: LVBA, 1995. Cited on page 23.
- GUPTA, G.; KUMAR, V. Induction motor tests using matlab/simulink. *EE - 5133 Dynamics of Power System and Apparatus*, 1999. Cited on page 51.
- KOSOW, I. L. *Máquinas Elétricas e Transformadores - 4ed.* [S.l.]: Editora Globo, 1982. Cited on page 26.
- MAMEDE, J. *Instalações Elétricas Industriais - 9ed.* [S.l.]: EditoraLTC, 2007. Cited 4 times on page 13, 25, 35 e 36.
- MATHWORKS. 2020. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/help/simulink/getting-started-with-simulink.html>>. Cited on page 23.
- SANZ, I.; GONZÁLEZ, J. S.; CAPILLA, A. Efectos de la crisis del covid-19 en la educación. Organización de Estados Iberoamericanos para la Educación, la Ciencia y la Cultura. Madrid, Espanha, 2020. Cited on page 23.
- SHI, K.; WONG, Y. K.; CHAN, T. Modelling of the three-phase induction motor using simulink. *Int. J. Elect. Enging. Educ., Vol. 36*, 1999. Cited on page 51.
- TORO, V. D. *Fundamentos de Máquinas Elétricas - 4ed.* [S.l.]: LTC, 1999. Cited 2 times on page 36 e 51.

UMANS, S. *Máquinas Elétricas de Fitzgerald e Kingsley - 6ed.* [S.l.]: Artmed Editora, 2014. Cited 11 times on page 13, 23, 27, 33, 34, 35, 44, 46, 47, 48 e 51.

WEG. *Knuth: Computers and Typesetting.* 2018. Disponível em: <<https://museuweg.net/blog/a-historia-do-motor-eletrico/>>. Cited on page 23.

WEG. *Guia de Especificação do Motor elétrico - 1ed.* Jaraguá do Sul, Brasil, 2020. 75 p. Cited 3 times on page 13, 25 e 33.