



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

NAYARA INGRID LISBOA SANTOS

DESENVOLVIMENTO DE UMA INTERFACE GRÁFICA PARA ANÁLISE DE
MÁQUINAS ELÉTRICAS DE INDUÇÃO

Campina Grande, Paraíba
Fevereiro de 2017

NAYARA INGRID LISBOA SANTOS

DESENVOLVIMENTO DE UMA INTERFACE GRÁFICA PARA ANÁLISE DE MÁQUINAS
ELÉTRICAS DE INDUÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Campina Grande, como
parte dos requisitos necessários para a obtenção do
grau de Bacharel em Ciências no Domínio da
Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Processamento de Energia

Orientador:

Professor Maurício Beltrão de Rossiter Corrêa, D. Sc.

Campina Grande, Paraíba
Fevereiro de 2017

NAYARA INGRID LISBOA SANTOS

DESENVOLVIMENTO DE UMA INTERFACE GRÁFICA PARA ANÁLISE DE MÁQUINAS
ELÉTRICAS DE INDUÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Campina Grande como parte
dos requisitos necessários para a obtenção do grau de
Bacharel em Ciências no Domínio da Engenharia
Elétrica.

Área de Concentração: Processamento de Energia

Aprovado em / /

Professor Avaliador
Universidade Federal de Campina Grande
Avaliador

Professor Maurício Beltrão de Rossiter Corrêa, D. Sc.
Universidade Federal de Campina Grande
Orientador, UFCG

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, em primeiro lugar, pela minha vida e pelo dom da perseverança, me proporcionando o discernimento necessário que me permitiu concluir este trabalho.

Agradeço à minha avó, Maria Ferreira dos Santos, que sempre me incentivou a estudar, não medindo esforços para me proporcionar a melhor educação, se hoje estou alcançando essa vitória é graças a ela.

Agradeço ao meu pai, Noé Pereira dos Santos Filho, que sempre esteve comigo me apoiando e me fortalecendo para eu me dedicar e sempre fazer o meu melhor.

Agradeço à minha mãe, Maria do Socorro Lisboa, que, infelizmente, não está mais entre nós, mas que sempre acreditou em mim e me incentivou para que eu lutasse pelos meus sonhos, me apoiando com o todo o seu amor.

Agradeço ao meu noivo, Khelvin Gleyk Guimarães Pereira, que está sempre ao meu lado, me dando suporte nos momentos de dificuldades e me ajudando a lutar pelos meus objetivos.

Agradeço também a toda minha família, que, com todo carinho e apoio, não mediu esforços para eu chegar a esta etapa da minha vida, em especial às minhas tias Noelma, Socorro e Francisca, por sempre me darem força ao lado da minha avó, acreditando nos meus sonhos e me ajudando da melhor forma possível.

Agradeço a todos os meus amigos, com os quais posso contar em todos os momentos. Quero agradecer em especial aos meus amigos do curso, por estarem sempre comigo, batalhando dia-a-dia, estudando e tornando os meus dias mais felizes.

Agradeço também ao Prof. Maurício, pelas orientações concebidas, pela oportunidade de trabalho e aprendizado.

À doutoranda Stefânia pelo apoio, orientação e dedicação, que foram de extrema ajuda, e aos colegas do LEIAM por estarem disponíveis para sanar eventuais dúvidas.

Enfim, agradeço a cada pessoa que sempre esteve comigo, sempre me dedicou palavras de carinho e de força, cada um de vocês foi essencial para a minha trajetória até aqui.

*“Que os vossos esforços desafiem as impossibilidades,
lembrai-vos de que as grandes coisas do homem
foram conquistadas do que parecia impossível.”*

Charles Chaplin.

RESUMO

O propósito desta pesquisa foi desenvolver uma interface gráfica denominada **ANAGRIM** (*GR*aphical *AN*alysis of *IN*duction *M*achine), que tem como objetivo proporcionar uma interação usuário/máquina elétrica de indução, de forma intuitiva e didática. Este trabalho envolveu o estudo de máquinas de indução, analisando seus perfis de funcionamento e suas características, de acordo com comportamento a vazio e a rotor bloqueado, sendo possível a identificação dos parâmetros elétricos e descrição da interface. Para a caracterização e implementação das máquinas em regime permanente e dinâmico, foi utilizado o software MATLAB e, para o desenvolvimento da interface gráfica, a plataforma GUI (*GR*aphical *U*ser *I*nterface). Como resultado, a plataforma permite ao usuário utilizar o sistema com base nas principais equações da máquina, de forma que permita a sua exploração e explanação por meio de suas próprias análises. Os resultados das simulações se apresentarão em função de visualizações gráficas de acordo com a validação da teoria apresentada.

Palavras-chave: Máquina elétrica de indução, Princípios de operação e controle de máquina, Controle de malha aberta, Interface gráfica e Modelagem de máquinas elétricas.

ABSTRACT

The purpose of this research was to develop a graphical interface called **ANAGRIM** (*GR*aphical *AN*alysis of *I*nduction *M*achine), The goal of this project is to provide user/machine interaction of electric induction, in an intuitive and didactic way. This work involved the study of induction machines, analyzing their operating profiles and their characteristics, according to vacuum behavior and blocked rotor, it being possible to identify the electrical parameters and the interface description. For the characterization and implementation of the machines in a permanent and dynamic regime, was used the MATLAB software and, for the development of the graphical interface, the GUI (*Graphical User Interface*) platform. As a result, the platform allows the user to use the system based on the main equations of the machine, so that it can be explored and explained through its own analysis. The results of the simulations will be presented in function of graphical visualizations according to the validation of the presented theory.

Keywords: Electric induction machine, Principles of operation and control of machine, Control of open mesh, Graphical interface and Modeling of electric machines.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Circuito equivalente da máquina assíncrona com o rotor gaiola de esquilo, padrão IEEE.	20
Figura 2: Representação da máquina simétrica trifásica	21
Figura 3: Armadura trifásica e bifásica equivalente	24
Figura 4: Transformação $\alpha\beta - xy$	27
Figura 5: Torque versus velocidade mecânica.....	28
Figura 6: Circuito equivalente por fase da máquina com diferentes frequências no estator e no rotor.	29
Figura 7: Circuito equivalente da máquina de indução gaiola de esquilo	30
Figura 8: Circuito equivalente da máquina de indução gaiola de esquilo e seu equivalente Thévenin	31
Figura 9: Representação do fluxo de potência ativa e diagrama de fasores, ($Q_s > 0$) da DFIG no modo 1	33
Figura 10: Representação do fluxo de potência ativa e diagrama de fasores, ($Q_s > 0$) da DFIG no modo 2	34
Figura 11: Representação do fluxo de potência ativa e diagrama de fasores, ($Q_s > 0$) da DFIG no modo 3	34
Figura 12: Representação do fluxo de potência ativa e diagrama de fasores, ($Q_s > 0$) da DFIG no modo 4	35
Figura 13: Circuito equivalente da máquina de indução de dupla alimentação.....	36
Figura 14: Velocidade em função do torque mantendo a relação V/Hz constante.	41
Figura 15: Velocidade em função do Torque variando a tensão rotórica	42
Figura 16: Esquema elétrico para o ensaio a vazio.....	43
Figura 17: Esquema elétrico para o rotor bloqueado.	44
Figura 18: Estrutura do ANAGRIM.....	48
Figura 19: Tela principal do ANAGRIM.	48
Figura 20: Menu da janela inicial	49
Figura 21: Janela da opção Sobre	49
Figura 22: Janela secundária da máquina de indução gaiola de esquilo	50
Figura 23: Janela: Analisar o comportamento	51
Figura 24: Tipo de entrada	51
Figura 25: Selecionar Arquivos.....	52
Figura 26: Seleção de parâmetros.....	52
Figura 27: Janela - Regime Permanente máquina de indução gaiola de esquilo	55
Figura 28: Janela - Regime Permanente máquina de indução de dupla alimentação.	55
Figura 29: Painel: Selecionar Variáveis.	56
Figura 30: Painel - Selecionar Variáveis para a máquina de indução gaiola de esquilo (a) eixo X; (b) Eixo Y.....	56
Figura 31: Painel - Selecionar Variáveis para a máquina de dupla alimentação: (a) Eixo X; (b) Eixo Y. .	57
Figura 32: Painel - Valor da tensão/fase rotórica	57
Figura 33: Painel - Curva para a máquina de indução gaiola de esquilo.	58
Figura 34: Painel - Curva para a máquina de indução de dupla alimentação	58
Figura 35: Painel - Curva: (a) tensão V_r fixa; (b) Fase de V_r fixa.	59
Figura 36: Painel - Valores.....	60
Figura 37: Painel - Selecionar Frequências.	60
Figura 38: Selecionar Frequências	61
Figura 39: Painel – Verificar Ponto de Operação.	61
Figura 40: Janela – Máquina de Indução Gaiola de Esquilo Regime Dinâmico	62
Figura 41: Janela – Máquina de Indução de Dupla Alimentação Regime Dinâmico	62
Figura 42: Painel – Referencial.	63
Figura 43: Painel – Tempo de Simulação.....	63
Figura 44: Painel – Valor da Tensão/fase Rotórica	63
Figura 45: Painel – Condições de Operação para a máquina de indução gaiola de esquilo.	64
Figura 46: Painel – Condições de Operação para a máquina de indução de dupla alimentação.....	65
Figura 47: Painel - Condições de operação: Modos de operação;	65

Figura 48: Painel – Seleção de Gráficos: (a) máquina de indução gaiola de esquilo; (b) máquina de indução de dupla alimentação.	66
Figura 49: Painel – Seleção de Fasores (a) máquina de indução gaiola de esquilo; (b) máquina de indução de dupla alimentação.	67
Figura 50: Janela de Processamento.	67
Figura 51: Barra de Ferramentas.	68
Figura 52: Janela Ensaiar a Máquina para a Máquina de indução Gaiola de Esquilo.	68
Figura 53: Painel – Modelo da Máquina.	69
Figura 54: Painel – Ensaio a Vazio.	70
Figura 55: Painel – Ensaio a rotor bloqueado.	70
Figura 56: Painel – Parâmetros.	71
Figura 57: Seleção do modelo da máquina e a realização do ensaio a vazio.	73
Figura 58: Ensaio a rotor bloqueado.	73
Figura 59: Janela de advertência.	74
Figura 60: Determinação dos parâmetros.	74
Figura 61: Gráfico da corrente em regime dinâmico para a máquina de indução gaiola de esquilo.	75
Figura 62: Gráfico das tensões estatóricas nos quatro referenciais, para a máquina de indução gaiola de esquilo: (a) natural; (b) estatórico; (c) rotórico; (d) síncrono.	76
Figura 63: Gráfico das correntes estatóricas nos quatro referenciais, para a máquina de indução gaiola de esquilo: (a) natural; (b) estatórico; (c) rotórico; (d) síncrono.	76
Figura 64: Gráfico das correntes rotóricas nos quatro referenciais, para a máquina de indução gaiola de esquilo: (a) natural; (b) estatórico; (c) rotórico; (d) síncrono.	77
Figura 65: Gráfico do torque eletromagnético para a máquina de indução gaiola de esquilo.	78
Figura 66: Fasores dos fluxos estatóricos para a máquina de indução gaiola de esquilo: (a) modo motor; (b) modo gerador.	78
Figura 67: Gráfico da tensão rotórica em regime dinâmico para a máquina de indução de dupla alimentação.	79
Figura 68: Gráficos das correntes rotóricas no regime dinâmico: (a) máquina de indução gaiola de esquilo; (b) máquina de indução de dupla alimentação.	80
Figura 69: Gráficos dos fluxos rotóricas no regime dinâmico: (a) máquina de indução gaiola de esquilo; (b) máquina de indução de dupla alimentação.	80
Figura 70: Primeiro modo de operação, motor supersíncrono: (a) velocidade mecânica; (b) fisor do fluxo estatórico e do fluxo rotórico.	81
Figura 71: Segundo modo de operação, gerador supersíncrono: (a) velocidade mecânica; (b) fisor do fluxo estatórico e do fluxo rotórico.	82
Figura 72: Terceiro modo de operação, gerador subsíncrono: (a) velocidade mecânica; (b) fisor do fluxo estatórico e do fluxo rotórico.	82
Figura 73: Quarto modo de operação, motor subsíncrono: (a) velocidade mecânica; (b) fisor do fluxo estatórico e do fluxo rotórico.	83
Figura 74: Escorregamento em função do torque para a máquina de indução gaiola de esquilo.	84
Fonte: Elaboração Própria.	84
Figura 75: Escorregamento em função torque para a máquina de indução gaiola de esquilo, com marcação de pontos específicos no gráfico: (a) partida; (b) nominal; (c) máximo torque como gerador; (c) máximo torque como motor.	85
Figura 76: Verificar ponto de operação, rendimento e fator de potência.	85
Figura 77: Escorregamento em função torque eletromecânico, com a marcação do ponto de operação.	86
Figura 78: Escorregamento em função do torque eletromecânico: (a) motor; (b) gerador.	86
Figura 79: Velocidade mecânica em função do torque eletromecânico utilizando o controle V/Hz, e com a marcação dos pontos de operação.	87
Figura 80: Escorregamento em função do torque eletromecânico para a máquina de indução de dupla alimentação, com a marcação do ponto de operação.	88
Figura 81: Curva da velocidade mecânica x torque eletromecânico variando o valor da tensão rotórica.	88
Tabela 7: Valores obtidos da variação da tensão rotórica.	89
Figura 82: Velocidade mecânica em função do torque eletromecânico variando a tensão do rotor.	89
Figura 83: Velocidade mecânica em função do torque eletromecânico variando a fase da tensão rotórica.	90
Figura 84: Velocidade Mecânica em função do tempo para a máquina de indução gaiola de esquilo: (a) motor, (b) gerador.	91

Figura 85: Verificação dos valores na curva da velocidade em função do torque eletromecânico para o regime permanente.	92
Figura 86: Velocidade Mecânica em função do tempo para a máquina de indução de dupla alimentação: (a) 1° modo; (b) 2° modo; (c) 3° modo; (d) 4° modo.	93
Figura 87: Verificação dos valores na curva da velocidade em função do torque eletromecânico para o regime permanente: (a) 1° e 2° modo; (b) 3° e 4° modo.	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Regiões de operação da DFIG	35
Tabela 2: Distribuição empírica de reatâncias de dispersão em motores de indução	46
Tabela 3: Valores e informações que correspondem aos parâmetros elétricos dos 7 modelos fornecidos pelo ANAGRIM	53
Tabela 4: Valores e informações que correspondem aos parâmetros mecânicos dos 7 modelos fornecidos pelo ANAGRIM	54
Tabela 5: Resumo modos de operação	81
Tabela 6: Valores obtidos para o controle V/Hz	87
Tabela 7: Valores obtidos da variação da tensão rotórica	89
Tabela 8: Valores obtidos da variação da fase da tensão rotórica	90
Tabela 9: Valores obtidos do gráfico de regime dinâmico e regime permanente para a máquina de gaiola de esquilo.....	92
Tabela 10: Valores obtidos do gráfico de regime dinâmico e regime permanente para a máquina de dupla alimentação.....	94

SUMÁRIO

Agradecimentos.....	iv
Resumo.....	vi
Abstract.....	vii
Lista de Ilustrações.....	viii
Lista de Tabelas.....	xi
Sumário.....	xii
1 Introdução.....	14
2 Fundamentação Teórica.....	17
2.1 Máquinas Elétricas de Indução.....	17
2.2 Modelagem das Máquinas de Indução.....	19
2.2.1 Modelo 123.....	21
2.2.2 Modelo odq.....	24
2.2.3 Modelo da Máquina no sistema de referência com velocidade arbitrária.....	27
2.3 Máquina de Indução Gaiola de Esquilo.....	27
2.3.1 Análise em Regime Permanente.....	29
2.4 Máquina de Indução com Dupla Alimentação.....	32
2.4.1 Modos de operações da Máquina de Dupla Alimentação.....	33
2.4.2 Análise em Regime Permanente.....	35
2.5 Características dos Máquina Elétricas Trifásicas.....	38
2.5.1 Fator de Potência.....	39
2.5.2 Rendimento.....	39
2.5.3 Perdas na Máquina.....	39
2.6 Estratégias de Controle em Malha Aberta.....	40
2.6.1 Controle V/Hz.....	40
2.6.2 Variação da tensão e Fase Rotórica.....	41
2.7 Ensaios de Caracterização.....	42
2.7.1 Ensaio a Vazio.....	42
2.7.2 Ensaio a Rotor Bloqueado.....	43
2.7.3 Determinação dos parâmetros.....	44
3 Interface Gráfica.....	47
3.1 Interface MATLAB® GUI.....	47
3.2 Descrição geral da Interface.....	47
3.2.1 Janela Inicial.....	48
3.2.2 Janela Secundária.....	50
3.2.3 Janela: Analisar o Comportamento.....	50
3.2.3.1 Janela: Regime Permanente.....	54

3.2.3.2	Janela: Regime Dinâmico	62
3.2.3.3	Barra de Ferramentas	67
3.2.4	Janela: Ensaiar a Máquina	68
4	Resultados	72
4.1	Ensaaios	72
4.2	Regime Dinâmico	75
4.3	Regime Permanente	84
4.4	Regime Dinâmico e Regime Permanente	91
5	Conclusões.....	95
	Referências	97

1 INTRODUÇÃO

As máquinas elétricas possuem um papel relevante nos processos da sociedade moderna. A capacidade bidirecional de conversão de energia e, conseqüentemente, a possibilidade de uso como motor ou gerador, faz com que os diferentes tipos de máquinas e as demandas de controle constituam elementos importantes para as mais variadas aplicações, desde o acionamento de ventiladores e portões à geração de energia elétrica.

As máquinas consideradas para o presente estudo são as de indução com rotor do tipo gaiola de esquilo e com rotor bobinado ou dupla alimentação, sendo de suma importância que elas sejam adequadas não apenas em custo, mas também em perfil de operação. Por este motivo, considera-se que os estudos exploratórios sobre as máquinas de indução esclareçam o entendimento sobre elas, de forma a adequá-las para compor o sistema elétrico que se deseja estudar.

O processo de modelagem matemática de um elemento sob estudo pode ser facilitado se o funcionamento desse elemento é observável. No caso de uma máquina elétrica, apesar de seu grau de complexidade exigir um certo esforço para compreender seu funcionamento, a abordagem baseada na observação e processamento das grandezas elétricas parece ser suficientemente confiável para aquisição de conhecimento. Assim, a partir da modelagem matemática, é possível realizar simulações em regime dinâmico e permanente no qual permita a visualização do comportamento sob diversos pontos de operação.

O estudo do modelo dinâmico permite observar as grandezas elétricas, tal como podem ser vistas em um osciloscópio, obtendo informação de defasagens e amplitudes das grandezas elétricas nas partes integrantes de uma máquina (estator e rotor), bem como monitorar o perfil de operação sob o ponto de vista mecânico (conjugado e velocidade).

Por ser uma máquina representada através de um modelo matemático, podem-se repetir ou realizar testes sob várias condições de operação (cargas de diferentes intensidades, rotor bloqueado, a vazio, etc.). De posse desses dados, é possível lançar mão de uma variedade de métodos para entender o funcionamento da máquina, familiarizando-se com seus modelos matemáticos, inclusive relacionando os pontos de operações sob os pontos de vista elétrico e mecânico.

Já o estudo do modelo em regime permanente permite o estudo do comportamento das grandezas em regime estacionário, através de circuitos equivalentes. Desta forma, é possível visualizar uma família de curvas que relacionem grandezas como torque e velocidade mecânica, tornando possível encontrar o melhor ponto de operação para que a máquina funcione com a máximo de eficiência.

Tendo em vista o que está disponibilizado, sugere-se uma sequência de uso tal que possa explorar o funcionamento da máquina sob o seguinte prisma: ensaio da máquina a vazio e a rotor bloqueado para construção do circuito equivalente; análise em regime permanente e dinâmico utilizando estratégias de controle em malha aberta. Portanto, buscou-se disponibilizar um aplicativo utilizando o *Graphical User Interface - GUI* do MATLAB para gerar um ambiente versátil para o estudo desses tipos de máquinas. Nesse ambiente, os modelos dinâmicos e de regime permanente são explorados para gerar pontos de operações que podem ser confrontados entre si, com a finalidade de compreender o funcionamento da máquina, visando melhoras no aprendizado e aplicando os resultados a estudos mais aprofundados quando a máquina estiver conectada à rede elétrica.

O presente trabalho de conclusão de curso teve como objetivo desenvolver uma interface gráfica para a manipulação e análise do comportamento das máquinas de indução, que permitam modificações, visando adequá-la a propósitos didáticos.

E como objetivos específicos:

- Estudar as máquinas de indução com o rotor gaiola de esquilo e com rotor de dupla alimentação;
- Estudar e modelar as máquinas nos referenciais estático, síncrono e rotórico;
- Realizar ensaios de caracterização para as máquinas;
- Visualizar graficamente o comportamento da máquina em regime permanente e dinâmico.

O trabalho está estruturado em 5 capítulos, incluindo este introdutório, conforme a seguir.

- **Capítulo 2:** descrição das máquinas elétricas de indução, assim como a modelagem e princípio de funcionamento de ambas as máquinas, e suas principais características de funcionamento; apresentação das estratégias de controle em malha aberta utilizadas, e procedimentos utilizado para realização dos ensaios;
- **Capítulo 3:** descrição geral do *software* utilizado e da interface desenvolvida, e suas funcionalidades;
- **Capítulo 4:** resultados obtidos e apresentação do uso da interface através de atividades que possam ser utilizados pelo usuário;
- **Capítulo 5:** conclusões acerca da pesquisa desenvolvida.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para o desenvolvimento da pesquisa, realizou-se o estudo analítico do modelo em regime permanente e dinâmico das máquinas, assim como as suas principais características de funcionamento e estratégias de controle em malha em aberta, visando o seu entendimento diante a vários pontos de operação. Para complementar as análises dissertou-se sobre os ensaios tradicionalmente utilizados para obtenção dos parâmetros da máquina. Como os parâmetros da máquina simulada são conhecidos, é fácil de comprovar a validade do procedimento recomendado para laboratório.

2.1 MÁQUINAS ELÉTRICAS DE INDUÇÃO

As máquinas elétricas de indução são máquinas de corrente alternada em que as bobinas estatóricas são alimentadas por tensões trifásicas equilibradas que induz corrente nas bobinas, gerando um campo magnético na velocidade síncrona. O rotor recebe então a corrente por indução do estator, na qual produzem ondas de fluxos que giram defasadas em relação a onda de fluxo do estator. O conjugado é produzido pela interação dessas duas ondas de fluxo.

De acordo com a lei de Lenz, o sentido da corrente induzida dada pelas suas ações magnéticas, tende sempre a opor-se à causa que lhe deu origem, com isso no rotor, quando é induzida a corrente, o campo magnético vai se opor ao campo girante gerado pelo estator, e para que isso ocorra os polos do estator e do rotor devem ser opostos. Como os polos opostos se atraem, o rotor vai girar sempre querendo acompanhar o estator (FITZGERALD; KINGSLEY e UMANS, 2014).

As máquinas são constituídas de duas estruturas principais, o estator e rotor. O estator é a parte fixa da máquina e o rotor é a parte móvel, sendo constituídos de aço e os enrolamentos são instalados em ranhuras alojadas nessas estruturas (FITZGERALD; KINGSLEY e UMANS, 2014).

A máquina trifásica é composta por seis bobinas, três no referencial estatórico e três no referencial rotórico, iguais entre si e defasadas igualmente formando ângulos

elétricos iguais a $2\pi/3$ radianos elétricos. Quando as três bobinas do estator são alimentadas por uma tensão trifásica de frequência f_s , é induzido um fluxo no estator que gira a uma velocidade constante, que é chamada de velocidade síncrona n_s , e é definida como:

$$n_s = \frac{60}{p} f_s [\text{rpm}] \quad (1)$$

em que f_s é a frequência elétrica do estator [Hz] e p é o número de par de polos.

A tensão induzida no rotor depende da relação entre a velocidade do fluxo rotacional do estator e a velocidade do fluxo rotacional do rotor, assim a frequência angular das tensões e correntes induzidas nos enrolamentos do rotor é dada por:

$$\omega_r = \omega_s - \omega_m \quad (2)$$

onde, ω_s é a velocidade angular síncrona, que é a frequência angular das tensões e correntes dos enrolamentos do estator [rad/s], e ω_m é a frequência angular do rotor [rad/s], que é definida como:

$$\omega_m = p\Omega_m \quad (3)$$

em que, Ω_m é a velocidade mecânica rotacional do rotor [rad/s].

A equação (4) mostra como é calculada a velocidade síncrona do campo girante em rad/s.

$$n_s = \frac{1}{p} \omega_e = \frac{2\pi f_s}{p} \frac{\text{rad}}{\text{s}} \quad (4)$$

O rotor do motor de indução ao operar com a velocidade abaixo da velocidade síncrona não consegue se alinhar com o estator, produzindo um conjugado eletromecânico. Quando a velocidade mecânica é maior que a velocidade síncrona, a máquina passa a operar como gerador, e se a velocidade mecânica se igualar à velocidade síncrona nenhuma corrente e nenhum conjugado será induzido pelo rotor, fazendo com que a máquina pare de operar.

A diferença entre a velocidade síncrona e a velocidade do rotor é definida como escorregamento, que é responsável por caracterizar o desempenho das máquinas, se a mesma opera como motor ou como gerador:

$$s = \frac{\omega_s - \omega_m}{\omega_s} \quad (5)$$

Combinando as equações (2) e (5), tem-se que a frequência angular do rotor dada em termos do escorregamento é:

$$\omega_r = s\omega_s \quad (6)$$

O movimento relativo entre o fluxo do estator e os condutores do rotor induz as tensões de frequência de escorregamento no rotor f_r que é dado por:

$$f_r = sf_s \quad (7)$$

Assim, o comportamento elétrico de uma máquina de indução é similar ao de um transformador, porém apresenta-se uma característica adicional de frequência produzida pelo movimento relativo entre os enrolamentos do estator e do rotor (FITZGERALD; KINGSLEY e UMANS, 2014).

As máquinas de indução podem ser em rotor gaiola de esquilo (curto-circuitado) ou rotor de dupla alimentação (bobinado). No primeiro caso, os enrolamentos do rotor são eletricamente curto-circuitado, ou seja, o enrolamento consiste em barras condutoras encaixadas em ranhuras no ferro do rotor e curto-circuitadas em cada lado por anéis condutores. No segundo, os enrolamentos do rotor são conectados a anéis deslizantes isolados, tornando assim disponíveis externamente ao motor (FITZGERALD; KINGSLEY e UMANS, 2014).

2.2 MODELAGEM DAS MÁQUINAS DE INDUÇÃO

A compreensão do modelo dinâmico das máquinas de corrente alternada (CA) é feita através da modelagem matemática, a fim de obter uma descrição do comportamento das grandezas internas por meio das expressões de fluxos, tensões, conjugado e potência. A partir do modelo em regime dinâmico, foi feita a análise em regime permanente e a

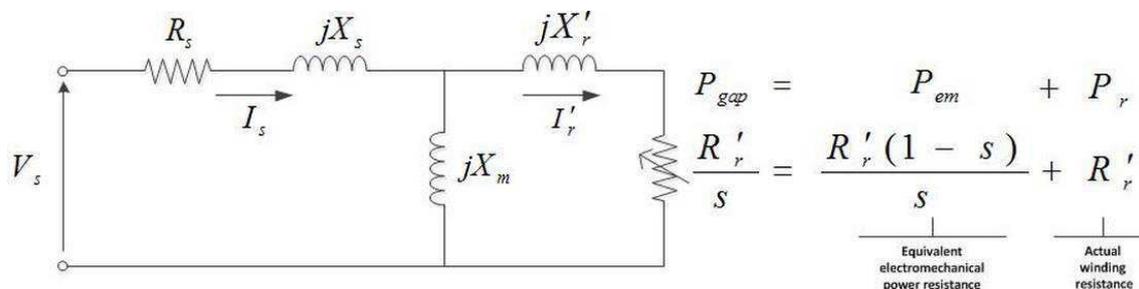
construção do seu circuito equivalente, para determinar as características de desempenho das máquinas.

A modelagem de máquinas elétricas é fundamental para a realização das simulações, em que, através dela, pode-se obter as características aproximadas de um sistema real.

A exemplo de um circuito RL, RC ou RLC, que pode ser estudado considerando sua modelagem matemática obtida pelas leis de *Kirchhoff*, é possível fazer algo análogo com uma máquina de indução. Certamente, o grau de complexidade será mais elevado devido à combinação de eventos no domínio mecânico e elétrico inerente a esse tipo de máquina. Sob essas condições, se faz necessário lidar com o efeito da rotação da máquina sobre seus parâmetros elétricos para obtenção o modelo elétrico.

Visualmente, é praticamente impossível associar de forma efetiva, as bobinas a elementos de circuitos. Todavia, assumindo ser de interesse a análise de uma máquina trifásica e que os arranjos das bobinas podem ser representados por indutores em série com uma resistência, considera-se a Figura 1 como uma representação aceitável de uma máquina assíncrona.

Figura 1: Circuito equivalente da máquina assíncrona com o rotor gaiola de esquilo, padrão IEEE.

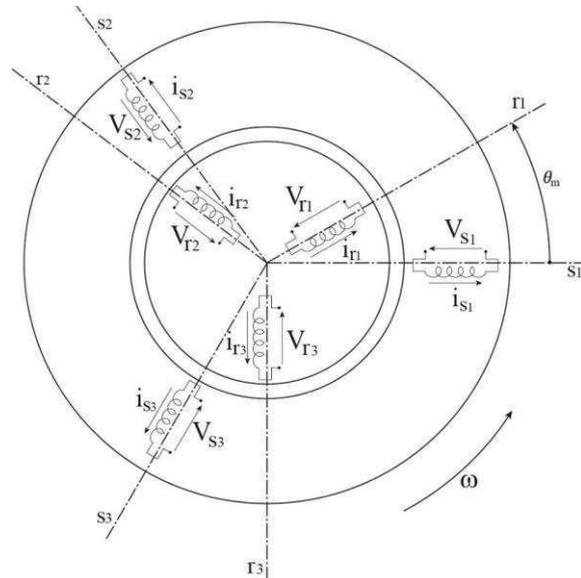


Fonte: https://en.wikipedia.org/wiki/Induction_motor.

O profundo entendimento das possíveis soluções deste circuito, em função do ponto de operação (usualmente definido em função da velocidade/carga mecânica e das grandezas elétricas impostas nos terminais) é o ponto chave para avaliar as características operacionais das máquinas, para fins de realização de controle.

As restrições operacionais para as quais a representação é válida, inclui a não saturação do núcleo magnético; o caráter bipolar da máquina e a distribuição senoidal do fluxo magnético.

Figura 2: Representação da máquina simétrica trifásica



Fonte: (ABAD; LÓPEZ; *et al.*, 2011)

onde s_1 , s_2 e s_3 representam as bobinas referentes ao estator e suas devidas tensões e correntes, e, de forma análoga, tem-se para as bobinas do rotor r_1 , r_2 , e r_3 .

Assim, considerando o acoplamento existente entre os indutores, bem como o efeito da velocidade sobre esse acoplamento, é possível obter o conjunto de equações que serão apresentados a seguir.

2.2.1 MODELO 123

As expressões das tensões, correntes e fluxos do estator da máquina podem ser descritas de acordo com as seguintes equações:

$$v_{s1} = R_s i_{s1} + \frac{d\lambda_{s1}}{dt} \quad (8)$$

$$v_{s2} = R_s i_{s2} + \frac{d\lambda_{s2}}{dt} \quad (9)$$

$$v_{s3} = R_s i_{s3} + \frac{d\lambda_{s3}}{dt} \quad (10)$$

onde, R_s é a resistência do estator.

As expressões de tensões, correntes e fluxos do rotor são descritos por:

$$\mathbf{v}_{r1} = R_r \mathbf{i}_{r1} + \frac{d\lambda_{r1}}{dt} \quad (11)$$

$$\mathbf{v}_{r2} = R_r \mathbf{i}_{r2} + \frac{d\lambda_{r2}}{dt} \quad (12)$$

$$\mathbf{v}_{r3} = R_r \mathbf{i}_{r3} + \frac{d\lambda_{r3}}{dt} \quad (13)$$

onde, R_r é a resistência do rotor.

De forma resumida, é apresentado as grandezas da seguinte maneira:

$$\mathbf{v}_{s123} = R_s \mathbf{i}_{s123} + \frac{d\lambda_{s123}}{dt} \quad (14)$$

$$\mathbf{v}_{r123} = R_r \mathbf{i}_{r123} + \frac{d\lambda_{r123}}{dt} \quad (15)$$

em que,

$$R_s = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \text{ e } R_r = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \quad (16)$$

Sabendo que as bobinas do estator e do rotor possuem indutâncias próprias denominadas de L_s e L_r , e que o defasamento é igual entre os enrolamentos, tem-se que as indutâncias mútuas entre dois enrolamentos do estator e do rotor são dadas por M_s e M_r , respectivamente.

A indutância mútua é máxima quando o ângulo entre elas é nulo, ou seja, quando são ortogonais. E é mínima quando o ângulo entre ela é π , pois conclui-se que a indutância mútua entre uma bobina do estator e rotor variam de acordo com o cosseno, logo pode-se representá-la como:

$$M_{sr} = M \cos \theta \quad (17)$$

Assim, as expressões dos fluxos em $I23$ podem ser apresentadas como:

$$\lambda_{s123} = L_{ss}\mathbf{i}_{s123} + L_{sr}\mathbf{i}_{r123} \quad (18)$$

$$\lambda_{r123} = L_{rs}\mathbf{i}_{s123} + L_{rr}\mathbf{i}_{r123} \quad (19)$$

em que,

$$L_{ss} = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix} \text{ e } L_{rr} = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$L_{sr} = M \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r + \frac{4\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r + \frac{4\pi}{3}\right) & \cos(\theta_r) & \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r + \frac{4\pi}{3}\right) & \cos(\theta_r) \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$L_{rs} = M \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & \cos\left(\theta_r + \frac{4\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta_r) & \cos\left(\theta_r + \frac{4\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r + \frac{4\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta_r) \end{bmatrix}. \quad (22)$$

O conjugado é a força necessária para que o rotor realize trabalho, e sua expressão é dada por:

$$c_e = p\mathbf{i}_{s123}^T \frac{dL_{sr}(\theta_r)}{d\theta_r} \mathbf{i}_{r123} = p\mathbf{i}_{r123}^T \frac{dL_{rs}(\theta_r)}{d\theta_r} \mathbf{i}_{s123} \quad (23)$$

A potência total instantânea da máquina é:

$$P = [\mathbf{i}_{s123} \quad \mathbf{i}_{r123}] \begin{bmatrix} \mathbf{v}_{s123} \\ \mathbf{v}_{r123} \end{bmatrix} \quad (24)$$

onde, $\mathbf{v}_{s123} = [\mathbf{v}_{s1}, \mathbf{v}_{s2}, \mathbf{v}_{s3}]$, $\mathbf{i}_{s123} = [i_{s1}, i_{s2}, i_{s3}]$ e $\lambda_{s123} = [\lambda_{s1}, \lambda_{s2}, \lambda_{s3}]$ são os vetores de tensões, correntes e fluxos do estator, respectivamente; $\mathbf{v}_{r123} =$

$[\mathbf{v}_{r1}, \mathbf{v}_{r2}, \mathbf{v}_{r3}]$, $\mathbf{i}_{r123} = [i_{r1}, i_{r2}, i_{r3}]$ e $\boldsymbol{\lambda}_{r123} = [\lambda_{r1}, \lambda_{r2}, \lambda_{r3}]$ são os vetores de tensões, correntes e fluxos do rotor, respectivamente.

2.2.2 MODELO *odq*

Devido aos parâmetros do modelo trifásico serem variáveis com a posição rotórica, torna-se um modelo complexo e inadequado para simulação e controle. (ROCHA, 2008)

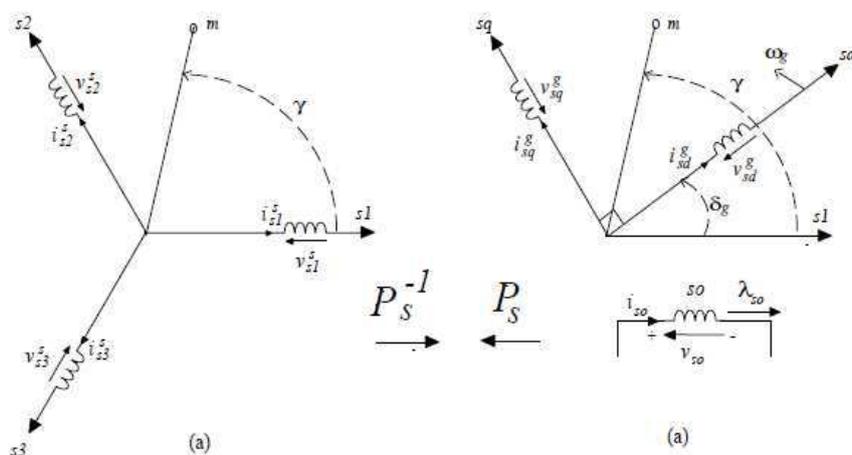
Para descrever o comportamento dinâmico de uma forma simplificada, utilizou-se a transformada de Park (modelo *odq*) para obter novas expressões de fluxos, tensões, conjugado e potência.

A transformada *odq* converte fisicamente a máquina simétrica trifásica em uma máquina simétrica bifásica com os mesmos parâmetros, dividida em três enrolamentos fictícios que são o eixo direto (d), o eixo em quadratura (q) e homopolar (o) (JACOBINA, 2005).

A componente homopolar é proporcional à soma das grandezas trifásicas originais dada por:

$$x_o = \frac{1}{\sqrt{3}}(x_1 + x_2 + x_3) \quad (25)$$

Figura 3: Armadura trifásica e bifásica equivalente



Fonte: (JACOBINA, 2005)

Por definição, tem-se:

$$\mathbf{x}_{123} = \mathbf{P}\mathbf{x}_{odq} \quad (26)$$

em que, \mathbf{P} é a matriz de transformação de 123 para odq , onde \mathbf{P}_s é para o estator e \mathbf{P}_r para o rotor:

$$\mathbf{P}_s = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & \cos(\delta_g) & -\text{sen}(\delta_g) \\ 1/\sqrt{2} & \cos(\delta_g - 2\pi/3) & -\text{sen}(\delta_g - 2\pi/3) \\ 1/\sqrt{2} & \cos(\delta_g - 4\pi/3) & -\text{sen}(\delta_g - 4\pi/3) \end{bmatrix} \quad (27)$$

$$\mathbf{P}_r = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & \cos(\delta_g - \theta_r) & -\text{sen}(\delta_g - \theta_r) \\ 1/\sqrt{2} & \cos(\delta_g - \theta_r - 2\pi/3) & -\text{sen}(\delta_g - \theta_r - 2\pi/3) \\ 1/\sqrt{2} & \cos(\delta_g - \theta_r - 4\pi/3) & -\text{sen}(\delta_g - \theta_r - 4\pi/3) \end{bmatrix} \quad (28)$$

Sendo o índice g indicado como referencial genérico dos eixos dq , e as matrizes de transformação ortogonais, $\mathbf{P}^{-1} = \mathbf{P}^T$.

Considera-se que a máquina opera de forma equilibrada, ou seja, as componentes homopolares são nulas. De modo a simplificar as equações dinâmicas as variáveis dq no modo complexo ou vetorial, nas coordenadas cartesianas x e y , são representadas por \mathbf{d} e \mathbf{q} , respectivamente (JACOBINA, 2005).

A variável complexa \mathbf{x} , no plano dq , é representada por:

$$\mathbf{x} = (x_d + jx_q) \quad (29)$$

A partir das definições apresentadas e fazendo as devidas substituições, segue as equações que representam o sistema dinâmico para as máquinas elétrica trifásicas.

$$\mathbf{v}_s = R_s \mathbf{i}_s + \frac{d\lambda_s}{dt} + j\omega_g \lambda_s \quad (30)$$

$$\mathbf{v}_r = R_r \mathbf{i}_r + \frac{d\lambda_r}{dt} + j(\omega_g - \omega_r) \lambda_r \quad (31)$$

$$\lambda_s = l_s \mathbf{i}_s + l_m \mathbf{i}_r \quad (32)$$

$$\lambda_r = l_r \mathbf{i}_r + l_m \mathbf{i}_s \quad (33)$$

$$c_e = pl_m \text{Im}(\mathbf{i}_s \mathbf{i}_r^*) \quad (34)$$

onde $\omega_g = \frac{d\delta_g}{dt}$ rad/s é a velocidade angular genérica.

As expressões da potência ativa e reativa do estator e rotor no referencial dq são definidas por:

$$P_s = \frac{3}{2} \text{Re}\{\mathbf{v}_s \mathbf{i}_s^*\} = \frac{3}{2} (\mathbf{v}_{sd} \mathbf{i}_{sd} + \mathbf{v}_{sq} \mathbf{i}_{sq}) \quad (35)$$

$$P_r = \frac{3}{2} \text{Re}\{\mathbf{v}_r \mathbf{i}_r^*\} = \frac{3}{2} (\mathbf{v}_{rd} \mathbf{i}_{rd} + \mathbf{v}_{rq} \mathbf{i}_{rq}) \quad (36)$$

$$Q_s = \frac{3}{2} \text{Im}\{\mathbf{v}_s \mathbf{i}_s^*\} = \frac{3}{2} (\mathbf{v}_{sq} \mathbf{i}_{sd} - \mathbf{v}_{sd} \mathbf{i}_{sq}) \quad (37)$$

$$Q_r = \frac{3}{2} \text{Im}\{\mathbf{v}_r \mathbf{i}_r^*\} = \frac{3}{2} (\mathbf{v}_{rq} \mathbf{i}_{rd} - \mathbf{v}_{rd} \mathbf{i}_{rq}) \quad (38)$$

Para que o modelo da máquina esteja completo, além das equações elétricas, são necessárias equações mecânicas que podem ser obtidas aplicando a segunda lei de Newton, no qual a força resultante aplicada a um corpo é igual a sua massa vezes sua aceleração:

$$c_e - c_m - F_m \omega_m = J_m \frac{d\omega_m}{dt}. \quad (39)$$

onde $F_m \omega_m$ é o conjugado de atrito e J_m é o momento de inércia da máquina.

Como se trata de um movimento circular, aparecem na lei de Newton a velocidade angular ω_m e o momento de inércia da máquina.

De posse do modelo completo, vários estudos podem ser feitos para a análise do funcionamento da máquina em função das grandezas elétricas ou mecânicas. Esse modelo é o dinâmico, mas que pode ser utilizado para observar o funcionamento da máquina em pontos específicos de operação em regime permanente.

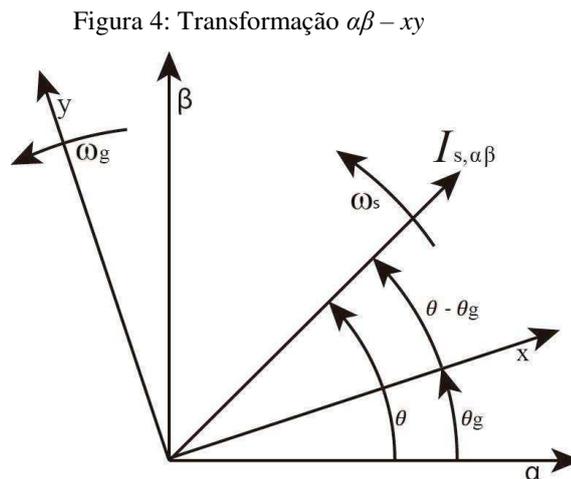
2.2.3 MODELO DA MÁQUINA NO SISTEMA DE REFERÊNCIA COM VELOCIDADE ARBITRÁRIA

Para descrever as equações em um referencial específico, basta substituir ω_g pela velocidade particular do sistema (BIM, 2014).

Geralmente, adotam-se três sistemas de coordenadas:

- Sistema de referência estacionário: $\omega_g = 0$, coordenadas $\alpha\beta$;
- Sistema de referência girante síncrono: $\omega_g = \omega_s$, coordenadas dq ;
- Sistema de referência girante rotórico: $\omega_g = \omega_m$, coordenadas mn ;

Na Figura 4, é ilustrada a transformação $\alpha\beta$ para um novo sistema de referência de coordenadas x e y , girando no sentido anti-horário e na velocidade arbitrária.



Fonte: (BIM, 2014)

A partir dessa análise é possível obter a máquina de indução no referencial desejado.

2.3 MÁQUINA DE INDUÇÃO GAIOLA DE ESQUILO

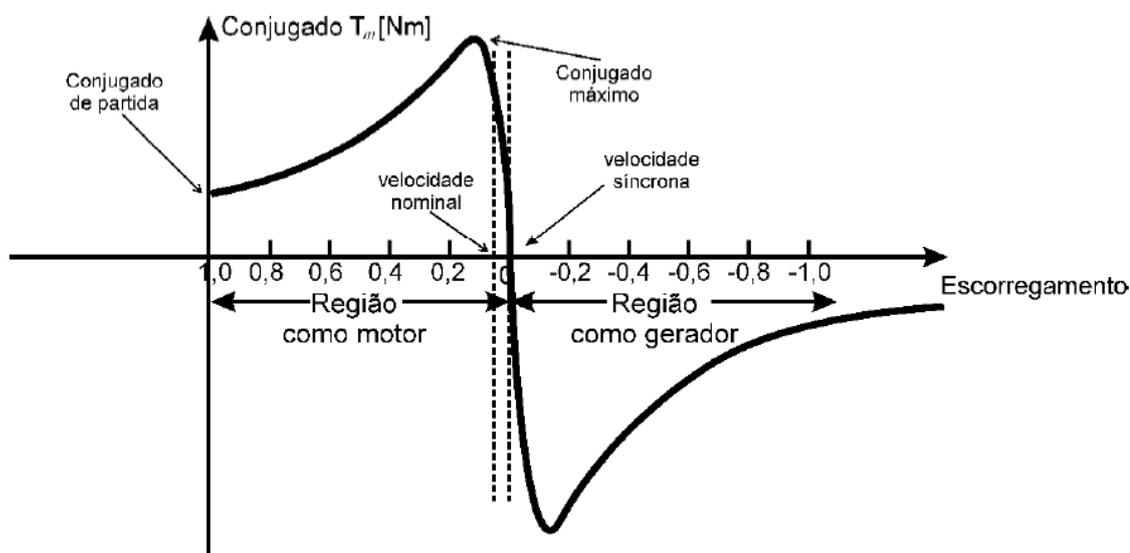
As máquinas de indução são muito utilizadas por serem mais baratas, robustas, quando comparadas às máquinas de corrente contínua e síncronas de mesma potência. Em relação às máquinas de corrente contínua, as de indução são de controle mais complexo por terem a frequência elétrica como uma variável adicional a ser controlada e

as relações torque versus velocidade e torque versus fluxo magnético de entreferro serem não lineares (BIM, 2014).

As máquinas elétricas são caracterizadas por converter energia elétrica em energia mecânica, ou vice-versa, sendo o primeiro caso caracterizado como motor e o último como gerador. O campo eletromagnético, essencialmente para a conversão de energia mecânica em energia elétrica é estabelecido através do estator da máquina. Tal fato implica que a máquina absorve potência reativa da rede.

A característica da máquina pode ser observada de acordo com a Figura 5, variação do torque em função da velocidade mecânica.

Figura 5: Torque versus velocidade mecânica.



Fonte: Elaboração Própria.

Durante o funcionamento normal como motor, o rotor gira no sentido de rotação do campo magnético produzido pelas correntes do estator, e como gerador, o motor deve ser acionado no sentido contrário ao do seu campo magnético.

Uma máquina de indução funcionará como gerador se seus terminais do estator forem conectados a uma fonte de tensão trifásica e seu rotor for acionado por uma máquina motriz acima da velocidade síncrona, por exemplo, um gerador de indução conectado a um sistema de potência acionado por uma turbina eólica. (FITZGERALD, KINGSLEY e UMANS, 2014)

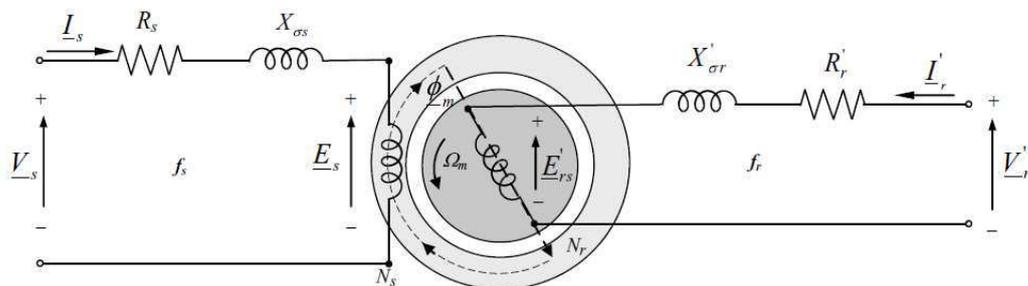
Quando acionado uma carga mecânica, em regime permanente, a uma determinada velocidade, o conjugado no eixo do motor é exatamente igual ao conjugado que a carga

acionada exige. Se o conjugado do motor for maior que o da carga ocorre aceleração até que uma velocidade superior seja atingida e o equilíbrio de conjugados ocorra. Se o conjugado da carga se tornar maior que o do motor ocorre uma redução na velocidade com o respectivo aumento do conjugado do motor para que o conjugado da carga seja contrabalançado (ANDRADE, 2003).

2.3.1 ANÁLISE EM REGIME PERMANENTE

A máquina de indução opera com frequências diferentes no estator e no rotor, conforme Figura 6. Do ponto de vista da modelagem matemática, fazer a análise com frequências diferentes torna o sistema extremamente complexo, pois utilizam-se métodos para adequar ao modelo da máquina para a frequência desejada, através da transformada $\alpha\beta$ ou dq apresentada, contanto que ambos os circuitos do estator e do rotor sejam representados com uma mesma frequência.

Figura 6: Circuito equivalente por fase da máquina com diferentes frequências no estator e no rotor.



Fonte: (ABAD, LÓPEZ, *et al.*, 2011)

onde, V_s é a tensão de alimentação do estator; V_r' é a tensão de alimentação do rotor; I_s é corrente induzida no estator; I_r' é a corrente induzida no rotor; E_s é a *fem* induzida no estator; E'_{rs} é a *fem* induzida no rotor, N_s é o número de enrolamentos no estator por fase e N_r é o número de enrolados no rotor por fase.

Assim, utilizando o modelo em regime dinâmico da máquina, representado pelas equações de (30) a (34), determina-se o modelo em regime permanente da máquina, sabendo que nesse caso da máquina com o rotor gaiola de esquilo os terminais do rotor são curto-circuitadas, logo, as tensões rotóricas são iguais e nulas, onde $v_{r1} = v_{r2} = v_{r3} = 0$ e, conseqüentemente, $v_{ro} = v_{rd} = v_{rq} = 0$.

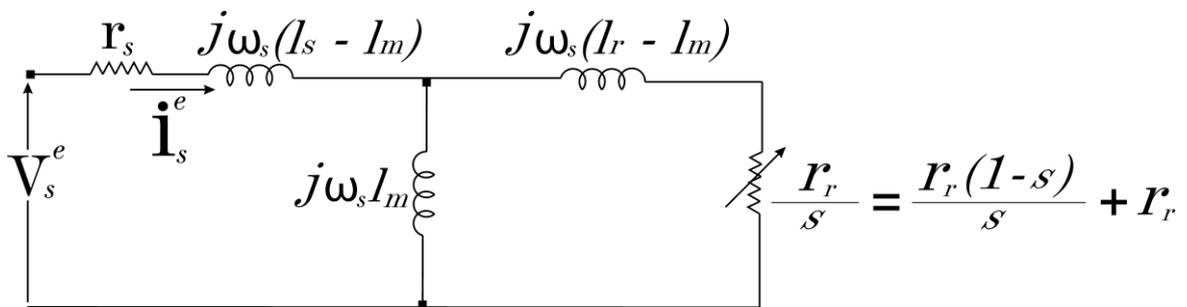
Em regime permanente, todas as derivadas são nulas e considera-se o referencial síncrono (estacionário) $\omega_g = \omega_s$, então:

$$\mathbf{v}_s = R_s \mathbf{i}_s + j\omega_s (l_s \mathbf{i}_s + l_m \mathbf{i}_r) \quad (40)$$

$$0 = \frac{R_r}{s} \mathbf{i}_r + \frac{j(\omega_s - \omega_r)}{s} (l_r \mathbf{i}_r + l_m \mathbf{i}_s) \quad (41)$$

De acordo com as equações (40) e (41) o circuito equivalente por fase da máquina em regime permanente conforme Figura 7, despreza as perdas ôhmicas no núcleo magnético.

Figura 7: Circuito equivalente da máquina de indução gaiola de esquilo



Fonte: Elaboração Própria.

É importante lembrar que as máquinas trifásicas estão ligadas em Y, de modo que as correntes e tensões sejam sempre expressa por valores de fase. Nesse caso, fica subtendido que as tensões e correntes nas demais fases podem ser obtidas por meio de um simples deslocamento adequado de fase ($\pm 120^\circ$) (FITZGERALD; KINGSLEY e UMANS, 2014).

De forma a simplificar a escrita das equações da máquina, fez-se as seguintes substituições: $X_s = j\omega_s (l_s - l_m)$ (reatância de dispersão do estator), $X_r = j\omega_s (l_r - l_m)$ (reatância de dispersão do rotor) e $X_m = j\omega_s l_m$ (reatância de magnetização). A partir do circuito equivalente, determina-se a potência total P_g , transferida através do entreferro do estator e as perdas no rotor P_r que podem ser calculadas a partir de $I_r^2 R_r$. A potência eletromagnética P_{mec} desenvolvida pela máquina é o decremento entre a potência do rotor e a potência do entreferro.

$$P_g = 3I_r^2 \frac{R_r}{s} \quad (42)$$

$$P_r = 3I_r^2 R_r \quad (43)$$

$$P_{mec} = 3I_r^2 R_r \frac{(1-s)}{s} = (1-s)P_g \quad (44)$$

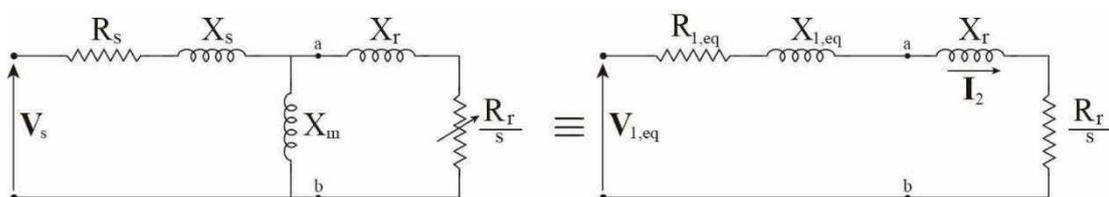
A partir da *fem* induzida nos enrolamentos do estator, quando for fornecida corrente à carga ou sistema elétrico a qual a máquina de indução de dupla alimentação está conectada, haverá o aparecimento de um conjugado eletromagnético que se oporá ao conjugado mecânico entregue ao eixo do rotor. Assim, o conjugado eletromecânico será igual ao conjugado mecânico quando a potência mecânica corresponder a potência mecânica líquida, já tendo sido descontadas as perdas mecânicas por atrito e ventilação (JUNIOR, 2006).

O conjugado eletromecânico T_{mec} é obtido quando a potência mecânica é igual ao produto do conjugado pela velocidade mecânica (45).

$$T_{mec} = \frac{P_{mec}}{\omega_m} = \frac{P_g}{\omega_s} \quad (45)$$

Com o objetivo de obter as relações de conjugado e potência, e assim poder determinar a curva conjugado versus escorregamento, utiliza-se o Teorema de Thévenin, para simplificar o circuito equivalente ilustrado na Figura 7. O teorema de Thévenin substitui o circuito visto dos terminais a e b por uma única fonte de tensão complexa em série com uma única impedância.

Figura 8: Circuito equivalente da máquina de indução gaiola de esquilo e seu equivalente Thévenin



Fonte: Elaboração Própria.

Ao calcular o equivalente Thévenin, obtêm-se as equações (46) a (49), correspondentes à tensão, impedância resultante e as correntes I_s e I_r , respectivamente.

$$V_{1eq} = \frac{V_s/fase jX_m}{(R_s + j(X_s + X_m))} \quad (46)$$

$$Z_{1eq} = \frac{jX_m(R_s + jX_s)}{(R_s + j(X_s + X_m))} \quad (47)$$

$$I_s = \frac{V_{1eq}}{(Z_{1eq} + jX_2 + \frac{R_2}{s})} \quad (48)$$

$$I_r = \frac{V_{1eq}}{(Z_{1eq} + jX_2 + \frac{R_2}{s})} \quad (49)$$

2.4 MÁQUINA DE INDUÇÃO COM DUPLA ALIMENTAÇÃO

A máquina de dupla alimentação pode operar com um grau de liberdade maior do que a máquina de indução gaiola de esquilo, uma vez que o rotor é alimentado por uma fonte de tensão. Efetivamente, cabe perceber que a amplitude e a frequência desta fonte necessitam ser controlada de forma adequada aos requisitos/propósitos de operação da máquina.

A diferença então entre a modelagem de uma máquina de indução gaiola de esquilo e a modelagem de uma máquina de indução duplamente alimentada está relacionada ao rotor. A primeira tem seu rotor curto-circuitado, enquanto que a segunda utiliza rotor bobinado (DE JESUS e CASTRO, 2008).

A configuração da máquina é caracterizada pela alimentação simultânea dos circuitos do rotor e do estator. Devido às interações entre os dois fluxos, a velocidade angular do eixo pode ser alterada em função da potência absorvida ou fornecida ao circuito rotórico.

Assim como na máquina gaiola de esquilo, para haver conjugado no eixo do rotor, deve haver um movimento relativo entre o rotor e o campo girante no entreferro, para a máquina com dupla alimentação isto também ocorre, traduzido na medida de

escorregamento. Este movimento relativo é compensado mediante aplicações das tensões trifásicas no enrolamento do rotor com a frequência do escorregamento, possibilitando ao gerador operar tanto na velocidade supersíncrona, quanto na velocidade subsíncrona (JUNIOR, 2006).

Neste contexto, identifica-se a necessidade de se dispor de um refinamento no que se refere a caracterização do perfil de operação da máquina. Em outras palavras, para que se possa explorar o funcionamento da máquina, é necessário caracterizá-la quanto a sua capacidade de operação.

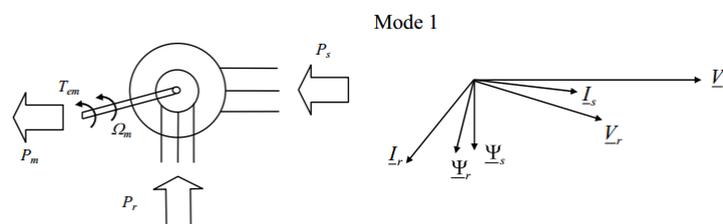
2.4.1 MODOS DE OPERAÇÕES DA MÁQUINA DE DUPLA ALIMENTAÇÃO

A máquina de dupla alimentação pode operar em quatro regiões nos quais dois são os modos convencionais, como motor e gerador, e dois não convencionais, no qual é necessário inserir potência ativa do rotor. As Figuras 9, 10, 11 e 12, mostram a relação das potências da máquina e o torque eletromagnético.

Modo 1:

- A máquina funciona como motor supersíncrono;
- A velocidade de rotação é maior que a velocidade síncrona;
- A potência de escorregamento é consumida pelos enrolamentos do rotor;
- A tensão imposta pelo conversor de potência ao circuito do rotor, tem a sequência de fases invertida em relação a tensão gerada pelo estator.

Figura 9: Representação do fluxo de potência ativa e diagrama de fasores, ($Q_s > 0$) da DFIG no modo 1



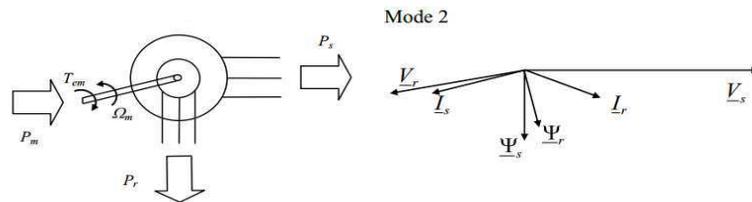
Fonte: (ABAD, LÓPEZ, *et al.*, 2011)

Modo 2:

- A máquina funciona como gerador supersíncrono (convencional);

- A velocidade de rotação é maior que a velocidade síncrona;
- A potência de escorregamento é fornecida aos enrolamentos do rotor;
- A tensão imposta pelo conversor de potência ao circuito do rotor, tem a sequência de fases invertida em relação a tensão gerada pelo estator.

Figura 10: Representação do fluxo de potência ativa e diagrama de fasores, ($Q_s > 0$) da DFIG no modo 2

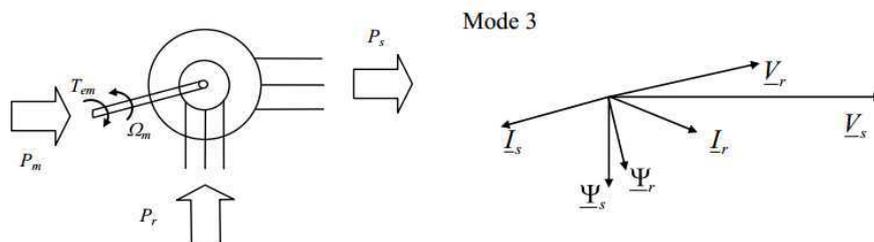


Fonte: (ABAD, LÓPEZ, et al., 2011)

Modo 3:

- A máquina funciona como gerador subsíncrono;
- A velocidade de rotação é menor que a velocidade síncrona;
- A potência de escorregamento é consumida pelos enrolamentos do rotor;
- A tensão imposta pelo conversor de potência ao circuito do rotor, tem a mesma sequência de fases da tensão gerada pelo estator.

Figura 11: Representação do fluxo de potência ativa e diagrama de fasores, ($Q_s > 0$) da DFIG no modo 3



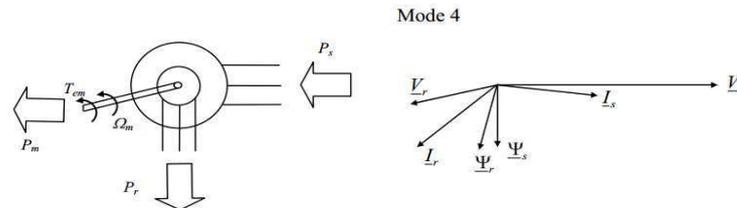
Fonte: (ABAD, LÓPEZ, et al., 2011)

Modo 4:

- A máquina funciona como motor subsíncrono (convencional);
- A velocidade de rotação é menor que a velocidade síncrona;
- A potência de escorregamento é fornecida pelos enrolamentos do rotor.;

- A tensão imposta pelo conversor de potência ao circuito do rotor, tem a mesma sequência de fases da tensão gerada pelo estator.

Figura 12: Representação do fluxo de potência ativa e diagrama de fasores, ($Q_s > 0$) da DFIG no modo 4



Fonte: (ABAD, LÓPEZ, *et al.*, 2011)

Nos casos em que o motor e o gerador operam na sua região não convencional, é necessário garantir a operação nessa região, para isso a máquina fornece potência ao circuito do rotor. Para a operação como motor, o sistema elétrico fornece potência elétrica à máquina que a converte em potência mecânica no eixo. E para gerador, o sistema elétrico fornece potência mecânica à máquina que a converte em potência elétrica.

Segue na Tabela 1, um resumo das quatro regiões, ressaltando os pontos de interesse como escorregamento, torque, potência mecânica, potência total do estator e rotor.

Tabela 1: Regiões de operação da DFIG

Variáveis de interesse da máquina	1º Modo (Motor supersíncrono)	2º Modo (Gerador convencional)	3º Modo (Gerador subsíncrono)	4º Modo (Motor convencional)
Escorregamento	$s < 0$	$s < 0$	$0 < s < 1$	$0 < s < 1$
Torque mecânico	$T_{em} > 0$	$T_{em} < 0$	$T_{em} < 0$	$T_{em} > 0$
Potência mecânica	$P_m > 0$	$P_m < 0$	$P_m < 0$	$P_m > 0$
Potência total do estator	$P_s > 0$	$P_s < 0$	$P_s < 0$	$P_s > 0$
Potência total do rotor	$P_r > 0$	$P_r < 0$	$P_r > 0$	$P_r < 0$

Fonte: Elaboração Própria.

2.4.2 ANÁLISE EM REGIME PERMANENTE

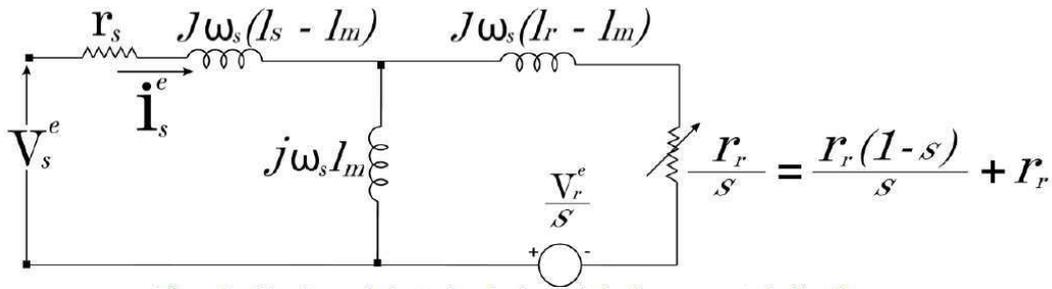
Similarmente ao que foi feito com a máquina de indução gaiola de esquilo, determina-se o modelo em regime permanente a partir das seguintes equações:

$$\mathbf{v}_s = R_s \mathbf{i}_s + j\omega_s (l_s \mathbf{i}_s + l_m \mathbf{i}_r) \quad (50)$$

$$\frac{v_r}{s} = \frac{R_r}{s} \mathbf{i}_r + \frac{j(\omega_s - \omega_m)}{s} (l_r \mathbf{i}_r + l_m \mathbf{i}_s), \quad (51)$$

D acordo com as equações (50) e (51), o circuito equivalente por fase da máquina em regime permanente é apresentado na Figura 13, desprezando as perdas ôhmicas no núcleo magnético da máquina.

Figura 13: Circuito equivalente da máquina de indução de dupla alimentação



Fonte: Elaboração Própria.

Realizaram-se as seguintes substituições: $X_s = j\omega_s (l_s - l_m)$, $X_r = j\omega_s (l_r - l_m)$ e $X_m = j\omega_s l_m$. A máquina de dupla alimentação apresenta vários problemas de instabilidade e por isso é utilizada a malha fechada, porém para analisar o seu comportamento optou-se por estudá-la em malha aberta de forma a entender o seu funcionamento visto a partir de uma ótica de causa e efeito.

A máquina de dupla alimentação é alimentada tanto pelo estator quanto pelo rotor. Ao variar a tensão do rotor, a máquina pode operar em diferentes pontos de operações. No geral, o estator é conectado diretamente à rede, o que significa que a tensão do estator é fixa e a tensão do rotor é suprida por conversor eletrônico de potência bidirecional que permite a modificação da amplitude da tensão do rotor, frequência e deslocamento de fase.

Assim, como feito para a gaiola de esquilo, utiliza-se o teorema de Thévenin para simplificar o circuito da Figura 13 e determinar as grandezas da máquina.

Dessa forma, obtém-se as equações (52) a (55), correspondentes à tensão equivalente de Thévenin, a impedância resultante e as correntes I_s e I_r , respectivamente.

$$V_{1eq} = \frac{V_s / \text{fase} jX_m}{(R_s + j(X_s + X_m))} \quad (52)$$

$$Z_{1eq} = \frac{jX_m(R_s + jX_s)}{(R_s + j(X_s + X_m))} \quad (53)$$

$$I_s = \frac{V_{1eq} - \frac{V_r}{s}}{(Z_{1eq} + jX_2 + \frac{R_2}{s})} \quad (54)$$

$$I_r = \frac{V_{1eq} - \frac{V_r}{s}}{(Z_{1eq} + jX_2 + \frac{R_2}{s})} \quad (55)$$

A partir das grandezas encontradas, determina-se as expressões das potências ativas e reativas do estator e do rotor, respectivamente.

$$P_s = 3\text{Re}\{V_s I_s^*\} \quad (56)$$

$$P_r = 3\text{Re}\{V_r I_r^*\} \quad (57)$$

$$Q_s = 3\text{Im}\{V_s I_s^*\} \quad (58)$$

$$Q_r = 3\text{Im}\{V_r I_r^*\} \quad (59)$$

Diferentemente da máquina de indução gaiola de esquilo, a máquina de dupla alimentação tem uma fonte de tensão controlada nos terminais do rotor, sendo necessário encontrar uma relação direta entre o torque e a tensão de alimentação do rotor, assim como a velocidade angular do rotor e o deslocamento de fase. Para isso, seguiu-se o procedimento utilizado por (ABAD, LÓPEZ, *et al.*, 2011), a partir das equações determinadas na modelagem da máquina.

$$T_{em} = 3 \frac{L_m}{\sigma L_r L_s} p F^2 \{ C_s C_r |V_s| |V_r| \sin \varepsilon + A_r C_r |V_s^2| \sin B_r - A_s C_s |V_r^2| \sin B_s - A_s A_r |V_s| |V_r| \sin(\varepsilon + B_s - B_r) \} \quad (60)$$

onde, $\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}$ é o coeficiente de dispersão, e

$$F = \sqrt{F_1^2 + F_2^2}, f = \text{atan}\left(-\frac{F_1}{F_2}\right) \quad (61)$$

$$F_1 = \frac{K_1}{K_1^2 + K_2^2}, F_2 = \frac{K_2}{K_1^2 + K_2^2} \quad (62)$$

$$K_1 = \frac{R_s R_r}{\sigma L_s L_r} - \omega_s \omega_r, \quad K_2 = \frac{\omega_s R_r}{\sigma L_r} + \frac{\omega_r R_s}{\sigma L_s} \quad (63)$$

$$C_s = \frac{R_s L_m}{\sigma L_s L_r}, \quad C_r = \frac{R_r L_m}{\sigma L_s L_r} \quad (64)$$

$$A_s = \sqrt{\left(\frac{R_s}{\sigma L_s}\right)^2 + \omega_s^2}, \quad B_s = \text{atan}\left(\frac{\sigma L_s \omega_s}{R_s}\right) \quad (65)$$

$$A_r = \sqrt{\left(\frac{R_r}{\sigma L_r}\right)^2 + \omega_r^2}, \quad B_r = \text{atan}\left(\frac{\sigma L_r \omega_r}{R_r}\right) \quad (66)$$

2.5 CARACTERÍSTICAS DOS MÁQUINA ELÉTRICAS TRIFÁSICAS

Esta seção define as características de funcionamento das máquinas elétricas, que ajudam a entender os principais fatores que estão presentes na conversão eletromecânica de energia. Essas características são: fator de potência; rendimento e perdas.

2.5.1 FATOR DE POTÊNCIA

O fator de potência é a relação entre a potência ativa consumida e a potência aparente. A eficiência do uso de energia indica quanto de energia foi utilizada para realizar trabalho. Um fator de potência alto indica uma alta eficiência, já um fator de potência baixo indica uma baixa eficiência.

2.5.2 RENDIMENTO

Rendimento é a relação entre a potência ativa fornecida pela máquina e a potência ativa solicitada pela máquina à rede (FRANCHI, 2007). Pode ser expresso pelas seguintes equações:

$$\eta = \frac{P_{mec}}{P_s + P_r}, P_{mec} > 0 \quad (67)$$

$$\eta = \frac{P_s + P_r}{P_{mec}}, P_{mec} < 0 \quad (68)$$

2.5.3 PERDAS NA MÁQUINA

As perdas podem ser divididas em quatro categorias: perdas elétricas, perdas magnéticas, perdas mecânicas e perdas parasitas.

As perdas elétricas aumentam com a carga aplicada ao motor, já as perdas magnéticas variam com a densidade do fluxo e a frequência, que ocorrem nas lâminas de ferro do estator e do rotor em virtude do efeito de histerese e das correntes induzidas. As mecânicas ocorrem em razão da fricção dos enrolamentos e as perdas parasitas são resultados das fugas do fluxo, distribuição de corrente não uniforme, imperfeições mecânicas nas aberturas para escoamento do ar e irregularidades na densidade do fluxo do ar ao ser escoado pelas aberturas (FRANCHI, 2007).

2.6 ESTRATÉGIAS DE CONTROLE EM MALHA ABERTA

As estratégias de controle em malha aberta, são importantes para que seja possível visualizar o comportamento das máquinas, impondo condições e observando o efeito das mesmas no sistema. Dessa forma, é possível observar os fatores que influenciam positivamente e negativamente a operação, e qual é a melhor forma de se trabalhar para que seja possível obter um maior rendimento, com um mínimo de perdas.

Existem diversos tipos de controles em malha aberta a serem explorados nas máquinas, porém devido a extensividade do projeto, optou-se por apenas dois: controle V/Hz para a máquina de indução gaiola de esquilo e o controle em malha aberta por meio da variação da amplitude e/ou fase da tensão do rotor para a máquina de dupla alimentação.

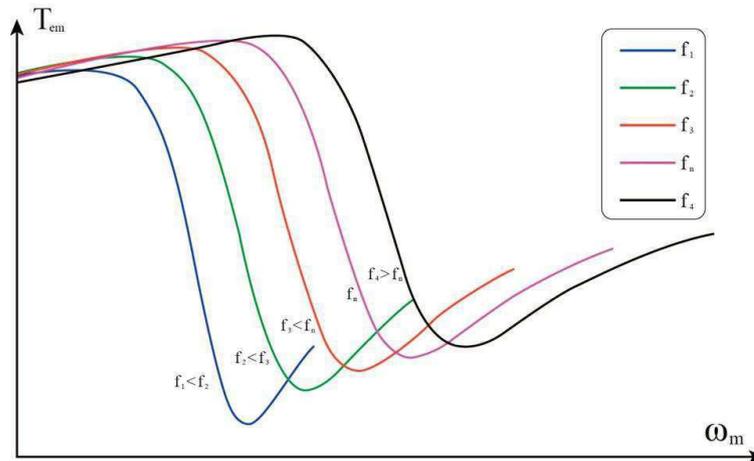
2.6.1 CONTROLE V/Hz

Para a máquina de indução, os pontos de operação em diferentes frequências e em regime permanente podem ser obtidos considerando a razão V/Hz constante para a tensão de alimentação do estator (dadas as condições nominais). Assim, uma família de curvas pode ser traçada considerando toda a faixa de operação de interesse.

A alteração da frequência elétrica do estator é um método de controle de velocidade e geralmente é acompanhada pela variação da tensão de terminal do estator para que não ocorra saturação magnética e por essa razão, o controle é conhecido por V/Hz (BIM, 2014).

Se a relação entre a tensão e a frequência for mantida constante, o fluxo permanecerá constante. Entretanto, em baixas frequências, o fluxo do entreferro é reduzido devido à queda de impedância do estator, tendo a tensão de ser aumentada para manter o nível de torque. (RASHID, 1999). Para uma dada demanda de torque, a velocidade pode ser controlada variando-se a frequência e a tensão. Assim, pode-se ajustar o escorregamento a um valor desejado para aumentar a eficiência de conversão e consequentemente fornecer um alto rendimento.

Figura 14: Velocidade em função do torque mantendo a relação V/Hz constante.



Fonte: Elaboração Própria.

2.6.2 VARIAÇÃO DA TENSÃO E FASE ROTÓRICA

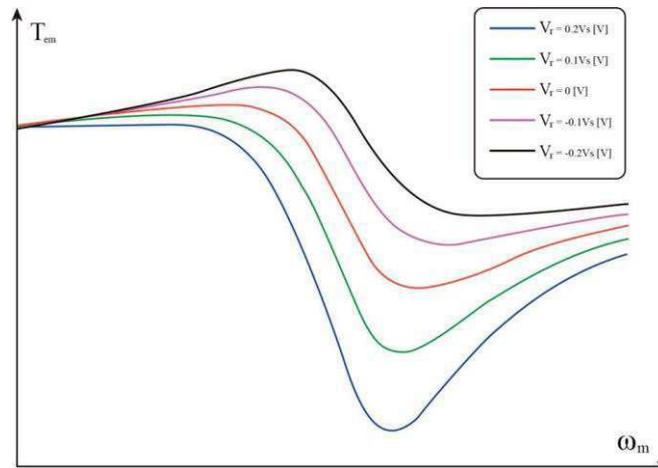
Se é desejado controlar a velocidade da máquina, a frequência angular da tensão do rotor deve ser modificada de acordo com a variação da velocidade, assim para conseguir uma certa troca de energia com a rede ou, por exemplo, um torque específico, a amplitude da tensão do rotor e a fase também devem ser selecionadas de forma a obter o ponto de operação desejado (ABAD, LÓPEZ, *et al.*, 2011).

A tensão do rotor pode ser modificada independente da variação da amplitude, frequência e deslocamento de fase. Todas as amplitudes da máquina como torque, corrente e potência são avaliadas quando a máquina for acionada por tensões diferentes em malha aberta.

Para a análise em regime permanente, são injetadas tensões rotóricas, definidas proporcionalmente a tensão do estator, e são modificadas de modo observar o efeito da variação no torque eletromecânico nas potências ativas e reativas da máquina. Também para a análise da máquina, varia-se a fase da tensão rotórica e observa o efeito da mesma sobre as grandezas da máquina.

A Figura 15, mostra a curva do torque em função da velocidade mecânica em diferentes valores de amplitude da tensão rotórica, mantendo a sua fase constante. É nítido que a máquina pode operar nos quatro modos de operação.

Figura 15: Velocidade em função do Torque variando a tensão rotórica



Fonte: Elaboração Própria.

2.7 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

Os ensaios de caracterização de uma máquina podem atender a diferentes propósitos. De uma forma geral, a obtenção de uma representação na forma de circuito elétrico que permita avaliar o funcionamento da máquina sem a necessidade de levar a uma bancada de testes.

Tendo em vista que o funcionamento da máquina possa ser entendido a partir de uma plataforma virtual, foi utilizando as máquinas que tem seus modelos definidos na biblioteca do *Simulink (SimPowerSystem)*, de forma que o modelo pudesse vir a ser validado a partir das grandezas elétricas, considerando pontos de operações específicos da máquina.

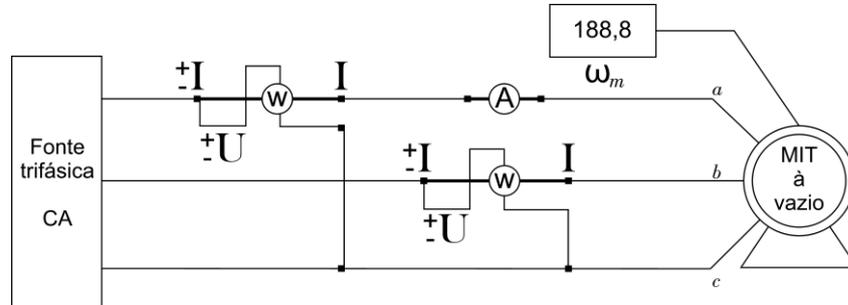
Para os cálculos dos parâmetros das máquinas de indução, foram realizados os ensaios a vazio e rotor bloqueado.

2.7.1 ENSAIO A VAZIO

O ensaio a vazio, ou em circuito aberto de um motor de indução, fornece informações em relação à corrente de excitação e às perdas a vazio, e é realizado aplicando a tensão nominal nos enrolamentos do estator, deixando a máquina girar sem carga (FITZGERALD; KINGSLEY e UMANS, 2014).

Para a realização desse ensaio, fizeram-se as medições de acordo com a Figura 16, que mostra o esquema de ligação.

Figura 16: Esquema elétrico para o ensaio a vazio.



Fonte: Elaboração Própria.

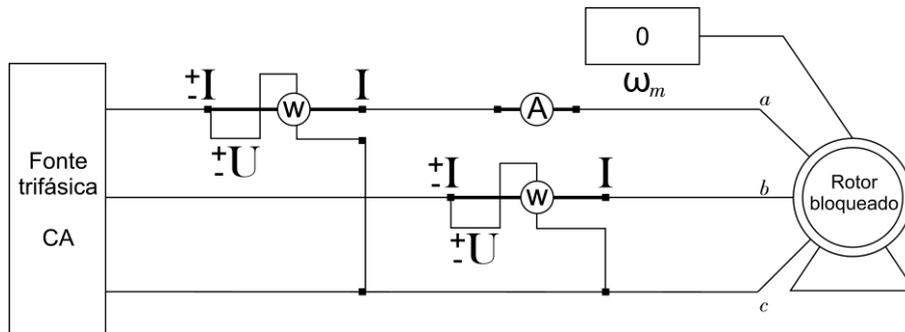
É inserida na entrada a velocidade mecânica rotacional Ω_m , que será igual à velocidade síncrona a f_s , portanto, $\Omega_m = \omega_s/p$. Aplicou-se a tensão nominal à frequência na fonte de tensão trifásica. Assim, serão obtidos os valores de tensão de fase a vazio: $V_{1,vz} = \frac{V_s}{\sqrt{3}}$ V, corrente de linha a vazio $I_{1,vz}$ e potência elétrica trifásica total de entrada a vazio P_{vz} .

2.7.2 ENSAIO A ROTOR BLOQUEADO

O ensaio de rotor bloqueado de um motor de indução fornece informações sobre as impedâncias de dispersão. O rotor é bloqueado de modo que não possa girar, e então $s_{bl} = 1$ (FITZGERALD; KINGSLEY e UMANS, 2014).

Primeiramente calcula-se a corrente nominal, inserindo na entrada a velocidade, a tensão e a frequência nominal da máquina. Após esse procedimento, realiza-se o ensaio, de acordo com a Figura 17.

Figura 17: Esquema elétrico para o rotor bloqueado.



Fonte: Elaboração Própria.

É inserida na entrada a velocidade mecânica ω_m , igual a 0. É necessário aplicar uma tensão de 10% a 20% da tensão nominal de modo a ter no máximo a corrente nominal. Este baixo valor de tensão é justificado pois, como o rotor está travado, a velocidade do fluxo vista do rotor é igual a velocidade do fluxo vista do estator.

Para máquinas com potência menor que 25HP, utiliza-se a frequência nominal, pois são igualmente aplicáveis às condições de operação de partida e de carga nominal, já para potência maior que 25HP, a norma IEEE 112 sugere uma frequência de ensaio de rotor bloqueado de 25% da frequência nominal, com a expectativa de que a impedância do rotor nessa frequência não seja muito diferente daquela para escorregamentos pequenos (FITZGERALD; KINGSLEY e UMANS, 2014).

Assim, são obtidos os valores de tensão de fase a rotor bloqueado: $V_{1,bl}$, corrente de linha a rotor bloqueado $I_{1,bl} = I_{nominal}$ e potência elétrica trifásica total de entrada a rotor bloqueado P_{bl} .

2.7.3 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS

Após as medições, calculam-se os parâmetros da máquina, sabendo que:

$$S_{vz} = 3V_{1,vz}I_{1,vz} \quad (69)$$

$$Q_{vz} = \sqrt{S_{vz}^2 - P_{vz}^2} = \sqrt{(3V_{1,vz}I_{1,vz})^2 - P_{vz}^2} \quad (70)$$

$$X_{vz} = \frac{Q_{vz}}{3I_{vz}^2} \quad (71)$$

Da mesma forma, procede-se para o ensaio a rotor bloqueado:

$$X_{bl} = \frac{Q_{bl}}{3I_{bl}^2} \quad (72)$$

A resistência de rotor bloqueado pode ser calculada a partir da potência de entrada de rotor:

$$R_{bl} = \frac{P_{bl}}{3I_{bl}^2} \quad (73)$$

A partir das análises obtidas no livro de (FITZGERALD; KINGSLEY e UMANS, 2014), têm-se:

$$X_2 = (X_{bl} - X_s) \frac{(X_{vz} - X_s)}{(X_{vz} - X_{bl})} \quad (74)$$

$$X_m = X_{vz} - X_s \quad (75)$$

$$R_r = (R_{bl} - R_s) \frac{(X_r - X_m)}{X_m}, \quad (76)$$

A norma IEEE 112 recomenda a distribuição empírica conforme Tabela 2. Se a classe do motor for desconhecida, assume-se que X_s e X_r são iguais.

Tabela 2: Distribuição empírica de reatâncias de dispersão em motores de indução

Classe de motor	Descrição	Fração de ($X_s + X_r$)	
		X_s	X_r
A	Conjugado de partida normal, corrente de partida normal	0,5	0,5
B	Conjugado de partida normal, corrente de partida baixa	0,5	0,6
C	Conjugado de partida elevado, corrente de partida baixo	0,3	0,7
D	Conjugado de partida elevado, escorregamento elevado	0,5	0,5
Rotor bobinado	Desempenho vária segundo a resistência do rotor	0,5	0,5

Fonte: Norma IEEE 112

Utilizou-se, para essa pesquisa, o valor de R_s fornecido pelo *Simulink*, que na prática é calculado aplicando uma tensão contínua ao enrolamento do estator. Dessa forma, são obtidos os parâmetros da máquina, em que a partir deles será possível a construção do circuito equivalente e o estudo do comportamento da máquina.

3 INTERFACE GRÁFICA

Para essa pesquisa, foi desenvolvida uma interface gráfica para análise das máquinas elétricas de indução, denominado **ANAGRIM** (*GR*aphical *AN*alysis of *IN*duction *M*achine). Essa plataforma de trabalho permite ao usuário realizar o estudo do modelo em regime permanente e dinâmico das máquinas estudadas, com o desígnio de entender o seu funcionamento diante dos vários pontos de operação, utilizando como o recurso didático o software MATLAB e a interface MATLAB® GUI.

3.1 INTERFACE MATLAB® GUI.

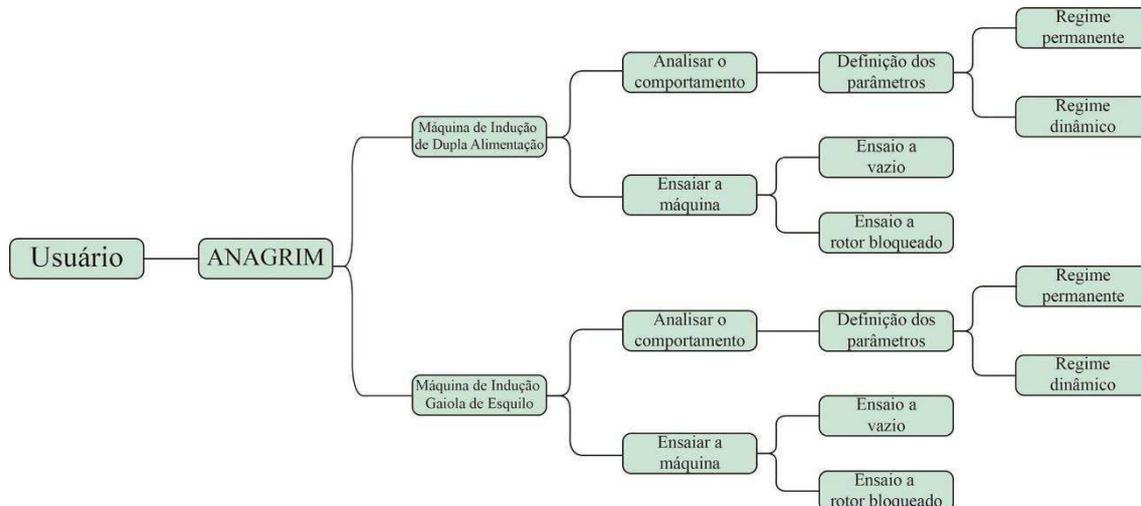
O MATLAB é um software de análise e visualização de dados, desenvolvido para a resolução de cálculo numérico. A resolução de muitos problemas em um curto intervalo de tempo, devido sua praticidade, o MATLAB vem sendo cada vez mais usado no meio tecnológico e científico. Em conjunto com o MATLAB, foi utilizado o GUIDE (*Graphical User Interface Development Environment*), no qual utiliza um sistema interativo para a análise e visualização de dados, criando, assim, uma “máscara” para os códigos realizados.

3.2 DESCRIÇÃO GERAL DA INTERFACE

O **ANAGRIM** foi desenvolvido com o intuito de facilitar a visualização gráfica das grandezas da máquina no regime permanente e no regime dinâmico, e também poder realizar manipulação de dados de forma interativa e didática.

Para desenvolver a interface gráfica, foi necessário um planejamento para que se pudesse melhor visualizar o entendimento do aplicativo. A Figura 18 ilustra a estrutura do **ANAGRIM**.

Figura 18: Estrutura do ANAGRIM



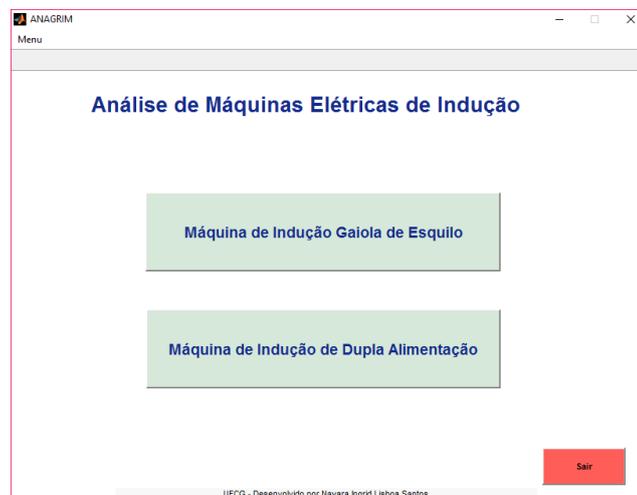
Fonte: Elaboração Própria.

O **ANAGRIM** é composto por diferentes janelas, em que cada tela terá uma funcionalidade principal, que atende aos propósitos a serem alcançados. Serão apresentadas nos tópicos a seguir as janelas desenvolvidas e suas funcionalidades, e em cada uma, há um código que contém a comunicação entre as funções criadas no MATLAB e no GUIDE.

3.2.1 JANELA INICIAL

Selecionando a opção **Run**, obtém-se a Janela Inicial do **ANAGRIM**.

Figura 19: Tela principal do ANAGRIM.

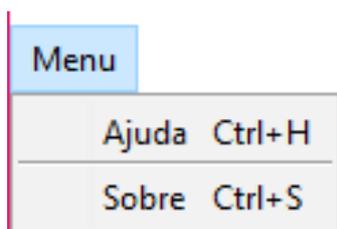


Fonte: Elaboração Própria.

A janela inicial é composta por um menu com duas opções: **Máquina de indução Gaiola de Esquilo** e **Máquina de Indução de Dupla Alimentação**. Ao selecionar qualquer uma das opções abrirá uma nova janela contendo opções que permitem ao usuário trabalhar com ambas as máquinas.

Ainda nessa primeira janela, no canto superior esquerdo, contém um Menu que disponibiliza duas opções: **Ajuda** e **Sobre**.

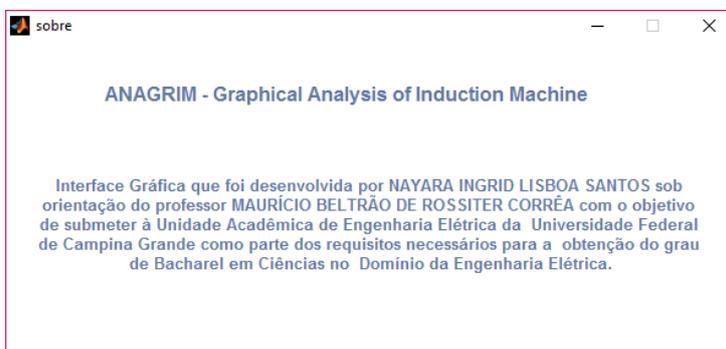
Figura 20: Menu da janela inicial



Fonte: Elaboração Própria.

Ao selecionar a opção **Ajuda (Ctrl + H)**, será aberto um arquivo em *pdf* contendo o manual do **ANAGRIM** e, ao selecionar a opção **Sobre (Ctrl + S)**, será aberta uma janela informando os dados sobre a interface, como mostra a Figura 21.

Figura 21: Janela da opção Sobre



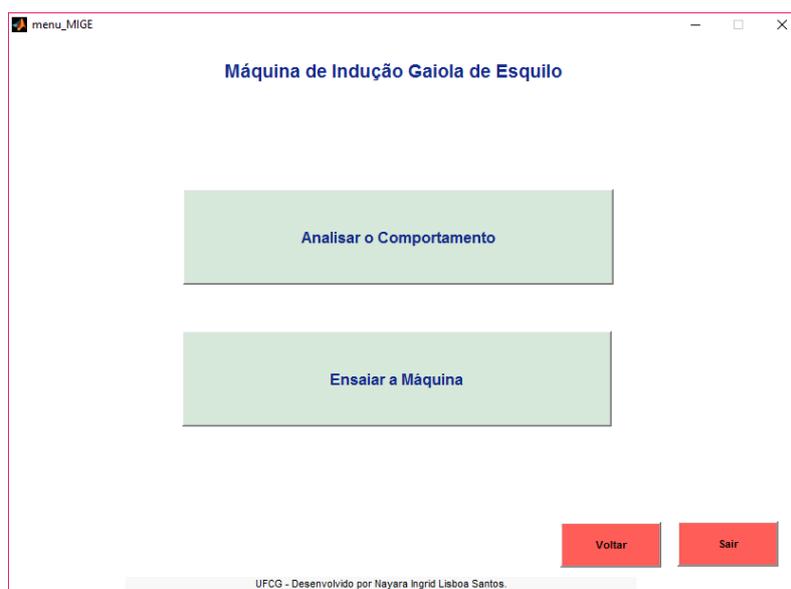
Fonte: Elaboração Própria.

Essa opção estará disponível somente na janela inicial. O fechamento imediato do **ANAGRIM** estará disponível ao apertar a opção **Sair**, porém esta opção estará contida em todas as outras janelas.

3.2.2 JANELA SECUNDÁRIA

A janela secundária é uma tela que será aberta ao selecionar qualquer uma das opções apresentadas na janela inicial e ela apresentará outras opções para se encaminhar à análise da máquina escolhida. Na Figura 22, abaixo, apresenta-se a janela secundária para a máquina escolhida, sendo identificada pelo título que será específico.

Figura 22: Janela secundária da máquina de indução gaiola de esquilo



Fonte: Elaboração Própria.

A janela secundária tem duas opções principais: **Analisar o Comportamento** e **Ensaiar a Máquina**. A primeira opção permite o estudo na máquina em regime permanente ou dinâmico, já a segunda permite realizar os ensaios de laboratório da máquina. Nessa janela, também aparece a opção **Voltar** além da opção **Sair**, mencionada na seção anterior. Essa opção faz com que a janela atual seja fechada e a janela anterior (inicial) se abra.

3.2.3 JANELA: ANALISAR O COMPORTAMENTO

Da mesma forma da janela secundária, essa janela abre para ambas as máquinas como descrito na Figura 22, e nela contém os painéis necessários para informar os parâmetros elétricos ou mecânicos, assim como escolher o regime que se deseja visualizar.

Figura 23: Janela: Analisar o comportamento



Fonte: Elaboração Própria.

Essa janela é composta por três painéis: *Parâmetros elétricos*, *Parâmetros mecânicos* e *Regime*. No painel parâmetros elétricos e mecânicos, encontra-se um subpainel chamado *Tipo de entrada*, que permite selecionar a opção desejada de inserção dos parâmetros elétricos ou mecânicos da máquina: **Manual** e **Arquivo**.

Figura 24: Tipo de entrada

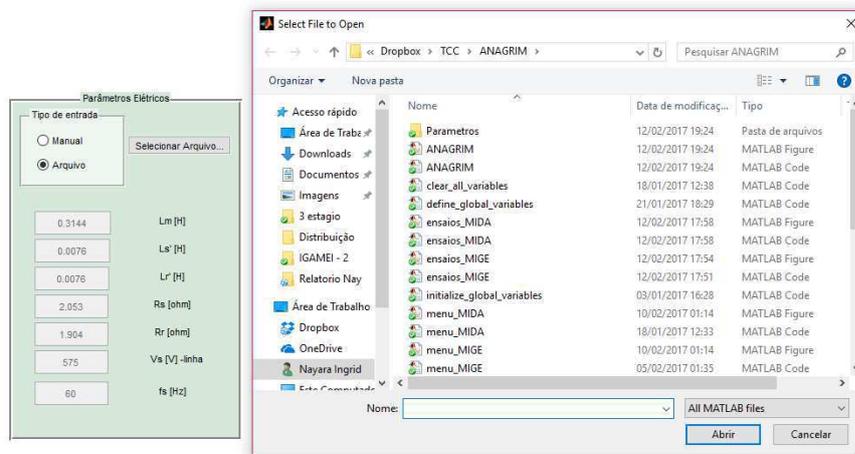


Fonte: Elaboração Própria.

Ao selecionar a opção manual, o usuário será capaz de digitar os valores desejados dos parâmetros, lembrando que o **ANAGRIM** já oferece valores *default*, que são valores obtidos a partir do bloco da máquina de indução do *Simulink*.

Inicialmente, o botão **Selecionar Arquivo** está desabilitado, já que a opção selecionada é **Manual**, caso o usuário deseje buscar ou inserir outros parâmetros da máquina via arquivo, ele selecionará a opção **Arquivo** da qual abrirá uma janela que permita a seleção desses parâmetros, como mostra a Figura 25.

Figura 25: Selecionar Arquivos

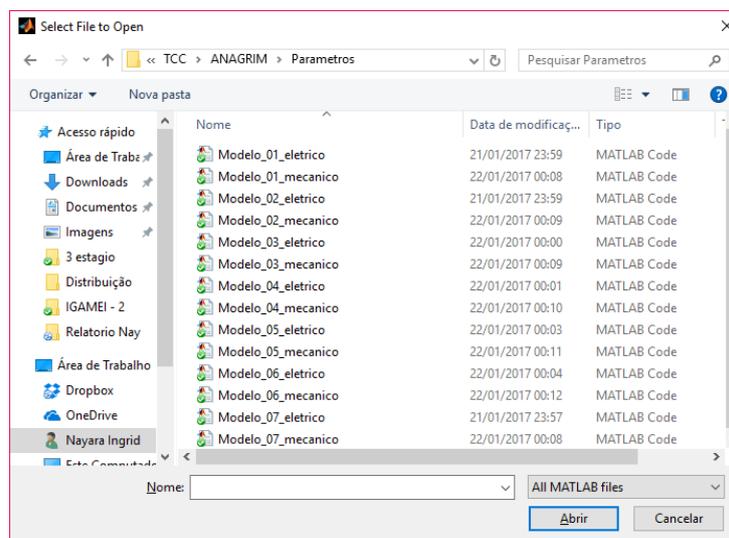


Fonte: Elaboração Própria.

Observe que, ao selecionar a opção **Arquivo**, o botão **Selecionar Arquivo** estará ativado, e as caixas de texto, onde era possível a inserção de valores, estará desabilitada, e então, ao abrir a janela *Select File to Open*, o usuário poderá direcionar-se para uma pasta específica em que estará o **arquivo .m** com os parâmetros elétricos ou mecânicos.

O **ANAGRIM** disponibiliza sete tipos de modelos de máquinas diferentes que o usuário poderá escolher para realizar as simulações. Para isso basta que o usuário chame a pasta **Parâmetros** e selecione o modelo desejado, lembrando que todos esses modelos foram retirados da biblioteca fornecida pelo *Simulink*, para a máquina de indução.

Figura 26: Seleção de parâmetros



Fonte: Elaboração Própria.

Os valores e informações acerca dos parâmetros elétricos destes modelos são apresentados na Tabela 3 e acerca dos parâmetros mecânicos, na Tabela 4:

Tabela 3: Valores e informações que correspondem aos parâmetros elétricos dos 7 modelos fornecidos pelo ANAGRIM

Parâmetros Elétricos	Definição	1° Modelo	2° Modelo	3° Modelo	4° Modelo	5° Modelo	6° Modelo	7° Modelo
L_m [H]	Indutância mútua	0,2037	0,1486	0,07614	0,03039	0,01664	0,01095	0,3144
L'_s [H]	Indutância de dispersão do estator	0,00597	0,004152	0,002191	0,000867	0,000389	0,000283	0,0076
L'_r [H]	Indutância de dispersão do rotor	0,00597	0,004152	0,002191	0,000867	0,000389	0,000283	0,0076
R_s [Ω]	Resistência do Estator	1,115	0,6837	0,2761	0,09961	0,03957	0,0302	2,053
R_r [Ω]	Resistência do Rotor	1,083	0,451	0,1645	0,05837	0,02215	0,01721	1,904
V_s [V]	Tensão de linha do estator	460	460	460	460	460	460	575
f_s [Hz]	Frequência elétrica da rede	60	60	60	60	60	60	60

Fonte: Elaboração Própria.

Tabela 4: Valores e informações que correspondem aos parâmetros mecânicos dos 7 modelos fornecidos pelo ANAGRIM

Parâmetros Mecânicos	Definição	1º Modelo	2º Modelo	3º Modelo	4º Modelo	5º Modelo	6º Modelo	7º Modelo
p	Pares de polos	2	2	2	2	2	2	2
$J_m [Kgm^2]$	O momento de inercia da máquina	0,02	0,05	0,1	0,4	0,02215	0,01721	0,02
$F_m [Nms]$	Coefficiente de Atrito	0,005752	0,008141	0,01771	0,02187	0,000389	0,000283	0,000283
$P_m [HP]$	Potência Mecânica Nominal	5	10	20	50	100	150	5
$\Omega_m [rpm]$	Velocidade Mecânica de rotação	1750	1760	1760	1780	1780	1785	1750

Fonte: Elaboração Própria.

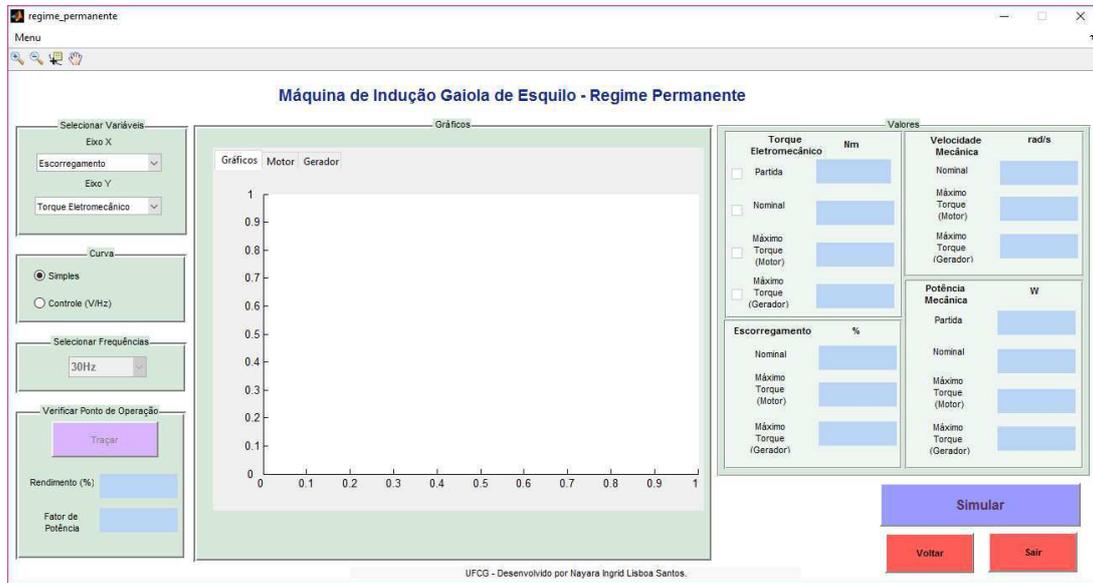
Após a definição dos parâmetros elétricos e mecânicos, o usuário deverá apertar o botão **Gravar**, que tornará disponível as opções **Regime Dinâmico** e **Regime Permanente**.

O usuário também tem a opção **Limpar**, que zera todas as variáveis apresentadas nos dois painéis, além das opções **Voltar** e **Sair**.

3.2.3.1 JANELA: REGIME PERMANENTE

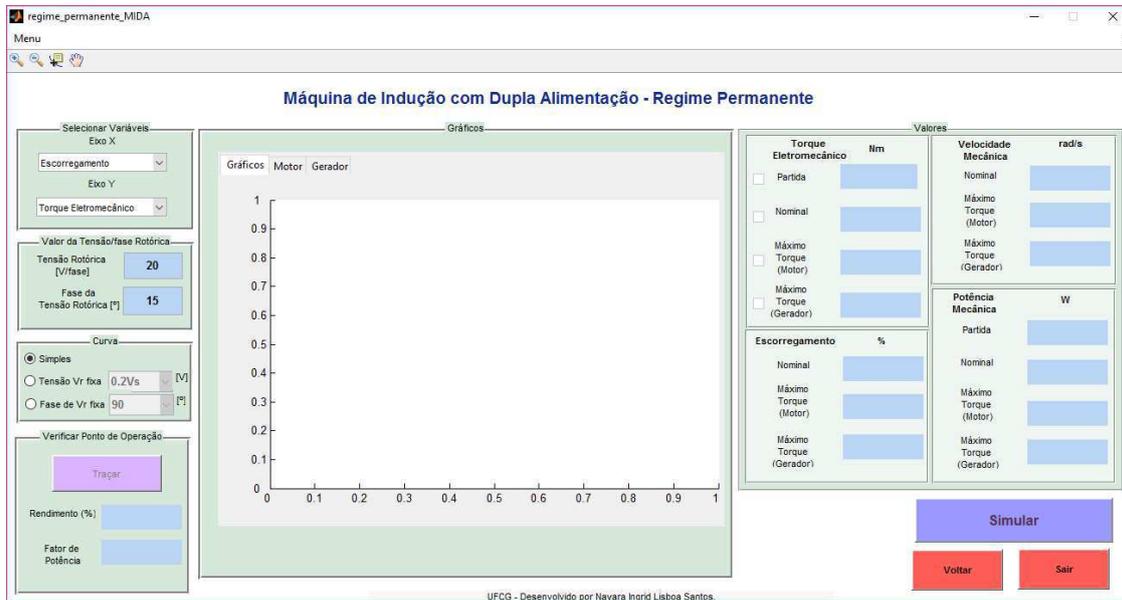
Essa janela aparece ao selecionar a opção **Regime Permanente** na tela de *Analisar a Máquina*. As Figuras 27 e 28 mostram as janelas que aparecem para a máquina de indução gaiola de esquilo e para a máquina de indução de dupla alimentação, respectivamente.

Figura 27: Janela - Regime Permanente máquina de indução gaiola de esquilo



Fonte: Elaboração Própria.

Figura 28: Janela - Regime Permanente máquina de indução de dupla alimentação.



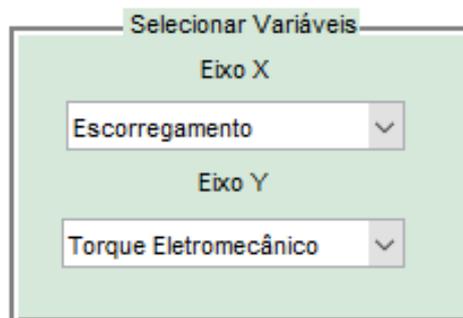
Fonte: Elaboração Própria.

Essas janelas são compostas por seis painéis, com três botões: **Simular**, **Voltar** e **Sair**. Segue abaixo um descritivo sobre cada uma dessas funções.

1. Selecionar Variáveis

Este painel é responsável por definir quais as variáveis que serão correlacionadas, de forma a gerar uma curva que apresentará as características da máquina. O usuário escolherá o **Eixo X** e o **Eixo Y**.

Figura 29: Painel: Selecionar Variáveis.

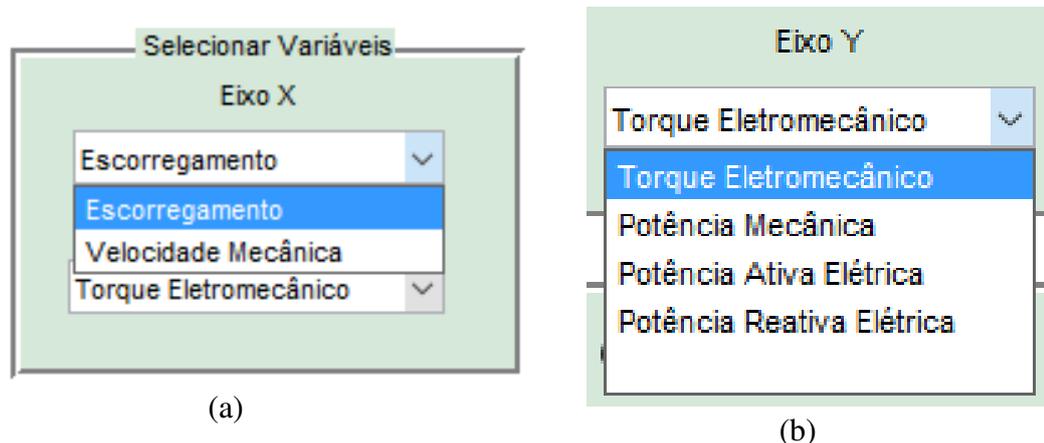


Fonte: Elaboração Própria.

Máquina de Indução Gaiola de Esquilo

O **Eixo X** apresenta as opções **Escorregamento** e **Velocidade Mecânica**, enquanto o **Eixo Y** apresenta as opções de **Torque Eletromecânico**, **Potência Mecânica**, **Potência Ativa** e **Potência Reativa**.

Figura 30: Painel - Selecionar Variáveis para a máquina de indução gaiola de esquilo (a) eixo X; (b) Eixo Y.

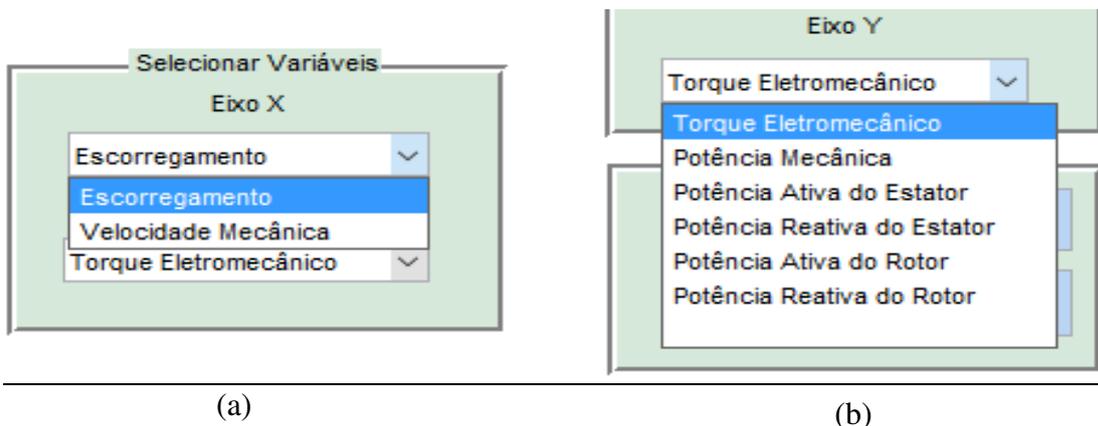


Fonte: Elaboração Própria.

Máquina de Indução com Dupla Alimentação

O **Eixo X** apresenta as opções **Escorregamento** e **Velocidade Mecânica**, enquanto o **Eixo Y** as opções de **Torque Eletromecânico**, **Potência Mecânica**, **Potência Ativa do Estator**, **Potência Reativa do Estator**, **Potência Ativa do Rotor** e **Potência Reativa do Rotor**.

Figura 31: Painel - Selecionar Variáveis para a máquina de dupla alimentação: (a) Eixo X; (b) Eixo Y.



Fonte: Elaboração Própria.

2. Valor da Tensão/Fase Rotórica

Neste painel, o usuário irá definir o valor da amplitude e da fase da tensão rotórica, estando presente somente na máquina de dupla alimentação, visto que para a máquina gaiola de esquilo a tensão rotórica é nula.

Figura 32: Painel - Valor da tensão/fase rotórica



Fonte: Elaboração Própria.

3. Curva

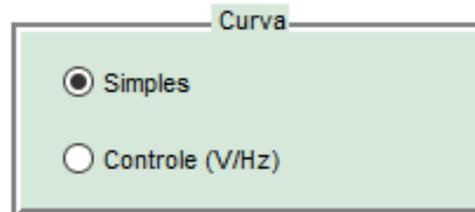
Máquina de Indução Gaiola de Esquilo

Neste painel o usuário deverá escolher entre as opções **Simples** e **Controle V/Hz**, que definem o tipo de gráfico que o usuário deseja visualizar, e, assim, poder fazer sua análise.

No primeiro caso, a curva será gerada entre as variáveis de interesse da máquina, e, no segundo caso, a curva gerada apresentará essas mesmas variáveis só que segundo o controle V/Hz, explicado na seção 2.6.1, no qual a simulação foi feita para cinco frequências diferentes: 30Hz, 40Hz, 50Hz, 60Hz e 70Hz.

Após selecionar as variáveis a serem estudadas e o tipo de curva, o usuário apertará o botão **Simular**, que realiza a compilação do código implementado.

Figura 33: Painel - Curva para a máquina de indução gaiola de esquilo.

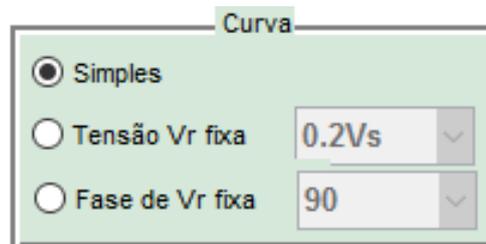


Fonte: Elaboração Própria.

Máquina de Indução de Dupla Alimentação

Diferentemente da máquina gaiola de esquilo, o controle em malha aberta utilizado será por meio da variação da tensão ou fase do rotor.

Figura 34: Painel - Curva para a máquina de indução de dupla alimentação

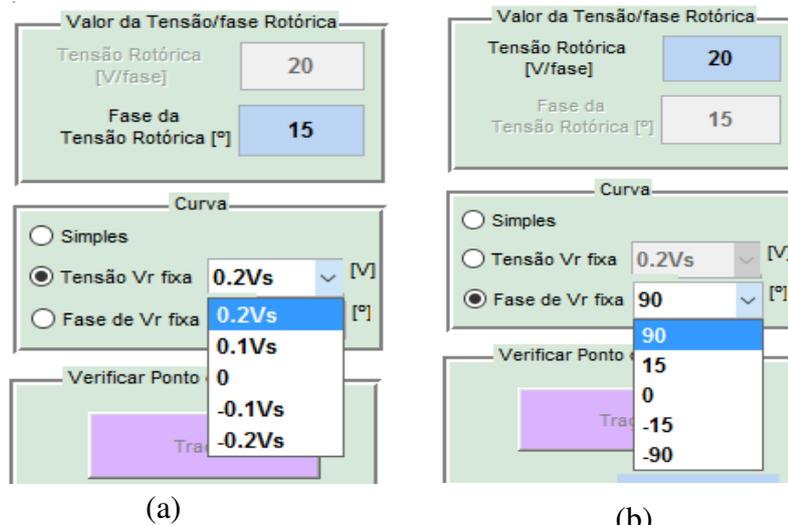


Fonte: Elaboração Própria.

Dessa forma, o painel **Curva**, terá três opções: **Simples**, **Tensão Vr fixa** e **Fase de Vr fixa**. A primeira opção tem a mesma função utilizada para a máquina de indução gaiola de esquilo, a segunda gera várias curvas variando o valor da tensão rotórica, em termos proporcionais da tensão estatórica, e mantendo a fase da tensão fixa. E a terceira gera várias curvas só que agora mantendo a tensão do rotor fixa e variando a fase.

Na Figura 35 observa-se que as opções para a escolher o valor da tensão ou da fase estão desativadas e elas só ficarão disponíveis quando for selecionada a opção desejada. Além disso, para o primeiro caso, a opção de inserir o valor da amplitude da tensão rotórica estará desabilitada, visto que a simulação será feita para os seguintes valores de tensão: $0,2V_s$, $0,1V_s$, 0 , $-0,1V_s$ e $-0,2V_s$, lembrando que a tensão negativa significa inversão de fases. Para o segundo caso, a opção de inserir o valor da fase da tensão rotórica estará desabilitada, pelo mesmo motivo do caso anterior, assim, a simulação será feita para os seguintes valores de fase: 90° , 15° , 0° , -15° e -90° .

Figura 35: Painel - Curva: (a) tensão Vr fixa; (b) Fase de Vr fixa.



Fonte: Elaboração Própria.

Depois que o usuário apertar no botão **Simular**, ele poderá visualizar as informações presentes no painel **Valores**, para cada tipo de tensão ou fase, e também traçar o ponto de operação na curva característica, através do botão **Traçar**, que será explanado na seção 7.

4. Gráficos

Este painel é dividido em três abas: **Gráficos**, **Motor** e **Gerador**, no qual é responsável pela visualização das curvas geradas através das simulações, conforme Figura 28.

Na aba **Gráficos**, a interface mostra as curvas geradas como um todo, apresentando a máquina como motor e como gerador. Na aba **Motor**, é visualizada apenas a parcela do gráfico que a máquina opera como motor, e na aba **Gerador**, a parcela que a máquina opera como gerador.

5. Valores

Este painel contém as informações sobre o **Torque Eletromecânico**, **Velocidade Mecânica**, **Escorregamento** e **Potência Mecânica**.

Estas informações são os valores que correspondem ao valor nominal; máximo torque como motor e máximo torque como gerador. Especificamente para o torque eletromecânico e para a potência mecânica, este painel também informa sobre valores de partida.

No painel ainda possibilita marcação de pontos no gráfico através das caixinhas (*check box*), que correspondem aos valores especificados correspondente ao torque

eletromecânico. Assim, essas caixinhas só estarão habilitadas, quando a opção selecionada no **Eixo Y** for o torque eletromecânico e a curva selecionada for **Simple**.

Figura 36: Painel - Valores

Torque Eletromecânico		Nm	Velocidade Mecânica		rad/s
<input type="checkbox"/>	Partida	<input type="text"/>		Nominal	<input type="text"/>
<input type="checkbox"/>	Nominal	<input type="text"/>		Máximo Torque (Motor)	<input type="text"/>
<input type="checkbox"/>	Máximo Torque (Motor)	<input type="text"/>		Máximo Torque (Gerador)	<input type="text"/>
<input type="checkbox"/>	Máximo Torque (Gerador)	<input type="text"/>			
Escorregamento		%	Potência Mecânica		W
	Nominal	<input type="text"/>		Partida	<input type="text"/>
	Máximo Torque (Motor)	<input type="text"/>		Nominal	<input type="text"/>
	Máximo Torque (Gerador)	<input type="text"/>		Máximo Torque (Motor)	<input type="text"/>
				Máximo Torque (Gerador)	<input type="text"/>

Fonte: Elaboração Própria.

6. Selecionar Frequências

Este painel inicialmente estará desativado, ficando apenas disponível quando o usuário escolher a opção **Controle V/Hz** do painel **Curvas**.

Figura 37: Painel - Selecionar Frequências.

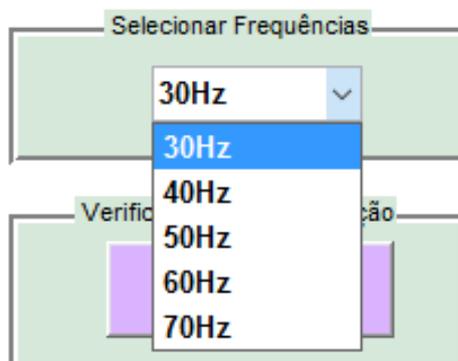
Selecionar Frequências

30Hz
▼

Fonte: Elaboração Própria.

Assim, depois que o usuário apertar no botão **Simular**, ele poderá visualizar as informações presentes no painel *Valores*. E para cada tipo de frequência, traçar o ponto de operação na curva característica, através do botão *Traçar*, que será explanado na seção seguinte.

Figura 38: Selecionar Frequências



Fonte: Elaboração Própria.

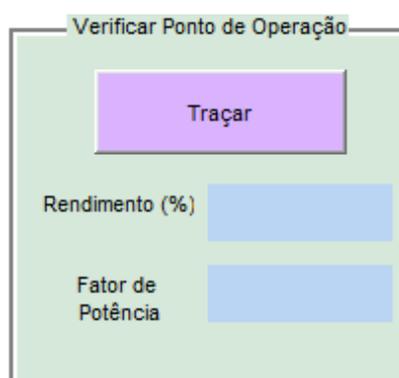
7. Verificar Ponto de Operação

Este painel permite que o usuário visualize na aba **Gráficos**, o ponto de operação correspondente à curva característica da máquina, identificando assim, os valores de velocidade mecânica ou escorregamento para o torque nominal.

Lembrando que, à medida que os parâmetros forem alterados, a curva sofrerá alterações, e assim possuirá uma nova curva característica. Este painel também traz informações acerca do rendimento e do fator de potência, para o determinado ponto de operação. E essas opções estarão presentes para ambas as opções de curvas.

Inicialmente esse botão estará desativado, e apenas quando a opção selecionada no **Eixo Y** for **Torque Eletromecânico** o mesmo ativará.

Figura 39: Painel – Verificar Ponto de Operação.

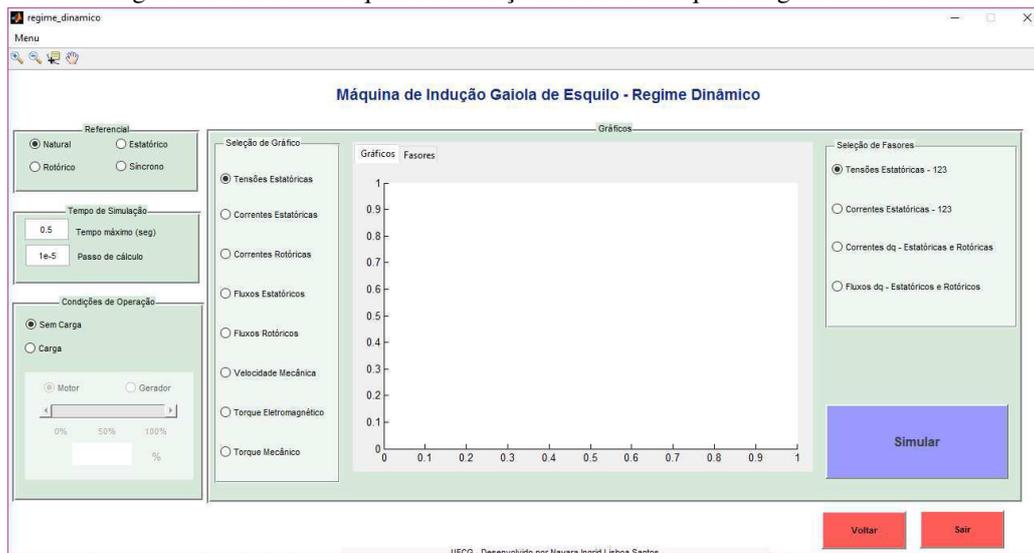


Fonte: Elaboração Própria

3.2.3.2 JANELA: REGIME DINÂMICO

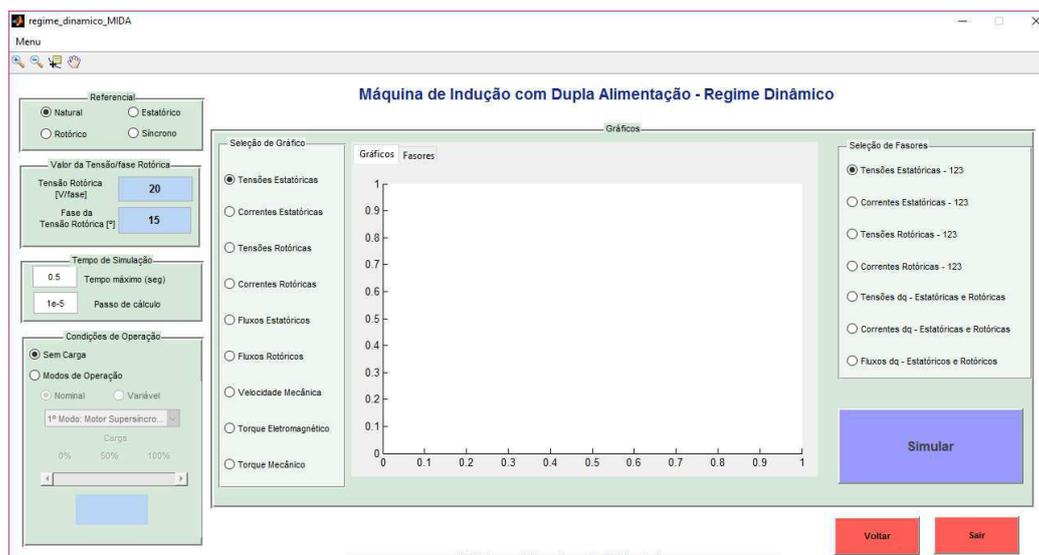
Essa janela aparece ao selecionar a opção **Regime Dinâmico** na tela de Analisar a Máquina. As Figuras 40 e 41 mostram as janelas que aparecem para a máquina de indução gaiola de esquilo e para a máquina de indução de dupla alimentação, respectivamente.

Figura 40: Janela – Máquina de Indução Gaiola de Esquilo Regime Dinâmico



Fonte: Elaboração Própria

Figura 41: Janela – Máquina de Indução de Dupla Alimentação Regime Dinâmico



Fonte: Elaboração Própria

A janela para a máquina de indução gaiola de esquilo é composta por seis painéis, já a máquina de dupla alimentação apresenta sete painéis. Ambas as máquinas possuem

três botões: **Simular**, **Voltar** e **Sair**. Um menu que contém a opção **Ajuda**, e uma barra de ferramentas.

Segue abaixo um descritivo sobre cada uma dessas funções.

1. Referencial

Neste painel, o usuário deverá escolher o referencial através do qual se deseja visualizar as grandezas da máquina, como explicado na seção 2.2.

As grandezas que sofrem essa variação são tensões, correntes e fluxos.

Figura 42: Painel – Referencial.

Referencial

Natural Estatórico

Rotórico Síncrono

Fonte: Elaboração Própria.

2. Tempo de Simulação

Este painel é responsável por definir o tempo máximo de simulação, em segundos, e o passo de cálculo.

Figura 43: Painel – Tempo de Simulação.

Tempo de Simulação

0.5 Tempo máximo (seg)

1e-5 Passo de cálculo

Fonte: Elaboração Própria.

3. Valor da tensão/Fase Rotórica

Para este painel, o usuário irá definir o valor da amplitude e da fase da tensão rotórica, da mesma forma como foi feito para o regime dinâmico.

Figura 44: Painel – Valor da Tensão/fase Rotórica.

Valor da Tensão/fase Rotórica

Tensão Rotórica [V/fase] 20

Fase da Tensão Rotórica [°] 15

Fonte: Elaboração Própria

4. Condições de operação

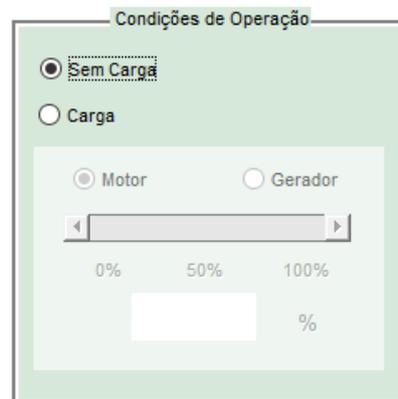
O usuário tem a opção de definir a condição de operação da máquina, se ele deseja simular a máquina com carga, ou sem carga.

Máquina de Indução Gaiola de Esquilo

Inicialmente, a opção selecionada será **Sem Carga**, enquanto as outras opções estarão desabilitadas. Caso ele deseje inserir carga à máquina, ele selecionará a opção **Carga**, que habilitará as demais opções, e definir o tipo de operação, se é como **Motor** ou como **Gerador**, e no *slider* a porcentagem da carga nominal que ele deseja aplicar.

Essas condições de operação se aplicam tanto para a máquina operando sem controle, quanto para o controle V/Hz.

Figura 45: Painel – Condições de Operação para a máquina de indução gaiola de esquilo.



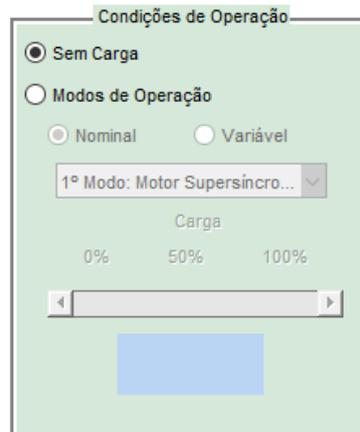
Fonte: Elaboração Própria.

Máquina de Indução com Dupla Alimentação

Similarmente ao caso anterior, o usuário poderá definir a condição de operação da máquina, aplicando uma carga ou não.

Porém, neste caso quando ele optar pela opção **Modos de Operação**, que corresponde à opção **Carga**, da máquina de indução gaiola de esquilo, ele poderá escolher entre duas outras opções: **Nominal** e **Variável**.

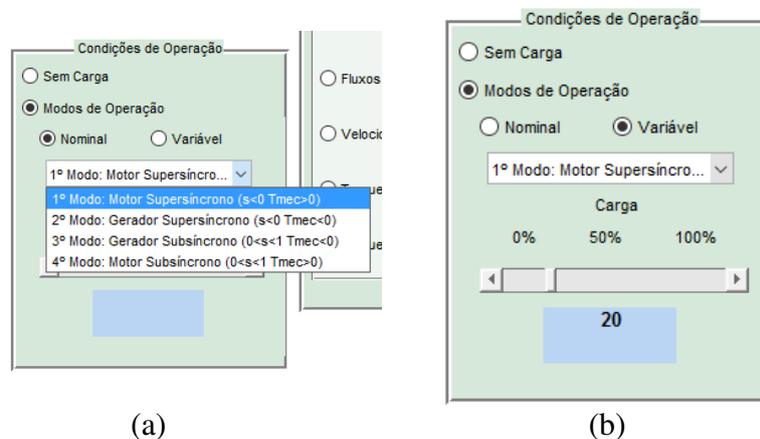
Figura 46: Painel – Condições de Operação para a máquina de indução de dupla alimentação.



Fonte: Elaboração Própria.

Na primeira opção, o usuário apenas definirá o modo que ele quer observar, se é o primeiro, segundo, terceiro ou quarto modo de operação, de acordo com o que foi explicado na seção 2.4.1. Na segunda opção, ele também escolherá o tipo de modo que deseja observar, e definir a carga que deseja impor à máquina.

Figura 47: Painel - Condições de operação: Modos de operação;



Fonte: Elaboração Própria.

5. Gráficos

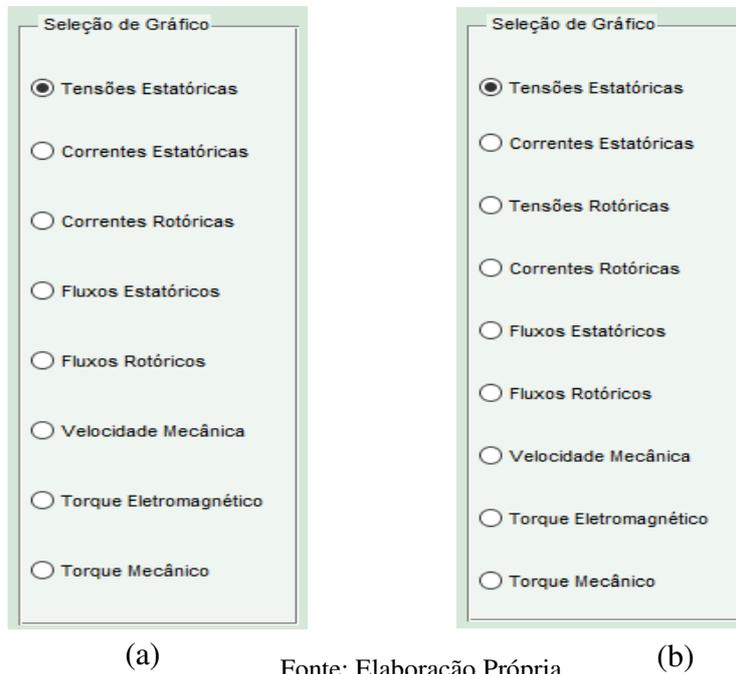
Este painel é dividido em duas abas: **Gráficos** e **Fasores** conforme ilustrado na Figura 40, responsável pela visualização das curvas geradas através das simulações. Na aba **Gráficos**, a interface mostra o comportamento das grandezas internas da máquina em função do tempo. E na aba **Fasores**, são visualizados os fasores correspondentes a essas grandezas, no seu referencial natural (123) e no referencial escolhido (odq).

6. Seleção de Gráficos

Neste painel, o usuário irá definir a grandeza que ele deseja visualizar. A única diferença para a máquina de dupla alimentação é que agora o usuário poderá visualizar também a **Tensão Rotórica**.

Pode-se ver, na Figura 48, o painel seleção de gráfico para a máquina de indução com o rotor gaiola de esquilo e com dupla alimentação, respectivamente.

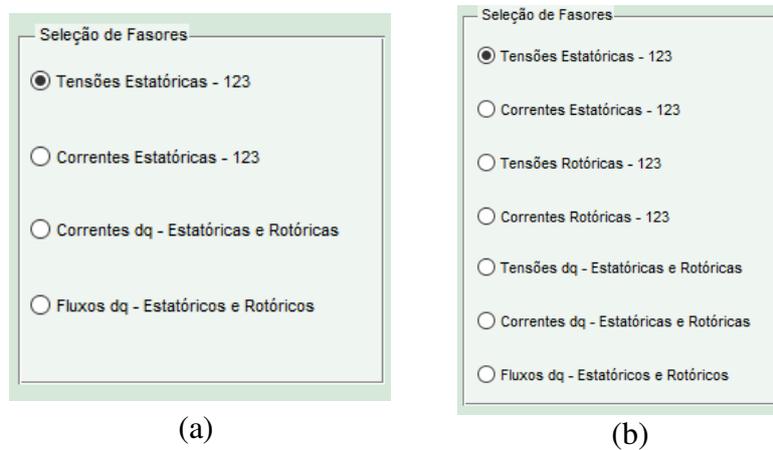
Figura 48: Painel – Seleção de Gráficos: (a) máquina de indução gaiola de esquilo; (b) máquina de indução de dupla alimentação.



7. Selecionar Fases

Semelhante à seção anterior, esse painel é responsável por definir o que o usuário deseja visualizar na aba **Fases**. A diferença entre as duas máquinas é que na máquina de dupla alimentação adiciona-se as opções: **Tensões Rotóricas – 123**, **Correntes Rotóricas – 123** e **Tensões dq – Estatóricas e Rotóricas**.

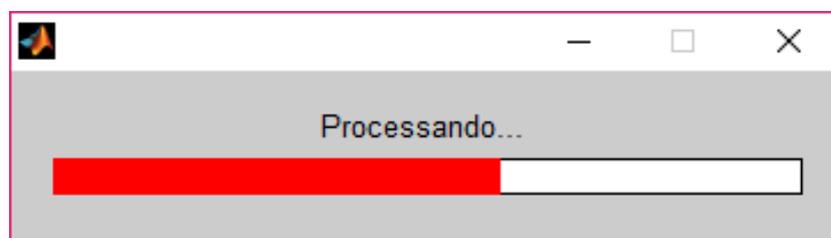
Figura 49: Paineis – Seleção de Fasores (a) máquina de indução gaiola de esquilo; (b) máquina de indução de dupla alimentação.



Fonte: Elaboração Própria.

Ao definir as condições de operação da máquina, o usuário apertará o botão **Simular**, que compilará o código implementado e aparecerá a janela de processamento, como mostra a Figura 50.

Figura 50: Janela de Processamento.



Fonte: Elaboração Própria.

3.2.3.3 BARRA DE FERRAMENTAS

A barra de ferramentas (Figura 51) é um conjunto de botões, que o usuário poderá utilizar para um melhor manuseamento das informações presentes no gráfico. Essa barra de ferramentas apenas estará disponível nas telas de regime dinâmico e permanente, de ambas as máquinas.

Figura 51: Barra de Ferramentas.



Fonte: Elaboração Própria.

- *Zoom In*: permite a ampliação dos gráficos;
- *Zoom Out*: permite a diminuição da ampliação dos gráficos;
- *Data Cursor*: permite selecionar um ponto no gráfico, que informa o valor corresponde do eixo x e do eixo y, nesse ponto.
- *Pan*: permite arrastar o gráfico, em qualquer direção;

3.2.4 JANELA: ENSAIAR A MÁQUINA

A janela *Ensaiar a Máquina* é uma tela que será aberta ao selecionar qualquer uma das opções apresentadas na janela de análise. Na Figura 52, apresenta-se a janela de ensaio para a máquina de indução gaiola de esquilo, porém a mesma janela abre para a máquina de dupla alimentação, com a única diferença: o título.

Figura 52: Janela Ensaiar a Máquina para a Máquina de indução Gaiola de Esquilo.

A janela "Máquina de Indução Gaiola de Esquilo" apresenta o seguinte layout:

- Modelo da Máquina:** Lista de sete modelos com um botão "Selecionar".
- Ensaio a Vazio ($s = 0 / \omega_m = \omega_s$):** Campos para $V1, vz$ (V), $I1, vz$ (A) e $P1, vz$ (W), com um botão "Ensaiar".
- Ensaio a rotor bloqueado ($s = 1 / \omega_m = 0$):** Campo para $I1, nominal$ (A) com um botão "Verificar".
- Encontrar o valor $Vs/fase$ para $I1, bi = In$:** Campos para $V1, bi$ (V), $I1, bi$ (A) e $P1, bi$ (W), com um botão "Ensaiar".
- Parâmetros:** Tabela com colunas "Parâmetros Calculados", "Parâmetros Reais" e "Erro (%)".

	Parâmetros Calculados	Parâmetros Reais	Erro (%)
Svz [VA]	Lis [H]		
Qvz [var]	Lr [H]		
Xlvz [ohms]	Lm [H]		
Sbl [VA]	R1 [ohms]		
Qbl [var]	R2 [ohms]		
Xbl [ohms]			
Rbl [ohms]			

Botão "Calcular" localizado na parte inferior da tabela de parâmetros.

Barra de controle inferior: "Limpar", "Voltar", "Sair".

UFCE - Desenvolvido por Nayara Ingrid Lisboa Santos.

Fonte: Elaboração Própria.

Essa janela é composta por quatro painéis, com três botões de utilidade: **Limpar**, **Voltar** e **Sair** e um menu que contém a opção **Ajuda**.

1. Modelo da Máquina

Neste painel, o usuário irá definir a máquina que ele deseja ensaiar. São disponíveis 7 modelos, que são os modelos encontrados no *Simulink*. Após selecionado o modelo, o usuário deverá apertar o botão **Selecionar**, que ativará a opção **Ensaiar**, do painel de ensaio a vazio.

Figura 53: Painel – Modelo da Máquina.

O painel 'Modelo da Máquina' apresenta uma interface com o seguinte conteúdo:

- Modelo da Máquina
- Modelo 01 - 5HP 460V 60Hz 1750rpm 3730VA
- Modelo 02 - 10HP 460V 60Hz 1760rpm 7460VA
- Modelo 03 - 20HP 460V 60Hz 1760rpm 14.920VA
- Modelo 04 - 50HP 460V 60Hz 1780rpm 37.300VA
- Modelo 05 - 100HP 460V 60Hz 1780rpm 74.600VA
- Modelo 06- 150HP 460V 60Hz 1785rpm 111.900VA
- Modelo 07 - 5HP 575V 60Hz 1750rpm 3730VA
- Botão Selecionar

Fonte: Elaboração Própria.

2. Ensaio a vazio

Neste painel, o usuário irá apertar o botão **Ensaiar**, que informará os valores da tensão, corrente e potência a vazio da máquina. Após realizar o ensaio a vazio, o botão **Ensaiar**, do ensaio a rotor bloqueado, será ativado.

Figura 54: Painel – Ensaio a Vazio.

Fonte: Elaboração Própria

3. Ensaio a rotor bloqueado

Após realizar o ensaio a vazio, o usuário irá realizar o ensaio a rotor bloqueado. Para isso, é necessário que ele aplique uma tensão de 10% a 20% da tensão nominal, de modo a ter no máximo a corrente nominal.

Dessa forma, o usuário irá verificar o valor da corrente nominal, bastando apenas apertar no botão **Verificar**, e, dessa forma, aplicar um valor de tensão $V_{1,bl}$, de modo a encontrar o valor de $I_{1,bl}$, que seja no máximo a corrente nominal encontrada anteriormente. Assim, obtém os valores da tensão, corrente e potência a rotor bloqueado. Lembrando que, nesse caso, independentemente do valor de tensão que se inserir, os parâmetros não serão alterados, devido à relação entre corrente e tensão ser linear.

Figura 55: Painel – Ensaio a rotor bloqueado.

Fonte: Elaboração Própria.

4. Parâmetros

Este painel é responsável por determinar os parâmetros da máquina, a partir dos ensaios feitos anteriormente. Após o usuário apertar o botão **Calcular**, serão mostrados,

na parte dos **Parâmetros Calculados**, os valores de potência aparente, potência reativa, reatância e resistência, a vazio e a rotor bloqueado. Na coluna do lado, serão mostrados os valores das indutâncias de dispersão do estator e do rotor, a indutância mútua e as resistências do estator e do rotor. E na outra parte, em **Parâmetros Reais**, é informado o valor real das variáveis, e, na coluna do lado, o erro em porcentagem correspondente.

Figura 56: Painel – Parâmetros.

Parâmetros

	Parâmetros Calculados		Parâmetros Reais		Erro (%)
Svz [VA]	<input type="text"/>	Lls [H]	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Qvz [var]	<input type="text"/>	Llr [H]	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Xvz [ohms]	<input type="text"/>	Lm [H]	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Sbl [VA]	<input type="text"/>	R1 [ohms]	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Qbl [var]	<input type="text"/>	R2 [ohms]	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Xbl [ohms]	<input type="text"/>	<input type="button" value="Calcular"/>			
Rbl [ohms]	<input type="text"/>				

Fonte: Elaboração Própria.

4 RESULTADOS

Nesta seção, serão apresentados os resultados das simulações, com base nas equações e na teoria apresentada, com o objetivo de explicar o funcionamento do **ANAGRIM**. Será mostrada uma sequência de testes, e, para cada sequência desenvolvida, uma discussão e explicação acerca dos resultados.

Devido à vasta possibilidade que o usuário tem para manipular a máquina no **ANAGRIM**, serão apresentados os resultados básicos, de forma a guiá-lo para uma exploração mais aprofundada.

4.1 ENSAIOS

O primeiro passo a ser seguido é o ensaio da máquina, que serve para ambas as máquinas. Com o ensaio a vazio e a rotor bloqueado, podem-se determinar os seus parâmetros, para que se possa construir o circuito equivalente e avaliar o seu funcionamento.

Os procedimentos realizados para os ensaios são os mesmos utilizados em laboratório, e, assim, o usuário terá a possibilidade de verificar, via simulação, esses passos, sem a necessidade do uso de bancadas, facilitando o seu entendimento.

A seguir, segue o descritivo de um teste que usuário terá como base para a realização desses ensaios.

O usuário deverá escolher um dos modelos propostos. Após a escolha do modelo, o usuário deverá apertar o botão selecionar, que ativará a opção **Ensaiar** no painel de *Ensaio a vazio*.

Figura 57: Seleção do modelo da máquina e a realização do ensaio a vazio.

Modelo da Máquina

- Modelo 01 - 5HP 460V 60Hz 1750rpm 3730VA
- Modelo 02 - 10HP 460V 60Hz 1760rpm 7460VA
- Modelo 03 - 20HP 460V 60Hz 1760rpm 14.920VA
- Modelo 04 - 50HP 460V 60Hz 1780rpm 37.300VA
- Modelo 05 - 100HP 460V 60Hz 1780rpm 74.600VA
- Modelo 06 - 150HP 460V 60Hz 1785rpm 111.900VA
- Modelo 07 - 5HP 575V 60Hz 1750rpm 3730VA

Ensaio a Vazio (s = 0 / wm = ws)

V1,vz 375.5884 V

I1,vz 4.7512 A

P1,vz 44.8479 W

Ensaio a rotor bloqueado (s=1 / wm=0)

I1,nominal 10.3408 A

Verificar

Encontrar o valor Vs/fase para I1,bl = In:

V1,bl 45 V

I1,bl 9.1131 A

P1,bl 533.5937 W

Ensaiar

Fonte: Elaboração Própria.

O usuário visualizará os valores da tensão, corrente e potência a vazio, para o modelo escolhido. Após esse procedimento, o usuário realizará o ensaio a rotor bloqueado, verificando a corrente nominal da máquina, inserindo os valores de tensão em que a corrente a rotor bloqueado seja, no máximo, o valor da corrente nominal.

Figura 58: Ensaio a rotor bloqueado.

Ensaio a rotor bloqueado (s=1 / wm=0)

I1,nominal 10.3408 A

Verificar

Encontrar o valor Vs/fase para I1,bl = In:

V1,bl 45 V

I1,bl 9.1131 A

P1,bl 533.5937 W

Ensaiar

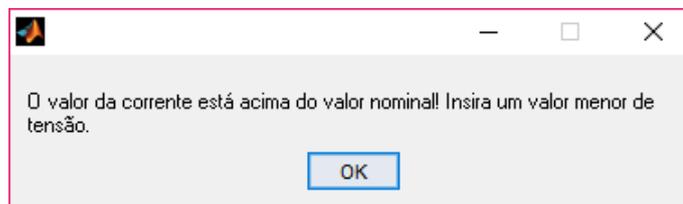
Fonte: Elaboração Própria.

Como resultado, verificou-se que a corrente nominal é de 10.3408A, e, assim com a máquina a rotor bloqueado, foi inserido um valor de tensão de 45V, que obteve uma

corrente de 9.1131A, menor que a corrente nominal, então, este valor de tensão está coerente, podendo determinar os parâmetros.

Observa-se que, independentemente da tensão que for inserida ao valor de corrente, os parâmetros não sofrerão influência, devido à característica linear do sistema. Porém, caso o usuário digite um valor de tensão que faça a corrente a rotor bloqueado ser maior que a corrente nominal, aparecerá uma tela de advertência informando o usuário a condição e pedindo para que se insira um novo valor.

Figura 59: Janela de advertência.



Fonte: Elaboração Própria.

O próximo passo é a determinação dos valores. O usuário irá apertar o botão **Calcular** e, na tela, as grandezas da máquina a vazio e a rotor bloqueado serão exibidas, resultando nos parâmetros elétricos da máquina. Ele ainda poderá comparar com o valor real, observando o erro correspondente.

Figura 60: Determinação dos parâmetros.

	Parâmetros Calculados		Parâmetros Reais		Erro (%)
	Valor	Unidade	Valor	Unidade	
Svz [VA]	5353.4597	Lls [H]	0.0059866	0.00597	0.27743
Qvz [var]	5353.2719	Llr [H]	0.0059866	0.00597	0.27743
Xvz [ohms]	79.0489	Lm [H]	0.2037	0.2037	0.001384
Sbl [VA]	1230.2668	R1 [ohms]	1.115	1.115	0
Qbl [var]	1108.5279	R2 [ohms]	1.0879	1.083	0.4556
Xbl [ohms]	4.4493				
Rbl [ohms]	2.1417				

Calcular

Fonte: Elaboração Própria.

Caso o usuário tenha dúvida a respeito do procedimento, ele poderá ir na opção **Menu**, e selecionar a opção **Ajuda**, que aparecerá um pdf com a introdução teórica dos ensaios.

4.2 REGIME DINÂMICO

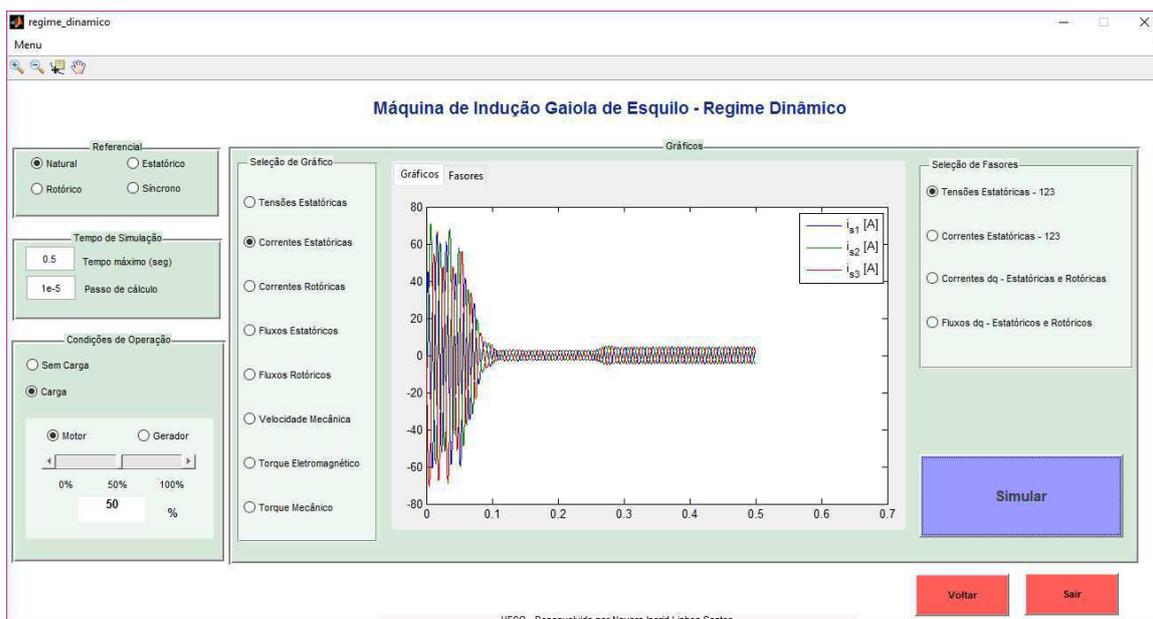
Após a realização dos ensaios, o usuário deverá seguir os passos que serão descritos, para a análise da máquina. Primeira análise a ser feita é em regime dinâmico para a máquina gaiola de esquilo e posteriormente para a máquina de dupla alimentação. O usuário poderá escolher inserir os parâmetros elétricos e mecânicos manualmente, ou selecionando o arquivo em .m, conforme já fora explicado.

Um dos primeiros testes que o usuário poderá realizar é inserir a carga, de 0% a 100% do torque nominal, e observar o seu comportamento tanto no modo motor como no modo gerador. Para esse caso específico, os testes realizados foram feitos adicionando-se uma carga de 50% do seu valor nominal, no modo motor.

Para a máquina de indução gaiola de esquilo, o **ANAGRIM** oferece oito possibilidades de gráficos e quatro de fasores, já para a máquina de dupla alimentação, nove possibilidades de gráficos e sete de fasores, devido à inserção da fonte rotórica na máquina. O usuário poderá, também, visualizar esses gráficos nos referenciais: natural, estatístico, síncrono e rotórico.

Começando as análises para a máquina de indução gaiola de esquilo, têm-se:

Figura 61: Gráfico da corrente em regime dinâmico para a máquina de indução gaiola de esquilo.



Fonte: Elaboração Própria.

Nas Figuras 62, 63 e 64 são mostrados, respectivamente, os gráficos das tensões estatórica, correntes estatóricas e correntes rotóricas nos quatro referenciais.

Figura 62: Gráfico das tensões estatóricas nos quatro referenciais, para a máquina de indução gaiola de esquilo: (a) natural; (b) estatórico; (c) rotórico; (d) síncrono.

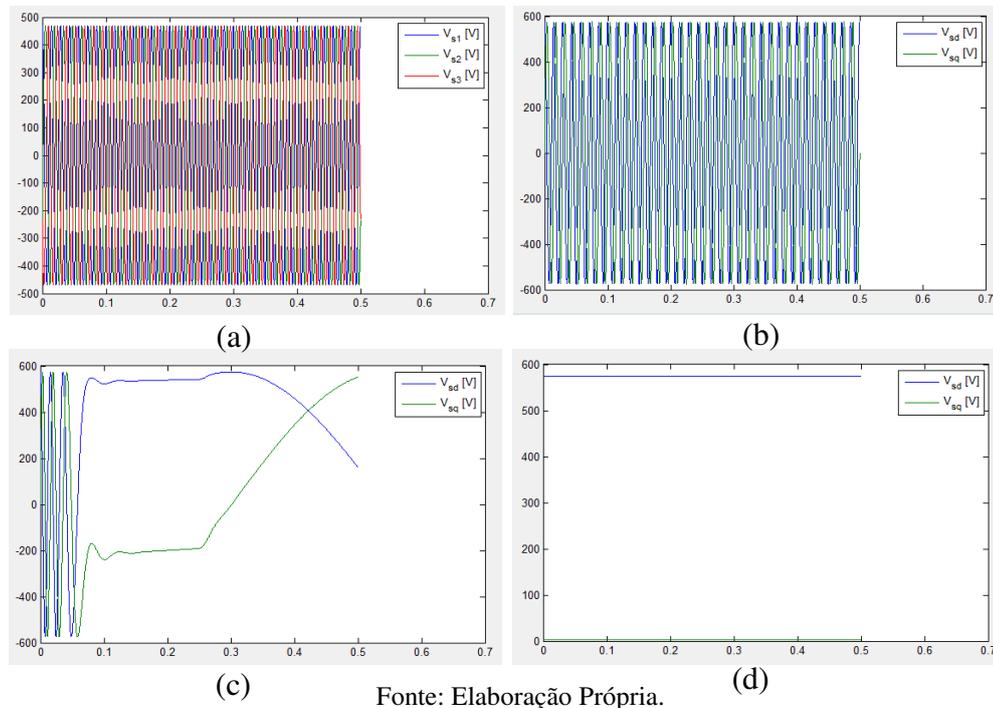


Figura 63: Gráfico das correntes estatóricas nos quatro referenciais, para a máquina de indução gaiola de esquilo: (a) natural; (b) estatórico; (c) rotórico; (d) síncrono.

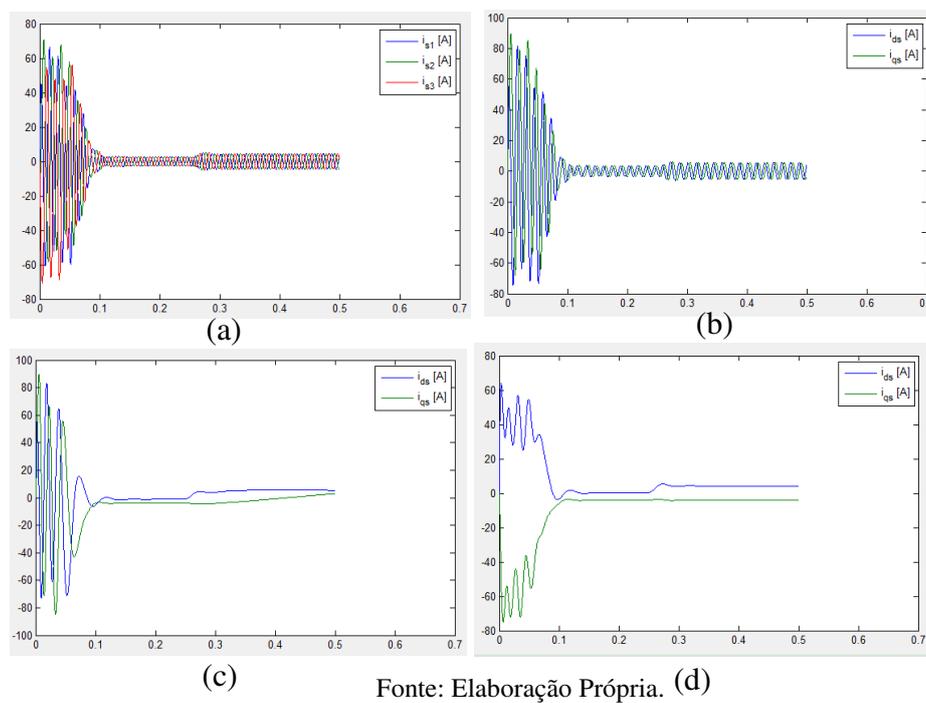
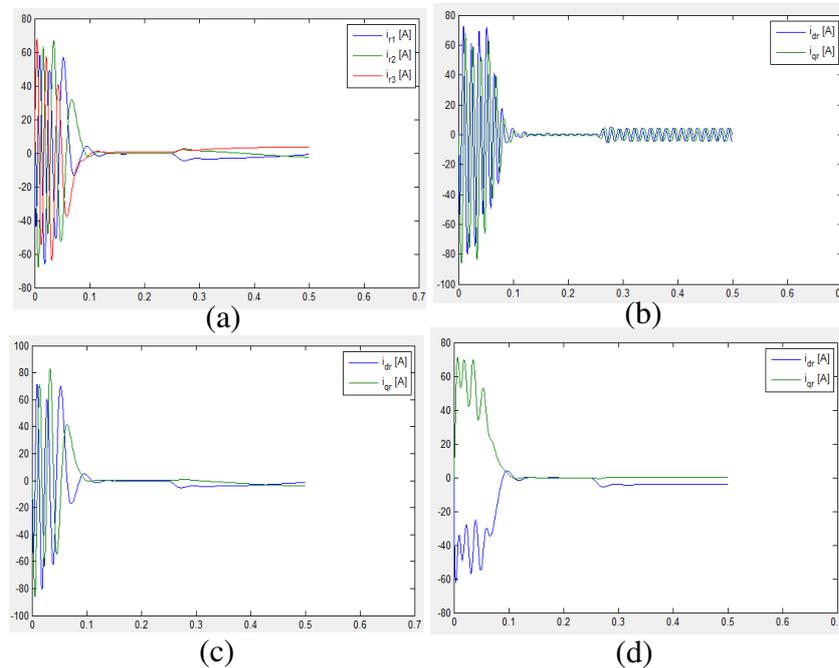


Figura 64: Gráfico das correntes rotóricas nos quatro referenciais, para a máquina de indução gaiola de esquilho: (a) natural; (b) estático; (c) rotórico; (d) síncrono.



Fonte: Elaboração Própria.

Os vetores dos fluxos estáticos e rotóricos, no referencial odq , juntamente com as demais possibilidades de gráficos, ficarão a cargo do estudo exploratório do usuário.

Nota-se que a frequência das grandezas estáticas no seu referencial natural, corresponde a frequência elétrica nominal. Dessa forma, quando as grandezas rotóricas, estão referidas ao estator, elas possuirão a mesma frequência que as estáticas.

A mesma análise pode ser feita para o referencial rotórico, onde a frequência das grandezas rotóricas é a frequência de escorregamento, por isso que, nas figuras, observa-se que a frequência é bem baixa para esse referencial, devido ao escorregamento ser bem pequeno.

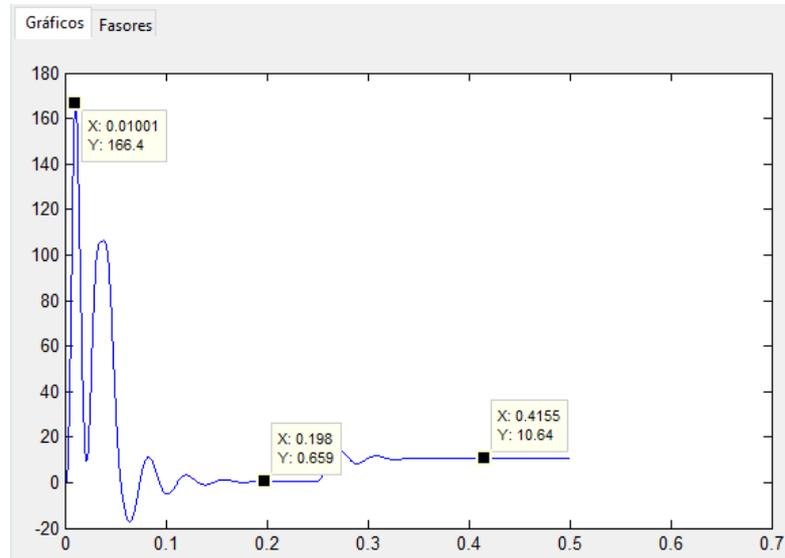
No referencial síncrono, a frequência dessas grandezas é zero, e o seu comportamento é similar à máquina em regime permanente (estacionário).

Utilizando a ferramenta *Data Cursor*, observa-se que o torque sobe até um valor de 166,4 Nm, para que a máquina tenha força suficiente para partir, e após o transitório, ele diminui até ficar com um valor constante aproximadamente nulo, que é quando a corrente se mantém constante e a máquina entra regime.

A máquina parte sem carga e, quando o tempo for igual à metade do tempo máximo, aplica-se a carga de 50% do valor nominal. Ao aplicar a carga, a velocidade irá diminuir, fazendo com que a corrente aumente para manter tensão constante. Em

contrapartida, o torque eletromagnético aumenta, para compensar a inserção da carga, fazendo com que o torque líquido seja nulo estabilizando, pois, a máquina.

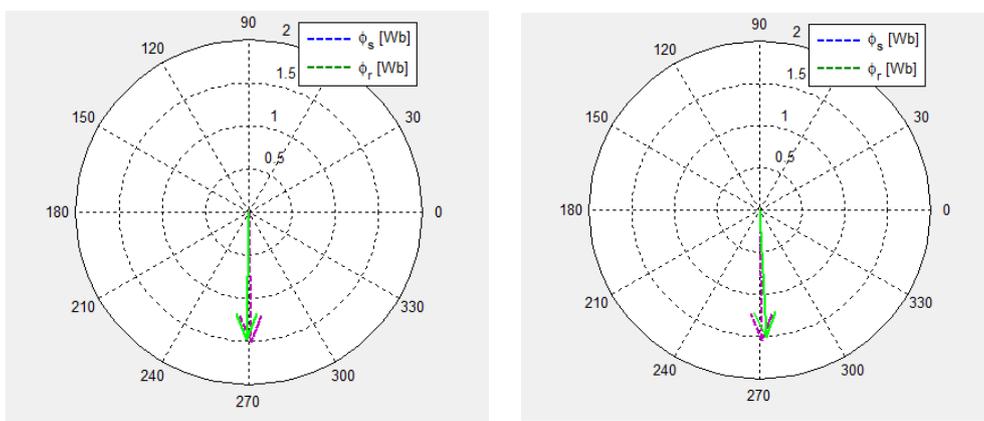
Figura 65: Gráfico do torque eletromagnético para a máquina de indução gaiola de esquilo



Fonte: Elaboração Própria.

Para visualizar a defasagem correspondentes dos fluxos estatóricos e rotóricos, basta selecionar a opção **Fluxos dq – Estatóricos e Rotóricos**, no painel seleção de fasores, e mudar a aba de gráficos para fasores. Na Figura 66, são mostrados os fasores quando a máquina opera como motor e gerador. A legenda para o fluxo estatórico está em azul devido a um problema na versão do MATLAB, dessa forma o vetor do fluxo estatórico está na cor vermelha e do rotórico na cor verde.

Figura 66: Fasores dos fluxos estatóricos para a máquina de indução gaiola de esquilo: (a) modo motor; (b) modo gerador.



Fonte: Elaboração Própria.

Observa-se que, quando a máquina opera como motor, o fluxo estático está adiantado do fluxo rotórico e, quando a máquina opera como gerador, o fluxo estático está atrasado do fluxo rotórico.

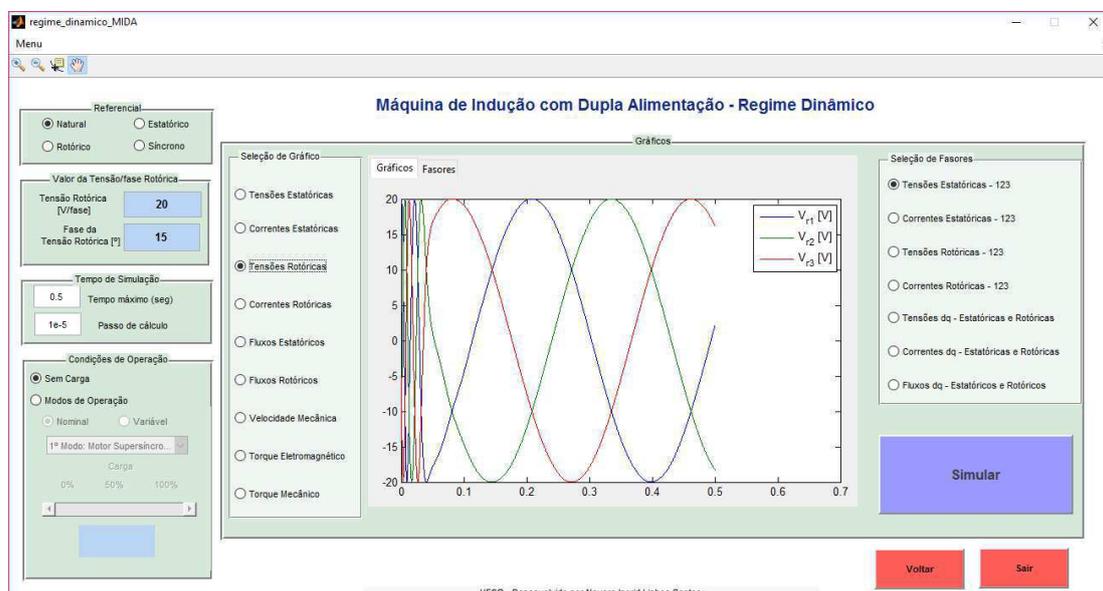
Para a máquina de indução de dupla alimentação, o procedimento é similar.

É inserido na máquina um valor de tensão de 20V por fase e o ângulo da tensão rotórica de 15°. O usuário poderá alterar esses valores e fazer as análises da máquina observando o seu comportamento de acordo com a variação de tensão rotórica e/ou de fase.

Como primeiro teste, não será aplicado nenhuma carga ao sistema, para apenas observar a influência da fonte de tensão rotórica na máquina, em comparação com a máquina gaiola de esquilo.

Na Figura 67, é mostrado o comportamento da tensão rotórica para a máquina, lembrando que a frequência da tensão é a frequência de escorregamento, conforme foi explicado no Capítulo 2.

Figura 67: Gráfico da tensão rotórica em regime dinâmico para a máquina de indução de dupla alimentação.



Fonte: Elaboração Própria.

Em comparação, os gráficos para as grandezas estáticas são idênticos ao apresentado na máquina de indução gaiola de esquilo, assim como a análise para diferentes referenciais.

Segue abaixo a comparação das grandezas rotóricas em relação à máquina de indução gaiola de esquilo, sem a aplicação de carga, e o comportamento da velocidade e dos fasores dos fluxos para diferentes modos de operação.

Figura 68: Gráficos das correntes rotóricas no regime dinâmico: (a) máquina de indução gaiola de esquilo; (b) máquina de indução de dupla alimentação.

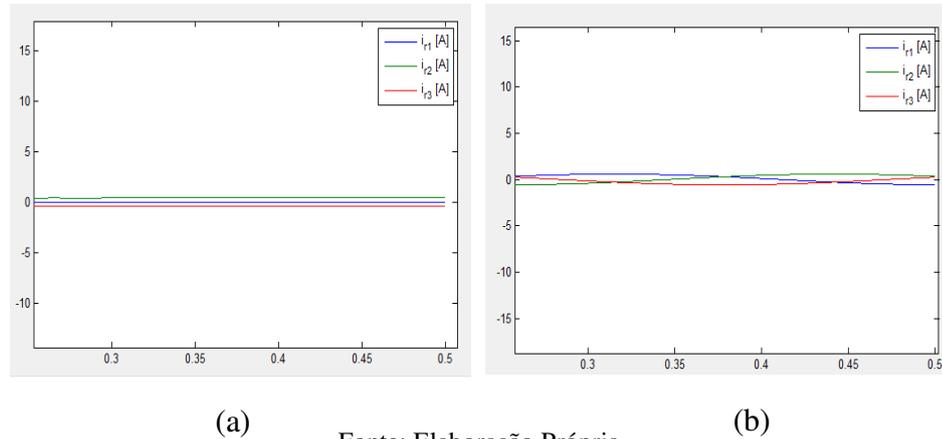
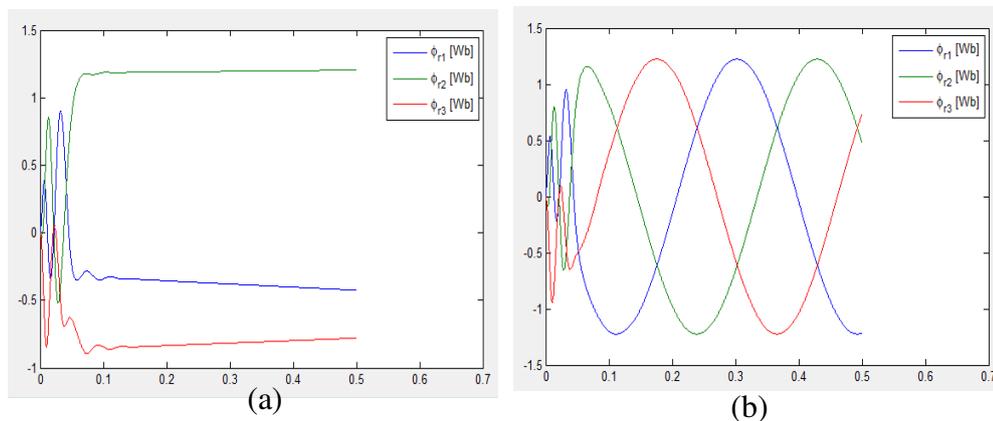


Figura 69: Gráficos dos fluxos rotóricas no regime dinâmico: (a) máquina de indução gaiola de esquilo; (b) máquina de indução de dupla alimentação.



Observa-se que as correntes rotóricas irão sofrer influência da tensão do rotor que esta variando conforme a frequência de escorregamento, e, dessa forma, os fluxos que dependem dessas correntes também serão afetados. De maneira prática, as correntes induzidas no rotor dependerão também do valor da tensão rotórica, que, para a máquina de indução gaiola de esquilo, será nulo, afetando assim a sua frequência.

Agora, ao aplicar uma carga igual ao torque nominal à máquina, nota-se o gráfico da velocidade e defasagem do vetor do fluxo estatórico em relação ao fluxo rotórico, tornando possível, a visualização nos quatro modos de operação da máquina.

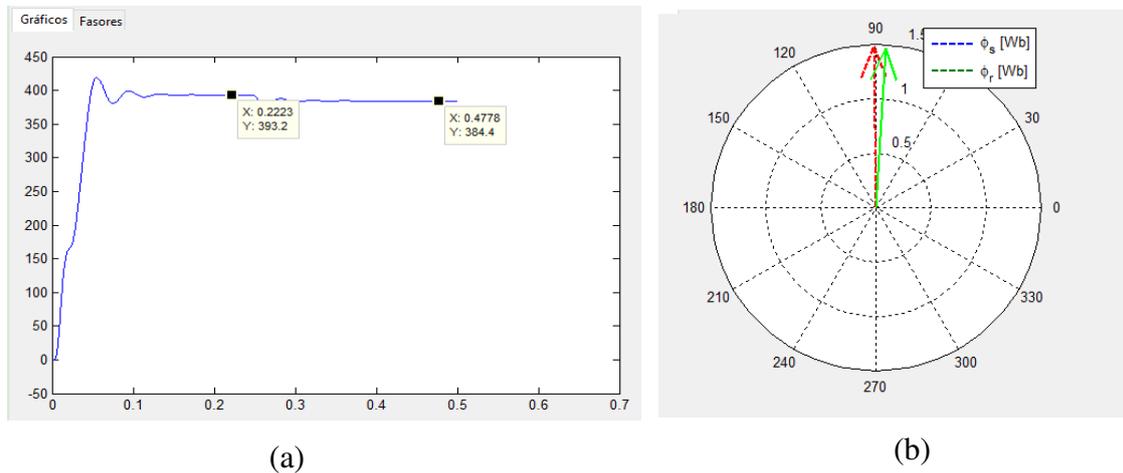
A Tabela 5 mostra um resumo das principais grandezas que definem o modo de operação da máquina. Para visualizar de modo completo, o usuário deverá olhar a Tabela 1, encontrada na seção 2.4.1.

Tabela 5: Resumo modos de operação

1° Modo (Motor Supersíncrono)	2° Modo (Gerador Supersíncrono)	3° Modo (Gerador Subsíncrono)	4° Modo (Motor Subsíncrono)
$V_r < 0$	$V_r < 0$	$V_r > 0$	$V_r > 0$
$T_{mec} > 0$	$T_{mec} < 0$	$T_{mec} < 0$	$T_{mec} > 0$
$\omega_m > \omega_s$	$\omega_m > \omega_s$	$\omega_m < \omega_s$	$\omega_m < \omega_s$

Fonte: Elaboração Própria.

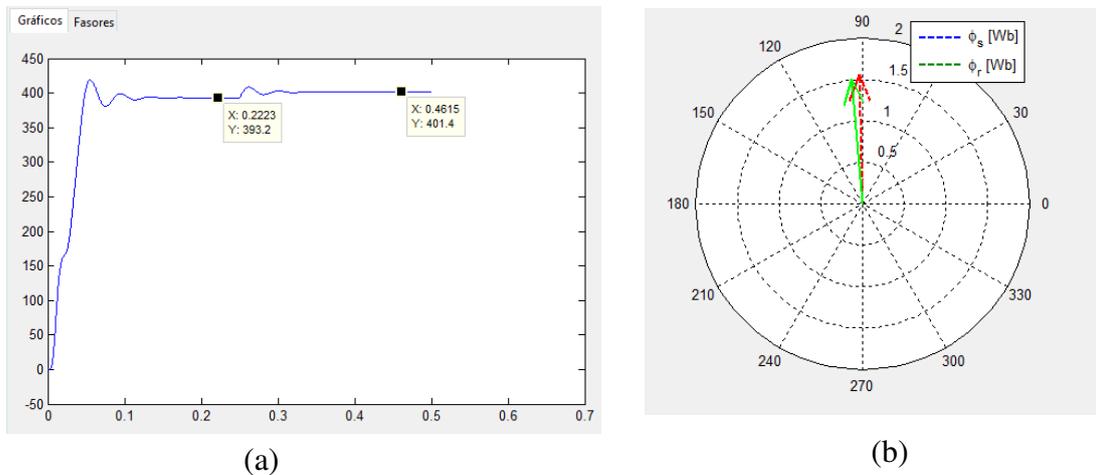
Figura 70: Primeiro modo de operação, motor supersíncrono: (a) velocidade mecânica; (b) fasor do fluxo estatórico e do fluxo rotórico.



Fonte: Elaboração Própria.

Observa-se que, para o primeiro modo, a velocidade mecânica é maior que a velocidade síncrona (377 rad/s) e, como a máquina opera como motor, o fluxo estatórico está adiantado do fluxo rotórico, validando, assim, as informações apresentadas na teoria. Vale ressaltar que a tensão rotórica negativa significa inversão de fases, e que, quando a carga é inserida, a velocidade diminui e a máquina sofre uma desaceleração de modo a equilibrar o sistema.

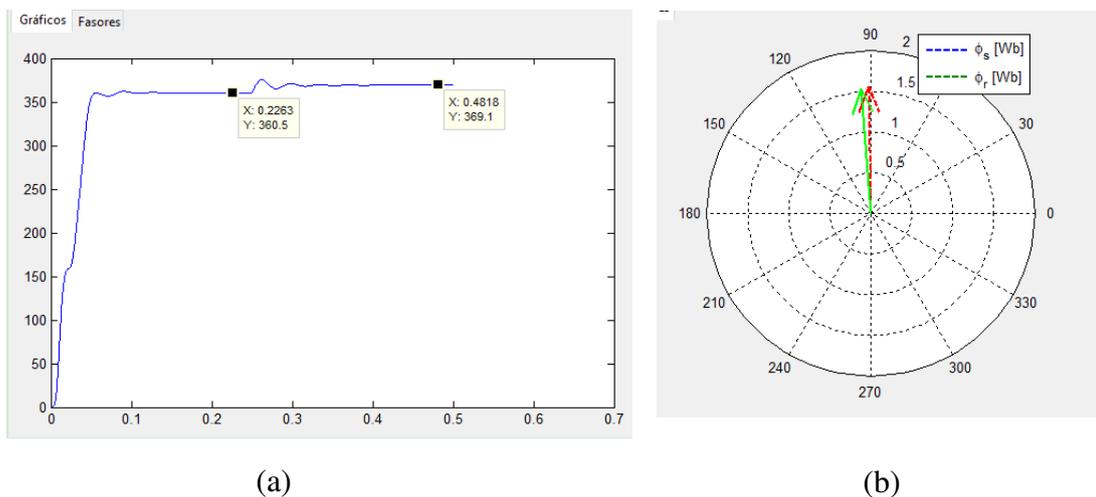
Figura 71: Segundo modo de operação, gerador supersíncrono: (a) velocidade mecânica; (b) fasor do fluxo estatórico e do fluxo rotórico.



Fonte: Elaboração Própria.

Neste caso, observa-se que a velocidade mecânica está acima da velocidade síncrona, já que a máquina está operando no modo sobresíncrono. Outro fato notável é quando aplica uma carga, fazendo a velocidade aumentar e a máquina acelerar. Na Figura 71 (b), observa-se que o fluxo do rotor agora está adiantado do fluxo do estator, pois a máquina opera como gerador nesse modo.

Figura 72: Terceiro modo de operação, gerador subsíncrono: (a) velocidade mecânica; (b) fasor do fluxo estatórico e do fluxo rotórico.

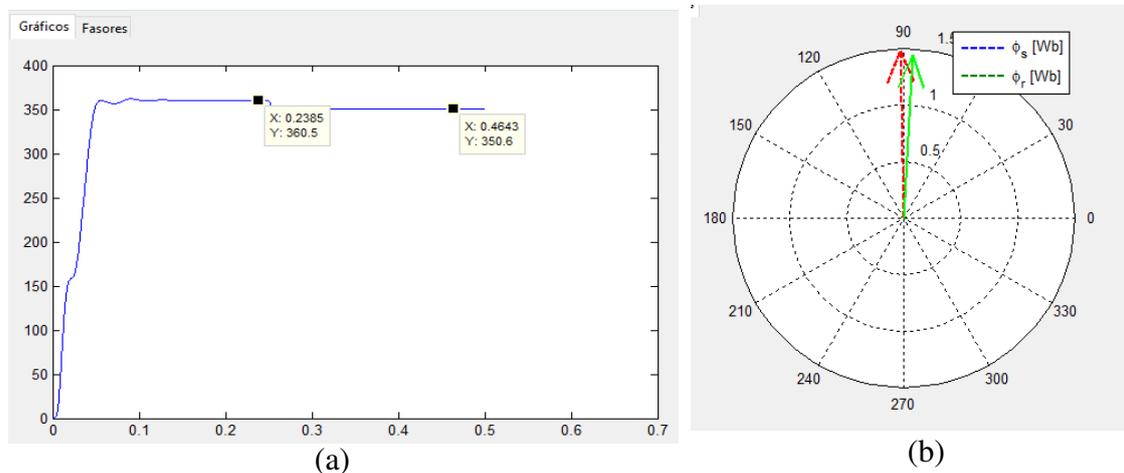


Fonte: Elaboração Própria.

Na Figura 72 (a), a máquina está operando como gerador subsíncrono, onde a velocidade mecânica é menor que a velocidade síncrona, dado que, como o torque é negativo, a velocidade irá aumentar quando se aplicar uma carga. Na figura 72 (b),

observa-se que o fluxo rotórico está adiantado do fluxo estatórico, já que a máquina opera como gerador.

Figura 73: Quarto modo de operação, motor subsíncrono: (a) velocidade mecânica; (b) fasor do fluxo estatórico e do fluxo rotórico.



Fonte: Elaboração Própria.

Por último, tem-se a máquina operando como motor com a velocidade subsíncrona, no qual a velocidade mecânica está abaixo da velocidade síncrona, e na Figura 73 (b), observa-se que o fluxo estatórico está adiantado do fluxo rotórico.

De forma resumida, têm-se:

- Quando a máquina opera como motor, o fluxo estatórico estará adiantado do fluxo rotórico, e o torque mecânico será positivo, fazendo com que a máquina sofra uma desaceleração e, assim, uma redução da velocidade mecânica.
- Quando a máquina opera como gerador, o fluxo rotórico estará adiantado em relação ao fluxo estatórico, e o torque mecânico será negativo, fazendo com que a máquina sofra uma aceleração e, conseqüentemente, um aumento da velocidade mecânica.

A influência da tensão rotórica na máquina fará com que ela tenha dois modos de operação a mais que a máquina gaiola de esquilo, o que a torna mais versátil.

4.3 REGIME PERMANENTE

Após realizar o estudo da máquina no regime dinâmico, o usuário tem a opção de continuar a aprendizagem no regime permanente da máquina.

Na Figura 74, é apresentada a curva característica como escorregamento *versus* torque eletromecânico. O usuário poderá obter outras curvas escolhendo a variável que desejar no **Eixo X** e **Y**. No painel *Valores*, o usuário visualiza as informações de partida para o torque eletromecânico, potência mecânica, velocidade mecânica e escorregamento.

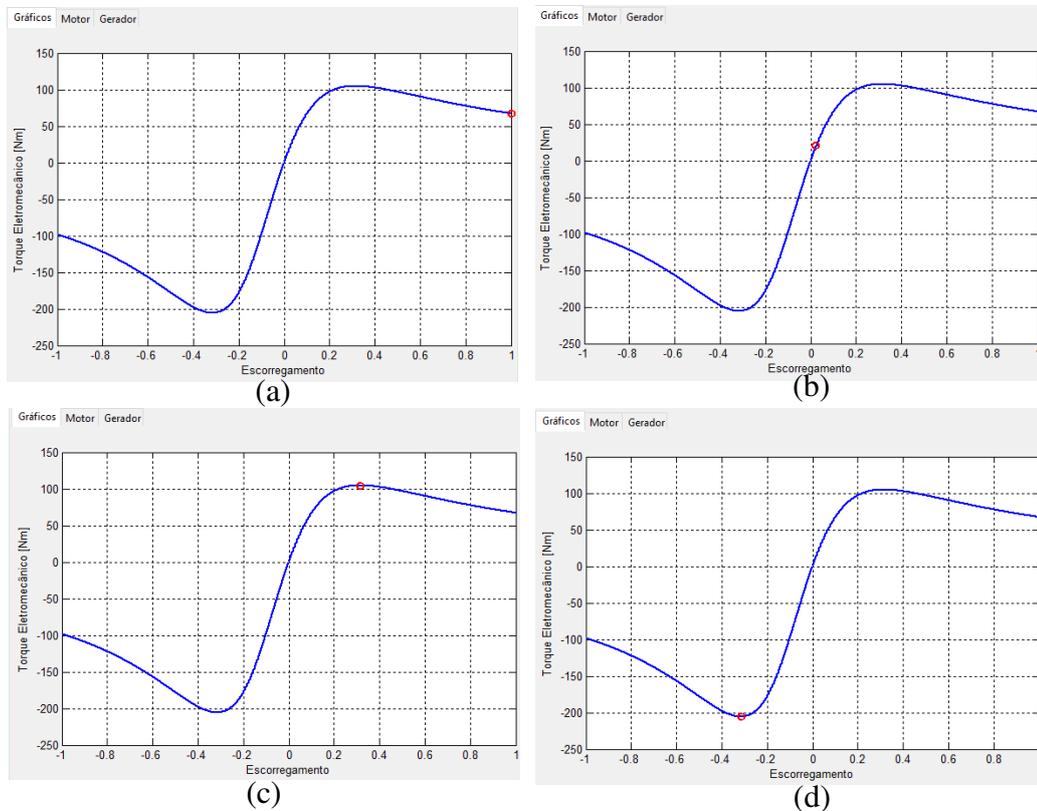
Figura 74: Escorregamento em função do torque para a máquina de indução gaiola de esquilo.



Fonte: Elaboração Própria.

Ao selecionar as caixinhas ao lado dos valores para o torque, aparecerá na tela um símbolo representando aquele valor no gráfico, ilustrado na Figura 75.

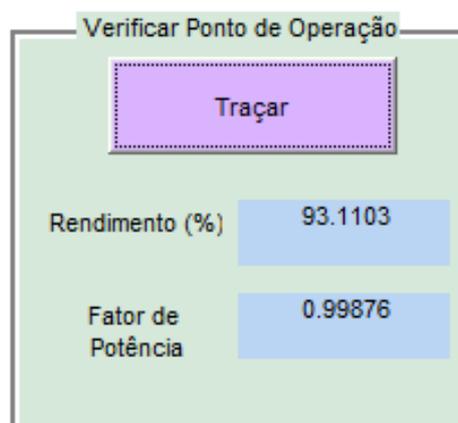
Figura 75: Escorregamento em função torque para a máquina de indução gaiola de esquilo, com marcação de pontos específicos no gráfico: (a) partida; (b) nominal; (c) máximo torque como gerador; (c) máximo torque como motor.



Fonte: Elaboração Própria.

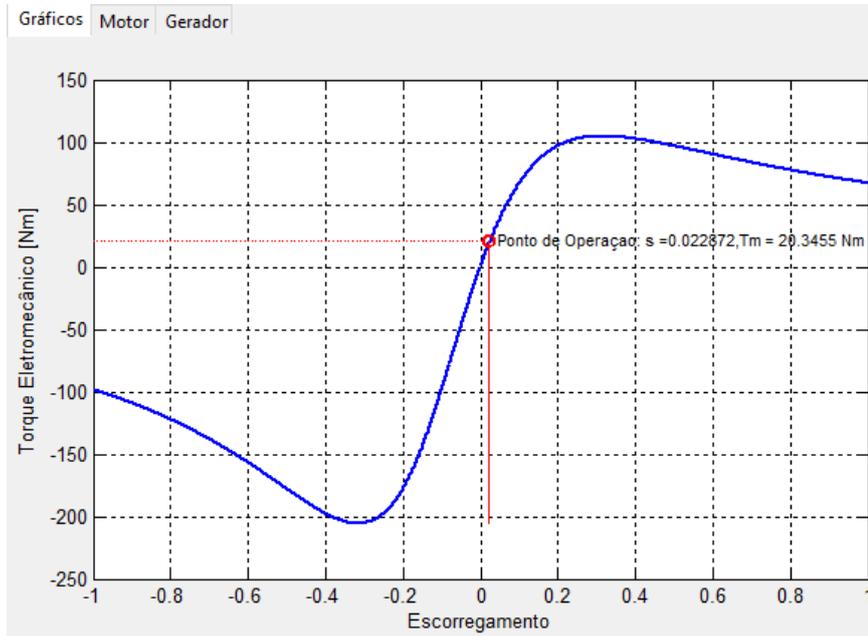
O usuário poderá verificar o ponto de operação da máquina, visualizando o valor do rendimento e da frequência para a máquina operando nesse valor. Para isso, ele deverá apertar o botão **Traçar** e, assim, marcar o ponto de operação.

Figura 76: Verificar ponto de operação, rendimento e fator de potência.



Fonte: Elaboração Própria.

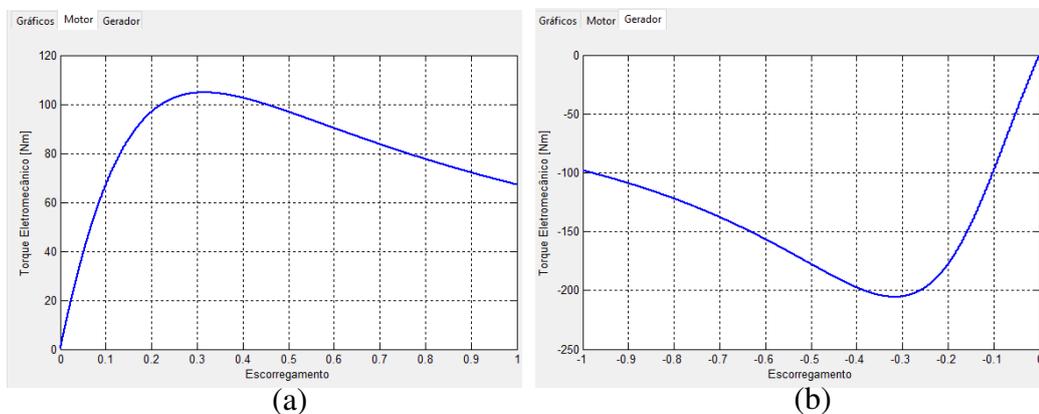
Figura 77: Escorregamento em função torque eletromecânico, com a marcação do ponto de operação.



Fonte: Elaboração Própria.

A Figura 78, é apresentado as figuras que correspondem as abas motor e gerador.

Figura 78: Escorregamento em função do torque eletromecânico: (a) motor; (b) gerador.



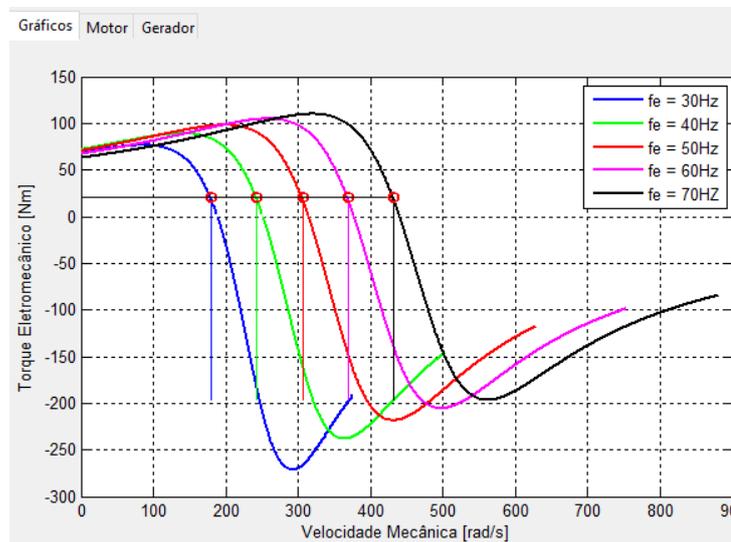
Fonte: Elaboração Própria.

Semelhante ao que foi feito para a opção de curva simples, o usuário simula a máquina aplicando o controle V/Hz, conforme Figura 79, para valores de frequência iguais a 30Hz, 40Hz, 50Hz, 60Hz e 70Hz.

Para realizar uma análise mais completa, plotou-se a curva velocidade mecânica em função do torque eletromecânico, e para cada frequência traçou-se o ponto de operação. Vale salientar que o usuário poderá visualizar os valores obtidos no painel

Valores, para cada tipo de frequência, assim como o valor do rendimento e do fator de potência.

Figura 79: Velocidade mecânica em função do torque eletromecânico utilizando o controle V/Hz, e com a marcação dos pontos de operação.



Fonte: Elaboração Própria.

Observa-se que, ao utilizar esse controle, pode-se variar a velocidade mecânica da máquina de acordo com a variação da frequência elétrica do sistema, mantendo o torque nominal constante.

O controle Volt/Hertz irá abranger o número de possibilidades de ponto de operação da máquina, dando liberdade de uso e operação, porém é importante lembrar que a potência utilizada deve ser próxima da nominal para não haver danos ao equipamento.

Assim, para cada valor de frequência é informado o valor do rendimento e fator de potência, dessa forma esses valores serão mostrados na Tabela 6.

Tabela 6: Valores obtidos para o controle V/Hz

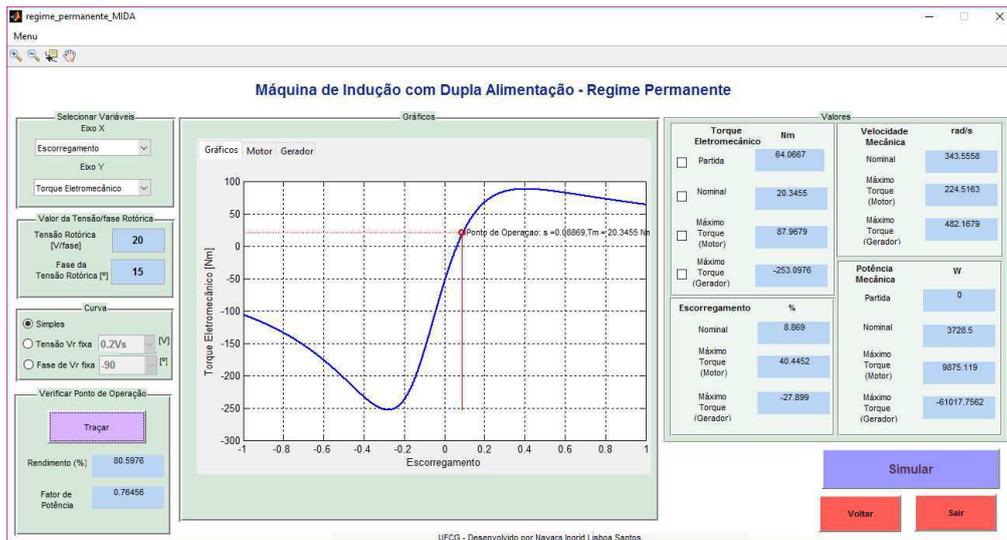
Frequências (Hz)	Velocidade Mecânica (rad/s)	Escorregamento (%)	Torque Eletromecânico (Nm)	Potência Mecânica (W)	Rendimento (%)	Fator de Potência
30	179,4303	4,0892	20,3455	3728,5	88,5198	0,99758
40	242,8439	3,3755	20,3455	3728,5	91,1527	0,99786
50	305,7948	2,6625	20,3455	3728,5	92,4902	0,99791
60	368,3705	2,2872	20,3455	3728,5	93,2022	0,99777
70	431,257	1,9476	20,3455	3728,5	93,8495	0,99779

Fonte: Elaboração Própria.

Observa-se que, para um mesmo torque e uma mesma potência, o rendimento da máquina aumentará, assim como o fator de potência.

O mesmo procedimento pode ser realizado para a máquina de indução com dupla alimentação. A Figura 80 ilustra a curva do escorregamento em função do torque eletromecânico, para um valor de tensão rotórica de 20V e deslocamento de fase de 15°.

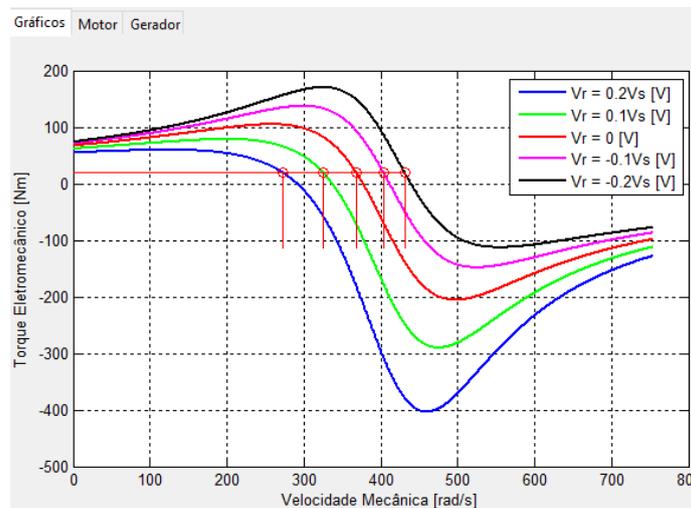
Figura 80: Escorregamento em função do torque eletromecânico para a máquina de indução de dupla alimentação, com a marcação do ponto de operação.



Fonte: Elaboração Própria.

Na Figura 81, é ilustrada a curva da velocidade mecânica em função do torque eletromecânico. São traçados os pontos de operação equivalente para cada valor de tensão rotórica e fase de 15.

Figura 81: Curva da velocidade mecânica x torque eletromecânico variando o valor da tensão rotórica



Fonte: Elaboração Própria.

Na Tabela 7, são mostrados os valores nominais da velocidade mecânica, torque e potência, assim como os valores do rendimento e fator de potência para cada caso.

Tabela 7: Valores obtidos da variação da tensão rotórica

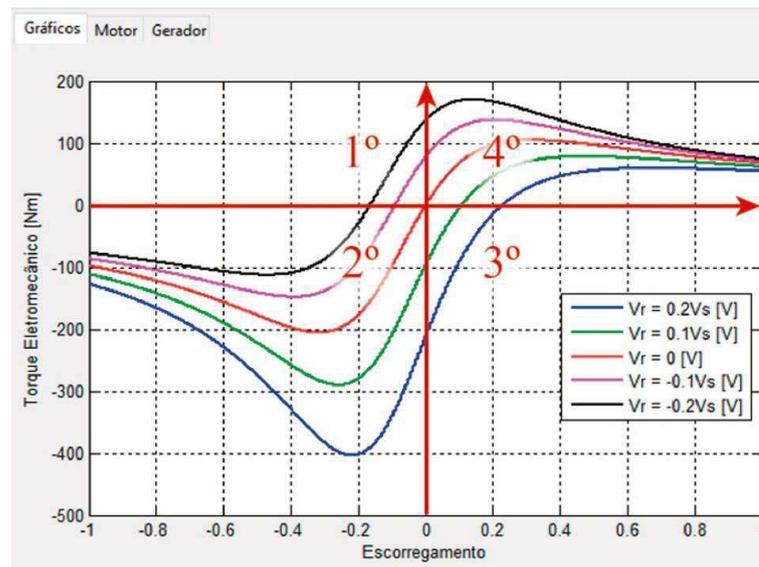
Tensões (V)	Velocidade Mecânica (rad/s)	Escorregamento (%)	Torque Eletromecânico (Nm)	Potência Mecânica (W)	Rendimento (%)	Fator de Potência
$0,2V_s$	272,4801	27,7224	20,3455	3728,5	53,3695	0,4352
$0,1V_s$	324,8272	13,8369	20,3455	3728,5	72,4007	0,62328
0	368,3686	2,2872	20,3455	3728,5	93,1103	0,99876
$-0,1V_s$	403,7205	-7,0897	20,3455	3728,5	86,9825	0,57438
$-0,2V_s$	431,2066	-14,3811	20,3455	3728,5	73,1972	0,34417

Fonte: Elaboração Própria.

À medida que a tensão se aproxima de zero, o rendimento é aumentado, assim como o fator de potência. Dessa forma, é possível variar a velocidade da máquina, de acordo com a tensão rotórica, e manter o torque constante.

Para valores negativos de tensão, a máquina opera no modo sobresíncrono, dessa forma a partir da curva apresentada e da curva da Figura 82 (escorregamento x torque) é possível visualizar a operação da máquina nos quatro quadrantes.

Figura 82: Velocidade mecânica em função do torque eletromecânico variando a tensão do rotor.



Fonte: Elaboração Própria.

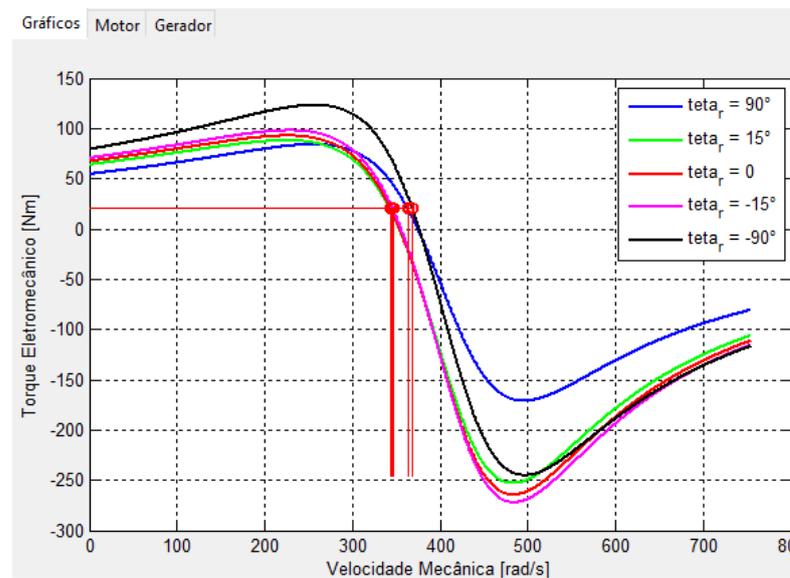
Assim, é importante analisar alguns aspectos com relação à tensão rotórica:

- Quando a tensão é zero (curva vermelha), a máquina opera em apenas dois quadrantes, que são as regiões convencionais da máquina;

- Quando a tensão é positiva (curva verde e azul), a máquina pode operar no terceiro quadrante, que corresponde a gerador subsíncrono;
- Quando a tensão é negativa (curva preta e rosa), a máquina pode operar no primeiro quadrante, que corresponde ao motor supersíncrono.

Modificando a fase da tensão rotórica, tem-se a curva da velocidade mecânica em função do torque eletromecânico, para alguns valores e amplitude de 20V/fase.

Figura 83: Velocidade mecânica em função do torque eletromecânico variando a fase da tensão rotórica.



Fonte: Elaboração Própria.

Na Tabela 8, são mostrados os valores nominais da velocidade mecânica, torque e potência, assim como os valores do rendimento e fator de potência para cada caso.

Tabela 8: Valores obtidos da variação da fase da tensão rotórica

θ_r (°)	Velocidade Mecânica (rad/s)	Escorregamento (%)	Torque Eletromecânico (Nm)	Potência Mecânica (W)	Rendimento (%)	Fator de Potência
90	363,8289	3,4914	20,3455	3728,5	86,1881	0,40635
15	343,5558	8,869	20,3455	3728,5	80,5976	0,76456
0	344,5409	8,6077	20,3455	3728,5	81,9777	0,98514
-15	346,5409	8,002	20,3455	3728,5	83,8925	0,88404
-90	369,0875	2,0965	20,3455	3728,5	97,248	0,37744

Fonte: Elaboração Própria.

À medida que a fase aumenta, a velocidade também aumenta para manter o torque nominal, porém ela sofre pouca variação. Com a aproximação do ângulo em $\pm 90^\circ$ a velocidade mecânica vai se aproximando da velocidade síncrona. O rendimento

permanece em uma faixa aceitável, mesmo com a variação do ângulo, porém o fator de potência decai quando o deslocamento se afasta muito de 0° . Assim, para se obter um equilíbrio, é necessário escolher uma tensão e uma fase adequada, para que a máquina opere em um nível desejado com um bom rendimento e um bom fator de potência.

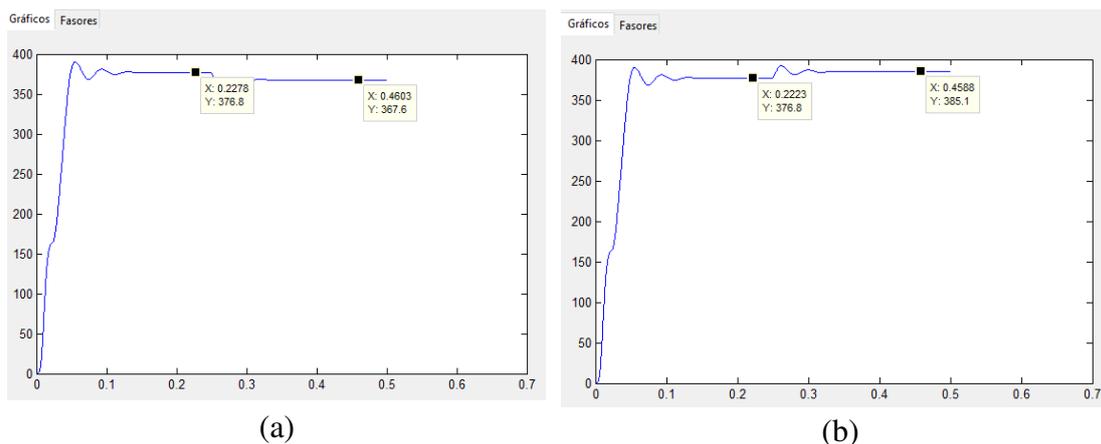
Devido a esse fato, destaca-se a importância de utilizar controle em malha aberta, para se ter um estudo aprofundado sobre a máquina, que possa ser utilizado em aplicações que exigem estratégias de controle mais complexas.

4.4 REGIME DINÂMICO E REGIME PERMANENTE

De modo a relacionar os resultados obtidos em regime dinâmico com os resultados obtidos em regime permanente, será mostrada uma sequência de passos que o usuário poderá utilizar para validar os resultados.

Para a máquina de indução gaiola de esquilo, o usuário deverá realizar a simulação em regime dinâmico aplicando uma carga igual ao valor do torque nominal com que a máquina opere como motor e gerador, verificando os valores. Dessa forma, é possível obter os valores da velocidade para quando o torque é zero e quando ele está no seu valor nominal como motor e como gerador. Na figura 84, apresenta-se esse resultado.

Figura 84: Velocidade Mecânica em função do tempo para a máquina de indução gaiola de esquilo: (a) motor, (b) gerador.

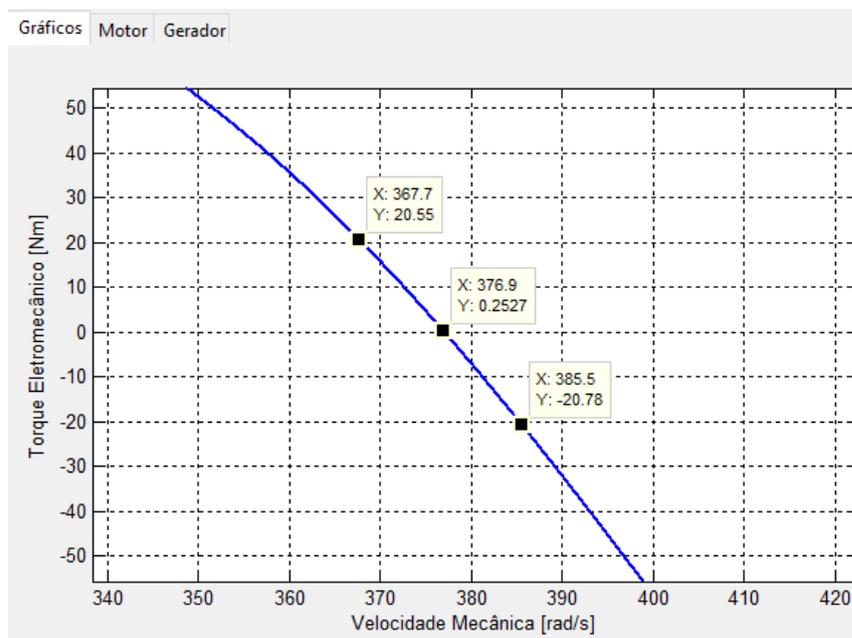


Fonte: Elaboração Própria.

Depois, o usuário deverá ir para o regime permanente e realizar a simulação da curva da velocidade mecânica em função do torque eletromecânico, observando, pois, os

valores correspondentes quando o torque é nulo e quando está no valor nominal como motor e como gerador.

Figura 85: Verificação dos valores na curva da velocidade em função do torque eletromecânico para o regime permanente.



Fonte: Elaboração Própria.

Os valores dos dados obtidos para os dois regimes são apresentados na Tabela 9:

Tabela 9: Valores obtidos do gráfico de regime dinâmico e regime permanente para a máquina de gaiola de esquilo.

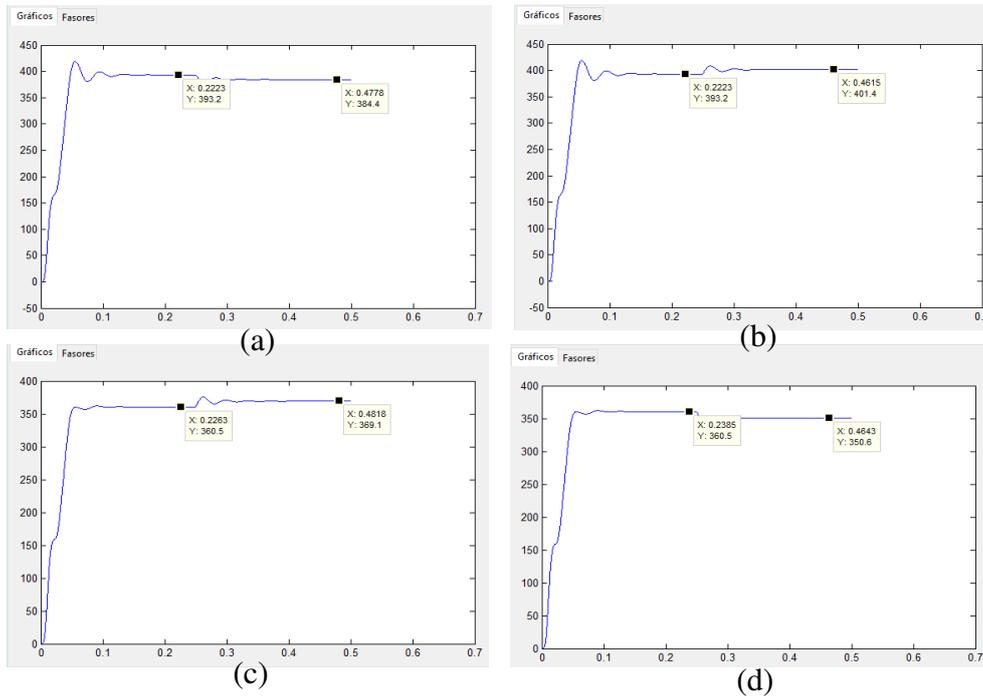
Torque (Nm)	Regime Dinâmico	Regime Permanente
	Velocidade (rad/s)	Velocidade (rad/s)
0 (sem carga)	376,8	376,9
20,3455 (motor)	367,6	367,7
-20,3455 (gerador)	385,1	385,5

Fonte: Elaboração Própria.

Verifica-se que os valores se equivalem, com algumas diferenças devido a erros de aproximação e a utilização do *Data Cursor*, onde não é possível obter o valor exato para o torque.

Realizando o mesmo procedimento para a máquina de indução de dupla alimentação, observando os quatro modos de operação. Salienta-se o fato de que os dados não serão exatamente os mesmos, devido a erros ocasionados nos cálculos, e a imprecisão do *Data Cursor*.

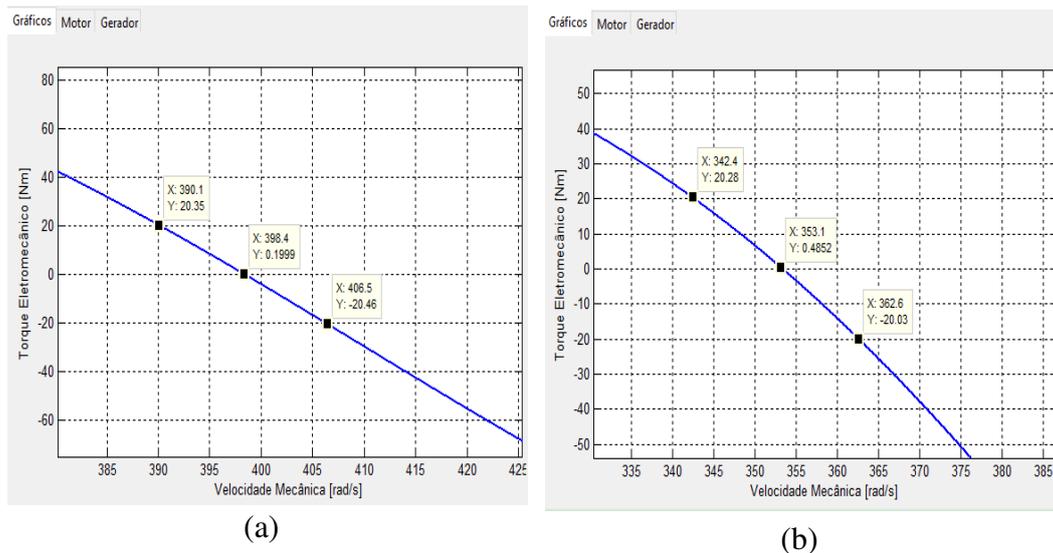
Figura 86: Velocidade Mecânica em função do tempo para a máquina de indução de dupla alimentação:
(a) 1º modo; (b) 2º modo; (c) 3º modo; (d) 4º modo.



Fonte: Elaboração Própria.

Na Figuras 87, utilizou-se a ferramenta *Zoom In*, para uma melhor visualização dos valores.

Figura 87: Verificação dos valores na curva da velocidade em função do torque eletromecânico para o regime permanente: (a) 1º e 2º modo; (b) 3º e 4º modo.



Fonte: Elaboração Própria.

Tabela 10: Valores obtidos do gráfico de regime dinâmico e regime permanente para a máquina de dupla alimentação.

Modos de Operação	Torque Mecânico (Nm)	Regime Dinâmico	Regime Permanente
		Velocidade (rad/s)	Velocidade (rad/s)
1° Modo	0 (sem carga)	393,2	398,4
	20,3455 (motor)	384,4	390,1
2° Modo	0 (sem carga)	393,2	398,4
	-20,3455 (gerador)	401,4	406,5
3° Modo	0 (sem carga)	360,5	351,3
	-20,3455 (gerador)	369,1	362,6
4° Modo	0 (sem carga)	360,5	351,3
	20,3455 (motor)	350,1	342,4

Fonte: Elaboração Própria.

Observa-se que os erros são relativamente baixos, mais que ambos os regimes podem conversar entre si e assim poder validar os resultados. Essas diferenças ocorrem devido a erros de aproximação, e a utilização do *Data Cursor*, onde não foi possível obter o valor exato para cada condição.

5 CONCLUSÕES

A interface **ANAGRIM** foi concluída com sucesso e possui uma interface amigável, com várias funcionalidades. O **ANAGRIM** foi desenvolvido com o principal objetivo de explanar o estudo sobre as máquinas elétricas de indução, além de ajudar na simplificação dos resultados de uma maneira didática, possibilitando o usuário aprender de forma interativa a manipulação dos pontos de operação de uma máquina.

Ao longo da execução da pesquisa, foi realizado um estudo detalhado sobre as máquinas elétricas de corrente alternada, analisando seus perfis de funcionamento e suas características. Foram também mostrados os procedimentos utilizados para os ensaios de caracterização por meio da descrição da plataforma.

No geral, as máquinas elétricas de indução são bastante utilizadas por serem práticas e mais baratas, porém sua teoria e aplicação é sofisticada, principalmente a máquina de indução com dupla alimentação.

Para esse trabalho, apenas utilizaram-se estratégias de controle em malha aberta com um intuito de entender melhor o comportamento da máquina para que se possa aplicar em trabalhos futuros.

A partir das simulações, foi possível observar o comportamento da máquina em regime permanente e dinâmico, assim como regiões de operação de ambas as máquinas. Dependendo do ponto de operação que se deseje operar, pode-se utilizar estratégias de controle, fazendo com que a máquina opere com um melhor aproveitamento de energia.

Conclui-se que, com essas análises realizadas na plataforma, foi possível a validação do estudo, e, assim, houve uma exploração das diversas possibilidades.

É importante lembrar que, nesse TCC, foram mostradas algumas opções de se trabalhar com as máquinas, porém o usuário tem uma enorme quantidade de possibilidades que podem ser utilizadas para o seu completo entendimento. Dessa forma, o usuário poderá verificar o comportamento da máquina diante de várias condições e verificar como a aplicação dessas condições influenciam na operação da máquina.

Como proposta para trabalhos futuros, sugere-se aprimoramento da interface gráfica e a implementação das seguintes funções:

- Identificar valores de potência ativa e reativa na interface;
- Permitir a alteração simultânea dos valores com a visualização do gráfico, utilizando o *slider*;
- Uma maior interação entre o regime dinâmico e o regime permanente;
- Uma maior interação entre as máquinas, de forma a realizar comparações;
- Implementar estudos de casos específicos, como aplicações em bomba d'água, motor de carro, motor de elevador e gerador eólico.
- Implementar outros tipos de controle em malha aberta;
- Mostrar de forma didática a utilização das equações;
- Exportar gráficos e valores.

REFERÊNCIAS

- ABAD, G. et al. **Doubly fed induction machine: modeling and control for wind energy generation**. New Jersey: A John Wiley e Sons, INC., 2011.
- BIM, E. **Máquinas Elétricas e Acionamento**. 3°. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.
- CARDOSO, P. A. S. F.; GOMES, J. Energia eólica: tipos de geradores e conversores usados atualmente. **O Setor Elétrico**, p. 161, Maio 2014.
- DE JESUS, J. F.; CASTRO, R. M. **Equipamento Elétrico dos geradores eólicos**. Lisboa: [s.n.], 2008.
- FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, C.; UMANS, S. D. **Máquinas Elétricas**. 7°. ed. São Paulo: Bookman, 2014.
- FRANCHI, C. M. **Acionamentos Elétricos**. São Paulo: Érica, 2007.
- JACOBINA, C. B. **Sistema de Acionamento Estático de Máquina Elétrica**. UFCG. Campina Grande. 2005.
- RASHID, M. H. **Eletrônica de Potência: circuitos, dispositivos e aplicações**. [S.l.]: Makron, 1999.
- ROBERTS, P. C. **A Study of Brushless Doubly-Fed (Induction) Machines**. University of Cambridge. Cambridge. 2004.
- ROCHA, N. **Sistemas Estáticos de Geração Elétrica com Gerador de indução a Partir de Fonte Eólica**. UFCG. Campina Grande. 2008.