



**ANDRÉ TRITIACK DE FARIAS**

**MODELO DINÂMICO DE MOTORES DE INDUÇÃO COMO  
INSTRUMENTO PARA O ENSINO DE MÁQUINAS ELÉTRICAS**

**SÃO PAULO  
2017**

ANDRÉ TRITIACK DE FARIAS

**MODELO DINÂMICO DE MOTORES DE INDUÇÃO COMO  
INSTRUMENTO PARA O ENSINO DE MÁQUINAS ELÉTRICAS**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Automação e Controle de Processos do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo - Campus São Paulo, como requisito para obtenção do título de mestre.

Orientador: Prof. Dr. Ênio Carlos Segatto

**SÃO PAULO**

**2017**

F224m Farias, André Tritiack  
Modelo dinâmico de motores de indução como  
instrumento para o ensino de máquinas elétricas / André  
Tritiack de Farias. São Paulo: [s.n.], 2017.  
76 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Ênio Carlos Segatto

Dissertação (Mestrado Profissional em Automação  
e Controle de Processos) - Instituto Federal de  
Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, IFSP,  
2017.

1. Máquinas elétricas 2. Motor de indução trifásico 3.  
Modelos Dinâmicos I. Instituto Federal de Educação,  
Ciência e Tecnologia de São Paulo. II. Título

CDU 681.0



## ATA DE EXAME DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Nome do Programa: **Mestrado Profissional em Automação e Controle de Processos**

Nome do(a) Aluno(a): André Tritziack de Farias

Nome do(a) Orientador(a): Prof. Dr. Ênio Carlos Segatto

Nome do(a) Coorientador(a):

Título do Trabalho: "Modelo dinâmico de sistemas de acionamento de motores de indução como instrumento para o ensino de máquinas elétricas"

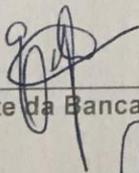
Abaixo o resultado de cada participante da Banca Examinadora

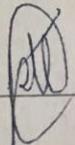
Nome completo dos Participantes Titulares da Banca	Sigla da Instituição	Aprovado / Não Aprovado
Prof. Dr. Ênio Carlos Segatto – Orientador	IFSP – SPO	APROVADO
Prof. Dr. Paulo Sergio Dainez – Membro Externo	IFSP – SPO	APROVADO
Profª Drª Patricia Teixeira Leite - Membro Externo	UFABC	APROVADO
Nome completo dos Participantes Suplentes da Banca	Sigla da Instituição	Aprovado / Não Aprovado
Prof. Dr. César da Costa – Membro Interno	IFSP – SPO	
Prof. Dr. Edmarcio Antonio Belati – Membro Externo	UFABC	

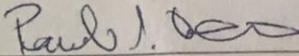
Considerando-o:  APROVADO  
 NÃO APROVADO

Assinaturas

São Paulo, 30 de março de 2017

  
\_\_\_\_\_  
Presidente da Banca

  
\_\_\_\_\_  
Membro Externo

  
\_\_\_\_\_  
Membro Externo

Observações:

Dedico esse trabalho à minha querida e amada filha Isabella, minha maior fonte de inspiração.

## AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Prof. Dr. Ênio Carlos Segatto, sou muito grato pela oportunidade da realização deste trabalho e pela sua excelência acadêmica na orientação desta dissertação.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, pela oportunidade.

Ao coordenador do programa de mestrado do IFSP, Prof. Dr. Alexandre Caporali, pelo incentivo, apoio e excelentes materiais compartilhados.

A todos os docentes do programa, em especial ao Prof. Dr. Alexandre Brincalpe Campo, pelas magníficas aulas de Tópicos de Controle.

À minha mãe Lisa e ao meu irmão Edson por sempre acreditarem em mim e estarem presentes em todos os momentos.

Aos amigos Fábio de Alexandro e Willian Junior pela amizade, parceria e apoio nos momentos mais complicados durante essa jornada.

E a todos os colegas de curso, em especial aos amigos Rodrigo Rech e João Luís Sanches, pela amizade e momentos compartilhados durante esses anos.

Muito obrigado,

André

***“Onde cruzarem seus talentos e suas paixões com as necessidades do mundo, lá estará sua direção”***

Arístoteles, filósofo grego.

## RESUMO

Este trabalho tem como principal foco a implementação de um modelo dinâmico de um motor de indução trifásico. Neste sentido, tem como objetivo a utilização desse tipo de modelo no ensino de máquinas elétricas em cursos de graduação e pós-graduação. Para tanto, é apresentada uma abordagem acerca dos principais temas relacionados às máquinas rotativas, com especial relevo ao Motor de Indução Trifásico (MIT) e suas respectivas características. Tão logo, a partir da análise do circuito equivalente e criação de modelo matemático do MIT, o constructo teórico aqui proposto recai sobre o desenvolvimento do modelo dinâmico do conjunto no MATLAB/Simulink®. Cabe ressaltar que, por esse *software* apresentar um abundante conjunto de ferramentas de controle, torna-se possível a realização da modelagem e emulação do modelo proposto, dando condições, assim, que tal ambiente de simulação possa permitir aos estudantes dos cursos de Engenharia maior proximidade possível no concernente à realidade industrial. Deste modo, pretende-se obter resultados que permitam uma avaliação que busque a reflexão a respeito dos impactos positivos dos métodos atualmente propostos nos cursos de Engenharia e Tecnologia no que concerne a experiência de aprendizagem dos alunos em cursos voltados aos estudos de máquinas elétricas.

**Palavras-chave:** Ensino de Máquinas Elétricas, Motor de Indução Trifásico, Modelos Dinâmicos.

## ABSTRACT

This work is mainly focused on the implementation of a dynamic model of a three-phase induction motor. In this sense, it aims to use this type of model in teaching electrical machines in undergraduate and graduate. Therefore, an approach is presented on the main topics related to rotating machinery, with special emphasis on the induction motor three phase (MIT), reaching yet, their respective characteristics. As soon as, from the equivalent circuit analysis, and mathematical model of MIT, the theoretical construct proposed here lies with the development of the dynamic assembly model in MATLAB / Simulink®. It should be noted that for this software provide a rich set of control tools, it becomes possible to perform the modeling and emulation of the model, giving conditions, so that such a simulation environment can enable students of engineering courses and technology closest possible in concerning the industrial reality. Thus, we intend to achieve results that allow an evaluation that seeks reflection about the positive impacts of the methods currently proposed in the Engineering courses in relation to the students' learning experience in courses aimed to study electrical machines.

**Keywords:** Electrical Machines Teaching, Three-phase Induction Motor, Dynamic Models.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Campo magnético produzido por um condutor de eletricidade. ....	26
Figura 2: Curva BH de materiais ferromagnéticos.....	28
Figura 3: Núcleo toroidal.....	29
Figura 4: Fluxos magnético e de dispersão.. ....	32
Figura 5: Representação do circuito e indutância de dispersão separada do núcleo.....	32
Figura 6: Rotor Gaiola .....	34
Figura 7: Rotor Bobinado.....	35
Figura 8: Estrutura do Motor de Indução .....	35
Figura 9: Circuito Equivalente do Estator. ....	38
Figura 10: Circuito Equivalente do rotor na frequência de escorregamento.....	40
Figura 11: Circuito Equivalente de um Motor de Indução Trifásico, referido ao estator, por fase. ....	41
Figura 12: Acionamento do motor de indução.....	44
Figura 13: Circuito equivalente eixo direto (d).....	45
Figura 14: Circuito equivalente eixo em quadratura (q).....	45
Figura 15: Subsistema MATLAB/ <i>Simulink</i> ® I. ....	48
Figura 16: Subsistema MATLAB/ <i>Simulink</i> ® II. ....	49
Figura 17: Subsistema MATLAB/ <i>Simulink</i> ® III. ....	50
Figura 18: Subsistema MATLAB/ <i>Simulink</i> ® IV. ....	50
Figura 19: Sinal simulado do Torque referente à carga (TL). ....	51
Figura 20: Subsistema MATLAB/ <i>Simulink</i> ® V.....	52
Figura 21: Subsistema MATLAB/ <i>Simulink</i> ® VI.....	53
Figura 22: Subsistema MATLAB/ <i>Simulink</i> ® VII.....	54
Figura 23: Subsistema MATLAB/SIMULINK® VIII.....	54
Figura 24: Modelo Dinâmico Principal.. ....	56
Figura 25: Modelo dq0 do Motor de Indução.....	57
Figura 26: Velocidade angular do rotor para $T_L = 10$ N.m. ....	60
Figura 27: Torque eletromagnético para $T_L = 10$ N.m.....	61
Figura 28: Corrente do estator para $T_L = 10$ N.m.. ....	61
Figura 29: Corrente do rotor para $T_L = 10$ N.m.....	62

Figura 30: Velocidade angular do rotor para $T_L = 10$ N.m. ....	62
Figura 31: Torque eletromagnético para $T_L = 15$ N.m. ....	63
Figura 32: Corrente do estator para $T_L = 15$ N.m. ....	63
Figura 33: Corrente do rotor para $T_L = 15$ N.m. ....	64
Figura 34: Velocidade angular do rotor para $T_L = 20$ N.m. ....	64
Figura 35: Torque eletromagnético para $T_L = 20$ N.m. ....	65
Figura 36: Corrente do estator para $T_L = 20$ N.m. ....	65
Figura 37: Corrente do rotor para $T_L = 20$ N.m. ....	66
Figura 38: Velocidade angular do rotor para $T_L = 25$ N.m. ....	66
Figura 39: Torque eletromagnético para $T_L = 25$ N.m. ....	67
Figura 40: Corrente do estator para $T_L = 25$ N.m. ....	67
Figura 41: Corrente do rotor para $T_L = 25$ N.m. ....	68
Figura 42: Velocidade angular do rotor para $T_L = 30$ N.m. ....	68
Figura 43: Torque eletromagnético para $T_L = 30$ N.m. ....	69
Figura 44: Corrente do estator para $T_L = 30$ N.m. ....	69
Figura 45: Corrente do rotor para $T_L = 30$ N.m. Fonte: Elaborado pelo autor. ..	70
Figura 46: Velocidade angular do rotor para partida com tensão reduzida e $T_L = 10$ N.m. ....	71
Figura 47: Torque eletromagnético para partida com tensão reduzida e $T_L = 10$ N.m. ....	71
Figura 48: Corrente do estator para partida com tensão reduzida e $T_L = 10$ N.m. ....	72
Figura 49: Corrente do rotor para partida com tensão reduzida e $T_L = 10$ N.m. ....	72

## LISTA DE SÍMBOLOS

- $H$ : Intensidade de campo magnético.
- $B$ : Densidade de fluxo magnético.
- $\Phi$ : Fluxo magnético.
- $\mu$ : Permeabilidade magnética.
- $\mu_0$ : Permeabilidade magnética do ar.
- $\mu_r$ : Permeabilidade relativa.
- $L$ : Comprimento.
- $N_i$ : Número de espiras.
- $\lambda$ : Fluxo concatenado.
- $\mathcal{R}_m$ : Relutância magnética.
- $L$ : Indutância.
- $L_{self}$ : Indutância do material.
- $L_m$ : Indutância de magnetização.
- $L_i$ : Indutância de dispersão.
- $\omega$ : Rotação angular.
- $f$ : Frequência.
- $P$ : Número de polos do motor.
- $s$ : Escorregamento.
- $V_1$ : Tensão de fase do estator.
- $I_1$ : Corrente do estator.
- $I_m$ : Corrente de magnetização.
- $I_2'$ : Corrente do rotor.
- $X_1$ : Reatância do estator.
- $E_2'$ : Força contra eletromotriz.

$z_2$ : Impedância equivalente do rotor.

$X_2$ : Reatância de dispersão do rotor.

$v_{ds}$ : Tensão do estator (eixo direto).

$v_{qs}$ : Tensão do estator (eixo em quadratura).

$v_{dr}$ : Tensão do rotor (eixo direto).

$v_{qr}$ : Tensão do rotor (eixo em quadratura).

$i_{ds}$ : Corrente do estator (eixo direto).

$i_{qs}$ : Corrente do estator (eixo em quadratura).

$i_{dr}$ : Corrente do rotor (eixo direto).

$i_{qr}$ : Corrente do rotor (eixo em quadratura).

$R_s$ : Resistência do estator.

$R_r$ : Resistência do rotor.

$\omega_e$ : Velocidade síncrona.

$\omega_r$ : Velocidade do rotor.

$\lambda_{ds}$ : Fluxo concatenado do estator (eixo direto).

$\lambda_{qs}$ : Fluxo concatenado do estator (eixo em quadratura).

$\lambda_{dr}$ : Fluxo concatenado no rotor (eixo direto).

$\lambda_{qr}$ : Fluxo concatenado no rotor (eixo em quadratura).

$L_r$ : Indutância do rotor.

$L_s$ : Indutância do estator.

$L_m$ : Indutância de magnetização.

$L_{lr}$ : Indutância de dispersão do rotor.

$L_{ls}$ : Indutância de dispersão do estator.

$T_e$ : Torque eletromagnético.

$T_L$ : Torque relativo a carga.

$P$  : Número de polos do motor.

$\theta_s$  : Posição inicial do rotor.

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	17
1.1 Justificativa .....	18
1.2 Objetivo Geral .....	19
1.3 Objetivos Específicos .....	19
1.4 Divisão do texto.....	20
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	21
3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	24
3.1 Conceitos Introdutórios .....	24
3.1.1 Circuitos Magnéticos.....	24
3.1.2 Campo Magnético Produzido por Condutores de Eletricidade .....	25
3.1.3 Lei de Ampère .....	26
3.1.4 Densidade de Fluxo B e o Fluxo $\phi$ .....	27
3.1.5 Materiais Ferromagnéticos .....	27
3.1.6 Fluxo $\phi_m$ .....	29
3.1.7 Fluxo concatenado e indutância .....	30
3.1.8 Indutâncias de magnetização e dispersão .....	31
3.2 Motores de Indução .....	33
3.2.1 Funcionamento do Motor de Indução .....	36
3.2.2 Circuito Equivalente do Motor de Indução .....	37
3.3 A Práxis Aplicada ao Estudo de Motores Elétricos .....	41
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	43
4.1 Modelagem matemática do Motor de Indução.....	43
4.1.1 Modelo Dinâmico Proposto .....	45
4.2 Modelo do Motor de Indução no MATLAB/Simulink® .....	55

5. RESULTADOS .....	58
5.1 Parâmetros utilizados nas simulações .....	58
5.2 Resultados das simulações.....	60
5.2.1 Resultados para o torque da carga em 10 N.m .....	60
5.2.2 Resultados para o torque da carga em 15 N.m .....	62
5.2.3 Resultados para o torque da carga em 20 N.m .....	64
5.2.4 Resultados para o torque da carga em 25 N.m .....	66
5.2.5 Resultados para o torque da carga em 30 N.m .....	68
5.2.6 Resultados para partida com tensão reduzida e $T_L = 10\text{N.m}$ .....	70
5.3 Análise dos resultados das simulações .....	73
6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	73
6.1 Conclusões .....	73
6.2 Sugestões para trabalhos futuros .....	74
7. REFERÊNCIAS: .....	75

## 1. INTRODUÇÃO

Na sociedade contemporânea, estudos acerca de máquinas elétricas são de suma importância para os cursos de graduação em Engenharia e Tecnologia, mais especificamente, aqueles aplicados aos motores e acionamentos elétricos.

Isto porque tais motores são os mais comumente encontrados no contexto industrial (LEONHARD, 1985). Entre suas características principais estão a eficiência; o melhor custo-benefício; ser de simples acionamento e exigir baixa manutenção.

Tema central do presente trabalho, o sistema de acionamento do motor de indução trifásico voltado ao processo ensino-aprendizagem de máquinas elétricas, evidencia a importância da modelagem matemática e simulação no desenvolvimento da prática de atividades que inserem o aluno no contexto industrial.

Para aplicações didáticas no ensino de Engenharia Elétrica, nem sempre há a disponibilidade de um sistema de acionamento elétrico do Motor de Indução Trifásico no qual o estudante tenha acesso aos diferentes pontos de interesse para medir e observar as principais formas de onda de corrente, torque ou velocidade.

Muito embora o sistema físico represente um equipamento indispensável, o uso de um modelo computacional apresenta-se como uma importante e igualmente indispensável ferramenta, possibilitando a imposição de diferentes condições de carga e alteração de diferentes parâmetros, criando oportunidades para investigação e compreensão de todo o sistema de acionamento do motor.

Assim sendo, o MATLAB/*Simulink*® tem se mostrado uma versátil e confiável ferramenta computacional para modelagem e simulação de sistemas dinâmicos. Com o uso dessa ferramenta computacional, sistemas dinâmicos complexos podem ser modelados, representando com riqueza de detalhes o sistema real.

## 1.1 Justificativa

As máquinas elétricas são as mais comumente utilizadas no contexto industrial pós-moderno. Justamente em virtude disso, cada vez mais estudos a respeito de motores e acionamentos elétricos se fazem presentes nos currículos constitutivos dos cursos de graduação em Engenharia e Tecnologia.

Observado esse fato por uma perspectiva didático-econômica, é possível afirmar que o enfoque de tais estudos recai sobre a eficiência, o custo benefício, a simplicidade e a exigência de baixa manutenção que os motores e acionamentos elétricos traduzem. Conseqüentemente, o processo ensino-aprendizagem deve alicerçar-se sobre a atividade prática.

De acordo com a apropriação do conceito supra, a *práxis* reflete o diálogo entre teoria e prática. Tão logo, a teoria que congrega os estudos de motores e acionamentos elétricos traz em seu arcabouço a necessidade de apropriação de muitos termos técnicos específicos, o que por si só, não se faz ideal para o atual paradigma educacional. Ideal se faz a oportunidade para que o aluno, frente aos preceitos teóricos consiga colocar em prática aquilo que lhe fora proposto.

Nesta esteira de raciocínio, a epistemologia também traz contribuições muito pertinentes. Isto porque ela incide no despertar de uma curiosidade mais apurada do aluno, curiosidade essa que lhe desperta a autonomia, tendo em vista a aproximação de sua Zona de Desenvolvimento Proximal, motivo cerne pelo qual as simulações e a modelagem de tais sistemas aqui realizados fazem-se extremamente pontuais.

Portanto, com essa perspectiva, o presente estudo pretende apresentar uma alternativa para a *práxis* especificamente voltada à modelagem computacional dos sistemas de acionamento de motores elétricos, em especial, o motor de indução trifásico.

Por uma questão de delimitação temática, far-se-á tal modelagem por intermédio da virtualização de ensaios. Assinala-se para os impactos positivos uma vez que se tornaram evidentes 02 (dois) aspectos importantes: o primeiro diz respeito à otimização econômica – uma vez que não houve necessidade de gastos com aquisição de equipamentos; o segundo referente ao temporal –

tendo em vista que é possível se administrar de forma mais consistente a exequibilidade das atividades desenvolvidas.

## 1.2 Objetivo Geral

Desenvolver um modelo de sistema de acionamento de um motor de indução trifásicos visando o aprimoramento dos estudos de máquinas elétricas em cursos de graduação<sup>1</sup>. Com isso, trazer para os estudos de máquinas elétricas um novo paradigma no que concerne ao processo ensino-aprendizagem tradicional.

## 1.3 Objetivos Específicos

Utilizar as equações diferenciais que descrevem o funcionamento do sistema de acionamento do motor de indução trifásico.

Elaborar um modelo matemático do sistema de acionamento do motor de indução trifásico, por intermédio da modelagem no MATLAB/*Simulink*®.

Verificar a validade e aplicabilidade do modelo proposto em cursos de graduação voltados ao estudo de máquinas elétricas, por intermédio da análise dos resultados das simulações.

---

<sup>1</sup> Conforme o Ministério da Educação, tal atividade presume o constructo teórico a ser fundamentado na prática e deve ser instrumentalizada de acordo com os Referenciais Nacionais dos Cursos de Engenharia. Disponível em: <<http://portal.mec.gov.br/dmdocuments/referenciais.pdf>>. Acesso em: 10 jan. 2016.

## 1.4 Divisão do texto

Para o desenvolvimento do tema proposto, este trabalho traz em sua estrutura a divisão de seu texto em 06 (seis) partes. A saber:

A primeira parte contempla os preceitos introdutórios aqui expostos cuja finalidade é conduzir a leitura deste estudo de forma mais didática. A segunda parte se aporta na revisão bibliográfica que considera uma breve retrospectiva histórica dos estudos realizados nos âmbitos internacional e nacional a respeito da temática ora apresentada. Este capítulo apresenta uma pesquisa bibliográfica a respeito de máquinas elétricas, modelos dinâmicos de motores de indução e artigos encontrados com objetivos próximos ao deste trabalho.

A terceira parte traduz os fundamentos teóricos. Para tanto, faz um resgate histórico com o intuito de compreender aspectos de fundamental importância. O primeiro aspecto no que concerne a *práxis* aplicada ao estudo de motores elétricos à luz de Caldeira & Zaidan (2008). A este respeito, há de se considerar que, na prática, estão presentes a ideia e a ação que, em tese, acabam por transformar a realidade. E, por fim, o segundo aspecto, conforme bem fundamentam Zatti (2007) e Mohan (2014) a respeito dos estudos de simulação como essenciais para a maior apreensão e motivação dos alunos frente aos sistemas avançados de acionamento elétrico.

A quarta parte contempla os Materiais e Métodos utilizados que, sob o prisma da pesquisa ora realizada, buscam traçar caminhos a serem percorridos com maior assertividade, conforme discorrem Minayo (1994) e Demo (2005) no apontamento de instrumentos mais específicos, aqui, delimitado por simulações realizadas por meio do MATLAB/*Simulink*®.

A quinta parte trata dos resultados obtidos a partir das simulações no MATLAB/*Simulink*® dos modelos propostos no capítulo. A sexta parte apresenta as considerações finais, conclusões sobre os resultados obtidos no trabalho e sugestões para trabalhos futuros sobre o assunto.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

De acordo com a literatura especializada, é possível afirmar que, em diversos países, pesquisadores também abordaram, ainda que de forma tangencial, a temática da presente pesquisa. Logo, por meio de uma perspectiva histórica, há de se considerar as obras infracitadas que apresentaram maior pertinência ao trabalho ora discutido.

Szablya & Bressane (1973) analisaram e publicaram a formulação complexa, ou vetorial, do modelo do motor de indução por meio de vetores espaciais.

Novotny & Wouterse (1976) utilizaram variáveis complexas no domínio do tempo, propiciando a criação de uma nova ferramenta para análise. Para tanto, utilizaram funções de transferência complexa, mostram o comportamento dessas funções utilizando o método do lugar das raízes para certas situações como a máquina funcionando com baixo escorregamento, o comportamento da frequência e da velocidade do rotor.

Na década de 90, 02 (dois) estudos foram pontuais. O primeiro, por Holtz (1995), mostrou vários métodos de simulação complexa, utilizando como base diversas combinações de variáveis de estado, como corrente de estator e fluxo de rotor, fluxo de estator e fluxo de rotor. Utilizou, portanto, diagramas de blocos complexo, lugar das raízes e analisa as raízes complexas. O segundo, por Vas (1998), acabou por descrever o modelo completo do motor de indução, utilizando equações diferenciais complexas e diversos tipos de modelagem para controlar o motor de indução.

Atualmente, em nível internacional podem ser elencados os estudos desenvolvidos por Leedy (2013), para quem a modelagem dinâmica e simulação de controladores do motor de indução são de grande importância para a indústria, assim como, para o ensino superior devido à predominância desses tipos de controladores em diversos ambientes industriais. Assim, por essa perspectiva, o motor de indução tem maior uso na indústria devido a sua evolução de uma máquina de velocidade constante para uma máquina de velocidade variável, tendo em vista o avanço da eletrônica de potência.

Neste sentido, cabe, ainda, ressaltar a essência do pensamento de Leedy (2013), que evidencia as máquinas de indução trifásicas e os inversores de frequência como sendo aqueles, atualmente, produzidos em larga escala, uma vez que apresentam baixo custo e estão prontamente disponíveis, por terem significativa acessibilidade. Com efeito, tal motor tem sido a principal escolha na indústria em muitas aplicações.

De forma a delimitar o presente estudo, torna-se fundamental a percepção de que no Brasil alguns pesquisadores também já abordaram o tema. Dentre esses, foram elencados 02 (dois), dada a respectiva aderência ao aqui proposto.

Desta forma, os primeiros pesquisadores que se destacaram em nosso país foram Aguiar & Cad (2000), uma vez que apresentaram definições significativas acerca do sistema dinâmico complexo e mostraram a solução para sistemas de equações complexas utilizando o programa MATLAB/*Simulink*®, comparando os resultados obtidos utilizando a separação em partes real e imaginária.

Cabe, ainda, ressaltar que os mesmos autores estudaram, em outra obra (2013), procedimentos de modelagem e simulação do motor de indução trifásico por meio de função de transferência complexa, utilizando MATLAB/*Simulink*® e as variáveis de fluxo e corrente.

Pelo viés jurisprudencial também é possível colocar em relevo a Resolução CNE/CES 11 do Ministério da Educação, de 11 de março de 2002 que Institui Diretrizes Curriculares Nacionais do Curso de Graduação em Engenharia<sup>2</sup> e traz no teor de seu parágrafo 3º o seguinte entendimento:

Art. 3º O Curso de Graduação em Engenharia tem como perfil do formando egresso/profissional o engenheiro, com formação generalista, humanista, **crítica e reflexiva, capacitado a absorver e desenvolver novas tecnologias, estimulando a sua atuação crítica e criativa na identificação e resolução de problemas**<sup>3</sup>, considerando seus aspectos políticos, econômicos, sociais, ambientais e culturais, com visão ética e humanística, em atendimento às demandas da sociedade.

---

<sup>2</sup> Disponível em: <http://portal.mec.gov.br/cne/arquivos/pdf/CES112002.pdf>. Acesso em: dez. 2015.

<sup>3</sup> *Grifo nosso.*

E, de forma mais específica, em seu artigo 6º, § 3º, Inciso XXXIII assinala:

Art. 6º Todo o curso de Engenharia, independente de sua modalidade, deve possuir em seu currículo um núcleo de conteúdos básicos, um núcleo de conteúdos profissionalizantes e um núcleo de conteúdos específicos que caracterizem a modalidade

(...)

§ 3º O núcleo de conteúdos profissionalizantes, cerca de 15% de carga horária mínima, versará sobre um subconjunto coerente dos tópicos abaixo discriminados, a ser definido pela IES:

(...)

**XXXIII - Modelagem, Análise e Simulação de Sistemas.<sup>4</sup>**

Em destaque, o fundamento legal acima referenciado é ratificado pelos Referenciais Nacionais dos Cursos de Engenharia Elétrica, conforme a seguir se observa:

#### PERFIL DO EGRESSO

O Engenheiro Eletricista é um profissional de formação generalista, que atua na geração, transmissão, distribuição e utilização da energia elétrica. Em sua atuação (...) Ele planeja, projeta, instala, opera e mantém instalações elétricas, sistemas de medição e de instrumentação, de **acionamentos de máquinas<sup>5</sup>**, de iluminação, de proteção contra descargas atmosféricas e de aterramento.

Portanto, é flagrante que, ao longo do contexto histórico, a literatura especializada vem efetivando a relevância dos estudos acerca de acionamentos de máquinas elétricas. Literatura essa que, no âmbito nacional, passou a ganhar também legitimação legal por meio do Ministério da Educação que regulamentou tais estudos nos cursos de graduação supracitados, por intermédio da Resolução CNE/CES 11 e pelos Referenciais Nacionais dos Cursos de Engenharia. Constructo teórico fundamental que alicerça a apreensão da presente pesquisa que ora se apresenta.

---

<sup>4</sup> *Grifo nosso.*

<sup>5</sup> *Idem*

### **3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS**

Ao longo do contexto histórico, estudos acerca de modelos de sistemas de acionamentos de motores de indução trifásicos são utilizados em cursos de graduação, mais especificamente, em cursos de Engenharia e Tecnologia com o intuito germinal de aprimorar a relação teoria-prática referente às máquinas elétricas. Estudos esses pontuados a seguir.

#### **3.1 Conceitos Introdutórios**

Existem diversos conceitos básicos que devem ser analisados antes de se iniciar qualquer estudo relacionado às máquinas elétricas. O princípio da conversão eletromecânica de energia é, sem dúvida alguma, a base para análise de tais máquinas (KRAUSE, 2002).

Assim sendo, o objetivo deste capítulo é oferecer subsídios para a melhor compreensão dos fenômenos relacionados às máquinas elétricas e, como efeito, oferecer condições para a elaboração das equações necessárias para a construção do modelo proposto nos próximos capítulos.

##### **3.1.1 Circuitos Magnéticos**

Os circuitos magneticamente acoplados desempenham um papel fundamental na transmissão e conversão de energia sendo o pilar da operação de transformadores, geradores e motores elétricos (MOHAN, 2012).

A este respeito, Fitzgerald *et al* (2006, p. 20) discorrem acerca da característica dos circuitos magnéticos:

Um circuito magnético consiste em uma estrutura que, em sua maior parte, é composta por material ferromagnético de permeabilidade elevada. A presença de um material de alta permeabilidade tende a fazer com que o fluxo magnético seja confinado aos caminhos delimitados pela estrutura, do mesmo modo que, em um circuito elétrico, as correntes são confinadas aos condutores.

O propósito deste subcapítulo é rever alguns conceitos básicos associados aos circuitos magnéticos, buscando desenvolver um entendimento mais fundamentado a respeito dos transformadores, item necessário para a compreensão acerca dos geradores e motores de corrente alternada, esses últimos, item principal do trabalho.

### **3.1.2 Campo Magnético Produzido por Condutores de Eletricidade**

Quando uma corrente  $I$  atravessa um condutor, um campo magnético é produzido. Importante também considerar que a direção do campo magnético depende do sentido da corrente.

Como mostrado na Figura 1a, a corrente através do condutor, perpendicular e “*entrando*” no plano do papel, é representada por "X". Assim, essa corrente produz um campo magnético no sentido horário.

Por outro lado, a corrente “*saindo*” do plano do papel, representada por um ponto, produz um campo magnético no sentido anti-horário, conforme pode ser observado na Figura 1b.

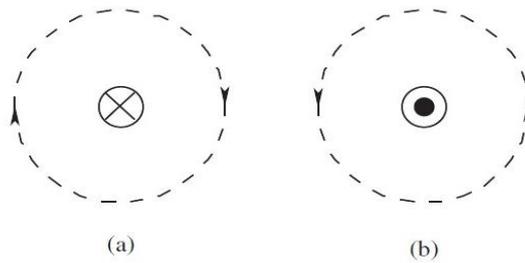


Figura 1: Campo magnético produzido por um condutor de eletricidade. Fonte: MOHAN, 2012, p. 69.

### 3.1.3 Lei de Ampère

A ciência base dos cursos de Engenharia e Tecnologia se encontra fundamentada em algumas leis básicas, como por exemplo, no âmbito do Eletromagnetismo, a Lei de Ampère traduz experiências com as forças que existem entre dois condutores que conduzem corrente, grandezas como densidade de fluxo magnético, intensidade de campo magnético e permeabilidade.

Segundo Mohan (2012, p. 69), o campo magnético de intensidade  $H$  produzido por condutores de eletricidade pode ser obtido por meio da Lei de Ampère que, em sua forma mais simples pode ser observada na equação 1:

$$H.l = N.i \quad (1)$$

### 3.1.4 Densidade de Fluxo B e o Fluxo $\phi$

Em qualquer instante de tempo  $t$  para um determinado campo magnético  $H$ , a densidade de linhas de fluxo, chamada densidade de fluxo  $B$  (na unidade *Tesla* [T]) depende da permeabilidade  $\mu$  do material no qual o campo  $H$  está atuando. Conforme equação 2, no ar, temos:

$$B = \mu_0 H \quad (2)$$

onde  $\mu_0$  é a permeabilidade do ar.

### 3.1.5 Materiais Ferromagnéticos

Os materiais ferromagnéticos são importantes para o arcabouço teórico ora discutido, pois conduzem campos magnéticos e, devido à sua elevada permeabilidade, requerem pequena relação Ampère-espira, que consiste em uma pequena corrente para um determinado número de voltas, para produzir a densidade de fluxo desejada, conforme abaixo se observa na equação 3:

$$B_m = \mu_m H_m \quad (3)$$

onde  $\mu_m$  é a permeabilidade de um material ferromagnético. Tipicamente, o valor de  $\mu_m$  de um material é representado relativamente a permeabilidade do ar, a saber:

$$\mu_m = \mu_r \mu_0 \quad (4)$$

Assim, em materiais ferromagnéticos, o valor de  $\mu_m$  pode ser milhares de vezes maior que  $\mu_0$ .

Conforme é possível se observar na Figura 2, a relação linear (com um  $\mu_m$  constante) é válida até aproximadamente a região do "joelho" da curva. Além dessa região, o material começa a saturar. Materiais ferromagnéticos operam frequentemente até uma densidade máxima de fluxo, ligeiramente acima da região supracitada, além da qual torna-se desejável um valor muito maior da relação ampere-espira, necessária para aumentar a densidade de fluxo. Na região de saturação, a permeabilidade incremental do material magnético se aproxima  $\mu_0$ , como mostrado pelo declive da curva na Figura 2.

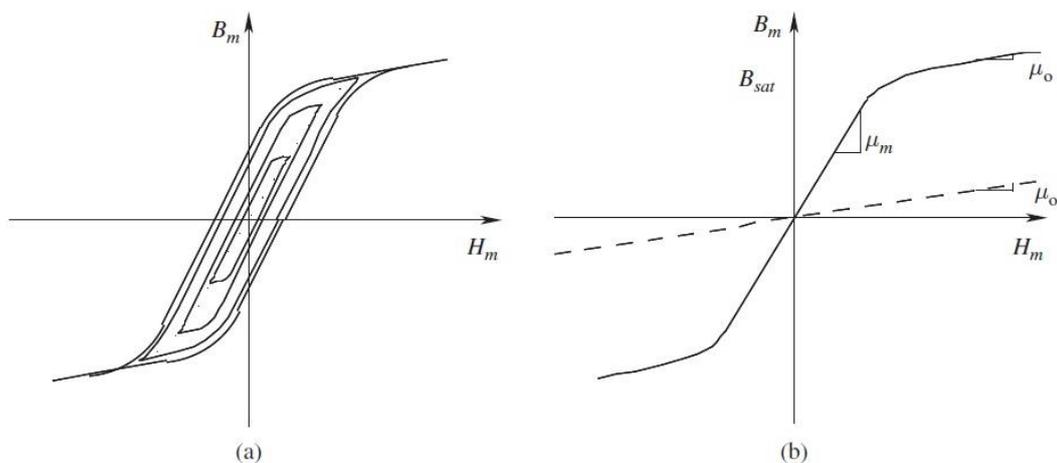


Figura 2 - Curva BH de materiais ferromagnéticos. Fonte: MOHAN, 2012, p. 71.

Neste trabalho, vamos supor que o material magnético está operando em sua região linear e, portanto, sua característica pode ser representada por  $B_m = \mu_m H_m$ , onde  $\mu_m$  permanece constante.

### 3.1.6 Fluxo $\Phi_m$

As linhas de fluxo magnético formam percursos fechados, como mostrado na Figura 3, considerando um núcleo magnético toroidal com bobinas condutoras de eletricidade. O fluxo neste núcleo toroidal pode ser calculado a partir da seleção de uma área circular  $A_m$  em um plano perpendicular à direção das linhas de fluxo. Como proposto no item 3.1.5, é razoável assumir um campo magnético  $H$  uniforme e, conseqüentemente, uma densidade de fluxo  $B_m$  em toda a seção transversal do núcleo.

$$B_m = \mu_m \frac{N_i}{l_m} \quad (5)$$

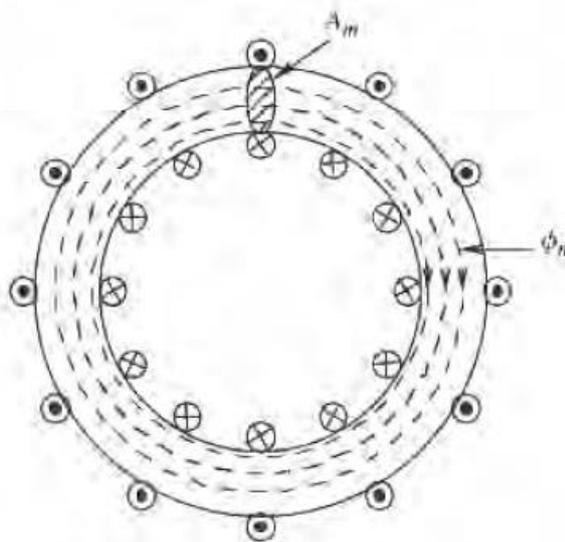


Figura 3 Núcleo toroidal. Fonte: MOHAN, 2012, p. 72.

onde  $B_m$  é a densidade de linhas de fluxo no núcleo. Portanto, supondo  $B_m$  uniforme, o fluxo  $\Phi_m$  pode ser calculado como:

$$\Phi_m = B_m A_m \quad (6)$$

onde o fluxo tem como unidade o Weber [Wb]. Substituindo  $B_m$  da equação 5 na equação 6:

$$\Phi_m = A_m \left( \mu_m \frac{N_i}{l_m} \right) = \frac{N_i}{\left( \frac{l_m}{\mu_m A_m} \right)} \quad (7)$$

onde  $N_i$  corresponde ao produto ampère-espiras ou à força magnetomotriz (FMM) aplicada ao núcleo e o termo do denominador é chamado de relutância do núcleo magnético ( $\mathcal{R}_m$ ), abaixo segue:

$$\mathcal{R}_m = \frac{l_m}{\mu_m A_m} [A/Wb] \quad (8)$$

### 3.1.7 Fluxo concatenado e indutância

Se todas as espiras de uma bobina, como a representada na Figura 3, anteriormente apresentada, estão submetidas ao mesmo fluxo  $\Phi_m$ , considera-se que a bobina tem um fluxo concatenado  $\lambda$ , conforme equação (9):

$$\lambda = N\Phi_m \quad (9)$$

Desde modo, em qualquer instante de tempo, o fluxo concatenado da bobina está relacionado com a corrente  $i$  por meio de um parâmetro definido como a indutância  $L$  (MOHAN, 2012):

$$\lambda_m = L_m i \quad (10)$$

onde considera-se a indutância é  $L_m$  constante se o material do núcleo se encontra na sua região de operação linear. A indutância da bobina na região magnética linear pode ser calculada baseando-se nas equações de 2 a 8 dos subcapítulos anteriores.

### **3.1.8 Indutâncias de magnetização e dispersão**

Assim como os condutores de eletricidade em circuitos elétricos, núcleos magnéticos conduzem o fluxo (MOHAN, 2012). Deste modo, em circuitos elétricos, a condutividade de cobre é aproximadamente  $10^{20}$  vezes mais elevada do que a de ar, permitindo que as correntes de fuga sejam desprezadas, seja em regime CC ou a baixas frequências, tais como 60 Hz. No entanto, em circuitos magnéticos, a permeabilidade dos materiais magnéticos é, tipicamente, cerca de  $10^4$  vezes maior que a do ar. Por esta razão, a janela central na estrutura da Figura 4, a seguir exposta, tem "vazamento" linhas de fluxo, que não atingem o seu destino – o entreferro.

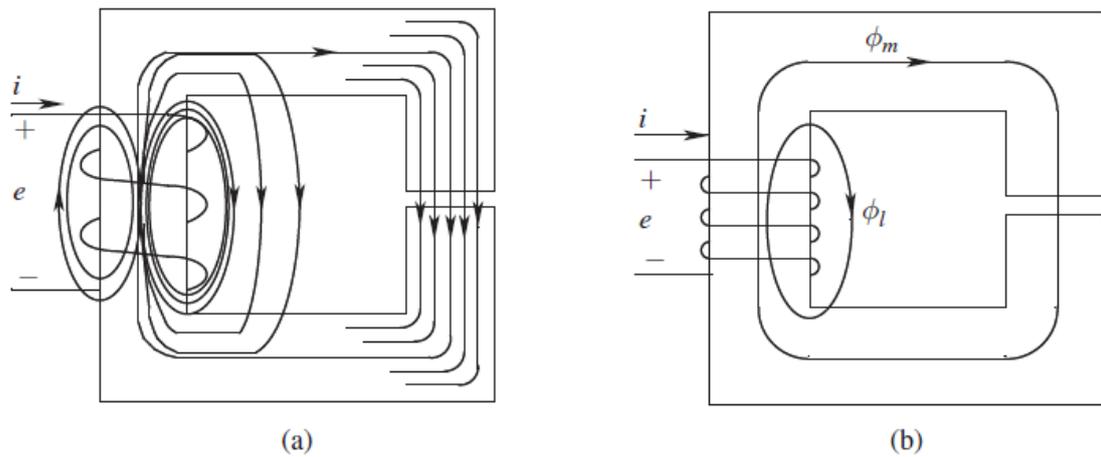


Figura 4: Fluxos magnético e de dispersão. Fonte: MOHAN, 2012, p.81.

Dessa forma, como resultado, a queda de tensão devido à indutância de dispersão é mostrada separadamente, de modo que a tensão induzida na bobina se torna dependente unicamente do fluxo de magnetização. A resistência  $R$  pode, então, ser adicionada em série para completar a representação da bobina, conforme se observa nas figuras 5a e 5b.

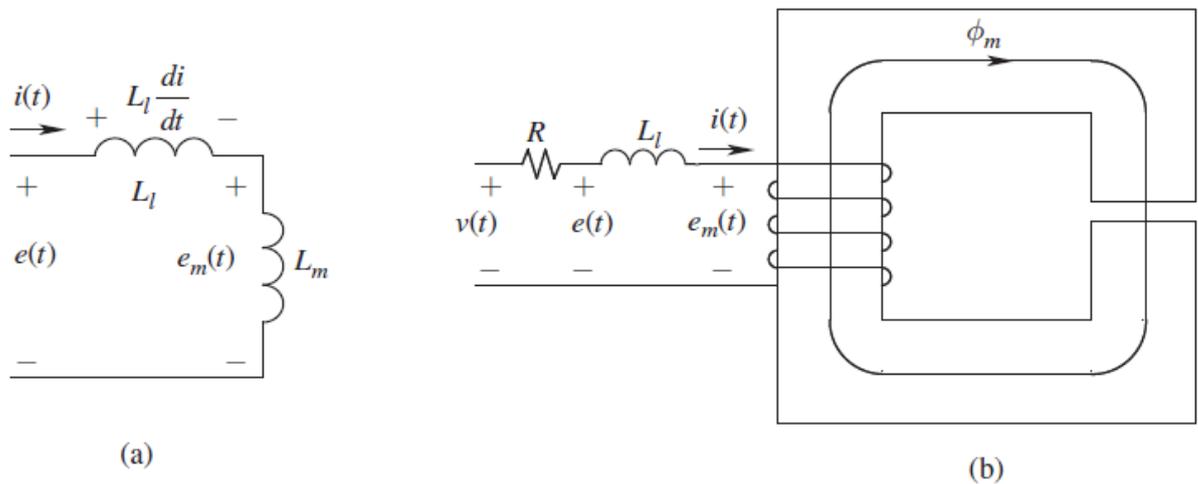


Figura 5: Representação do circuito e indutância de dispersão separada do núcleo. Fonte: MOHAN, 2012, p.81.

Portanto:

$$L_{self} = L_m + L_\ell \quad (11)$$

onde  $L_m$  é chamado a indutância de magnetização referente ao fluxo  $\Phi_m$  no núcleo magnético, e  $L_\ell$  é chamada de indutância de dispersão, devido à dispersão do fluxo  $\Phi_m$ .

### 3.2 Motores de Indução

Em análise ao motor de indução, também denominado por motor assíncrono, é crível identificar sua constituição a partir de 02 (duas) partes: estator e rotor. A saber:

A primeira, o estator, consiste na parte estacionária do motor. Enquanto que a segunda, o rotor, conforme a própria denominação indica, consiste na parte rotativa. Existe também um espaço entre o estator e o rotor que é depreendido como entreferro. Por fim, é justamente por esse que o fluxo magnético responsável pelo movimento do eixo circula (FITZGERALD, 2006).

Vale ressaltar também que tanto o estator como o rotor são compostos por chapas finas de aço magnético com ranhuras que permitem a acomodação dos enrolamentos. Tais chapas recebem tratamento térmico com objetivo de reduzir as perdas por correntes parasitas e histerese (LEONARD, 2001).

Nesta análise, os motores de indução também podem ser classificados como de dois tipos: gaiola de esquilo e rotor bobinado.

O primeiro tipo de motor, o gaiola de esquilo, tem ampla utilização nas indústrias uma vez que, por ser mais simples e robusto, torna-se mais viável economicamente e de fácil manutenção (MOHAN, 2014). Sua constituição se dá por barras de cobre curto-circuitadas, imersas nas ranhuras do rotor e conectadas nas extremidades por anéis condutores.

O segundo tipo, o rotor bobinado, permite acesso aos enrolamentos rotóricos por meio de anéis coletores e escovas o que possibilita o fácil controle de velocidade do motor e alto conjugado de partida. Contudo, devido à ampla quantidade de cobre presente em seus enrolamentos, seu custo econômico é mais elevado que o motor de gaiola, além de exigir mais manutenção por conta de escovas e anéis (MOHAN, 2014).

Para fins didáticos deste trabalho, na sequência, as figuras 6 e 7 mostram, respectivamente, o rotor de gaiola de esquilo e o rotor bobinado. E, em caráter suplementar, a figura 8 mostra a estrutura de um motor de indução trifásico.

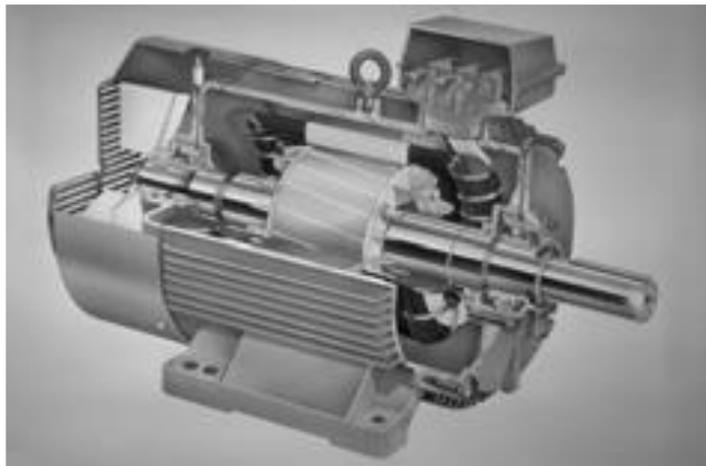


Figura 6: Rotor Gaiola<sup>6</sup>

---

<sup>6</sup> Disponível em: <http://www.dec.ufcg.edu.br/saneamento/CurvEnc3.html>. Acesso em: mar. 2016.

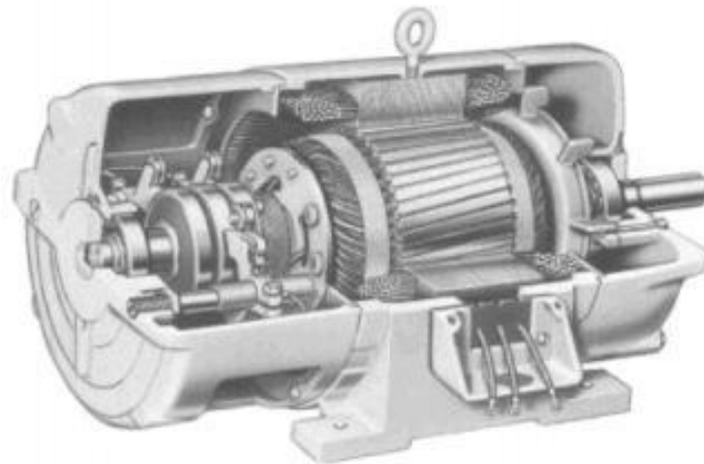


Figura 7: Rotor Bobinado<sup>7</sup>

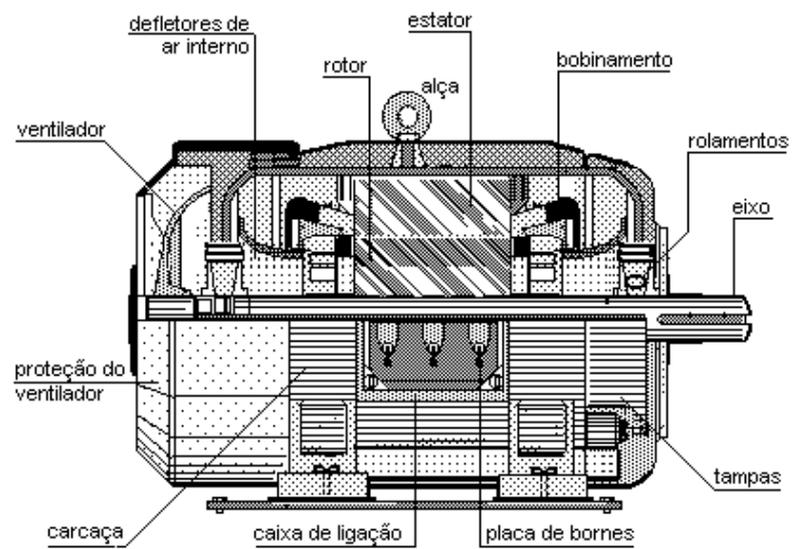


Figura 8: Estrutura do Motor de Indução<sup>8</sup>

<sup>7</sup> Disponível em: <http://www.dec.ufcg.edu.br/saneamento/CurvEnc3.html>. Acesso em: mar. 2016.

<sup>8</sup> Disponível em: <http://moodle.planetfone.com.br/mod/page/view.php?id=7>. Acesso em: mar. 2016.

### 3.2.1 Funcionamento do Motor de Indução

De acordo com Fitzgerald (2006), o funcionamento do motor de indução pode ser comparado ao funcionamento de um transformador uma vez que o rotor recebe uma tensão induzida, gerada pelo campo girante do estator, esse último, é alimentado por tensões trifásicas balanceadas, fazendo circular corrente trifásica equilibrada capaz de produzir um campo magnético que, por sua vez, tem sua velocidade, denominada mais especificamente como velocidade síncrona, na qual se percebe que a mesma depende da frequência elétrica  $f$  da rede e do número de polos  $p$  do motor. A este respeito, segue:

$$\omega_s = \frac{120 \cdot f}{p} \quad (12)$$

Nesse sentido, há o entendimento de que o rotor estando fechado, gaiola de esquilo ou resistências externas inseridas ou escovas curto-circuitadas, surge a circulação de uma corrente, que gera um campo magnético. Logo, a interação entre esse campo e o campo girante do estator produz o movimento do rotor. O campo girante atravessa o entreferro cortando os condutores do rotor e induz uma tensão. Essa tensão faz circular corrente no rotor, uma vez que o mesmo se encontra totalmente fechado, produzindo também no rotor o seu campo magnético girante. A interação entre o campo do rotor e do estator produz o torque eletromagnético da máquina. Importante destacar também que a diferença entre a velocidade síncrona e a velocidade do rotor é chamada de escorregamento. Pode-se calcular, portanto, a velocidade do rotor por intermédio do escorregamento e da velocidade síncrona como mostra a equação a seguir:

$$\omega_r = (1 - s)\omega_s \quad (13)$$

cujos indicadores referem-se à velocidade do rotor, a velocidade síncrona e o escorregamento.

Com isso, observa-se que o campo induzido pelas correntes do rotor gira com a mesma velocidade que o campo do estator o que resulta em um conjugado de partida que faz com que o rotor tenda a girar no sentido de rotação do campo de indução do estator. Mais ainda, a velocidade do rotor nunca se iguala a velocidade síncrona. Se isso viesse a acontecer, os condutores do rotor estariam estacionários em relação ao campo do rotor e corrente alguma seria induzida neles. Como efeito, o conjugado seria nulo, o que se confirma com os estudos de Krause (2002).

### 3.2.2 Circuito Equivalente do Motor de Indução

Segundo bem conceitua Fitzgerald (2006), o motor de indução trifásico pode ser expresso na forma de um circuito equivalente. Para fins de delimitação temática, há de se considerar, aqui, apenas as máquinas com enrolamentos polifásicos simétricos, excitadas por tensão polifásicas equilibradas.

Portanto, torna-se oportuno considerar que as máquinas trifásicas estão ligadas em Y, de modo que as correntes e tensões sejam sempre expressas por valores de fase. Com isso, deduz-se que um circuito equivalente para uma fase, de modo que, para as demais fases, basta fazer um deslocamento adequado da fase que está sendo estudada.

A partir dessa perspectiva de estudo, em primeira análise, verificam-se condições no estator. Logo, a onda de fluxo de entreferro, girando sincronicamente gera forças contra eletromotrizes nas faces do estator. Por sua vez, a tensão terminal do estator difere da força contra eletromotriz pela queda de impedância de dispersão do estator. De tal modo, tem-se:

$$\hat{V}_1 = \hat{E}_2 + \hat{I}_1(R_1 + jX_1) \quad (14)$$

onde  $\hat{V}_1$  é a tensão terminal de fase do estator,  $\hat{E}_2$  é a força contra eletromotriz,  $\hat{I}_1$  é a corrente do estator,  $R_1$  é a resistência do estator e  $X_1$  é a reatância de dispersão do estator. Um circuito equivalente do estator é mostrado a seguir por intermédio da figura 9.

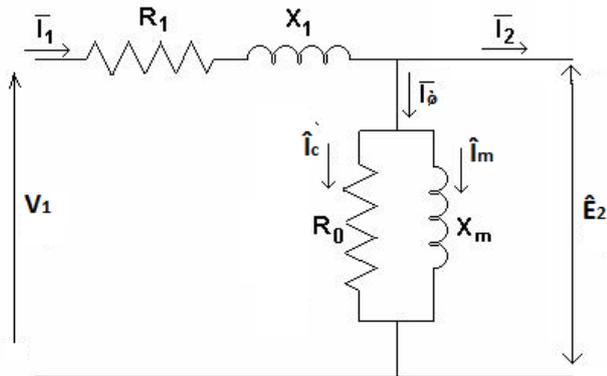


Figura 9: Circuito Equivalente do Estator.<sup>9</sup>

De forma similar a um transformador, pode-se decompor a corrente do estator em uma componente de carga e uma componente de perdas no núcleo e uma componente de magnetização. No circuito equivalente do estator nota-se, ainda, a resistência de perdas no núcleo em paralelo com a reatância de magnetização.

Devem-se incluir os efeitos do rotor para completar o modelo do motor de indução. Do ponto de vista do circuito equivalente do estator, o rotor pode ser visto por uma impedância equivalente  $Z_2$ :

$$Z_2 = \frac{\hat{E}_2}{\hat{I}_2} \quad (15)$$

<sup>9</sup> Disponível em:

<http://rcientificas.uninorte.edu.co/index.php/ingenieria/rt/printerFriendly/868/4508>. Acesso em: abr. 2016.

o que corresponde à impedância de dispersão de um secundário equivalente estacionário.

Em franca condição análoga a um transformador, há possibilidade de se deduzir um circuito equivalente do rotor refletido no estator. Caso fosse utilizado efetivamente um transformador, bastaria multiplicar a impedância do secundário pelo quadrado da relação de espiras entre o primário e o secundário.

Existe, ainda, a percepção do modo semelhante que, no motor de indução ocorre quando o rotor é substituído por um rotor equivalente, tendo um enrolamento polifásico com os mesmos números de fases e espiras que o estator, contudo, produz a mesma força eletromotriz e fluxo de entreferro que o rotor real, o desempenho não será alterado quando observado do ponto de vista do estator.

Logo, depois de algumas considerações, é importante ressaltar primeiro a impedância de dispersão do rotor em tela, na frequência de escorregamento. A este respeito, é relevante o entendimento:

$$z_2 = \frac{\hat{E}_2}{\hat{I}_2} = R_2 + jsX_2 \quad (16)$$

Portanto, onde  $R_2$  é a resistência do rotor referido e  $X_2$  é a reatância de dispersão do rotor referido, na frequência de escorregamento.

O circuito equivalente de uma fase do rotor referido, na frequência de escorregamento, está mostrado na figura 10, a seguir:

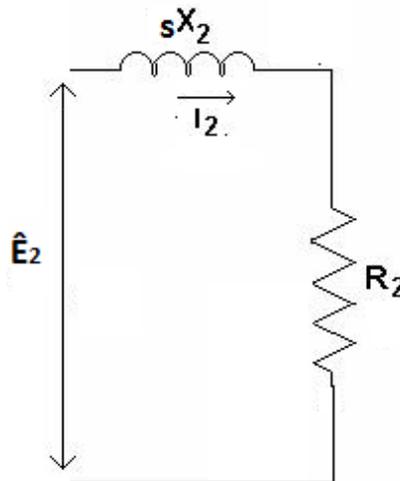


Figura 10: Circuito Equivalente do rotor na frequência de escorregamento. <sup>10</sup>

Neste ensejo, para finalizar a dedução do circuito equivalente do motor de indução, cabe a divisão da equação supra pelo escorregamento  $s$ :

$$z_2 = \frac{R_2}{s} + jX_2 \quad (17)$$

O resultado final é o circuito equivalente por fase, referido ao estator. A partir da qual nota-se que os efeitos combinados da carga no eixo e da resistência do rotor aparecem na forma de uma resistência refletida  $\frac{R_2}{s}$ , que é uma função do escorregamento e, portanto, da carga mecânica.

Ao final, a corrente na impedância do rotor refletido é igual à componente de carga  $\hat{I}_2$  da corrente do estator. A tensão sobre essa impedância é igual à tensão de estator  $\hat{E}_2$ . Conforme a figura 11, temos:

<sup>10</sup> Disponível em <http://rcientificas.uninorte.edu.co/index.php/ingenieria/rt/printerFriendly/868/4508> Acesso em: abr. 2016.

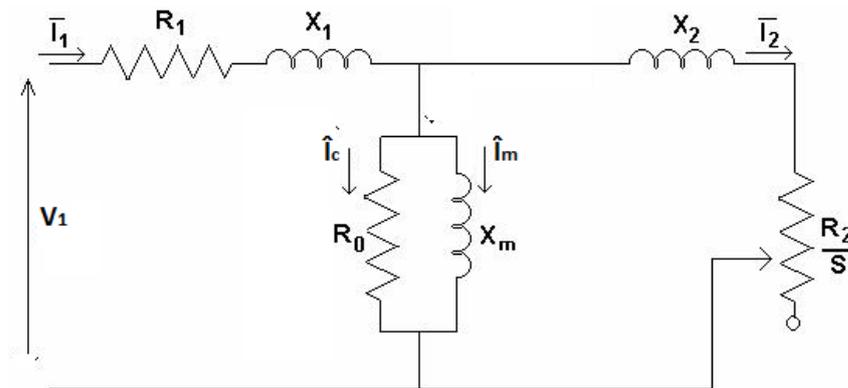


Figura 11: Circuito Equivalente de um Motor de Indução Trifásico, referido ao estator, por fase. <sup>11</sup>

### 3.3 A Práxis Aplicada ao Estudo de Motores Elétricos

Por tal lógica, é oportuno também considerar de primeiro plano que a teoria pode ser apreendida como um corpo de conhecimento estruturado cientificamente. Assim, à luz de Caldeira & Zaidan (2008, pp. 21-22), no contexto educacional, a teoria deve estabelecer um paralelo à prática, uma vez que essa emerge do cotidiano da sala de aula e de outros espaços escolares. Portanto, na prática estão presentes a ideia e a ação, que buscam transformar a realidade, ou seja, há uma unidade entre teoria e prática, entre concepção e ação:

A prática e a reflexão sobre a prática (*práxis* fundamentada na teoria), portanto, colocam-se como parte da própria prática, num **movimento contínuo de construção, como parte da experiência vivida pelos sujeitos e como elemento essencial de transformação da realidade.**<sup>12</sup>

Deste modo, a justificativa central do presente trabalho alicerça-se sobre a relação que se estabelece entre elas, o que aponta para a necessidade de se conceber um modelo de sistemas de acionamento de motores, dentre os

<sup>11</sup> Disponível em

<http://rcientificas.uninorte.edu.co/index.php/ingenieria/rt/printerFriendly/868/4508> Acesso em: abr. 2016.

<sup>12</sup> Grifo nosso

diversos existentes, cujo enfoque esteja na *práxis* pedagógica que coloca em franco diálogo teoria e prática, o que corrobora, ainda, com o pensamento de Caldeira & Zaidan (2008, p. 16):

Nesse entendimento, as teorias, no nosso caso as teorias educativas, devem se conformar às normas e critérios científicos e, como tais, devem ser aplicadas. De acordo com essa posição, portanto, os princípios e as teorias podem orientar tanto o desenvolvimento de uma técnica de ensino como a solução de problemas relacionados à disciplina e ao controle da sala de aula, à motivação e à avaliação.

Motivo pelo qual o desenvolvimento do modelo de sistemas de acionamento de motores supramencionado tende a solucionar problemas relacionados à apreensão e motivação dos alunos, uma vez que esses poderão instrumentalizar o referido modelo. Em caráter complementar, o que encontra fundamento nas conclusões de Caldeira & Zaidan (2008, p. 23):

Ainda nesse sentido, é possível afirmar que a atividade docente traz nela mesma a unidade teoria-prática e pode contribuir para a construção de um novo conhecimento, pois a ação docente é uma prática que visa transformação de uma realidade. Portanto, a ação docente atenta e reflexiva pode ser considerada uma *práxis* pedagógica.

A partir de tal entendimento, é possível afirmar que, atualmente, existe uma gama de modelos de sistemas de acionamento de motores elétricos – que serão discutidos ao longo do presente trabalho.

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais e métodos utilizados no experimento proposto. Para tanto, divide-se em duas partes, sendo que a primeira trata da modelagem matemática do Motor de Indução Trifásico associada à construção dos modelos no MATLAB/*Simulink*®, e a segunda apresenta os resultados das simulações e análise dos resultados.

### 4.1 Modelagem matemática do Motor de Indução

Este subcapítulo visa apresentar um modelo dinâmico do motor de indução desenvolvido no MATLAB/*Simulink*®, assim como, sua pertinência enquanto instrumento de ensino de máquinas elétricas. Dessa forma, o modelo é apropriado para estudos acerca do comportamento dinâmico do motor de indução. Mais ainda, com pequenas alterações, pode ser utilizado em várias topologias de acionamento do motor, incluindo inversores e controladores PWM.

Nesta perspectiva e, em consonância com os estudos realizados por Leedy (2013), a base do presente estudo alicerçou-se no modelo  $dq0$  do motor de indução que, intuitivo, permite facilmente sua utilização, assim como, o acesso a todos os parâmetros do motor, com objetivo de monitoramento e comparação.

A pertinência do MATLAB/*Simulink*® para o presente estudo recai sobre suas características, dentre as quais está a possibilidade de se realizar a modelagem dinâmica de sistemas usando uma estrutura de diagrama de blocos que podem ser construídos com rapidez e eficiência. Por meio da literatura, é possível identificar muitos modelos de motor de indução desenvolvidos no *Simulink*®, com especial destaque aos trabalhos realizados por Aguiar & Cad (2013), Leedy (2013) e Cad (2000).

A apresentação de um modelo dinâmico de motor de indução torna-se relevante tendo em vista a possibilidade de se utilizar o MATLAB/*Simulink*®,

aplicando suas ferramentas aos estudos acerca do comportamento transitório de um sistema de acionamento do motor. A título de exemplificação, é possível destacar o motor de indução acionado por um inversor de frequência, aspecto esse que pode ser observado por intermédio da figura 12:

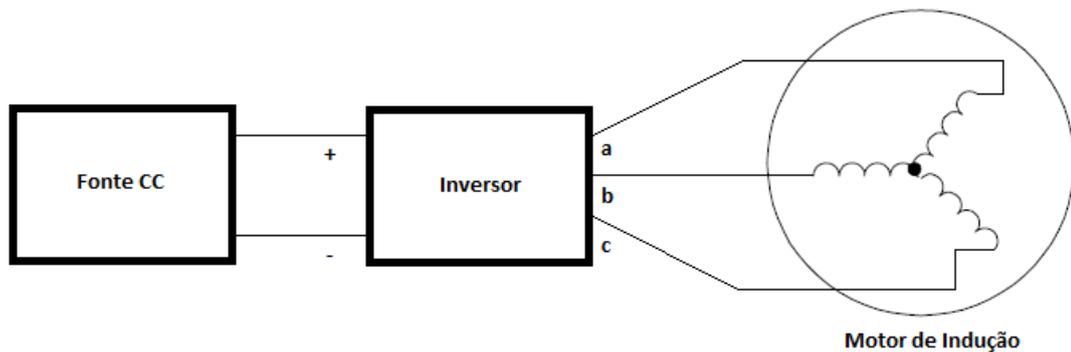


Figura 12: Acionamento do motor de indução. Fonte: Elaborado pelo autor.

Assim sendo, é importante ressaltar que o enfoque deste estudo está em se desenvolver um modelo que é intuitivo, fácil de usar e que permita o acesso a todos os parâmetros de monitoramento do motor e garantindo possibilidades de comparação. Para tanto, utilizam-se equações diferenciais que descrevem o funcionamento de um sistema de acionamento do motor, o que permite o desenvolvimento de modelos matemáticos do sistema antes que se trabalhe no modelo *Simulink*®.

### 4.1.1 Modelo Dinâmico Proposto

Em sua totalidade, a análise e simulação no presente documento são baseadas no circuito equivalente d-q-0 ou dinâmico do motor de indução. A seguir, serão apresentadas as equações diferenciais produzidas a partir da análise dos circuitos das figuras 13 e 14, a seguir:

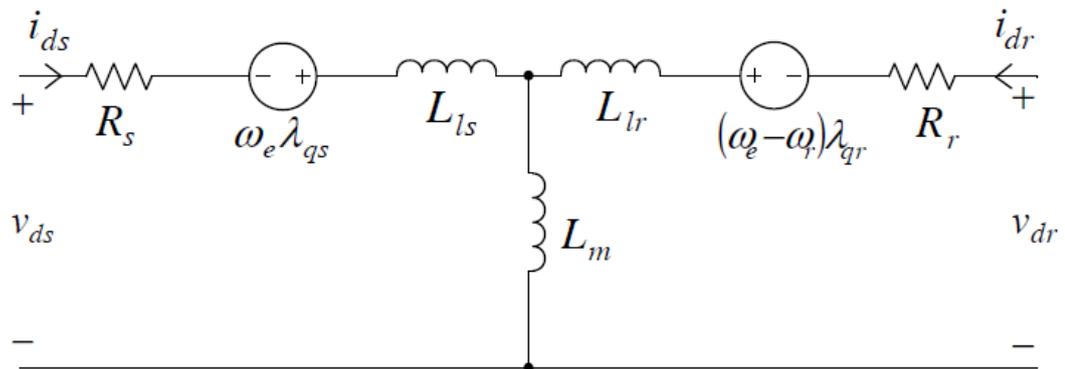


Figura 13: Circuito equivalente eixo direto (d). Fonte: LEEDY, 2013, p. 2.

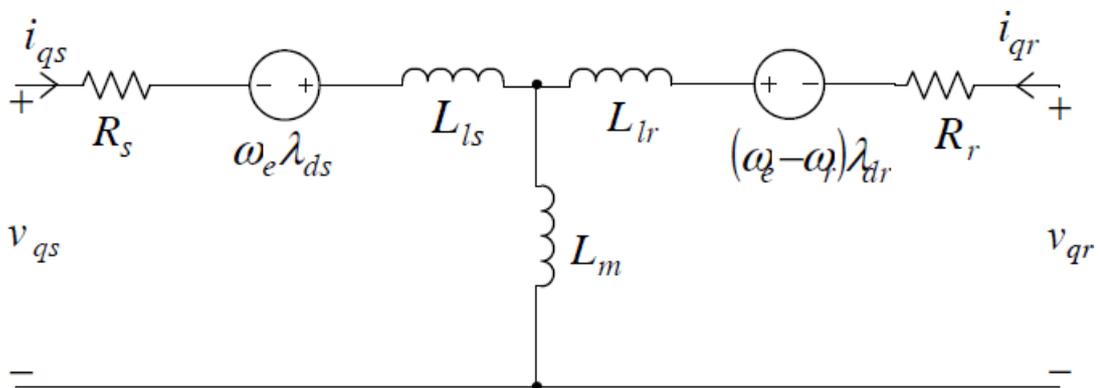


Figura 14: Circuito equivalente eixo em quadratura (q). Fonte: LEEDY, 2013, p. 2.

$$v_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\lambda_{ds}}{dt} - \omega_e \lambda_{qs} \quad (18)$$

$$v_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\lambda_{qs}}{dt} + \omega_e \lambda_{ds} \quad (19)$$

$$v_{dr} = 0 = R_r i_{dr} + \frac{d\lambda_{dr}}{dt} - (\omega_e - \omega_r) \lambda_{qr} \quad (20)$$

$$v_{qr} = 0 = R_r i_{qr} + \frac{d\lambda_{qr}}{dt} + (\omega_e - \omega_r) \lambda_{dr} \quad (21)$$

onde d é o eixo direto, q é o eixo em quadratura,  $v_{ds}$  e  $v_{qs}$  são as tensões no estator,  $v_{dr}$  e  $v_{qr}$  são as tensões no rotor,  $i_{ds}$  e  $i_{qs}$  são as correntes no estator,  $i_{dr}$  e  $i_{qr}$  são as correntes no rotor,  $R_s$  é a resistência do estator,  $R_r$  é a resistência do rotor,  $\omega_e$  é a velocidade angular do plano de referência,  $\omega_r$  é a velocidade angular do rotor, e  $\lambda_{ds}$ ,  $\lambda_{qs}$ ,  $\lambda_{dr}$  e  $\lambda_{qr}$  são os fluxos concatenados.

Assume-se que o motor analisado é o motor de indução com rotor gaiola de esquilo, considerando, assim, as tensões no rotor nas equações 20 e 21 iguais a zero. Os fluxos concatenados serão representados por:

$$\lambda_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i_{dr} \quad (22)$$

$$\lambda_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i_{qr} \quad (23)$$

$$\lambda_{dr} = L_r i_{dr} + L_m i_{ds} \quad (24)$$

$$\lambda_{qr} = L_r i_{qr} + L_m i_{qs} \quad (25)$$

onde  $L_r$  é a indutância do rotor,  $L_s$  é a indutância do estator,  $L_m$  é a indutância de magnetização,  $L_{lr}$  é a reatância de dispersão do rotor, e  $L_{ls}$  é a reatância de dispersão do estator. As indutâncias do estator e do rotor podem ser expressas por:

$$L_s = L_m + L_{ls} \quad (26)$$

$$L_r = L_m + L_{lr} \quad (27)$$

Mais ainda, as correntes podem ser descritas por:

$$i_{ds} = \frac{\lambda_{ds} - L_m i_{dr}}{L_s} \quad (28)$$

$$i_{qs} = \frac{\lambda_{qs} - L_m i_{qr}}{L_s} \quad (29)$$

$$i_{dr} = \frac{\lambda_{dr} - L_m i_{ds}}{L_r} \quad (30)$$

$$i_{qr} = \frac{\lambda_{qr} - L_m i_{qs}}{L_r} \quad (31)$$

Após algumas substituições, as correntes podem ser expressas em função dos fluxos concatenados, conforme se observa a seguir:

$$i_{ds} = \frac{L_r}{L_r L_s - L_m^2} \lambda_{ds} - \frac{L_m}{L_r L_s - L_m^2} \lambda_{dr} \quad (32)$$

$$i_{qs} = \frac{L_r}{L_r L_s - L_m^2} \lambda_{qs} - \frac{L_m}{L_r L_s - L_m^2} \lambda_{qr} \quad (33)$$

$$i_{dr} = \frac{L_s}{L_r L_s - L_m^2} \lambda_{dr} - \frac{L_m}{L_r L_s - L_m^2} \lambda_{ds} \quad (34)$$

$$i_{qr} = \frac{L_s}{L_r L_s - L_m^2} \lambda_{qr} - \frac{L_m}{L_r L_s - L_m^2} \lambda_{qs} \quad (35)$$

Na figura 15, o modelo *Simulink*® construído a partir da equação 32. Para as equações de 33 a 35, segue-se o mesmo método de construção, ou seja:

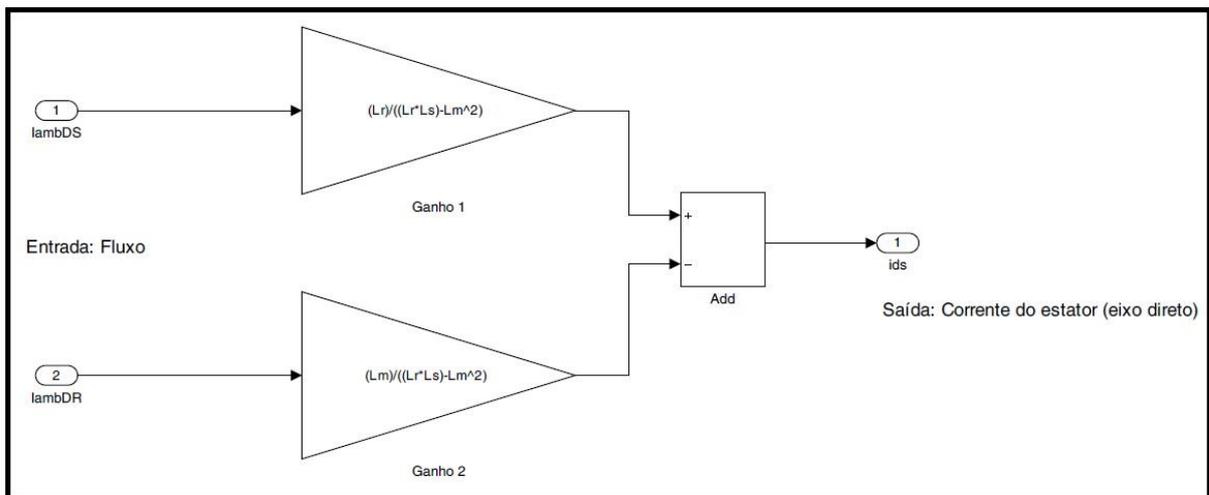


Figura 15: Subsistema MATLAB/*Simulink*® I. Fonte: Elaborado pelo autor.

Desde modo, o torque eletromagnético do motor pode ser descrito por:

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} L_m [i_{qs} i_{dr} - i_{ds} i_{qr}] \quad (36)$$

onde  $P$  representa o número de polos e  $T_e$  é o torque eletromagnético.

Pela mesma lógica, o modelo referente a equação 36 é mostrado na figura 16. A saber:

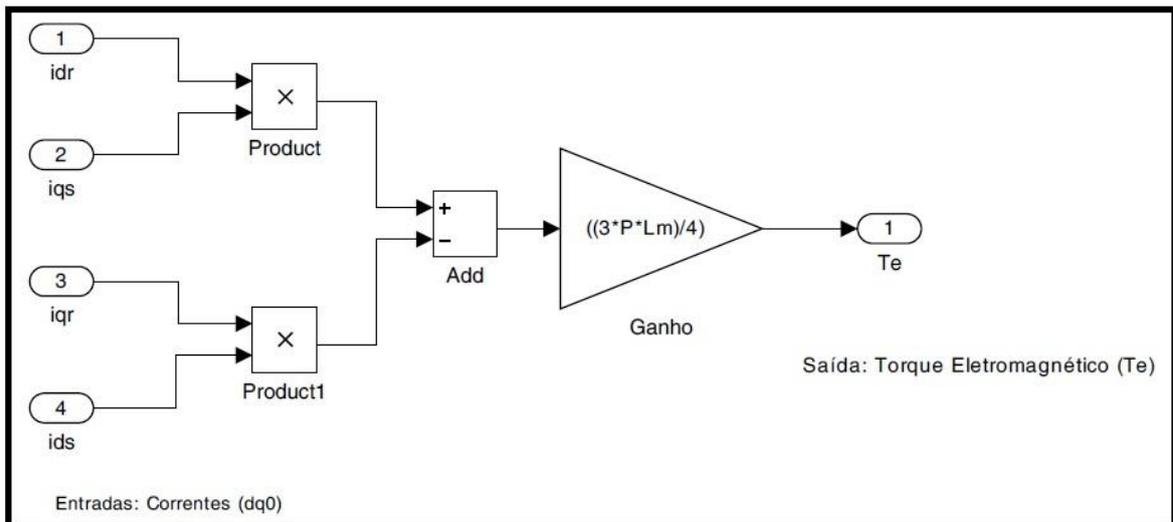


Figura 16: Subsistema MATLAB/Simulink® II. Fonte: Elaborado pelo autor.

Importante ressaltar ainda que, para esta análise, despreza-se o amortecimento mecânico. Desta forma, a relação entre a velocidade do rotor e o torque eletromagnético pode ser representado por:

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{P}{2J} (T_e - T_L) \quad (37)$$

A figura 17 apresenta o modelo *Simulink*®, elaborado a partir da equação 37:

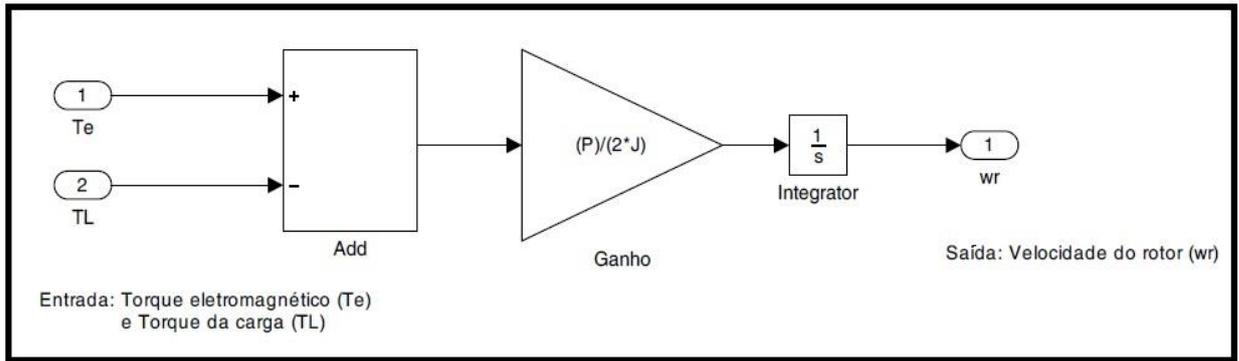


Figura 17: Subsistema MATLAB/Simulink® III. Fonte: Elaborado pelo autor.

onde  $T_L$  é o torque da carga a  $J$  a inércia do rotor e da carga conectada. O ângulo  $\theta_e$  é calculado diretamente pela integração da frequência dos sinais de entrada, como se segue:

$$\theta_e = \int_0^t \omega_e dt + \theta_e(0) \quad (38)$$

onde  $\theta_e(0)$  é a posição inicial do rotor.

Na figura 18, apresenta-se o modelo *Simulink*® referente à equação 38, conforme se observa a seguir:

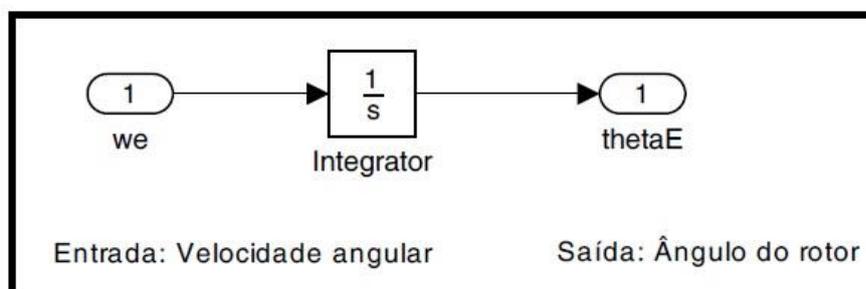


Figura 18: Subsistema MATLAB/Simulink® IV. Fonte: Elaborado pelo autor.

Utilizando o bloco *Signal Builder*, o torque da carga  $T_L$  pode ser representado pela figura 19:



Figura 19: Sinal simulado do Torque referente à carga (TL). Fonte: Elaborado pelo autor.

Com a utilização da Transformada de Park, conforme Apêndice I, as tensões trifásicas podem ser convertidas em um sistema estacionário de duas fases, utilizando a relação:

$$\begin{bmatrix} v_{qs}^s \\ v_{ds}^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{an} \\ v_{bn} \\ v_{cn} \end{bmatrix} \quad (39)$$

onde o sufixo *s* na matriz acima refere-se ao quadro estacionário (dq0).

Para a conversão do modelo ABC para o modelo dq0 das variáveis de tensão, conforme equação 39, construiu-se o modelo *Simulink*® da figura 20. A matriz M1, vista a seguir, deve ser descrita no MATLAB.

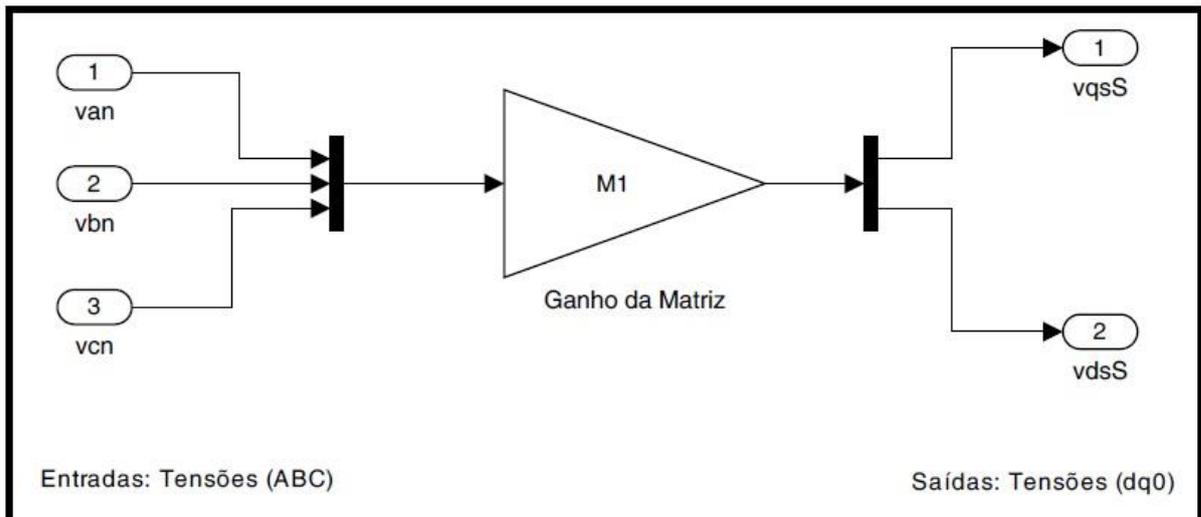


Figura 20: Subsistema MATLAB/Simulink® V. Fonte: Elaborado pelo autor.

Ainda pelo mesmo processo de transformação, as tensões podem ser convertidas a partir do quadro bifásico estacionário para o quadro rotativo síncrono usando as seguintes equações:

$$v_{qs} = v_{qs}^s \cos \theta_e - v_{ds}^s \sin \theta_e \quad (40)$$

e

$$v_{ds} = v_{qs}^s \sin \theta_e + v_{ds}^s \cos \theta_e \quad (41)$$

Importante ressaltar ainda que, tomando como referência as equações 40 e 41, o modelo da figura 21 permite as conversões dq0 – ABC supracitadas:

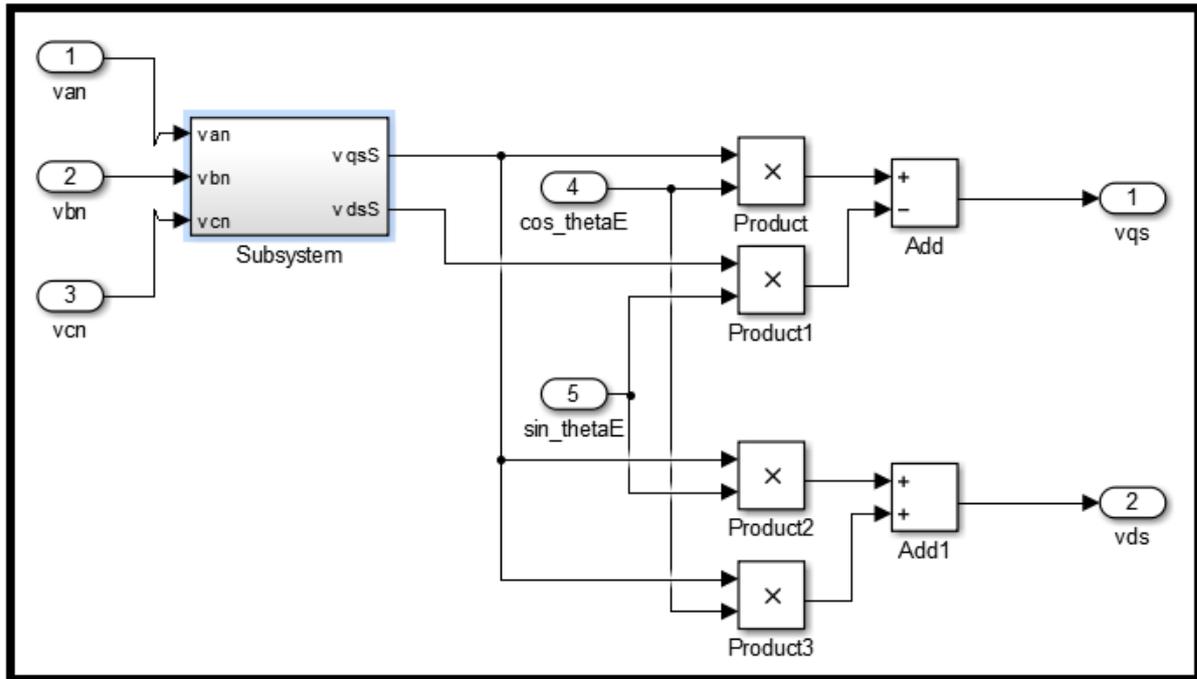


Figura 21: Subsistema MATLAB/Simulink® VI. Fonte: Elaborado pelo autor.

As variáveis de corrente podem ser representadas pelas equações a seguir apresentadas:

$$i_{qs}^s = i_{qs} \cos \theta_e + i_{ds} \sin \theta_e \quad (42)$$

$$i_{ds}^s = -i_{qs} \sin \theta_e + i_{ds} \cos \theta_e \quad (43)$$

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{-1}{2} & \frac{-\sqrt{3}}{2} \\ \frac{-1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs}^s \\ i_{ds}^s \end{bmatrix} \quad (44)$$

De modo similar às conversões das variáveis de tensão, o modelo da figura 22 permite a simulação das equações das variáveis de corrente, isto é:

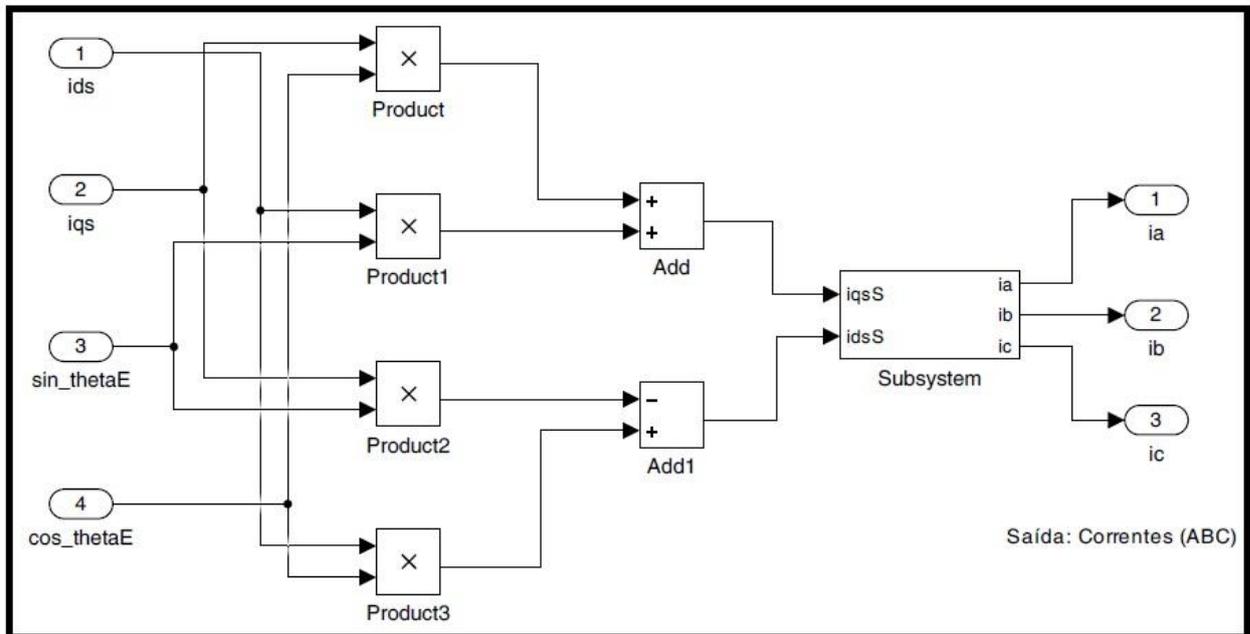


Figura 22: Subsistema MATLAB/Simulink® VII. Fonte: Elaborado pelo autor.

O bloco de conversão dq0 – ABC referente às correntes é descrito abaixo, na figura 23. A matriz identificada neste bloco deve ser configurada no MATLAB.

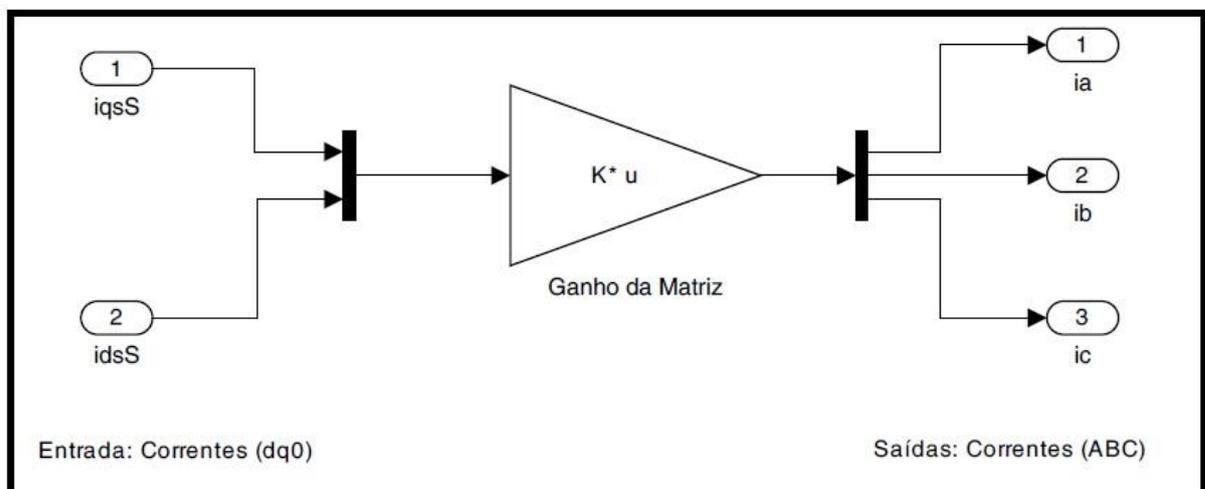


Figura 23: Subsistema MATLAB/SIMULINK® VIII. Fonte: Elaborado pelo autor.

## 4.2 Modelo do Motor de Indução no MATLAB/Simulink®

A estratégia utilizada para construir o modelo no *Simulink*® neste trabalho é baseada na elaboração de blocos, ou seja, a partir da criação de módulos, conforme a ideia apresentada por Ozpineci (2003, p.34), porém, com o acréscimo de algumas simulações e análises. No entanto, o objetivo cerne deste trabalho é apresentar o modelo de uma forma clara e simplificada, permitindo um melhor atendimento aos estudantes de máquinas elétricas.

Destarte, para iniciarmos a construção do modelo do motor de indução no *Simulink*®, devemos substituir as equações 28 a 31 em 18 a 21, obtendo as seguintes equações diferenciais, em função dos fluxos concatenados:

$$\frac{d\lambda_{ds}}{dt} = v_{ds} - \frac{R_s L_r}{L_r L_s - L_m^2} \lambda_{ds} + \frac{R_s L_m}{L_r L_s - L_m^2} \lambda_{dr} + \omega_e \lambda_{qs} \quad (45)$$

$$\frac{d\lambda_{qs}}{dt} = v_{qs} - \frac{R_s L_r}{L_r L_s - L_m^2} \lambda_{qs} + \frac{R_s L_m}{L_r L_s - L_m^2} \lambda_{qr} - \omega_e \lambda_{ds} \quad (46)$$

$$\frac{d\lambda_{dr}}{dt} = \frac{-R_r L_s}{L_r L_s - L_m^2} \lambda_{dr} + \frac{R_r L_m}{L_r L_s - L_m^2} \lambda_{ds} + (\omega_e - \omega_r) \lambda_{qr} \quad (47)$$

$$\frac{d\lambda_{qr}}{dt} = \frac{-R_r L_s}{L_r L_s - L_m^2} \lambda_{qr} + \frac{R_r L_m}{L_r L_s - L_m^2} \lambda_{qs} - (\omega_e - \omega_r) \lambda_{dr} \quad (48)$$

O modelo *Simulink*® pode ser construído por intermédio da criação de subsistemas utilizando as equações 45 a 48. Cada subsistema do modelo supracitado permite a resolução independente das equações do modelo, utilizando para isso, blocos básicos como integradores, ganho, soma etc.

Importante ressaltar que tais blocos estão presentes nas versões *standard* do MATLAB, incluindo as versões do estudante. A utilização de blocos básicos evita a aquisição de *toolboxes* extras, como a *SimPowerSystems*, o que acarretaria em custos adicionais, muitas vezes inviáveis para orçamentos com fins de pesquisa ou educacionais (LEEDY, 2013).

Na figura 24, apresenta-se o modelo dinâmico do motor de indução, com o qual torna-se possível inserir os sinais de tensão e frequência aplicados ao motor e obter na saída os parâmetros de análise, como correntes ( $i_a$ ,  $i_b$  e  $i_c$ ), torque eletromagnético ( $T_e$ ) e velocidade angular do rotor ( $\omega_e$ ). É possível obter os valores das correntes rotóricas utilizando-se o mesmo bloco “Conversão d-q corrente”.

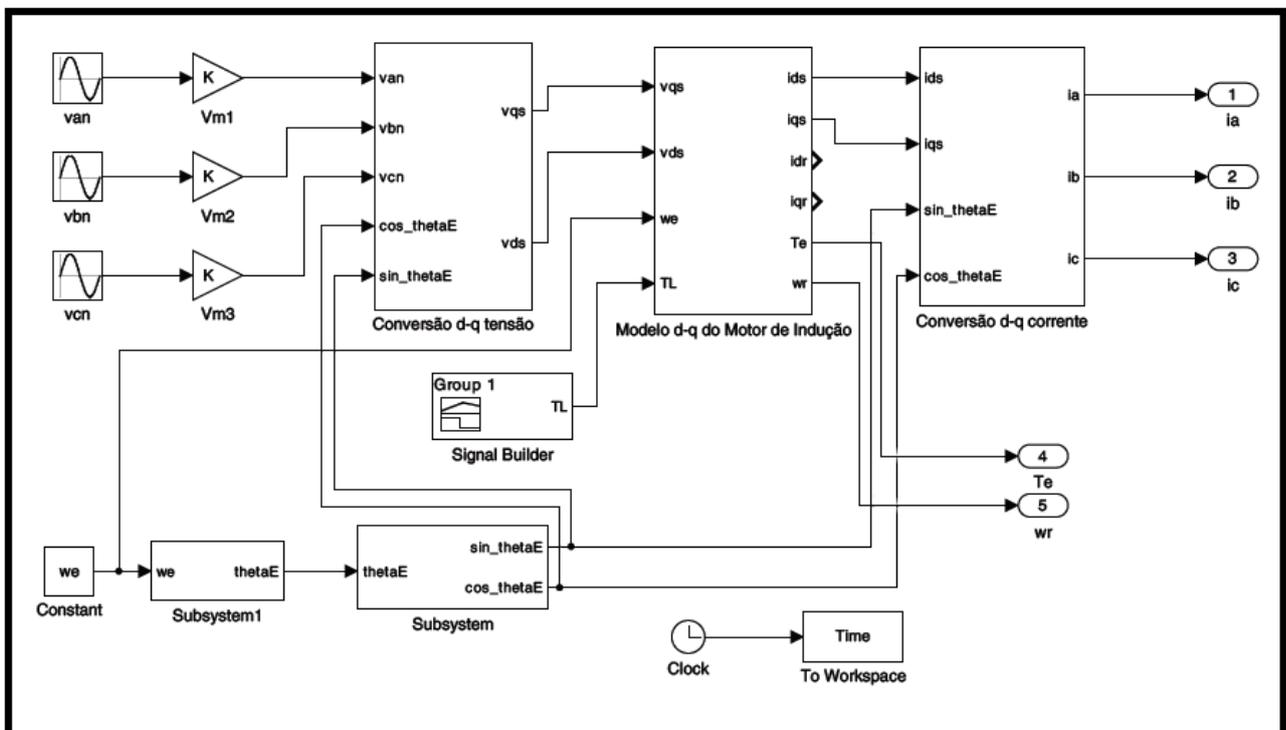


Figura 24: Modelo Dinâmico Principal. Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir do modelo principal, apresentado na figura 24, os diversos subsistemas podem ser abertos e analisados na área de trabalho do Simulink®, permitindo, assim, que o usuário tenha acesso aos detalhes da construção de cada bloco e, se pertinente, construa seus modelos individuais. A seguir, demonstra-se o detalhamento de cada bloco individual associado às equações descritas no subcapítulo anterior. Na figura 25, o modelo dq0 do motor de indução:

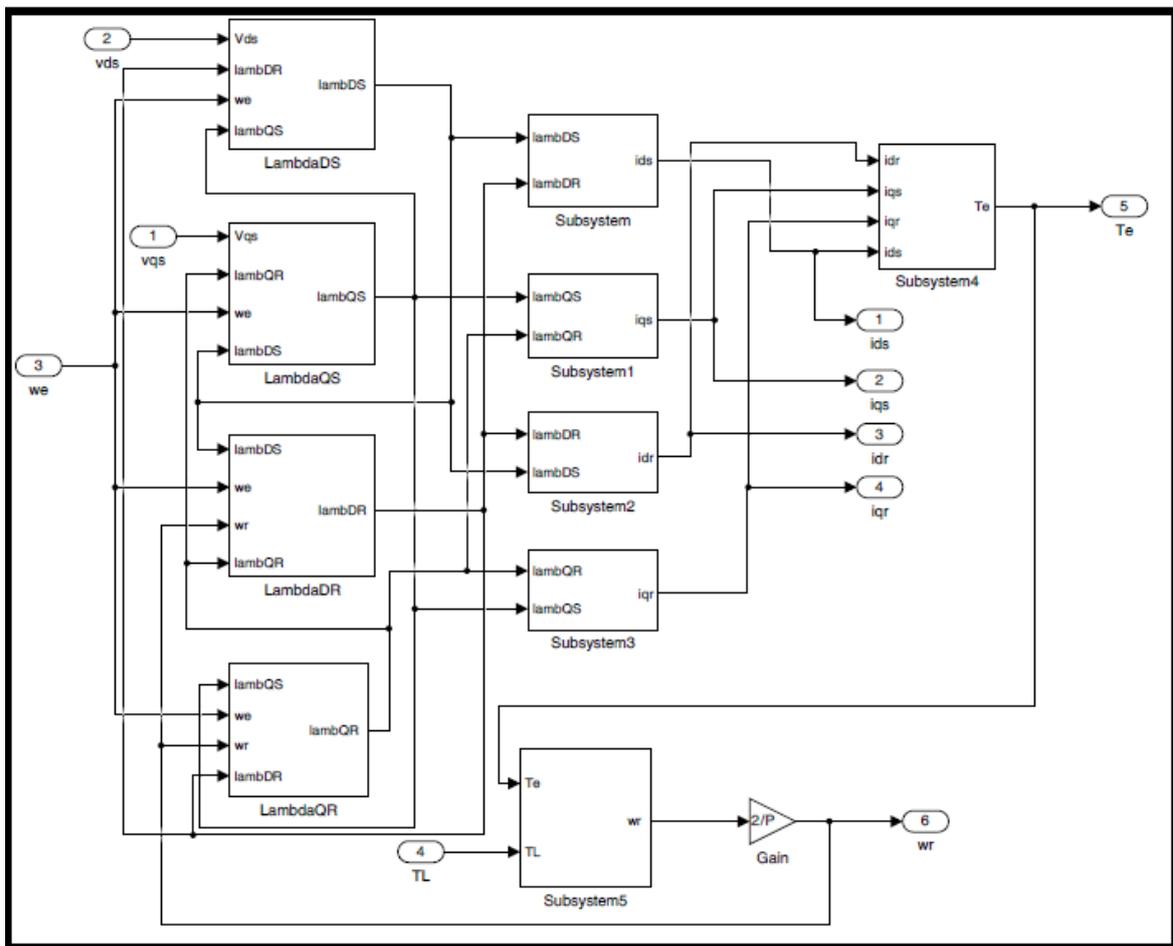


Figura 25: Modelo dq0 do Motor de Indução. Fonte: Elaborado pelo autor.

## 5. RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados da simulação dos modelos apresentados no Capítulo 4, considerando-se como modelo para simulação o “Modelo Principal do Motor”, referenciado na figura 24. Os resultados iniciais em forma gráfica, descreverão o desempenho dinâmico durante a aceleração do motor a partir do repouso sem carga, ou seja, o ensaio de partida. Em seguida, os demais resultados mostrarão o comportamento do motor em outras condições de carga, uma vez que é possível alterar os parâmetros tanto do motor quanto da carga, a partir do arquivo .m no MATLAB.

Os resultados serão caracterizados pelos gráficos da velocidade ( $\omega_e$ ), do conjugado eletromagnético ( $T_e$ ), da corrente do estator ( $I_s$ ) e da corrente do rotor ( $I_r$ ). Todos os gráficos mostram o comportamento das variáveis supracitadas em função do tempo.

### 5.1 Parâmetros utilizados nas simulações

A seguir são apresentados os parâmetros do motor de indução trifásico e os parâmetros de simulação utilizados. Vale ressaltar que tais parâmetros podem ser alterados diretamente nos arquivos de configuração no MATLAB/*Simulink*®.

### 5.1.1 Parâmetros do motor de indução trifásico

Para as simulações, foram utilizados os parâmetros do motor utilizado por LEEDY (2013), com alterações nas condições da carga, como descrito a seguir:

Potência do motor: 3.0 HP (2238 kW)

Velocidade angular do rotor ( $\omega_R$ ): 1710 rpm

Resistência do estator ( $R_r$ ): 0.435  $\Omega$

Resistência do estator ( $R_r$ ): 0.816  $\Omega$

Indutância de magnetização ( $L_m$ ): 34.7 mH

Indutância de dispersão do estator ( $L_{ls}$ ): 0.8 mH

Indutância de dispersão do rotor ( $L_{lr}$ ): 0.8 mH

Número de polos (P): 4

### 5.1.2 Parâmetros de simulação

Para que seja possível a obtenção dos valores de corrente do estator, corrente do rotor, torque eletromagnético e velocidade angular do rotor nas simulações, foram adotados os seguintes parâmetros de simulação:

Momento de inércia (J): 1.662 kg/m<sup>2</sup>

Tensão de fase ( $v_{an}$ ,  $v_{bn}$ ,  $v_{cn}$ ): 127 V<sub>RMS</sub> e 220 V<sub>RMS</sub>

Torque da carga ( $T_L$ ): 10, 15, 20, 25 e 30 N.m

Tempo de simulação: 1.4 s

Tempo de carga: 0.8 s

## 5.2 Resultados das simulações

### 5.2.1 Resultados para o torque da carga em 10 N.m

As figuras 26, 27, 28 e 29 apresentam a resposta no tempo para a velocidade angular do rotor, torque eletromagnético e correntes do rotor e estator, para  $T_L = 10$  N.m:

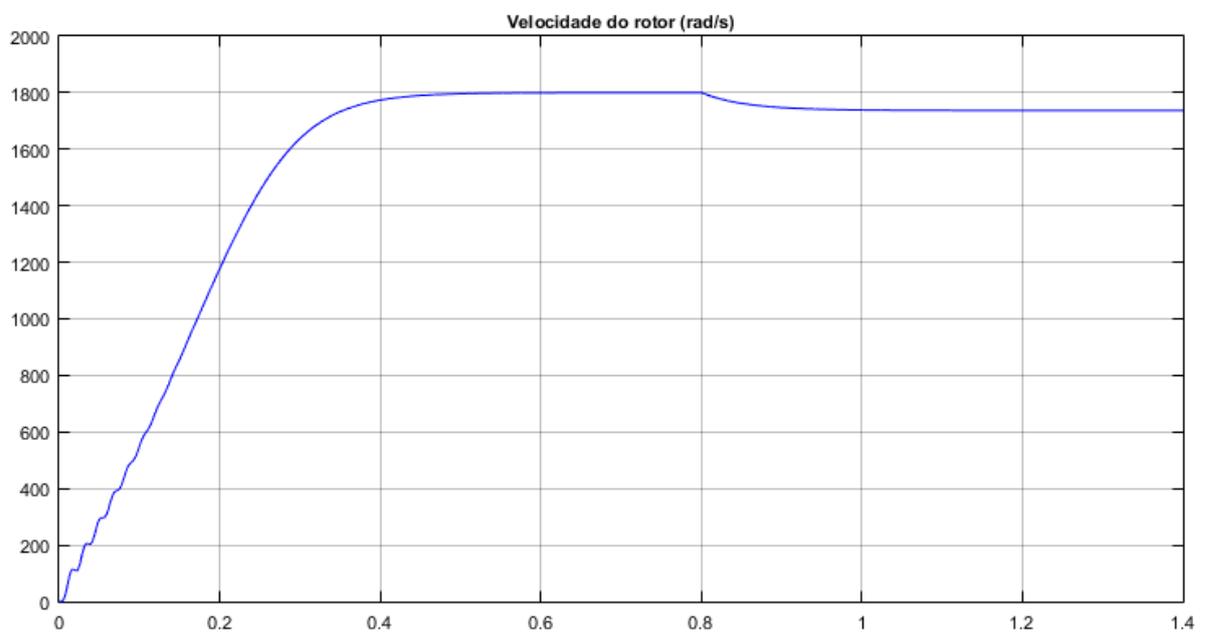


Figura 26: Velocidade angular do rotor para  $T_L = 10$  N.m. Fonte: Elaborado pelo autor.

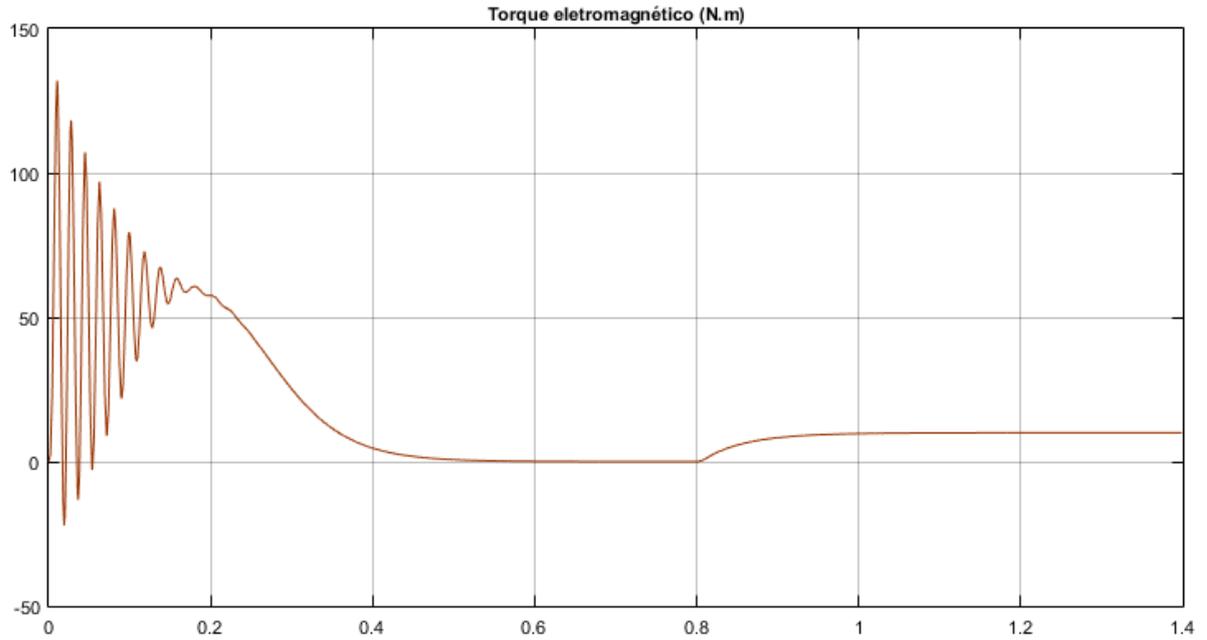


Figura 27: Torque eletromagnético para  $T_L = 10$  N.m. Fonte: Elaborado pelo autor.

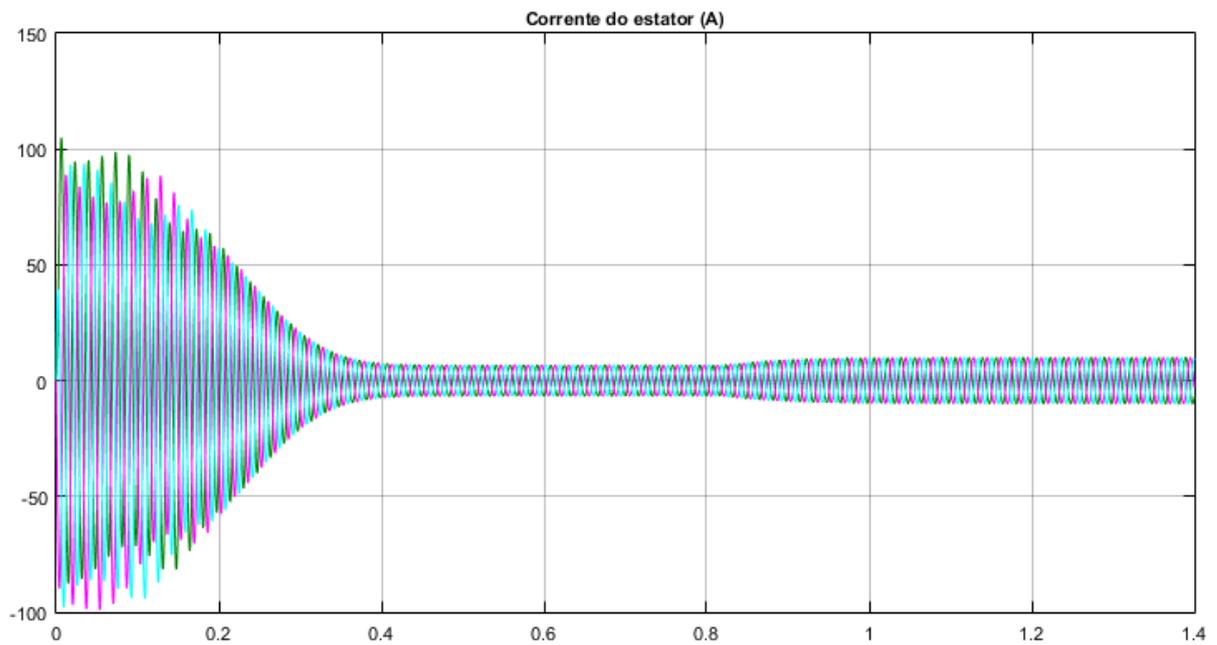


Figura 28: Corrente do estator para  $T_L = 10$  N.m. Fonte: Elaborado pelo autor.

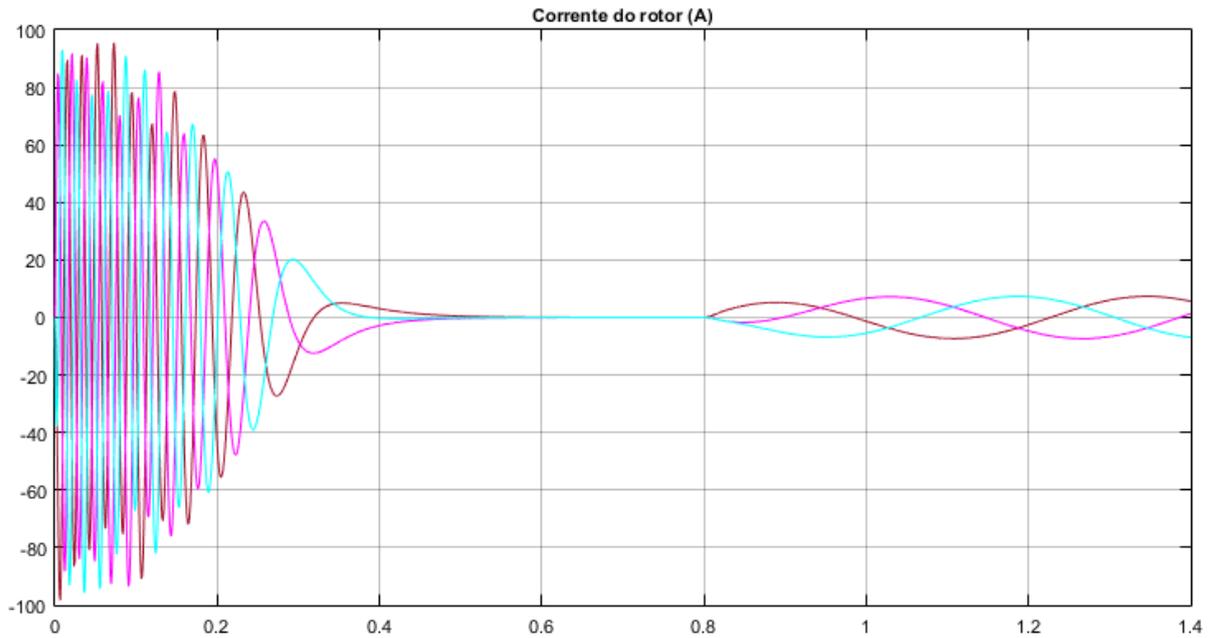


Figura 29: Corrente do rotor para  $T_L = 10$  N.m. Fonte: Elaborado pelo autor.

### 5.2.2 Resultados para o torque da carga em 15 N.m

Nas figuras 30, 31, 32, 33 é possível observar a resposta no tempo para a velocidade angular do rotor, torque eletromagnético e correntes do rotor e estator, para  $T_L = 15$  N.m:

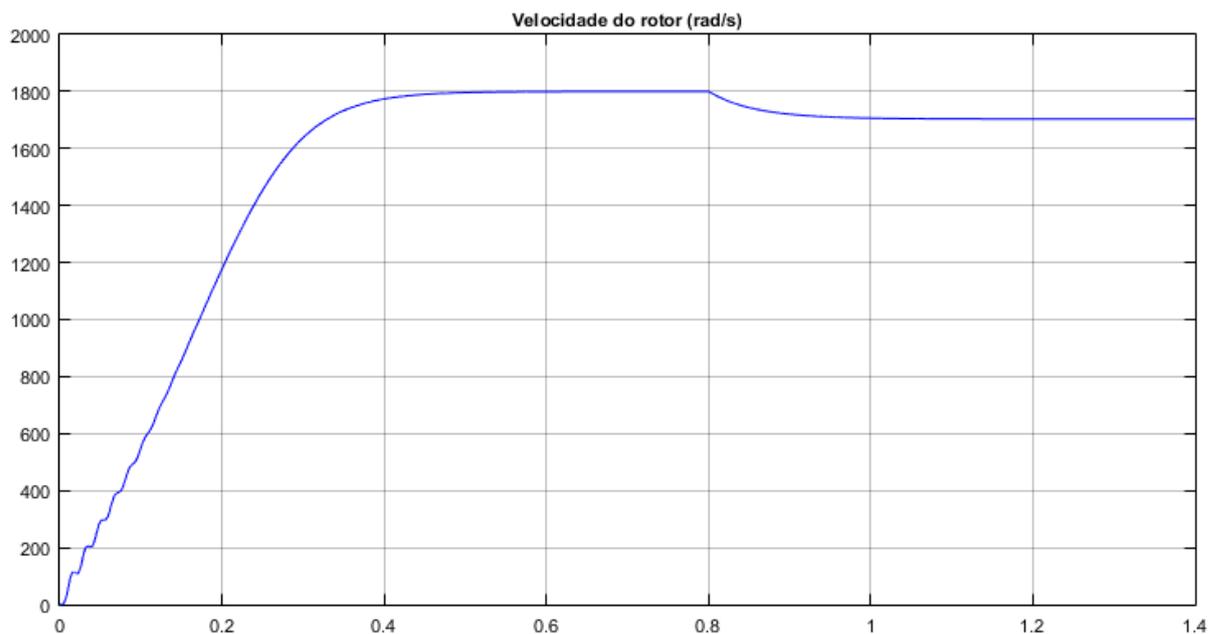


Figura 30: Velocidade angular do rotor para  $T_L = 10$  N.m. Fonte: Elaborado pelo autor.

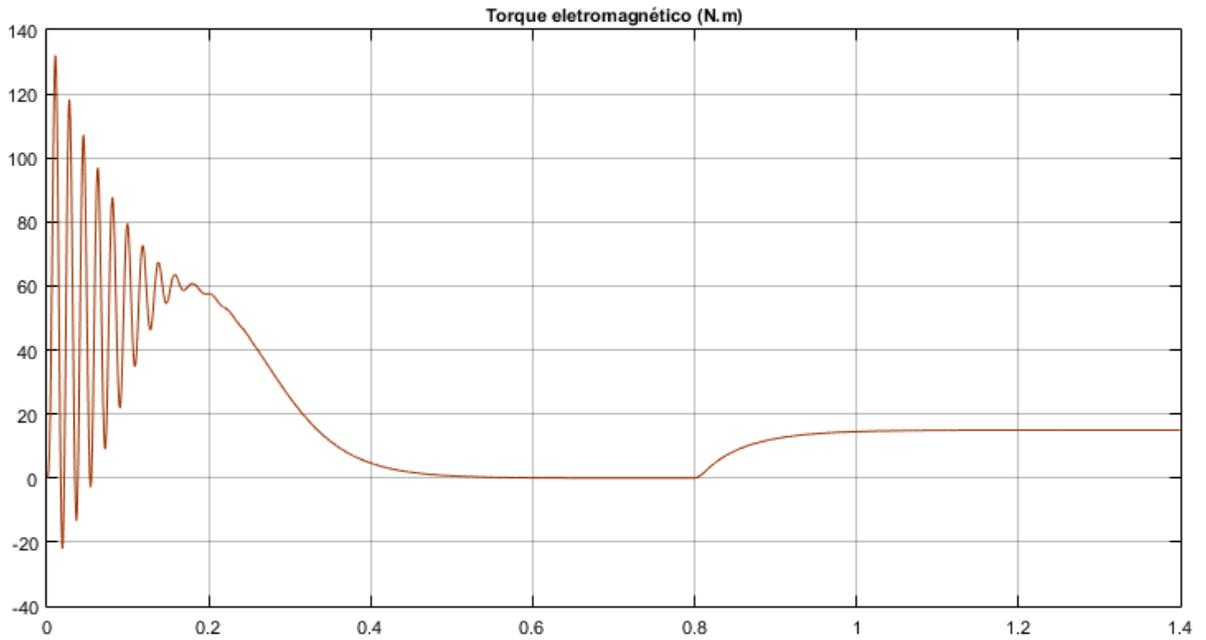


Figura 31: Torque eletromagnético para  $T_L = 15$  N.m. Fonte: Elaborado pelo autor.

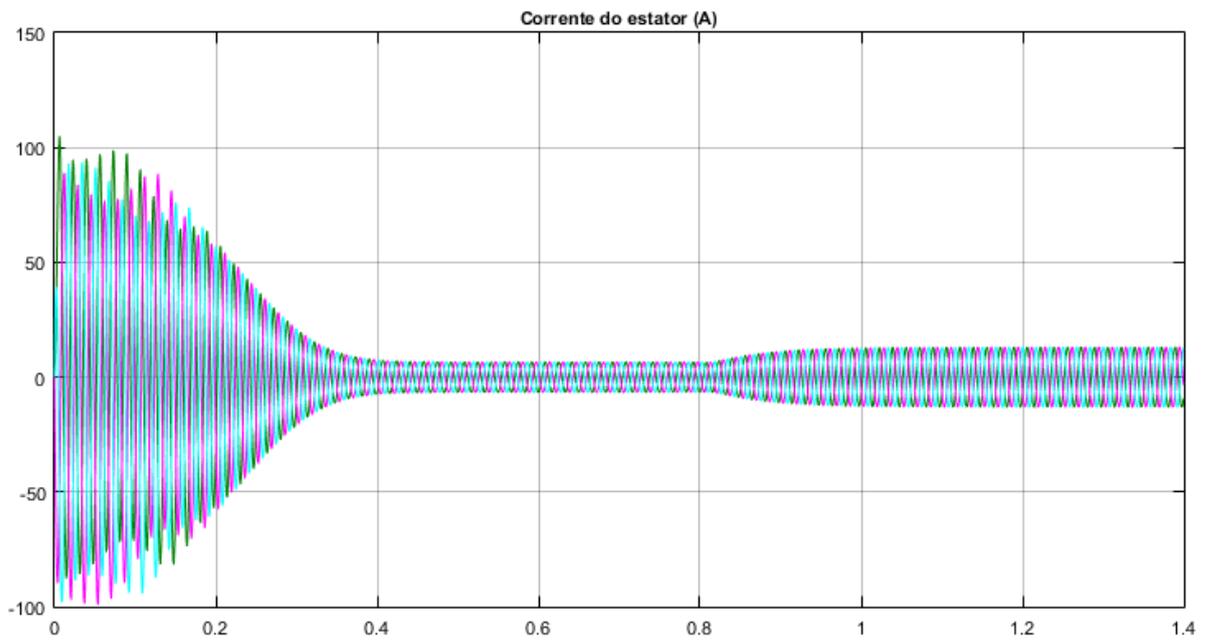


Figura 32: Corrente do estator para  $T_L = 15$  N.m. Fonte: Elaborado pelo autor.

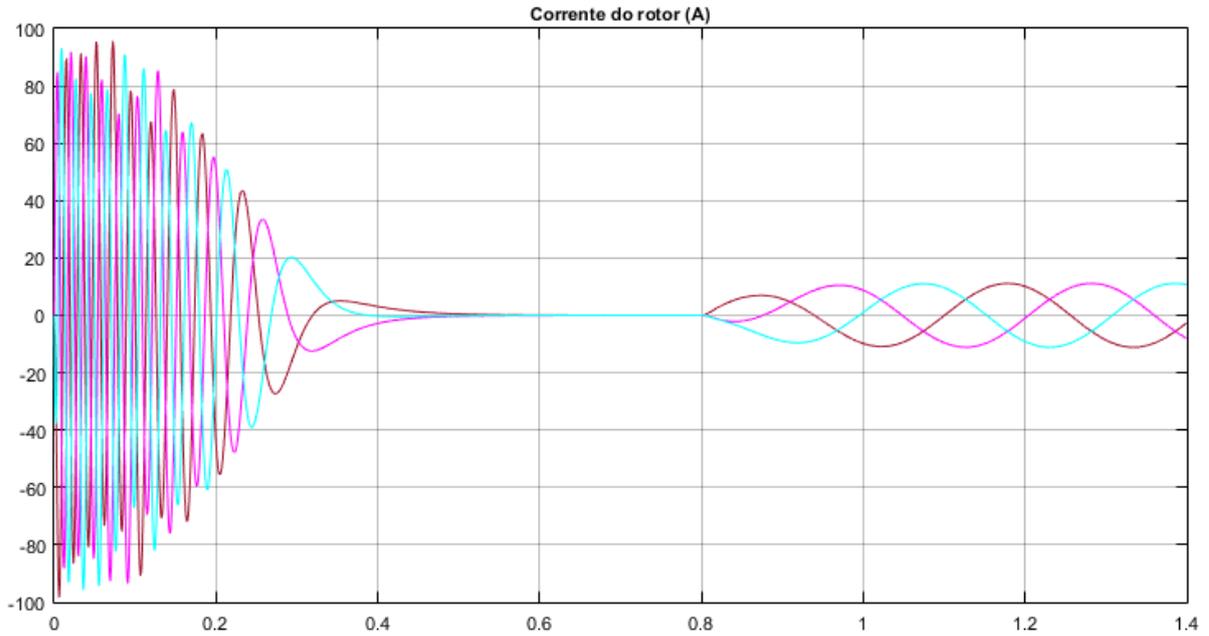


Figura 33: Corrente do rotor para  $T_L = 15$  N.m. Fonte: Elaborado pelo autor.

### 5.2.3 Resultados para o torque da carga em 20 N.m

Nas figuras de 34 a 37, observa-se a resposta no tempo para a velocidade angular do rotor, torque eletromagnético e correntes do rotor e estator, para  $T_L = 20$  N.m:

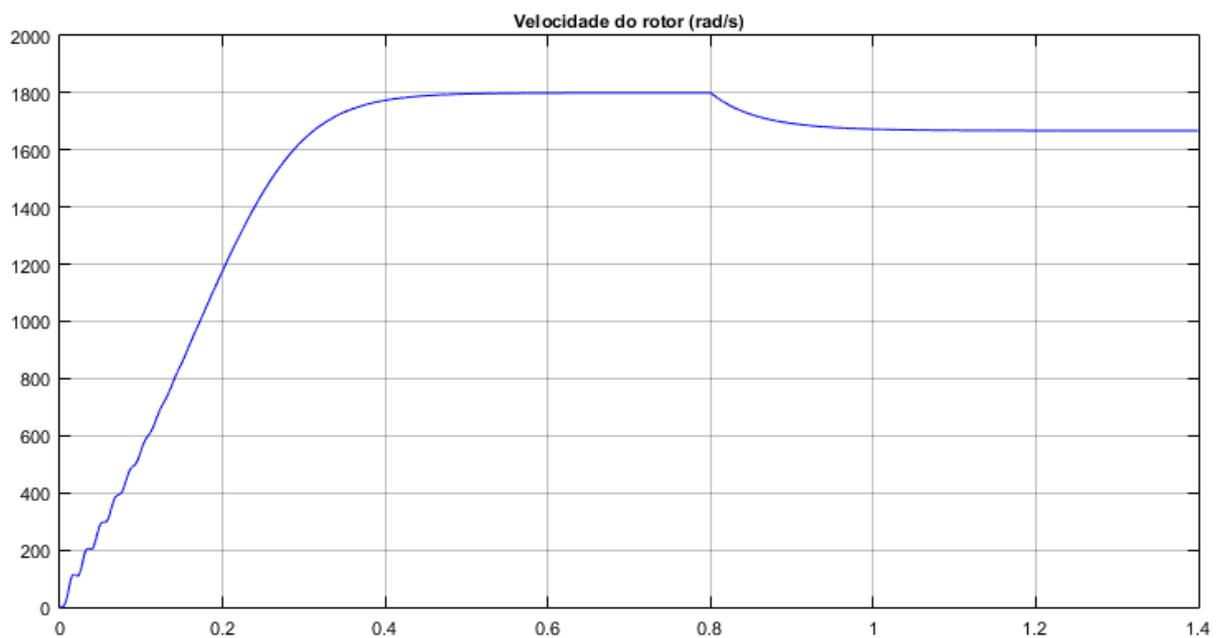


Figura 34: Velocidade angular do rotor para  $T_L = 20$  N.m. Fonte: Elaborado pelo autor.

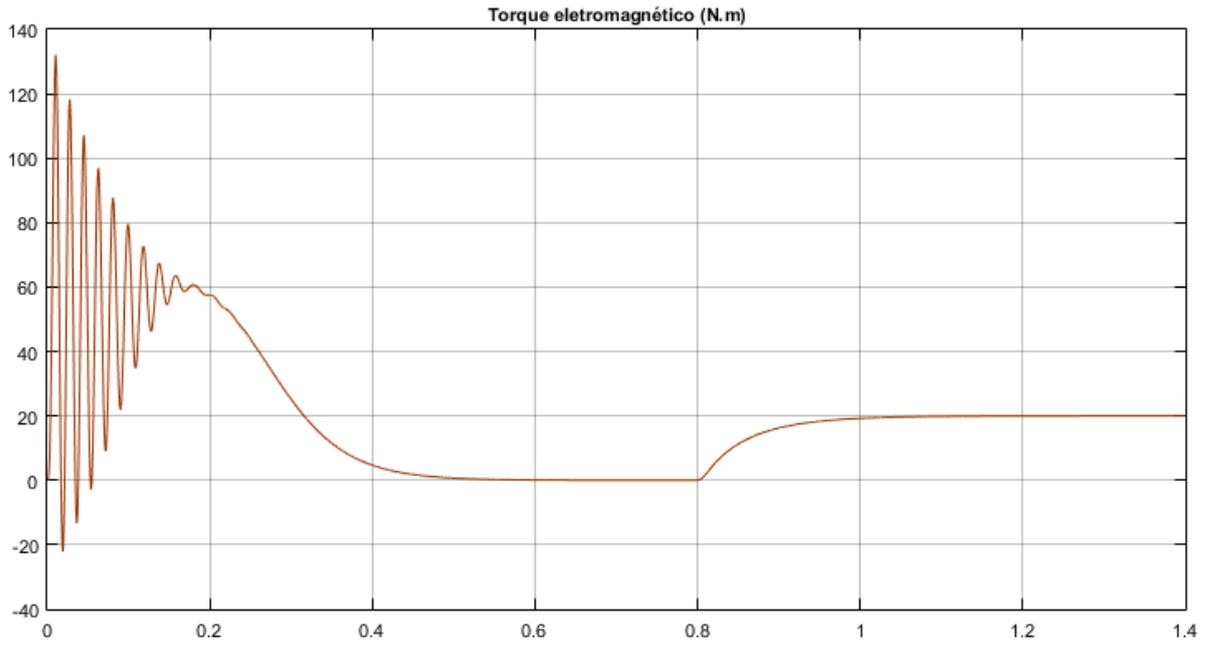


Figura 35: Torque eletromagnético para  $T_L = 20$  N.m. Fonte: Elaborado pelo autor.

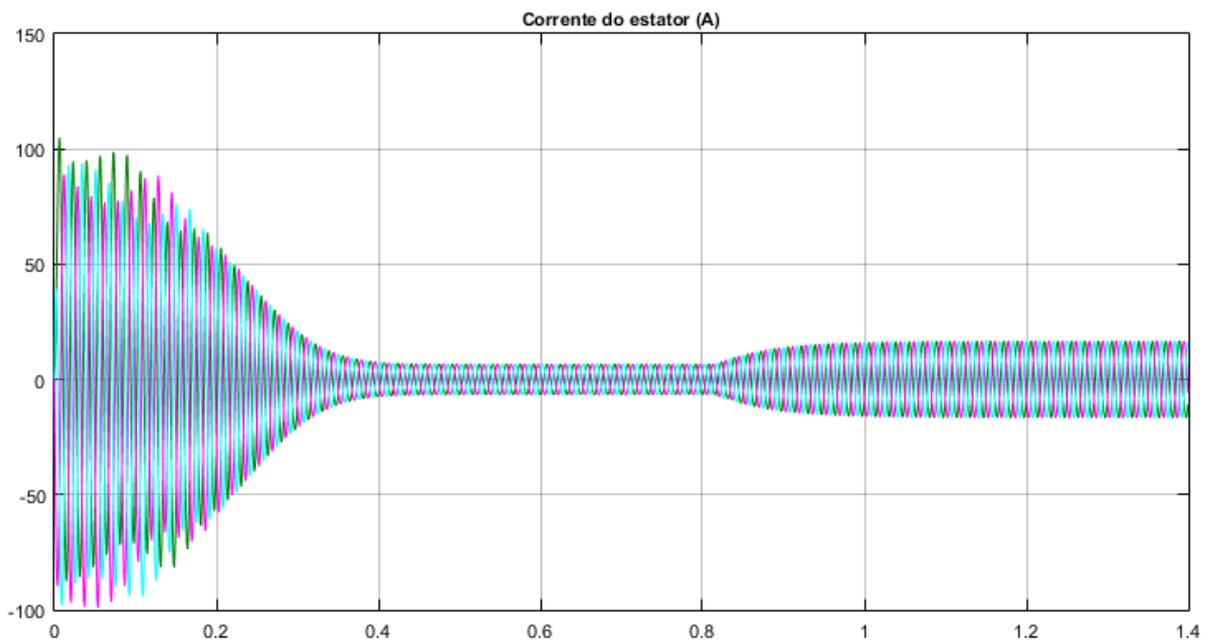


Figura 36: Corrente do estator para  $T_L = 20$  N.m. Fonte: Elaborado pelo autor.

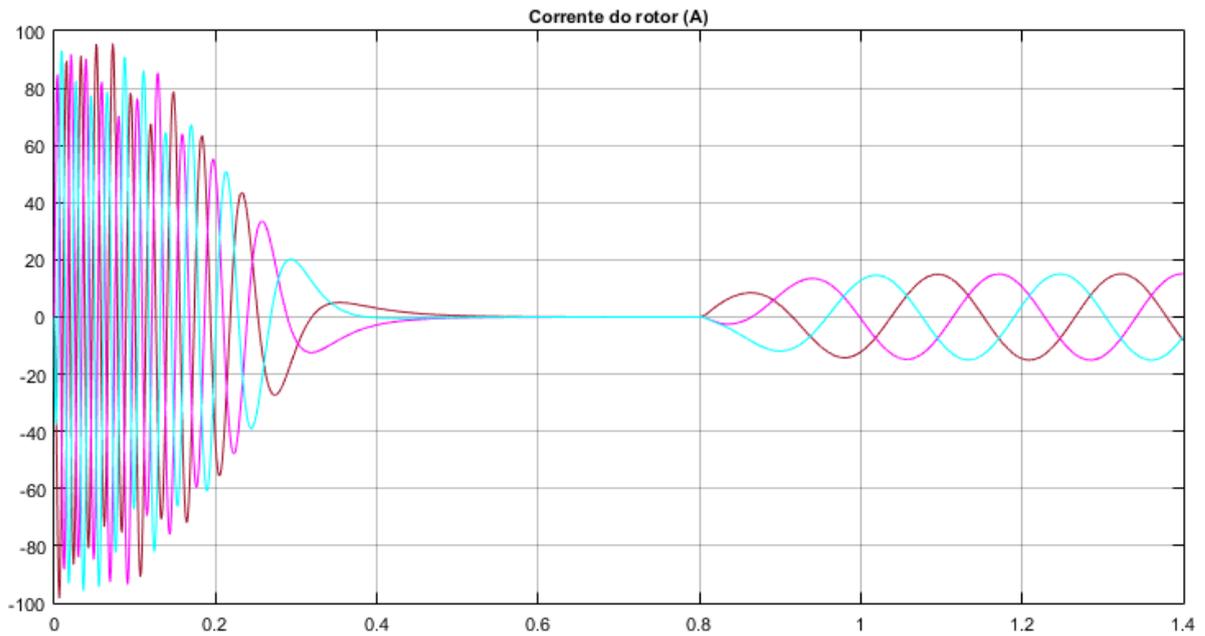


Figura 37: Corrente do rotor para  $T_L = 20$  N.m. Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 5.2.4 Resultados para o torque da carga em 25 N.m

Abaixo, nas figuras de 38 a 41, observa-se a resposta no tempo para a velocidade angular do rotor, torque eletromagnético e correntes do rotor e estator, para  $T_L = 25$  N.m:

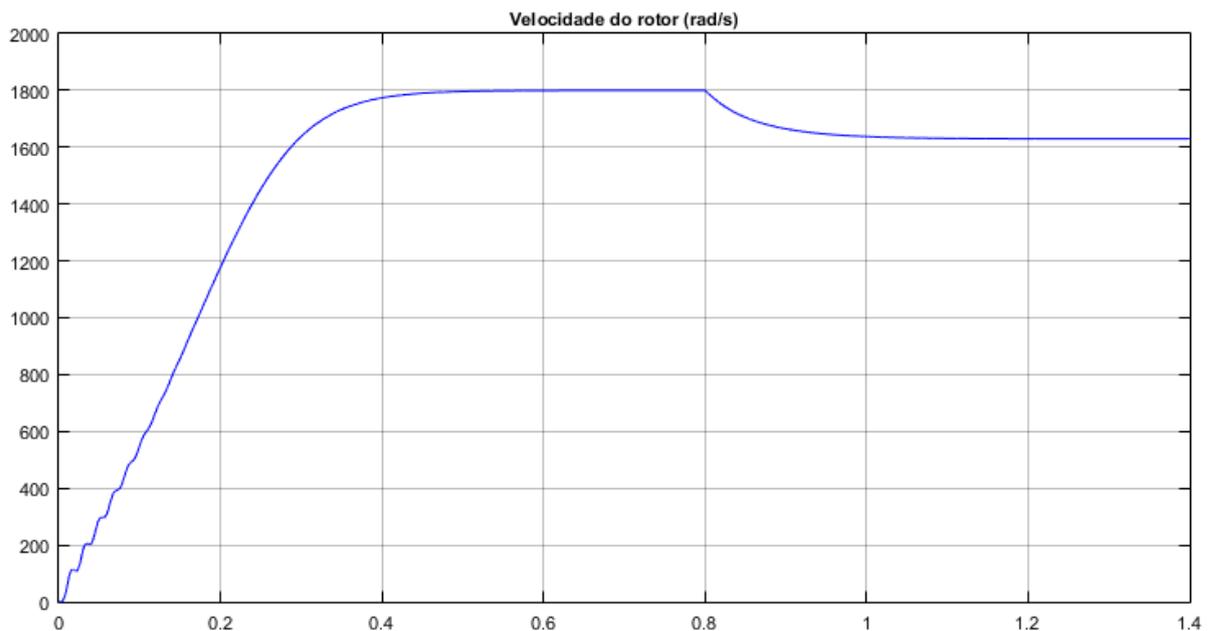


Figura 38: Velocidade angular do rotor para  $T_L = 25$  N.m. Fonte: Elaborado pelo autor.

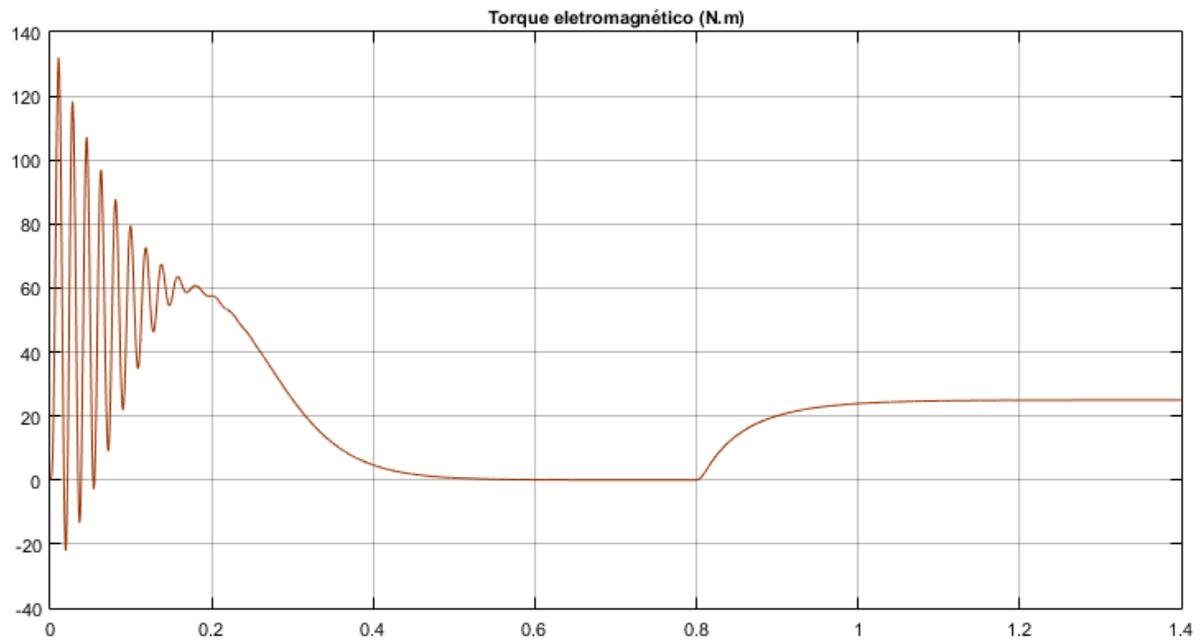


Figura 39: Torque eletromagnético para  $T_L = 25$  N.m. Fonte: Elaborado pelo autor.

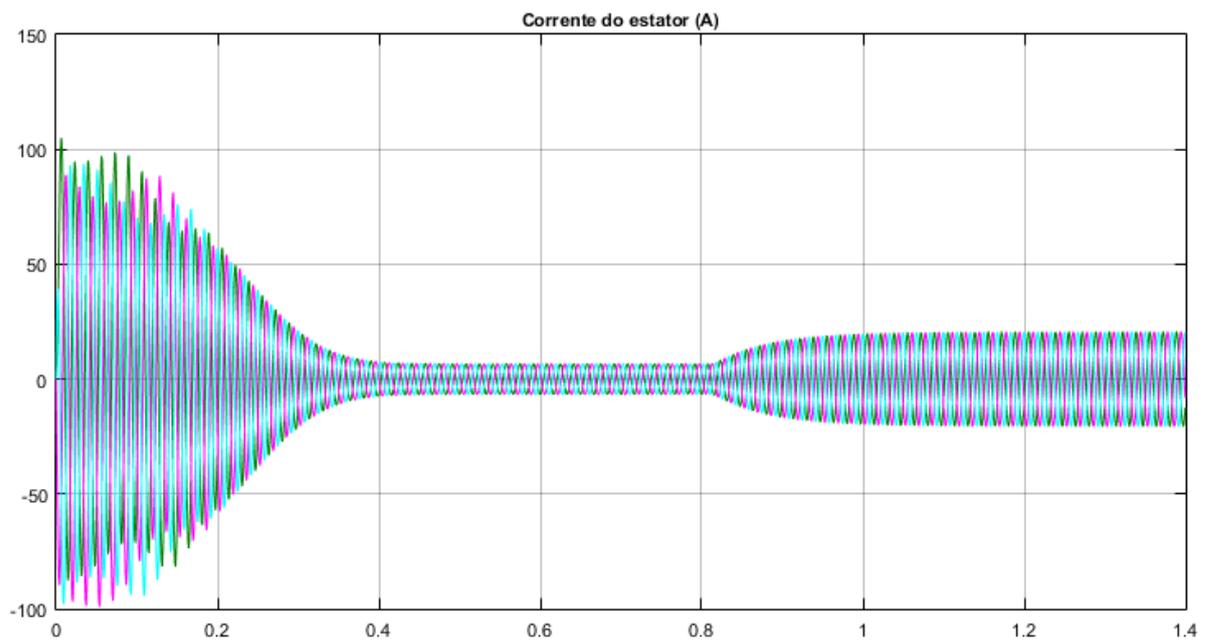


Figura 40: Corrente do estator para  $T_L = 25$  N.m. Fonte: Elaborado pelo autor.

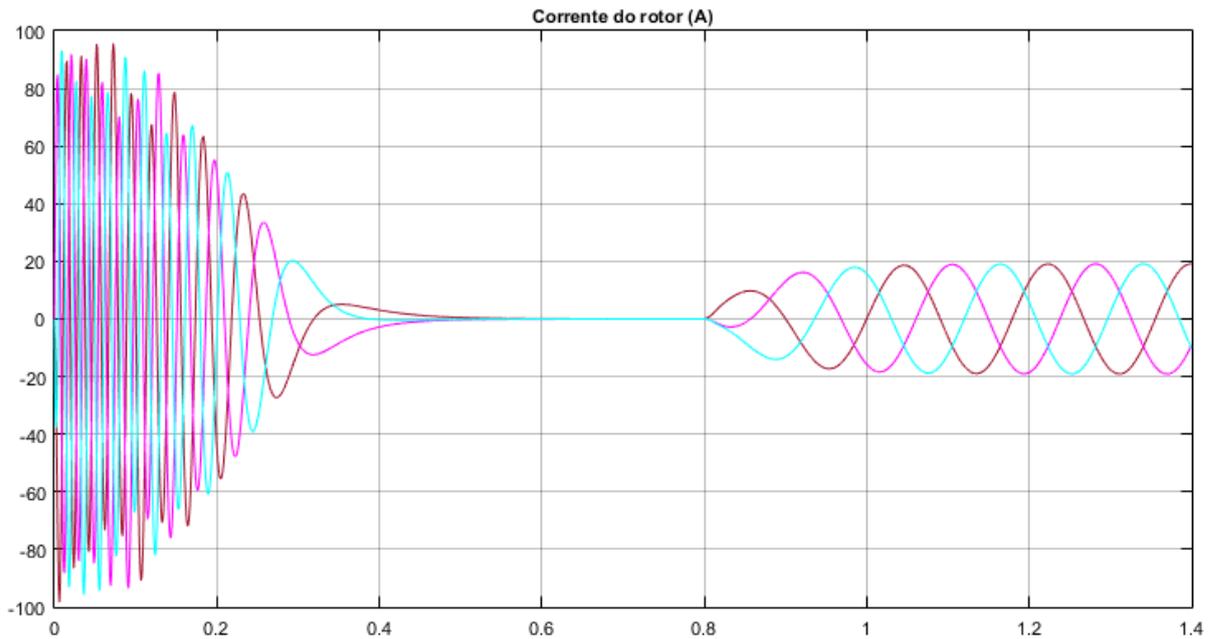


Figura 41: Corrente do rotor para  $T_L = 25$  N.m. Fonte: Elaborado pelo autor.

### 5.2.5 Resultados para o torque da carga em 30 N.m

A seguir, nas figuras de 42 a 45, é apresentada a resposta no tempo para a velocidade angular do rotor, torque eletromagnético e correntes do rotor e estator, para  $T_L = 30$  N.m:

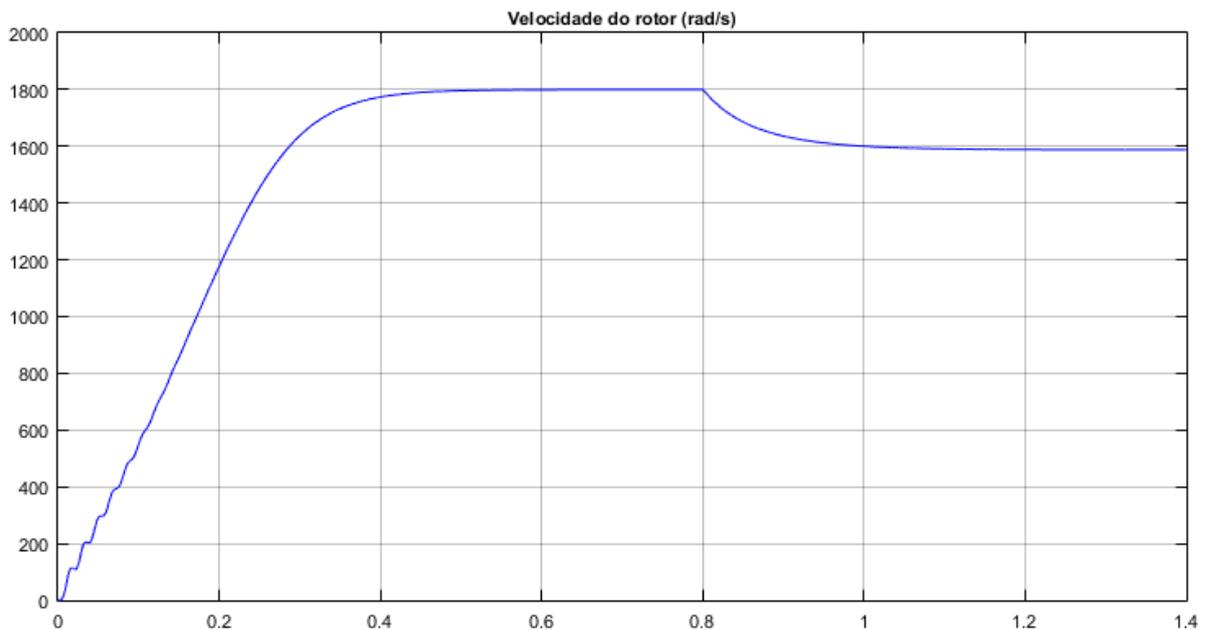


Figura 42: Velocidade angular do rotor para  $T_L = 30$  N.m. Fonte: Elaborado pelo autor.

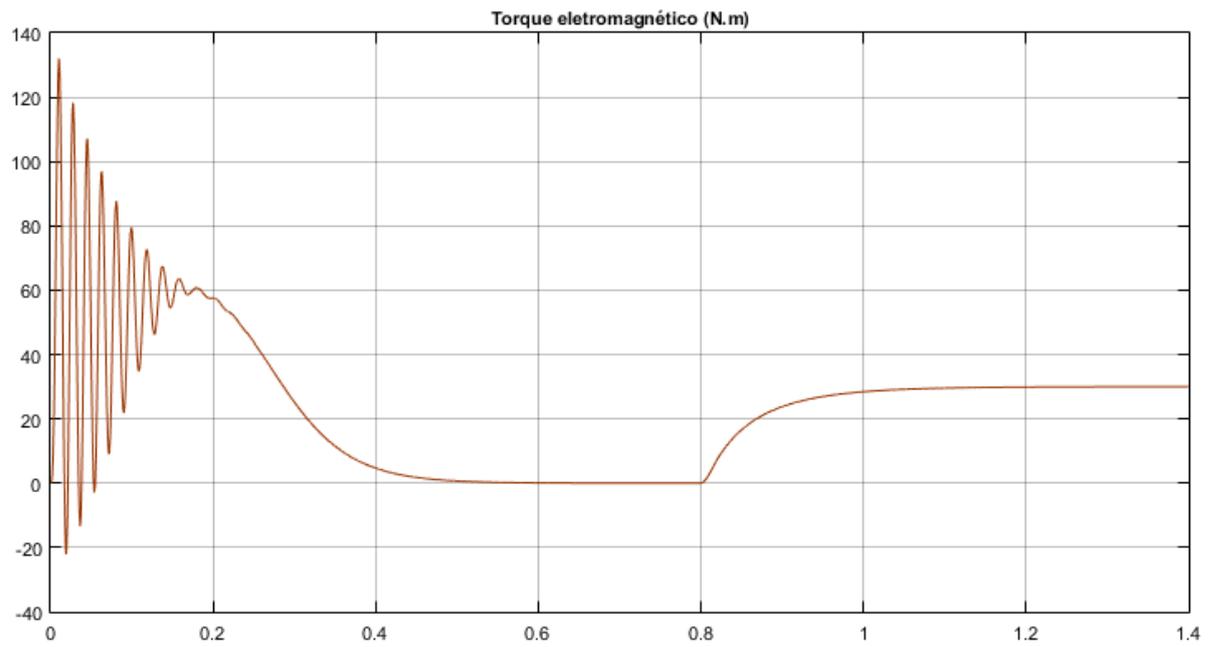


Figura 43: Torque eletromagnético para  $T_L = 30$  N.m. Fonte: Elaborado pelo autor.

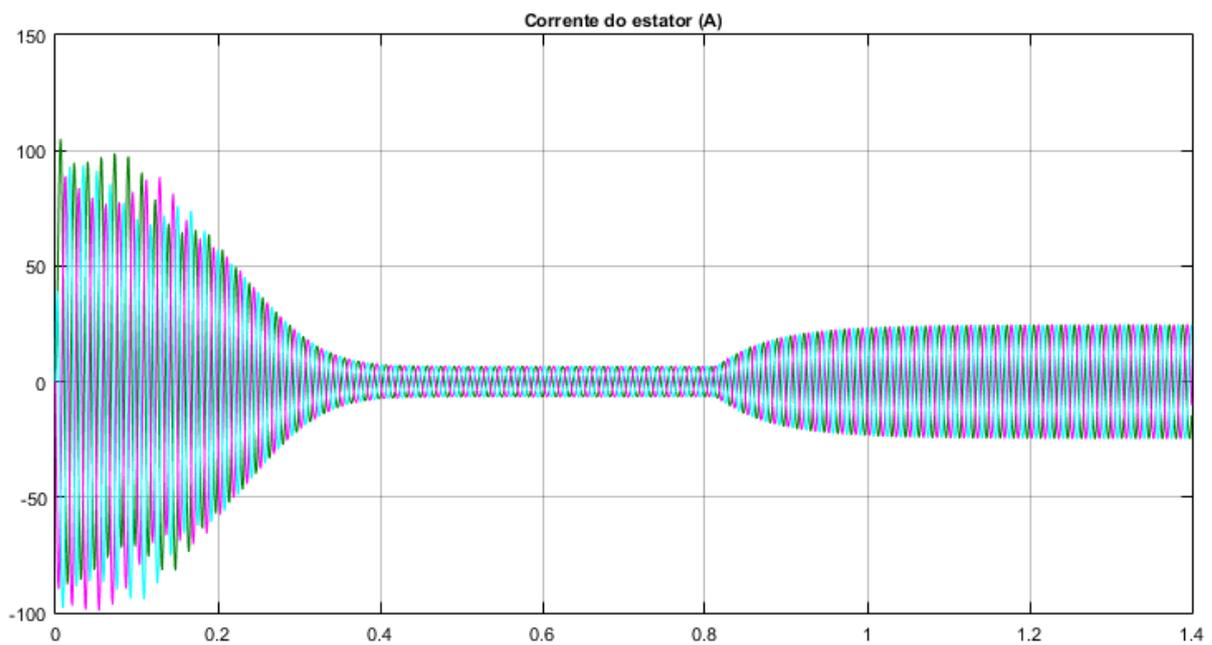


Figura 44: Corrente do estator para  $T_L = 30$  N.m. Fonte: Elaborado pelo autor.

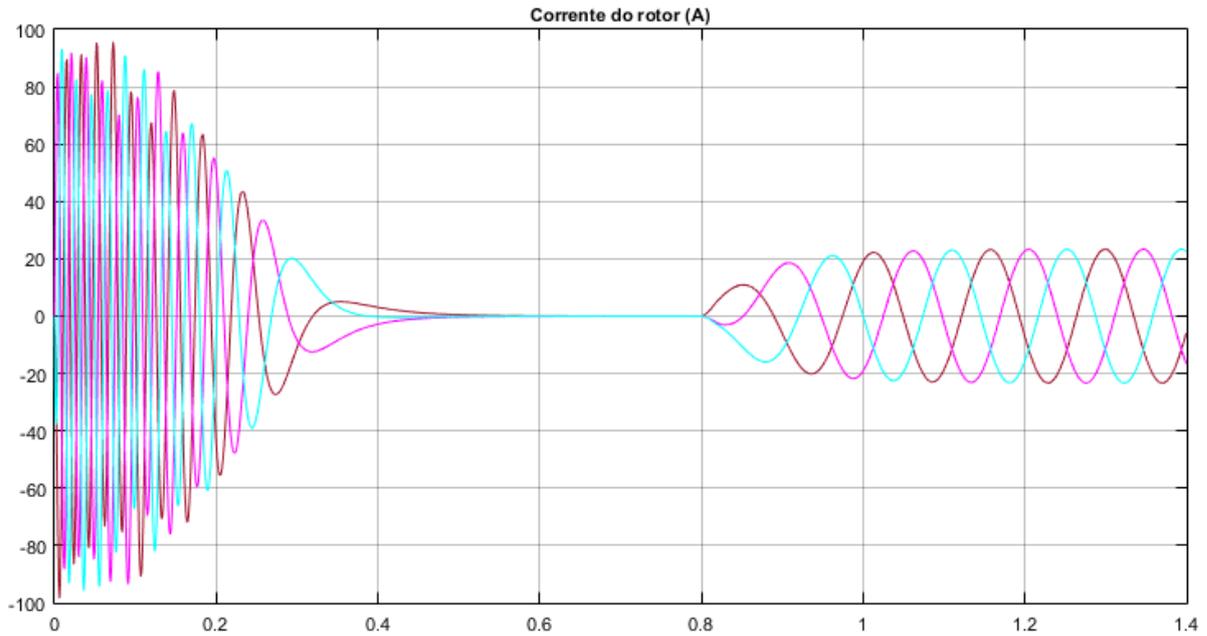


Figura 45: Corrente do rotor para  $T_L = 30 \text{ N.m}$ . Fonte: Elaborado pelo autor.

### 5.2.6 Resultados para partida com tensão reduzida e $T_L = 10 \text{ N.m}$

As figuras 46, 47, 48 e 49 apresentam a resposta no tempo para a velocidade angular do rotor, torque eletromagnético e correntes do rotor e estator, em condições de redução de tensão. Adotou-se  $V_{an} = V_{bn} = V_{cn} = 127 V_{RMS}$ .  $T_L = 10 \text{ N.m}$ :

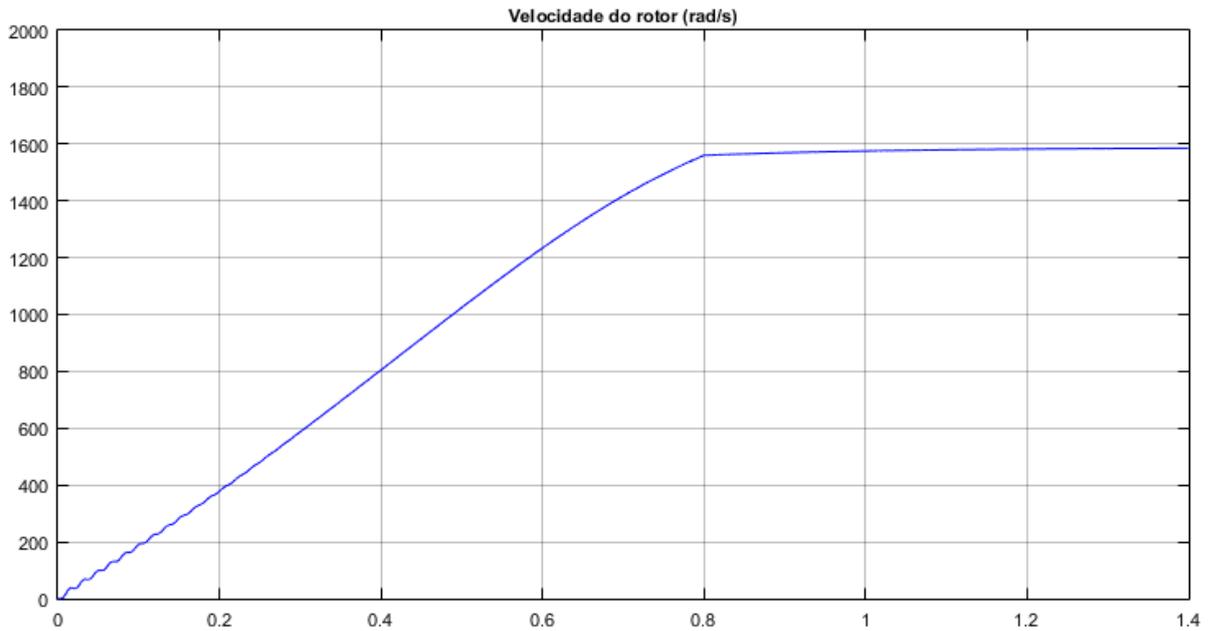


Figura 46: Velocidade angular do rotor para partida com tensão reduzida e  $T_L = 10$  N.m.

Fonte: Elaborado pelo autor.

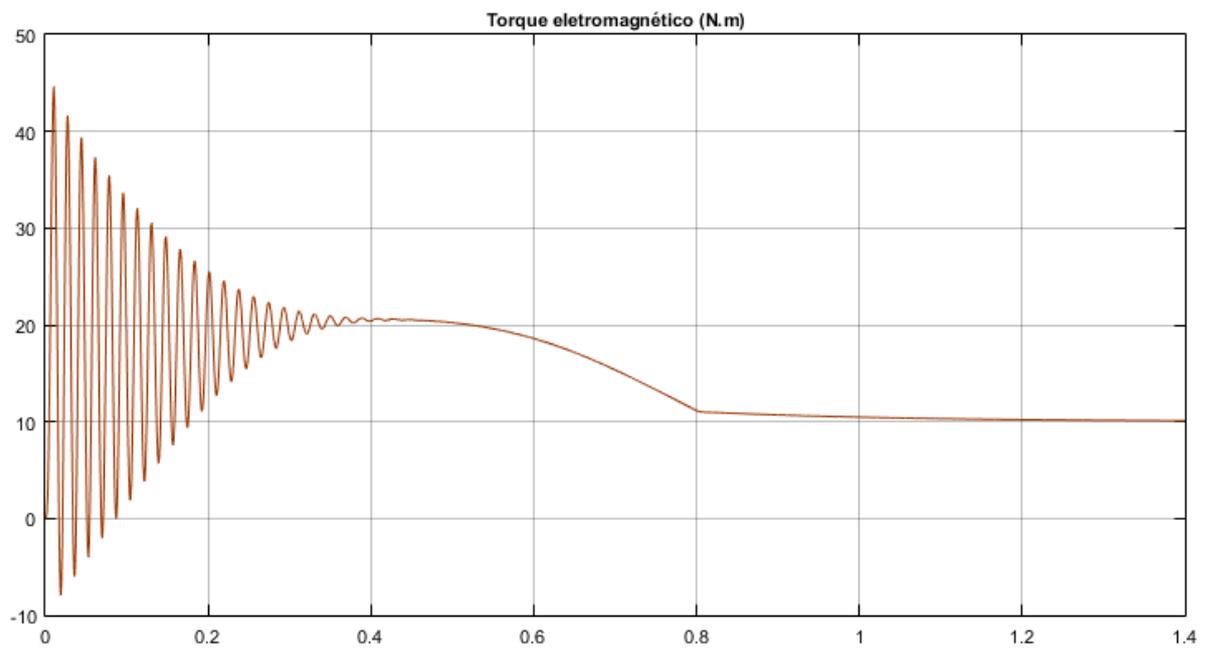


Figura 47: Torque eletromagnético para partida com tensão reduzida e  $T_L = 10$  N.m. Fonte:

Elaborado pelo autor.

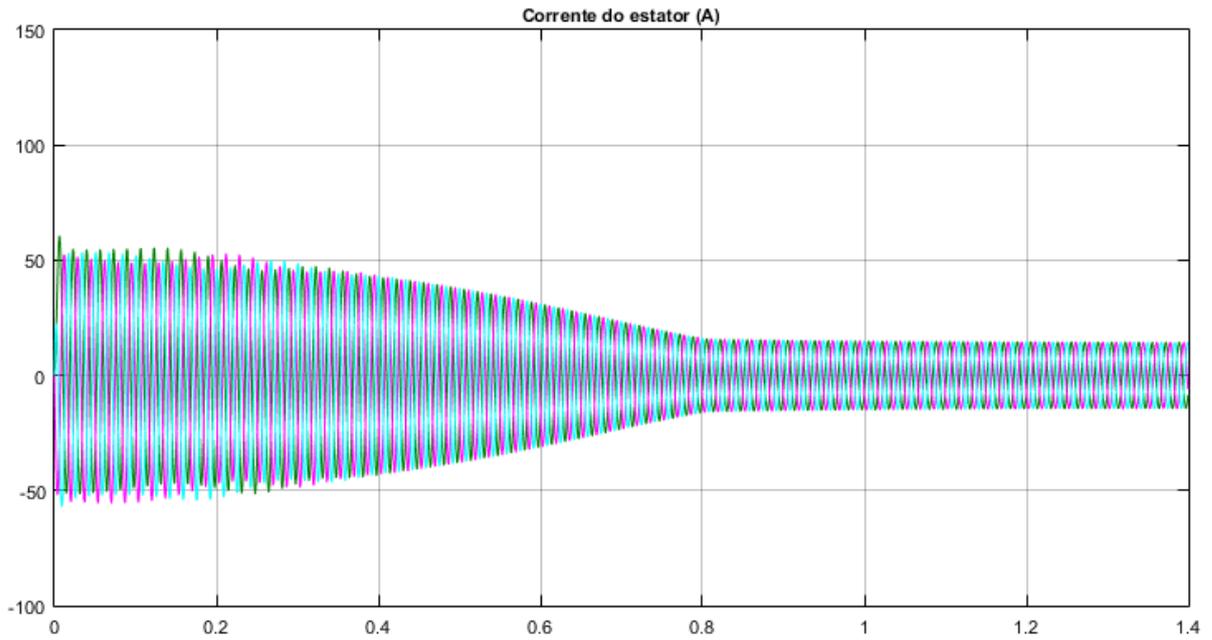


Figura 48: Corrente do estator para partida com tensão reduzida e  $T_L = 10$  N.m.

Fonte: Elaborado pelo autor.

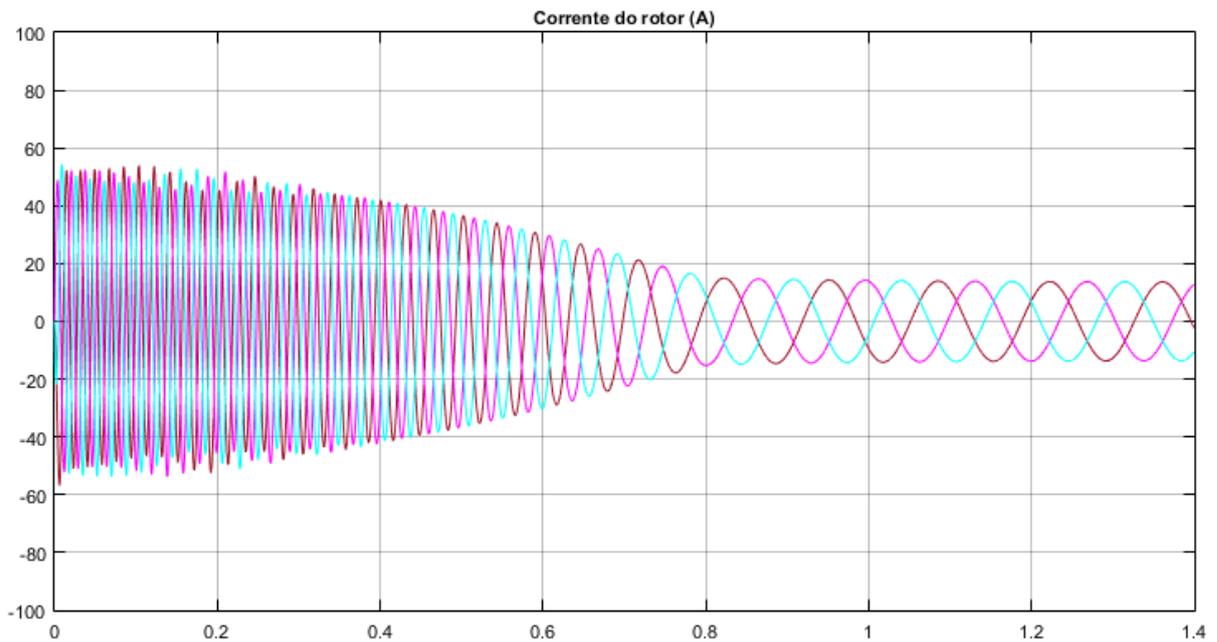


Figura 49: Corrente do rotor para partida com tensão reduzida e  $T_L = 10$  N.m.

Fonte: Elaborado pelo autor.

### 5.3 Análise dos resultados das simulações

Realizadas a descrição da metodologia de pesquisa e as premissas básicas para as simulações, os resultados das estimativas e análises das técnicas propostas foram apresentados no presente capítulo. Procurou-se definir seis condições de operação diferentes de modo a cobrir a maior parte das situações na qual o motor ficaria exposto em operações reais. Quando foram impostos esses testes ao modelo do motor de indução trifásico, as simulações apresentaram resposta rápida e baixa ondulação do torque eletromagnético. Também os resultados obtidos para os esquemas apresentados neste trabalho mostraram-se compatíveis com os resultados apresentados na literatura.

## 6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

### 6.1 Conclusões

Um modelo dinâmico do motor de indução desenvolvido usando MATLAB/Simulink® foi apresentado e considerado, por meio da análise, métodos e simulações realizadas, benéfico para utilização em cursos de graduação voltados para estudos de máquinas elétricas. A abordagem a partir de modelos de blocos é intuitiva, fácil de usar e permite que todos os parâmetros do motor sejam facilmente acessados para fins de monitoramento e comparação.

O modelo desenvolvido no MATLAB/Simulink® é explicado em detalhes e pode ser comparado com configurações experimentais correspondentes, como, por exemplo, no levantamento de variáveis a partir dos resultados das simulações. Com este modelo, o usuário tem acesso a todas as variáveis internas para obter uma visão sobre o funcionamento da máquina. Qualquer

algoritmo de controle da máquina pode ser simulado no ambiente *Simulink*® com este modelo.

O sistema foi validado por simulações baseadas em um modelo real do motor de indução trifásico, e os resultados mostraram robustez, mesmo com mudanças súbitas de carga ou redução de tensão na partida. Sendo assim, a utilização do modelo do motor de indução trifásico é possível para a simulação da partida de motores de indução trifásico, a fim de que se possa prever o funcionamento no período transitório. A resposta referente aos parâmetros de corrente, velocidade angular e torque eletromagnético indicam similaridade com as curvas encontradas na literatura, o que mostra que o modelo digital desenvolvido no MATLAB/*Simulink*® permite a comparação e estudo das características do modelo físico. Desta forma, o presente trabalho pode ser utilizado de forma a motivar os alunos a pesquisarem sobre métodos de acionamento de máquinas, e despertar o interesse acerca do estudo de máquinas elétricas.

## 6.2 Sugestões para trabalhos futuros

Algumas sugestões para trabalhos futuros são:

- a) Implementar controles com o modelo desenvolvido neste trabalho de forma a simular motores de indução e geradores;
- b) Modelar testes de motor de indução, como ensaios em vazio ou com rotor bloqueado;
- c) Incluir modelos *Simulink*® de transformadores, máquinas de corrente contínua e máquinas síncronas, buscando desenvolver mais ferramentas de apoio à educação de máquinas elétricas.
- d) Validar o modelo a partir de estudo comparativo com um modelo físico.

## 7. REFERÊNCIAS:

AGUIAR, Manoel L. *et alii*. **Plataforma virtual do controle direto de torque de um motor de indução como ferramenta de auxílio ao ensino de máquinas elétricas**. Rio Grande do Sul: XLI Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia, 2013.

AGUIAR, Manoel L.; CAD, Marcelo M. **The concept of complex functions applied to the modeling of induction motors**. Singapura: Power Engineering Society Winter Meeting, 2000.

CAD, Marcelo M. **Estratégias de modelagem dinâmica e simulação computacional do motor de indução trifásico**. 2000, 171 f. Dissertação: Mestrado em Engenharia Elétrica. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo.

CALDEIRA; ZAIDAN. **Práxis pedagógica**. 2008. Disponível em: <[http://www.pucpr.br/eventos/educere/educere2008/anais/pdf/871\\_886.pdf](http://www.pucpr.br/eventos/educere/educere2008/anais/pdf/871_886.pdf)>. Acesso em: 29 dez. 2015.

DEMO, Pedro. **Metodologia da investigação em educação**. Curitiba: IBPEX, 2005.

FITZGERALD, *et alii*. **Máquinas elétricas: com introdução à eletrônica de potência**. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.

HOLTZ, J. **State of art of controlled AC drives without speed sensor**. Singapura: Power Electronics and Drive Systems (PEDS), 1995.

KRAUSE, Paul *et alii*. **Analysis of Electric Machinery and Drive Systems**. 2. ed. New Jersey: Wiley-Interscience, 2002.

LEEDY, Aleck W. **Simulink / MATLAB Dynamic Induction Motor Model for Use as A Teaching and Research Tool**. Vol. 3. IJCE: International Journal of Soft Computing and Engineering, 2013.

LEONHARD, W. **Control of Electrical Drives**. 3. ed. Alemanha: Springer-Verlag, 1985.

MINAYO, Maria Cecília de Souza (Org.). **Pesquisa social: teoria, método e criatividade**. 23. ed. Rio de Janeiro: Vozes, 1994.

MOHAN, Ned. **Advanced Electric Drives: Analysis, Control and Modeling Using MATLAB / Simulink**. New Jersey: Wiley-Interscience, 2014.

\_\_\_\_\_. **Electric Machines and Drives: A First Course**. New Jersey: Wiley-Interscience, 2012.

NOVOTNY, D.; WOUTERSE J. **Induction Machine Transfer Functions an Dynamic Response by Means of Complex Time Variables**. Kansas: IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1976.

OZPINECI, B.; TOLBERT, L.M. **Simulink implementation of induction machine model - a modular approach**. Wisconsin: Electric Machines and Drives Conference, 2003.

**Referenciais Nacionais Dos Cursos De Engenharia**. Disponível em: <<http://portal.mec.gov.br/dmdocuments/referenciais.pdf>>. Acesso em: 10 jan. 2016.

**Resolução CNE/CES 11**, de 11 de março de 2002 que Institui Diretrizes Curriculares Nacionais do Curso de Graduação em Engenharia. Disponível em: <<http://portal.mec.gov.br/cne/arquivos/pdf/CES112002.pdf>>. Acesso em: 18 de dez. 2015.

SZABLYA, J.; BRESSANE, J. **Transfer Functions of AC Machines**. Kansas: IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1973.

**Tutorial MATLAB**. Disponível em: <<http://www.del.ufms.br/tutoriais/matlab/apresentacao.htm>>. Acesso em: 02 nov. 2015.

VAS, P. **Electrical Machines And Drives: Present and Future**. Bari: Electrotechnical Conference (MELECON), 1998.

ZATTI, Vicente. **Autonomia e educação em Immanuel Kant e Paulo Freire**. Porto Alegre, PUC/RS, 2007. Disponível em <<http://www.pucrs.br/edipucrs/online/autonomia/autonomia/2.4.html>>. Acesso: 08 fev. 2010.