



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Eudes Rodrigo Nunes de Oliveira

**Projeto de uma bancada de ensaios e estudo de
um motor assíncrono monofásico de fase
dividida**

Campina Grande, Paraíba

Julho de 2018

Eudes Rodrigo Nunes de Oliveira

Projeto de uma bancada de ensaios e estudo de um motor assíncrono monofásico de fase dividida

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande, Campus Campina Grande, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Identificação de Sistemas

Orientador: Edgar Roosevelt Braga Filho, D. Sc

Campina Grande, Paraíba

Julho de 2018

Eudes Rodrigo Nunes de Oliveira

Projeto de uma bancada de ensaios e estudo de um motor assíncrono monofásico de fase dividida/ Eudes Rodrigo Nunes de Oliveira. – Campina Grande, Paraíba, Julho de 2018-

49 p. : il. ; 30 cm.

Orientador: Edgar Roosevelt Braga Filho, D. Sc
Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, Julho de 2018.

Eudes Rodrigo Nunes de Oliveira

Projeto de uma bancada de ensaios e estudo de um motor assíncrono monofásico de fase dividida

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande, Campus Campina Grande, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovado em ____ / ____ / ____

Professor Avaliador

Universidade Federal de Campina Grande
Avaliador

Edgar Roosevelt Braga Filho, D. Sc
Universidade Federal de Campina Grande
Orientador

Campina Grande, Paraíba
Julho de 2018

*Dedico este trabalho à minha mãe, Lúcia,
ao meu pai, Audecy,
e a minha namorada, Magda.*

Agradecimentos

Agradeço aos meus pais, Audecy Belarmino e Lúcia de Fátima, por toda sua dedicação, paciência e, principalmente, pelos ensinamentos morais que nem a própria universidade poderia me dar. A minha irmã, Laíse, pelo companheirismo nas horas difíceis e, por último, a minha sobrinha, Maria Isabel, por abrilhantar meus dias com sua inteligência e inocência. Esta jornada só foi possível pelo sonho compartilhado da nossa família.

Aos meus amigos de universidade André Queiróz, Rogério Mota, Mateus Queiroga, Luciano Alves, Charles Dias, Mateus Lucena, Bianca Porto, Rodrigo Rayton, Andrei Pimentel, Elam Gomes, Daniel Souza, Hotoniones e, em especial, Francisco Maerle, pela vivência e aprendizados compartilhados. Vocês tornaram a jornada mais leve através dos anos.

A minha namorada, e agora mãe do meu filho, Magda Leite, por demonstrar amor, paciência e confiança em cada passo dado.

Ao meu orientador, Edgar, pelo exemplo de pessoa e profissional íntegro, por sua organização e comprometimento na preparação das aulas e por sua compreensão humana em momentos críticos.

Aos professores Célio Anésio, Leimar, Ubirajara e Raquel, por seu apoio e confiança nos momentos de incertezas.

A Manoel Adalberto Guedes, pela inúmeras horas dedicadas em ajudar, sempre sem esperar nada em troca e com a maior boa vontade possível.

A Adail, pelo exemplo de execução da atividade pública, além do comprometimento humano em ver o crescimento dos alunos de graduação em engenharia elétrica da UFCG.

Por fim, ao povo brasileiro, por ter financiado o meu desenvolvimento educacional, de altíssimo nível, em universidade pública e no exterior.

*"O medo é assustador até virar familiar. Então o medo é circunstancial, e, portanto,
relativo."*

(Guilherme Cavallari)

Resumo

As máquinas assíncronas ou de indução monofásicas são dispositivos que possuem apenas um conjunto de bobinas com alimentação alternada de baixa potência. Estes tipos de máquinas possuem características específicas, pois necessitam de auxílio para partida devido a presença, quando em repouso, de conjugados iguais em sentidos opostos. Dentre os tipos de partida existentes estão a partida a capacitor, a duplo-capacitor e os motores de duplo enrolamento. Este trabalho de conclusão de curso (TCC) visa o estudo característico dos motores de indução monofásicos com partida de duplo enrolamento e suas particularidades, além da elaboração de uma ferramenta didática para ensaios em laboratório.

Palavras-chave: motor assíncrono; motor monofásico; capacitor de partida; laboratório; máquinas elétricas.

Abstract

Single-phase asynchronous or induction machines are devices that have only one set of coils with low-power alternating power. These types of machines have specific characteristics, since they require starting aid due to the presence, when at rest, of equal conjugates in opposite directions. Among the available starting types are the capacitor, double-capacitor and double-winding motors. This work of course completion (TCC) aims at the study of single-phase induction motors with double winding starting and their particularities, in addition to the elaboration of a didactic tool for laboratory tests. **Keywords:** asynchronous motor; single phase motor; capacitor-start; laboratory; electrical machines.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Esquema do estator e do rotor de um motor assíncrono monofásico de fase dividida	19
Figura 2 – Torque em máquinas monofásicas assíncronas sem enrolamento auxiliar para partida	20
Figura 3 – Dinâmica do campo pulsante em relação aos campos girantes	21
Figura 4 – Seção transversal de um motor de indução monofásico	21
Figura 5 – Sistema de tensões de quatro fases desequilibrado	23
Figura 6 – Circuito equivalente representando as reações do campo progressivo e retrógrado vistos pelo enrolamento principal	24
Figura 7 – Circuito equivalente do motor bifásico desequilibrado pelo conjunto de sequência positiva e para a sequência negativa	25
Figura 8 – Circuito equivalente de um motor de indução monofásico baseado na teoria de componentes simétricos	26
Figura 9 – Circuito equivalente de um motor de indução monofásico operando num escorregamento s	27
Figura 10 – Circuito equivalente generalizado para máquinas bifásicas	27
Figura 11 – Segregação de perdas para um motor assíncrono monofásico	28
Figura 12 – Dados de placa do motor de indução com capacitor de partida	30
Figura 13 – Motor de indução VOGES 110/220V de fase dividida	30
Figura 14 – Conexões internas para o motor VOGES de fase dividida	31
Figura 15 – Esquemático da bancada para acesso aos terminais do motor	32
Figura 16 – Bancada de ensaios com os respectivos dispositivos utilizados	33
Figura 17 – Circuito equivalente de um motor de indução monofásico em teste com rotor bloqueado	35
Figura 18 – Circuito equivalente de um motor de indução monofásico em vazio	36
Figura 19 – Configuração para a estimação da resistência dos enrolamentos da máquina	37
Figura 20 – Montagem para medição da impedância do enrolamento auxiliar	38
Figura 21 – Ensaio com o rotor bloqueado	39
Figura 22 – Ensaio com o motor a vazio	40
Figura 23 – Corrente de entrada x Escorregamento	41
Figura 24 – Rendimento x Velocidade em pu	41
Figura 25 – Fator de Potência x Velocidade em pu	42
Figura 26 – Torque x Escorregamento	43
Figura 27 – Potência no eixo x Escorregamento	44

Lista de abreviaturas e siglas

AC	Corrente alternada (do inglês 'alternated current')
DC	Corrente contínua (do inglês 'direct current')
fmm	Força magnetomotriz
rpm	Rotações por minuto

Lista de símbolos

α	Ângulo entre a força magnetomotriz do estator e rotor
a	operador dos componentes simétricos
a	relação efetiva entre o número de espiras no circuito auxiliar e principal
C_{pt}	Capacitor de partida
\hat{E}_a	Reação total do campo no enrolamento auxiliar
\hat{E}_m	Reação total do campo no enrolamento principal
\hat{E}_{mf}	Reação do campo progressivo vista do enrolamento principal
\hat{E}_{mb}	Reação do campo retrógrado vista do enrolamento principal
\mathcal{F}_s	Força magnetomotriz do estator
\mathcal{F}_r	Força magnetomotriz do rotor
\mathcal{F}_f	Força magnetomotriz progressiva
\mathcal{F}_b	Força magnetomotriz retrógrada
HP	Unidade de potência (do inglês ‘horse power’)
i	Corrente alternada no enrolamento do estator
\hat{I}_1	Componente simétrico da corrente de um sistema polifásico desequilibrado
\hat{I}_2	Componente simétrico da corrente de um sistema polifásico desequilibrado
\hat{I}_a	Corrente no enrolamento auxiliar do estator
\hat{I}_a	Corrente de um sistema polifásico desequilibrado na fase a
\hat{I}_{af}	Corrente progressiva no enrolamento auxiliar do estator
\hat{I}_{ab}	Corrente retrógrada no enrolamento auxiliar do estator
\hat{I}_d	Corrente de um sistema polifásico desequilibrado na fase d
\hat{I}_m	Corrente no enrolamento principal do estator

\hat{I}_{mb}	Corrente retrógrada no enrolamento principal do estator
\hat{I}_{mf}	Corrente progressiva no enrolamento principal do estator
I_{max}	Corrente de pico no enrolamento do estator
j	Unidade imaginária do números complexo
k	Constante qualquer
k_i	Chave centrífuga da máquina
n	velocidade do rotor em rpm
n	velocidade síncrona do rotor em rpm
N	Número de voltas efetivas do enrolamento do estator
N_a	Número de voltas efetivas do enrolamento auxiliar do estator
N_b	Número de voltas efetivas do enrolamento principal do estator
P_{eixo}	Potência no eixo da máquina
P_{gf}	Potência total entregue ao campo progressivo pelas duas fases do estator
P_{gf}	Potência total entregue ao campo retrógrado pelas duas fases do estator
Φ_a	Fluxo magnético do enrolamento auxiliar do estator
Φ_b	Fluxo magnético do enrolamento principal do estator
Φ_{ba}	Fluxo magnético retrógrado do enrolamento auxiliar
Φ_{bm}	Fluxo magnético retrógrado do enrolamento principal
Φ_f	Fluxo magnético progressivo
Φ_{fa}	Fluxo magnético progressivo do enrolamento auxiliar
Φ_{fm}	Fluxo magnético progressivo do enrolamento principal
Φ_r	Fluxo magnético do rotor
Φ_s	Fluxo magnético do estator
P_{mech}	Potência mecânica desenvolvida pela máquina
P_{rot}	Perdas rotacionais da máquina
r_1	Resistência do enrolamento principal do estator

r'_2	Resistência do rotor referida ao estator
R_f	Resistência vista da reação do campo progressivo vista do enrolamento principal
R_{Fa}	Resistência a frio do enrolamento auxiliar da máquina
R_{Fm}	Resistência a frio do enrolamento principal da máquina
R_{Qm}	Resistência a quente do enrolamento principal da máquina
R_b	Resistência vista da reação do campo progressivo vista do enrolamento principal
s	Escorregamento
s_b	Escorregamento retrógrado
θ	Ângulo entre a força magnetomotriz do estator e o eixo do enrolamento do estator
T_f	Torque progressivo
T_b	Torque retrógrado
T	Torque resultante da diferença entre o torque progressivo e o torque retrógrado
\hat{V}_0	Componente de sequência zero de um sistema polifásico desequilibrado
\hat{V}_1	Componente de sequência positiva de um sistema polifásico desequilibrado
\hat{V}_2	Componente de sequência negativa de um sistema polifásico desequilibrado
\hat{V}_3	Componente simétrico da tensão de um sistema polifásico desequilibrado
\hat{V}_a	Tensão terminal do enrolamento auxiliar do estator
\hat{V}_a	Tensão de um sistema polifásico desequilibrado da fase a
\hat{V}_b	Tensão de um sistema polifásico desequilibrado da fase b
\hat{V}_c	Tensão de um sistema polifásico desequilibrado da fase c
\hat{V}_d	Tensão de um sistema polifásico desequilibrado da fase d
\hat{V}_m	Tensão terminal do enrolamento principal do estator

\hat{V}_{mb}	Tensão retrógrada do enrolamento principal do estator
\hat{V}_{mf}	Tensão progressiva do enrolamento principal do estator
\hat{V}_t	Tensão no terminal da máquina
w_s	velocidade mecânica do rotor em rad/s
w_s	velocidade síncrona do campo do estator em rad/s
x_1	reatância do enrolamento principal do estator
x'_2	reatância do rotor referida ao estator
X_f	Reatância vista da reação do campo progressivo vista do enrolamento principal
X_b	Reatância vista da reação do campo retrógrado vista do enrolamento principal
x_ϕ	reatância de magnetização do motor
τ_{mec}	Torque mecânico
Z_1	Impedância do circuito equivalente do motor bifásico desequilibrado de sequência positiva
Z_2	Impedância do circuito equivalente do motor bifásico desequilibrado de sequência negativa
Z_{1m}	Impedância do circuito enrolamento principal do estator
Z_{1a}	Impedância do circuito enrolamento auxiliar do estator
Z_b	Impedância vista da reação do campo retrógrado vista do enrolamento principal
Z_d	Metade da diferença das impedâncias referidas ao enrolamento principal
Z_f	Impedância vista da reação do campo progressivo vista do enrolamento principal
Z_o	Impedância média das impedâncias referidas ao enrolamento principal
o	grau

Sumário

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Objetivos	17
1.2	Estrutura do trabalho	17
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1	Motor monofásico assíncrono de fase dividida	19
2.2	Torque induzido e teoria do duplo campo girante	19
2.3	Escorregamento para uma máquina assíncrona monofásica]	22
2.4	Componentes simétricos aplicados a motores bifásicos desequilibrados	23
2.5	Segregação de perdas	28
2.5.1	motor operando sem enrolamento auxiliar	28
2.5.2	motor operando com enrolamento auxiliar	29
2.6	Torque	29
2.6.1	motor operando sem enrolamento auxiliar	29
2.6.2	Motor operando com enrolamento auxiliar	29
2.7	Bancada de ensaios	30
3	ENSAIOS PARA DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS	34
3.1	Resistência dos enrolamentos do estator	34
3.1.1	Resistência a frio e a quente - Enrolamento principal	34
3.1.2	Enrolamento auxiliar	34
3.2	Impedância dos enrolamentos referidas ao estator - Ensaio com o rotor bloqueado	35
3.3	Reatância de magnetização x_ϕ - Ensaio com o motor a vazio	36
4	EXPERIMENTOS	37
4.1	Instrumentação	37
4.2	Resistência dos enrolamentos do estator	37
4.2.1	r_{1m}	37
4.2.2	r_{1a} e x_{1a}	38
4.3	Ensaio com o rotor bloqueado	39
4.3.1	r'_2	39
4.3.2	$x_{1m} = x'_2$	39
4.4	Ensaio com o motor a vazio	40
4.5	Curvas características - MATLAB	40

5	CONCLUSÃO	45
	REFERÊNCIAS	46
	APÊNDICES	47
	APÊNDICE A – ALGORITMOS DESENVOLVIDOS NO MATLAB	48
	APÊNDICE B – GUIA DE EXPERIMENTOS	49

1 Introdução

Os motores de indução são dispositivos essenciais no mundo moderno por sua versatilidade, sendo utilizados desde equipamentos como eletrodomésticos até os mais variados processos industriais. Neste aspecto, os motores de indução monofásicos apresentam grande aplicabilidade por questões de custo e desempenho, podendo ser utilizados em redes distribuição monofásicas.

Os aspectos estruturais de uma máquina de indução monofásica se assemelham aos de um motor de indução polifásico, sendo o seu diferencial encontrado na distribuição dos enrolamentos do estator. Este aspecto construtivo, particular das máquinas assíncronas monofásicas, se deve a necessidade de auxílio para partida devido a presença, quando em repouso, de conjugados iguais em sentidos opostos. Para que haja a presença de um conjugado mecânico não nulo, os enrolamentos do estator são alocados com 90° de deslocamento espacial entre si e projetados de forma que haja um desvio de fase na corrente de cada enrolamento de 90° entre eles.

Compreendendo-se a necessidade de meios de partida auxiliares para os dispositivos rotóricos assíncronos, pode-se classificar o motor de indução monofásico de acordo com o dispositivo de partida auxiliar por ele utilizado. Desta forma, estes motores podem ser classificados como motor de indução monofásico de fase dividida, de capacitor de partida, de capacitor permanente ou ainda de duplo capacitor.

1.1 Objetivos

Este estudo visa detalhar o motor assíncrono monofásico através de ensaios para determinação de parâmetros e posterior elaboração de rotinas numéricas para cálculo de potência, torque, fator de potência, dentre outras grandezas. Em seguida, propomos a elaboração de uma bancada de ensaios e um guia didático para o experimento, facilitando a obtenção dos parâmetros para posterior estudo por parte dos alunos de graduação.

1.2 Estrutura do trabalho

Este trabalho apresenta a seguinte distribuição. O capítulo um é introdutório, apresentando a contextualização do tema, os objetivos do relatório e sua estrutura. O capítulo dois apresenta uma revisão bibliográfica sobre o motor assíncrono monofásico de fase dividida. O capítulo três apresenta os ensaios necessários para determinação dos parâmetros. No capítulo quatro apresenta-se os experimentos realizados em laboratório.

Finalmente, o capítulo cinco apresenta as conclusões.

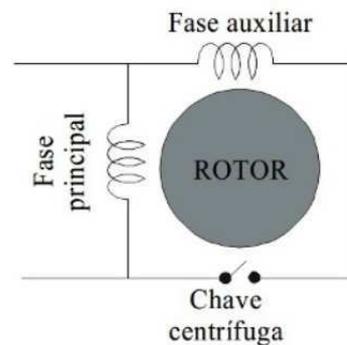
2 Fundamentação Teórica

2.1 Motor monofásico assíncrono de fase dividida

Um motor assíncrono monofásico é um dispositivo constituído por dois enrolamentos com características diferentes em seu estator defasados espacialmente de 90° , sendo o enrolamento principal de elevada reatância e baixa resistência e o enrolamento auxiliar exatamente o contrário. O enrolamento auxiliar é ainda ativado e desativado conforme sua necessidade por um interruptor centrífugo (SEN, 1997).

O objetivo desta diferença nos enrolamentos do estator reside na necessidade de resultar em correntes defasadas no tempo de forma a criar um campo giratório responsável por iniciar a rotação (SEN, 1997).

Figura 1 – Esquema do estator e do rotor de um motor assíncrono monofásico de fase dividida.



Fonte: Adaptado de (TORO, 1994).

O interruptor centrífugo é projetado de forma a desligar o enrolamento auxiliar quando o rotor atinge 80% da rotação nominal de forma a proteger seus enrolamentos após a partida (TORO, 1994).

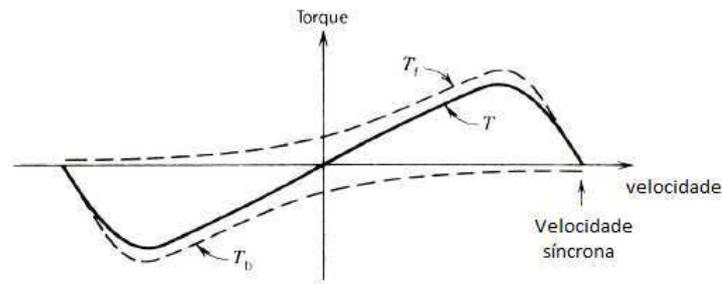
A inversão do sentido de rotação deste tipo de moto se faz possível invertendo-se os pólos de qualquer um dos enrolamentos sendo que, quando em repouso, o sentido de rotação é determinado pelo sentido que é dado na partida (TORO, 1994).

2.2 Torque induzido e teoria do duplo campo girante

Um motor monofásico de constituição simples não possui torque de partida, fazendo-se necessário modificar sua constituição física de forma a criar um torque inicial não nulo

responsável por dar partida na máquina (TORO, 1994). A figura abaixo representa a relação Torque x Velocidade para um motor simples, sem dispositivos para auxiliarem sua partida.

Figura 2 – Torque em máquinas monofásicas assíncronas sem enrolamento auxiliar para partida.



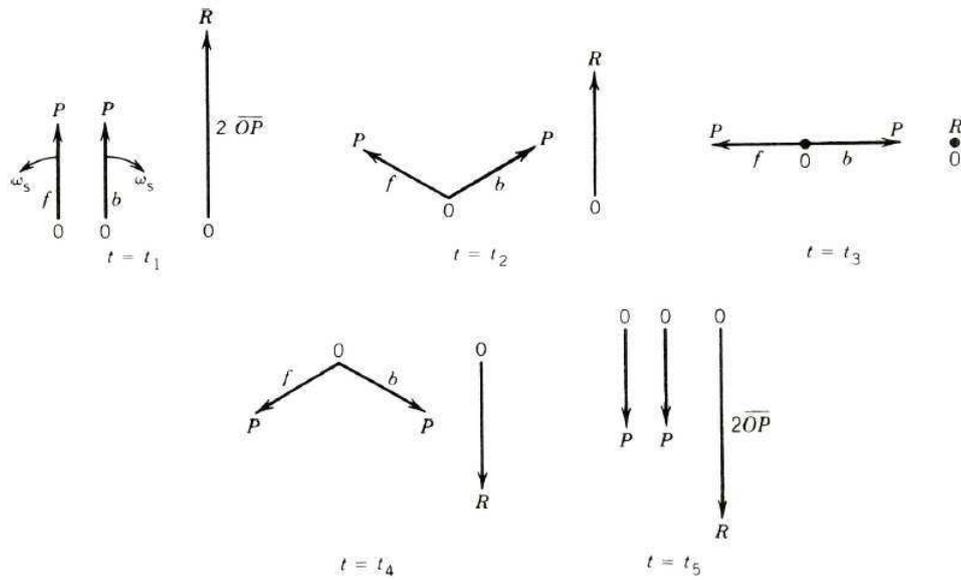
Fonte: Adaptado de (SEN, 1997).

Conforme constatou-se anteriormente, sem uma forma auxiliar para a partida, quando o rotor está parado, ele tende a permanecer parado devido a característica pulsante do seu campo. No entanto, caso haja um "desequilíbrio" e o motor desenvolva qualquer movimento inicial, este permanecerá em movimento (FITZGERALD, 1961).

A tensão induzida nas bobinas do rotor produz um fluxo (Φ_r) também pulsante (fixo e de módulo variável) no rotor, ao longo do mesmo eixo do fluxo do estator (Φ_s). A lei de Lenz diz que esses dois fluxos tendem a serem opostos um ao outro, o que resulta em torque resultante de partida igual a zero.

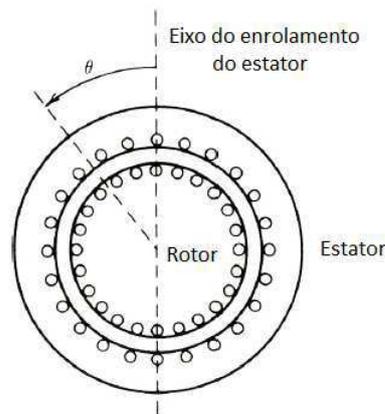
O rotor pode ser colocado em movimento através de uma ação física ou através de circuitos auxiliares. O campo pulsante (FMM ou Fluxo) pode ser decomposto em duas componentes vetoriais, cada qual com metade da magnitude do vetor original e girando em sentidos opostos, como ilustrado na figura 2. As componentes vetoriais f (forward) e b (backward), giram em sentido anti-horário e horário, respectivamente.

Figura 3 – Dinâmica do campo pulsante em relação aos campos girantes.



Fonte: Adaptado de (SEN, 1997).

Figura 4 – Seção transversal de um motor de indução monofásico.



Fonte: Adaptado de (SEN, 1997).

Sendo θ o ângulo em relação ao eixo do estator, a força magnetomotriz é dada por:

$$F(\theta) = N * i * \cos(\theta)$$

Sendo que N é o número de voltas do enrolamento do estator e $i = I_{max} \cos(\omega t)$ (SEN, 1997).

A partir da identidade trigonométrica $\cos(x) = \frac{1}{2} * (\cos(-x) + \cos(x))$ pode-se determinar os valores das componentes de avanço e atraso (SEN, 1997):

$$F(\theta) = N * i * \frac{1}{2} * \cos(-x) + N * i * \frac{1}{2} * \cos(x)$$

ou ainda:

$$F(\theta) = \frac{NI_{max}}{2} \cos(\omega t - \theta) + \frac{NI_{max}}{2} \cos(\omega t + \theta)$$

Onde $F_f = N * i * \frac{1}{2} * \cos(-x)$ representa a componente da FMM no sentido anti-horário e $F_b = N * i * \frac{1}{2} * \cos(x)$ a componente da FMM no sentido horário (SEN, 1997).

O resultado é portanto:

$$F(\theta) = F_f + F_b$$

Caso $F_f > F_b$ ou $F_f < F_b$, tem-se $F(\theta)$ diferente de zero e, conseqüentemente, o torque também será diferente de zero, resultando em movimento. Por outro lado, se o torque no eixo for zero ($F_f = F_b$) e conseqüentemente $F(\theta) = 0$, a máquina permanecerá parada (SEN, 1997).

Isso significa que, uma vez que a máquina seja colocada em movimento, através de um torque inicial, ela manterá esse movimento por que as componentes vetoriais do torque serão desiguais (SEN, 1997).

2.3 Escorregamento para uma máquina assíncrona monofásica]

Conforme será posteriormente explicado, pode-se dividir o circuito equivalente de um motor assíncrono monofásico de fase dividida de acordo com suas componentes de avanço e atraso resultantes do deslocamento espacial dos seus enrolamentos e das características físicas do seu enrolamento auxiliar (TORO, 1994). Portanto, representa-se matematicamente o escorregamento para a máquina assíncrona monofásica conforme demonstrado abaixo.

Para o campo no sentido anti-horário (avanço ou forward) tem-se (TORO, 1994):

$$s_f = \frac{n_s - n}{n_s} = s.$$

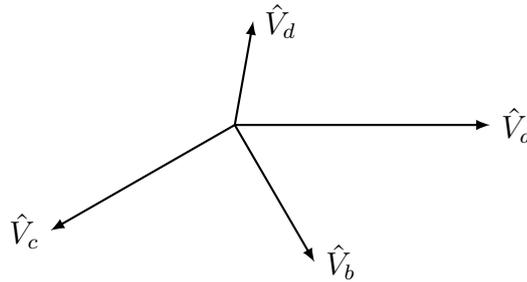
Para o campo em sentido horário (atraso ou backward) tem-se (TORO, 1994):

$$s_b = \frac{n_s - (-n)}{n_s} = 1 + 1 - s = 2 - s.$$

2.4 Componentes simétricos aplicados a motores bifásicos desequilibrados

Um sistema bifásico desequilibrado pode ser representado por um de quatro fases. A figura abaixo representa um sistema de tensões polifásico de quatro fases desequilibrado que pode ser decomposto em termo das suas componentes de avanço e atraso (TORO, 1994).

Figura 5 – Sistema de tensões de quatro fases desequilibrado.



Fonte: Adaptado de (TORO, 1994).

$$\hat{V}_a = \hat{V}_1 + \hat{V}_2 + \hat{V}_3 + \hat{V}_0$$

$$\hat{V}_b = a\hat{V}_1 + a^3\hat{V}_2 + a^2\hat{V}_3 + \hat{V}_0$$

$$\hat{V}_c = a^2\hat{V}_1 + a\hat{V}_2 + \hat{V}_3 + \hat{V}_0$$

$$\hat{V}_d = a^3\hat{V}_1 + a\hat{V}_2 + a^2\hat{V}_3 + \hat{V}_0$$

Sabendo-se que as componentes de sequência positiva e negativa podem ser calculadas de acordo com as equações abaixo (TORO, 1994):

$$a = 1\angle -90^\circ = -j$$

$$\hat{V}_0 = \frac{1}{4}(\hat{V}_a + \hat{V}_b + \hat{V}_c + \hat{V}_d)$$

$$\hat{V}_1 = \frac{1}{4}(\hat{V}_a + j\hat{V}_b - \hat{V}_c - j\hat{V}_d)$$

$$\hat{V}_2 = \frac{1}{4}(\hat{V}_a - j\hat{V}_b - \hat{V}_c + j\hat{V}_d)$$

$$\hat{V}_3 = \frac{1}{4}(\hat{V}_a - \hat{V}_b + \hat{V}_c - \hat{V}_d)$$

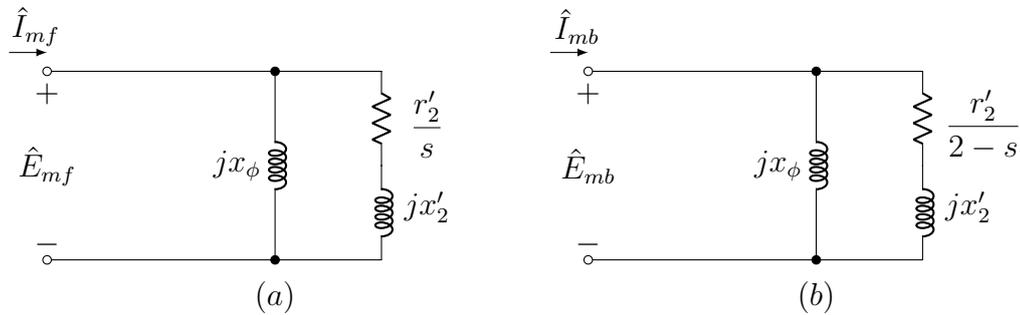
Para representar um sistema bifásico desequilibrado no sistema de quatro fases basta assumirmos que $\hat{V}_c = -\hat{V}_a$ e $\hat{V}_b = -\hat{V}_d$ (TORO, 1994). Desta forma:

$$\hat{V}_a = \hat{V}_1 + \hat{V}_2 + \hat{V}_3 + \hat{V}_0 = \hat{V}_1 + \hat{V}_2$$

$$\hat{V}_d = a^3\hat{V}_1 + a\hat{V}_2 + a^2\hat{V}_3 + \hat{V}_0 = j\hat{V}_1 - j\hat{V}_2$$

Desta forma pode-se representar o circuito equivalente para o enrolamento principal e auxiliar em duas partes que representam a resposta as tensões de sequência positiva e a resposta as tensões de sequência negativa. Desta forma, pode-se ilustrar o diagrama da seguinte maneira:

Figura 6 – Circuito equivalente representando as reações do (a) campo progressivo e (b) retrógrado vistos pelo enrolamento principal.



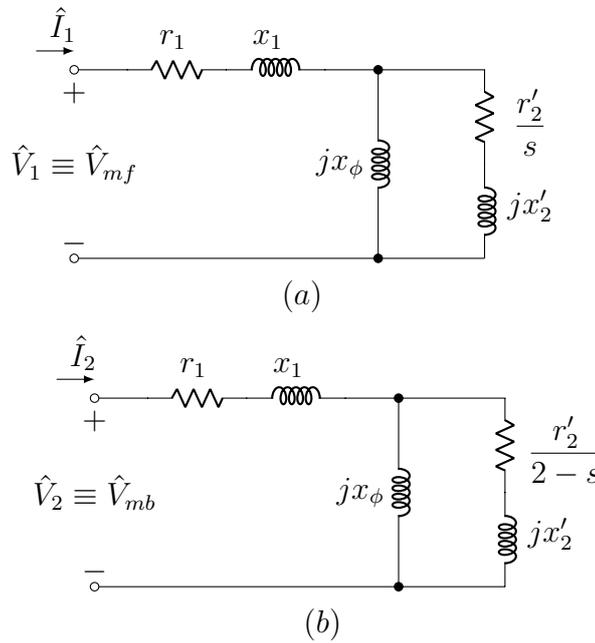
Fonte: Adaptado de (FITZGERALD, 1961).

Onde:

- x_ϕ : reatância de magnetização;
- x'_2 : reatância de dispersão do rotor em relação ao estator;
- r'_2 : resistência do rotor.

$$Z_f = R_f + jX_f = \frac{jx_\phi \left(\frac{r'_2}{s} + jx'_2 \right)}{\frac{r'_2}{s} + j(x_\phi + x'_2)} \quad Z_b = R_b + jX_b = \frac{jx_\phi \left(\frac{r'_2}{2-s} + jx'_2 \right)}{\frac{r'_2}{2-s} + j(x_\phi + x'_2)}$$

Figura 7 – Circuito equivalente do motor bifásico desequilibrado pelo (a) conjunto de sequência positiva e para (b) o de sequência negativa.



Fonte: Adaptado de (TORO, 1994).

Onde:

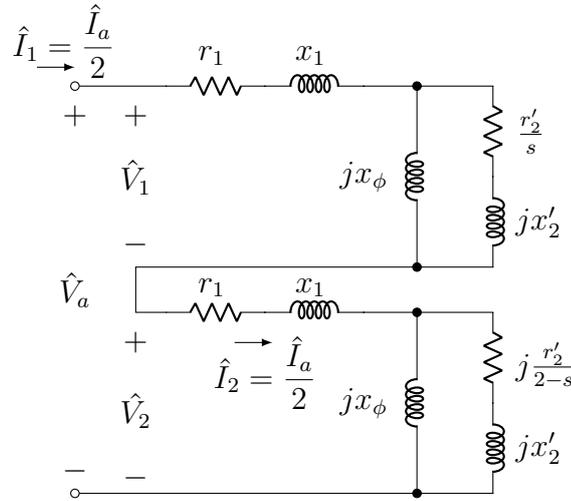
- r_1 : resistência dos enrolamentos do estator;
- x_1 reatância de dispersão das bobinas do estator;
- \hat{V}_{mf} : componente de tensão de sequência positiva;
- \hat{V}_{mb} : componente de tensão de sequência negativa.

Como no caso do motor assíncrono monofásico a diferença angular entre as correntes é ocasionada pelas características do enrolamento auxiliar do estator e sabendo-se que ele é alimentado por uma única fase, pode-se assumir que (TORO, 1994):

$$\hat{I}_1 = \hat{I}_2 = \frac{\hat{I}_a}{2} \quad (2.1)$$

Conseqüentemente, pode-se agora associar os dois circuitos para sequência positiva e negativa em série (TORO, 1994). As figuras abaixo representam os circuitos acoplados em série.

Figura 8 – Circuito equivalente de um motor de indução monofásico baseado na teoria de componentes simétricos.



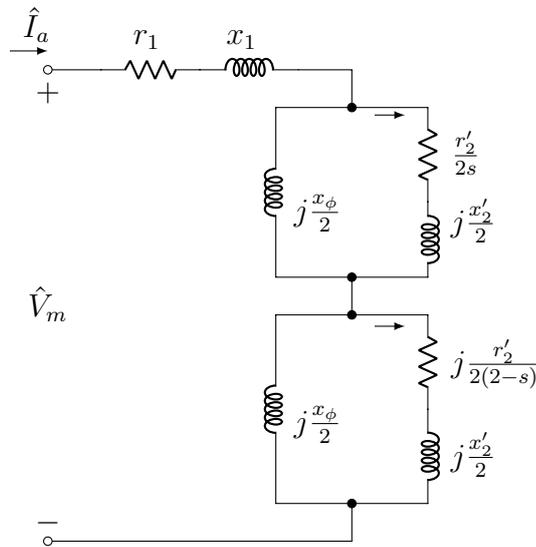
Fonte: Adaptado de (TORO, 1994).

$$Z_1 = r_1 + jx_1 + \frac{jx_\phi \left(\frac{r'_2}{s} + jx'_2 \right)}{\frac{r'_2}{s} + j(x_\phi + x'_2)}$$

$$Z_2 = r_1 + jx_1 + \frac{jx_\phi \left(\frac{r'_2}{2-s} + jx'_2 \right)}{\frac{r'_2}{2-s} + j(x_\phi + x'_2)}$$

$$\begin{aligned} \hat{V}_1 &= \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2} \hat{V}_a \\ \hat{V}_2 &= \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} \hat{V}_a \end{aligned} \tag{2.2}$$

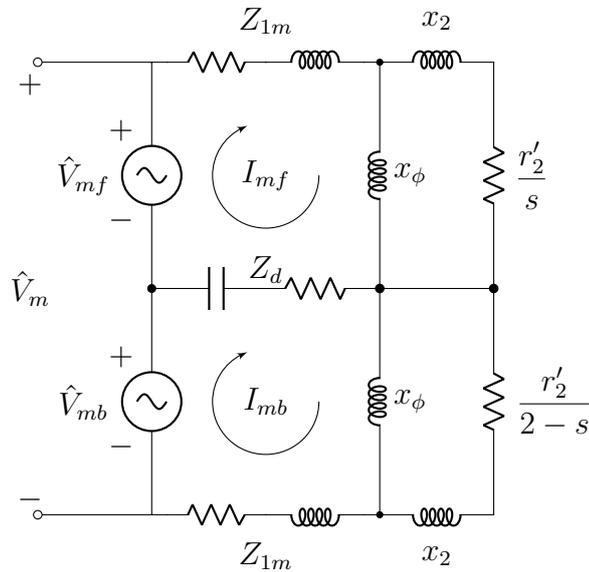
Figura 9 – Circuito equivalente de um motor de indução monofásico operando num escorregamento s .



Fonte: Adaptado de (TORO, 1994).

De forma geral pode-se representar esta máquina por um circuito equivalente generalizado:

Figura 10 – Circuito equivalente generalizado para máquinas bifásicas.

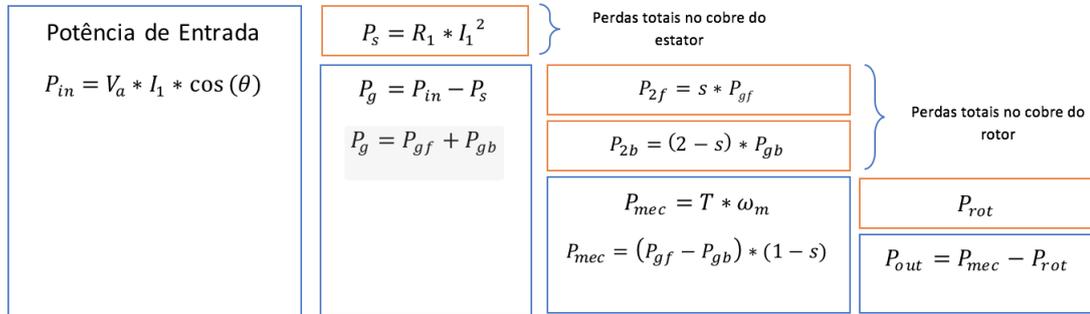


Fonte: Adaptado de (FITZGERALD, 1961).

Para o caso de estudo do motor de fase dividida o circuito não existe o ramo do capacitor.

2.5 Segregação de perdas

Figura 11 – Segregação de perdas para um motor assíncrono monofásico.



Fonte: Adaptado de citechapman.

2.5.1 motor operando sem enrolamento auxiliar

Potência de entrada fornecida pela fonte

$$P_{in} = V_a * I_1 * \cos(\Theta)$$

Potência no campo de avanço:

$$P_{gf} = I_{mf}^2 \frac{R_f}{2}$$

Potência no campo retrógrado:

$$P_{gb} = I_{mb}^2 \frac{R_b}{2}$$

Potência resultante no gap de ar entre rotor e estator:

$$P_g = P_{gf} - P_{gb}$$

Potência dissipada nos enrolamentos do estator:

$$P_s = R_1 * I_1^2$$

P_{2f} representa a perda no cobre do rotor devido a componente de avanço.

P_{2g} representa a perda no cobre do rotor devido a componente de atraso.

$P_{mec} = P_g * (1 - s)$ representa a potência mecânica no eixo, sem perdas por atrito e ventilação.

P_{rot} representa as perdas no rotor por atrito e ventilação.

$P_{out} = P_{eixo} = P_{mec} - P_{rot}$ representa a potência de saída.

2.5.2 motor operando com enrolamento auxiliar

Potência no campo de avanço:

$$P_{gf} = 2 * I_{mf}^2 * R_f$$

Potência no campo retrógrado:

$$P_{gb} = 2 * I_{mb}^2 * R_b$$

2.6 Torque

2.6.1 motor operando sem enrolamento auxiliar

Torques de avanço e atraso:

$$T_f = \frac{P_{gf}}{\omega_s} \quad T_b = \frac{P_{gb}}{\omega_s}. \quad (2.3)$$

Torque resultante:

$$T = T_f - T_b = \frac{P_g}{\omega_s} \quad (2.4)$$

Torque no eixo:

$$\tau_{eixo} = \frac{P_{eixo}}{\omega_m}. \quad (2.5)$$

2.6.2 Motor operando com enrolamento auxiliar

Torques de avanço e atraso:

$$T_f = \frac{P_{gf}}{\omega_s} \quad T_b = \frac{P_{gb}}{\omega_s} \quad (2.6)$$

Torque resultante:

$$T = T_f - T_b = \frac{2}{\omega_s} (I_{mf}^2 R_f - I_{mb}^2 R_b) \quad (2.7)$$

Toque no eixo:

$$\tau_{eixo} = \frac{P_{eixo}}{\omega_m}. \quad (2.8)$$

2.7 Bancada de ensaios

O motor utilizado nos experimentos deste relatório possui seus dados de placa exibidos na figura abaixo. Trata-se de um motor de indução monofásico VOGES capaz de girar nos dois sentidos e que opera tanto em 110V quanto em 220V.

Figura 12 – Dados de placa do motor de indução VOGES 110/220V de fase dividida.

VOGES		~ 1	MOD: 10SC48	01-09
		COD: LTE1650		
MOTOR DE INDUÇÃO MONOFÁSICO		110/220 V	RPM 1725	
		8,6/4,3 A	ISOL B Δt K	
PI INVERTER A ROTAÇÃO TROCAR O 5 PELO 7 <small>CNPJ 04.854.447/0004-88 IND. BRASILEIRA</small>		FS 1,25	AFS 9,2/4,6	REG S1
		REND 59,0	COS φ 0,66	IP 21

Fonte: Própria autoria, 2018.

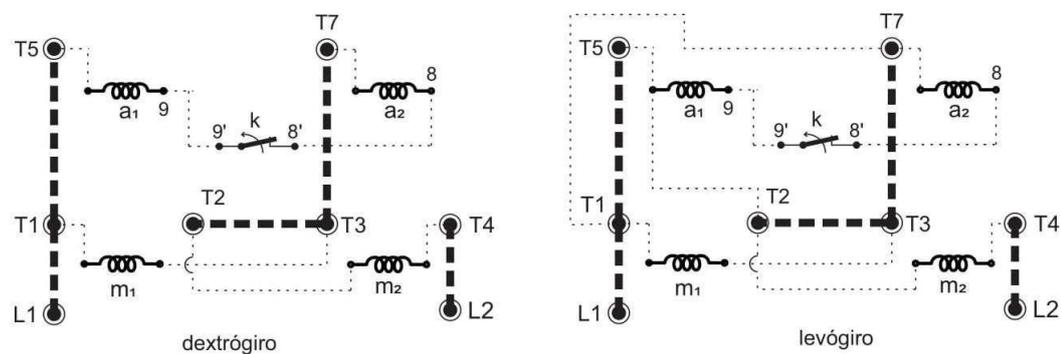
Figura 13 – Motor de indução VOGES 110/220V de fase dividida.



Fonte: Própria autoria, 2018.

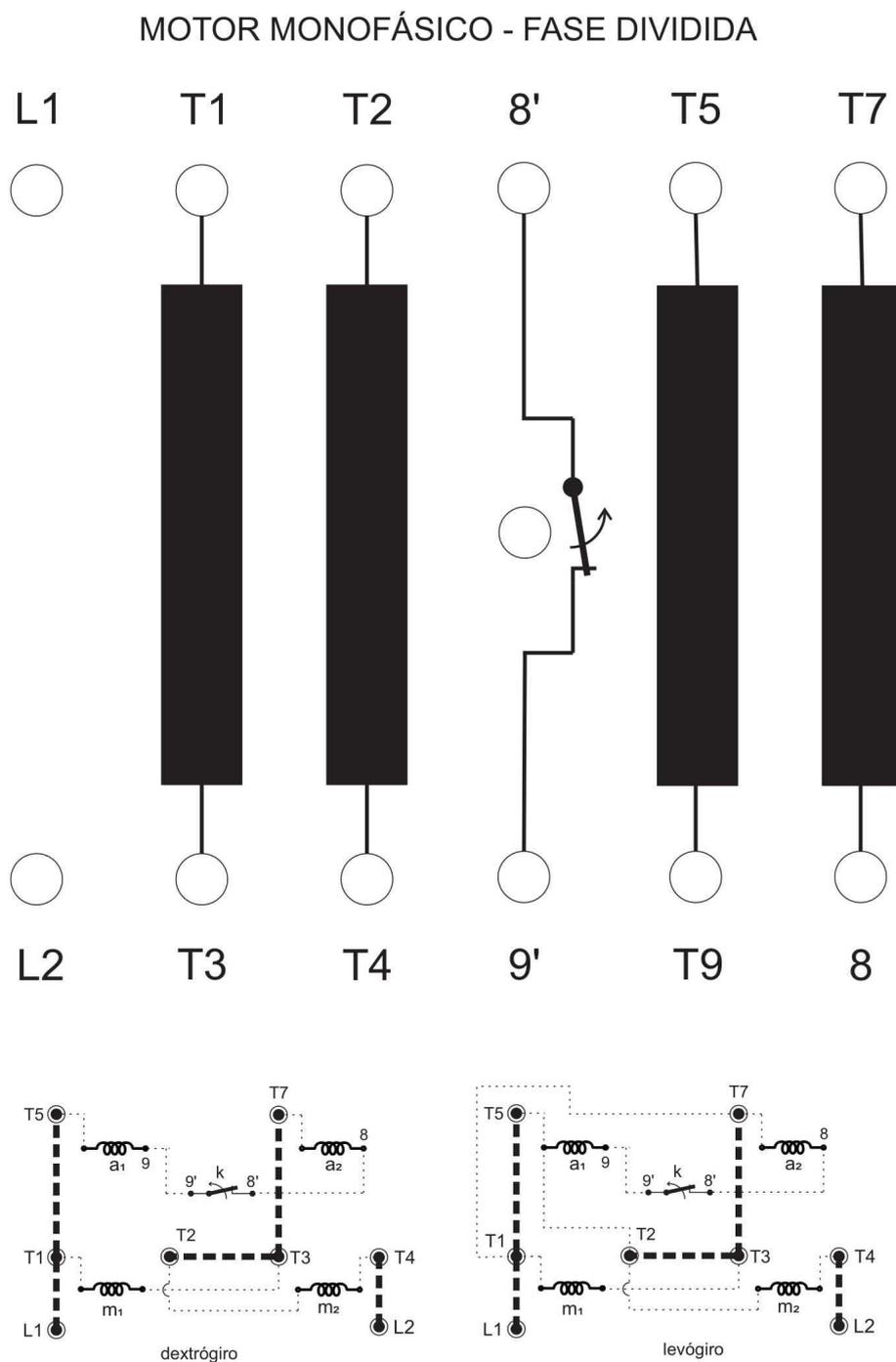
Rearranja-se os terminais da máquina de forma a externá-los para possibilitar a realização dos experimentos aqui propostos. Após externar os terminais, o orientador deste trabalho elaborou diagramas para os enrolamentos da máquina de forma a facilitar as atividades dos estudantes durante o uso da bancada. As figuras 14 e 15 correspondentes aos diagramas foram então criados:

Figura 14 – Conexões internas para o motor VOGES de fase dividida nos sentidos dextrógiro e levógiro.



Fonte: Própria autoria, 2018.

Figura 15 – Esquemático da bancada para acesso aos terminais do motor.



Fonte: Própria autoria, 2018.

Figura 16 – Bancada de ensaios com os respectivos dispositivos utilizados.



Fonte: Própria autoria, 2018.

3 Ensaio para determinação de parâmetros

Neste trabalho realizou-se três experimentos para posterior determinação dos parâmetros da máquina sendo eles: medição de resistência a frio e a quente, ensaio de rotor bloqueado e ensaio em vazio (SEN, 1997).

3.1 Resistência dos enrolamentos do estator

3.1.1 Resistência a frio e a quente - Enrolamento principal

Neste experimento subte-se os terminais do enrolamento a tensão contínua, medindo a corrente circulante por este circuito e calculando posteriormente o valor de sua resistência. Deve-se depois referenciar este valor à uma temperatura de $75^{\circ}C$ realizando leituras de corrente e tensão com a máquina fria e depois com ela quente. Utiliza-ses as equações abaixo para referenciar a temperatura à $75^{\circ}C$ (??).

$$T_2 = T_1 + \frac{R_Q - R_F}{R_F}(234.5 + T_1) \quad (3.1)$$

$$r_1 = R_Q + R_Q \frac{75 - T_2}{234.5 + T_2} \quad (3.2)$$

onde

T_1 : Temperatura ambiente (considerada igual a 25°);

T_2 : Temperatura estimada do enrolamento a quente;

R_F : Valor de resistência medido a frio;

R_Q : Valor de resistência medido a quente;

234.5: Constante associada ao material do enrolamento (cobre).

3.1.2 Enrolamento auxiliar

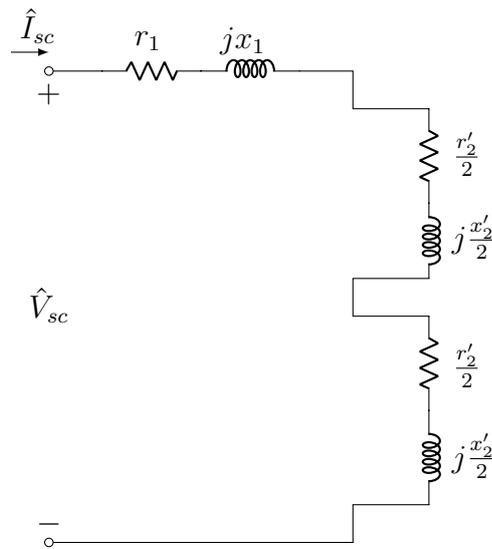
A reatância do enrolamento auxiliar é dada por (SEN, 1997):

$$x_{1a} = \sqrt{Z_{1a}^2 - r_{1a}^2} \quad (3.3)$$

3.2 Impedância dos enrolamentos referidas ao estator - Ensaio com o rotor bloqueado

Para este caso tem-se $s = 1$, e como a impedância $x_\phi/2$ é consideravelmente maior que $r'_2/2 + jx'_2/2$, esta pode ser desconsiderada.

Figura 17 – Circuito equivalente de um motor de indução monofásico em teste com rotor bloqueado.



Fonte: Adaptado de (TORO, 1994).

A impedância equivalente referente à bobina do estator é

$$Z_e = \frac{V_{sc}}{I_{sc}}$$

$$R_e \equiv r_1 + r'_2 = \frac{P_{sc}}{I_{sc}^2}$$

Sendo que:

$$r'_2 = R_e - r_1$$

A reatância de dispersão equivalente é dada por:

$$X_e = \sqrt{Z_e^2 - R_e^2}$$

$$X_e = x_1 + x'_2$$

Considerando-se que:

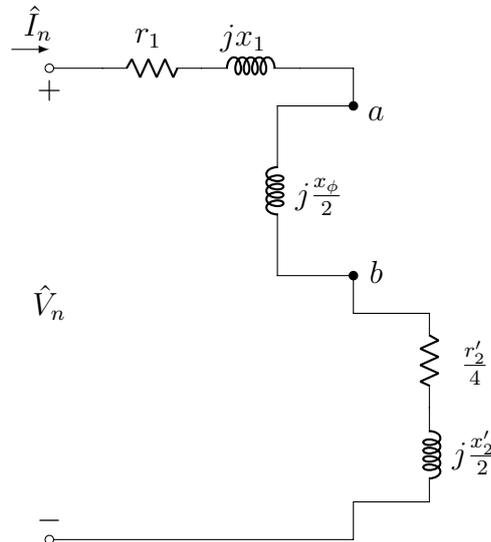
$$x_1 = x'_2$$

$$x_1 = x'_2 = \frac{X_e}{2}.$$

3.3 Reatância de magnetização x_ϕ - Ensaio com o motor a vazio

Neste experimento o rotor está livre, portanto o escorregamento s se aproxima muito de zero e $r_2/4 + jx_2/2 \ll jx_\phi/2$ (TORO, 1994).

Figura 18 – Circuito equivalente de um motor de indução monofásico em vazio.



Fonte: Adaptado de (TORO, 1994).

Medindo-se a tensão entre a e b conseguimos determinar o valor para x_ϕ (TORO, 1994).

$$\hat{V}_{ab} = \hat{V}_n - I_n \angle \theta_n \left[r_1 + \frac{r'_2}{4} + j \left(x_1 + \frac{x'_2}{2} \right) \right]$$

$$\cos \theta_n = \frac{P_n}{V_n I_n}$$

$$\frac{x_\phi}{2} = \frac{V_{ab}}{I_n}$$

4 Experimentos

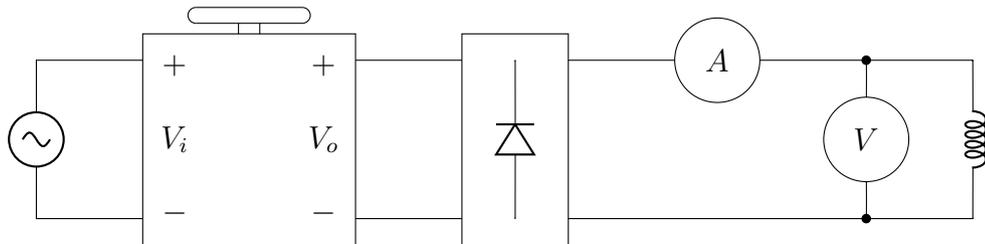
4.1 Instrumentação

- .
- 1- Voltímetro digital;
- 1- Amperímetro digital;
- 1- Retificador monofásico;
- 1- Wattímetro;
- 1- Tacômetro;
- 1- Variac;
- Cabos.

4.2 Resistência dos enrolamentos do estator

4.2.1 r_{1m}

Figura 19 – Configuração para a estimação da resistência dos enrolamentos da máquina.



Fonte: Adaptado de (TORO, 1994).

Tabela 1 – Tensão e corrente para cálculo de resistências a frio.

$V(V)$	$I(A)$
2.39	0.62
3.79	1.01
6.42	1.71
7.77	2.08

Tabela 2 – Tensão e corrente para cálculo de resistências a quente.

$V(V)$	$I(A)$
2	0.53
4	1
6	1.53
7.84	2

A média aritmética é então tomada:

Tabela 3 – Resistências estimadas a frio e a quente para o enrolamento principal do motor.

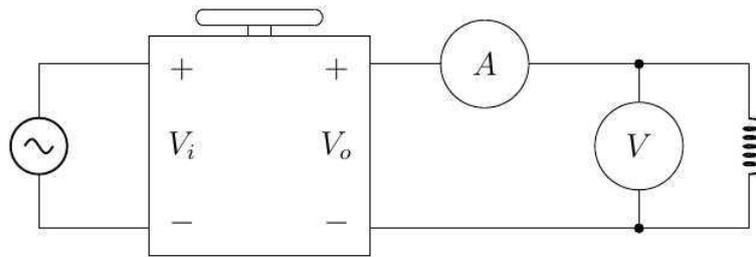
$R_F(\Omega)$	$R_Q(\Omega)$
3.77	3.91

$$T_2 = 34.64^\circ C$$

$$r_{1m} = 4.496\Omega$$

4.2.2 r_{1a} e x_{1a}

Figura 20 – Montagem para medição da impedância do enrolamento auxiliar.



Fonte: Própria autoria, 2018.

Tabela 4 – Tensão e corrente para cálculo da impedância do enrolamento auxiliar.

$V(V)$	$I(A)$
6.48	0.47
13.76	1.01
20.9	1.53
28	2

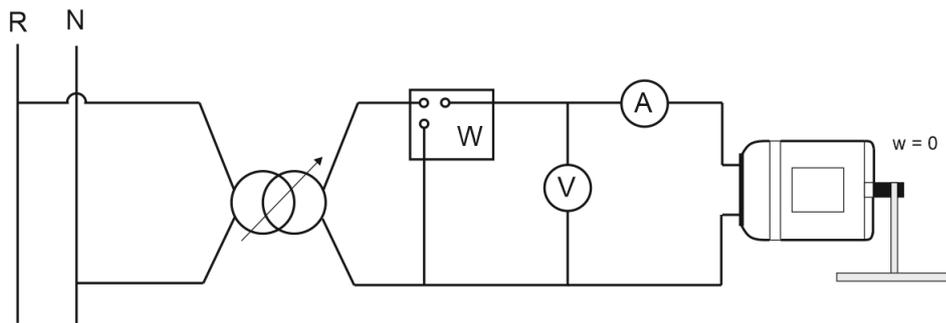
$$r_{1a} = 13.76\Omega$$

Retiramos a ponte retificadora e repetimos o experimento com tensão alternada:

$$x_{1a} = 2.31\Omega$$

4.3 Ensaio com o rotor bloqueado

Figura 21 – Ensaio com o rotor bloqueado.



Fonte: Própria autoria, 2018.

Tabela 5 – Dados do ensaio de motor com o rotor bloqueado.

I_n (A)	V_t (V)	P(w)
4.3	53.2	155

4.3.1 r'_2

$$R_e = \frac{155}{4.3^2} = 6.7274\Omega$$

$$r'_2 = R_e - r_{1m} = 2.2314\Omega$$

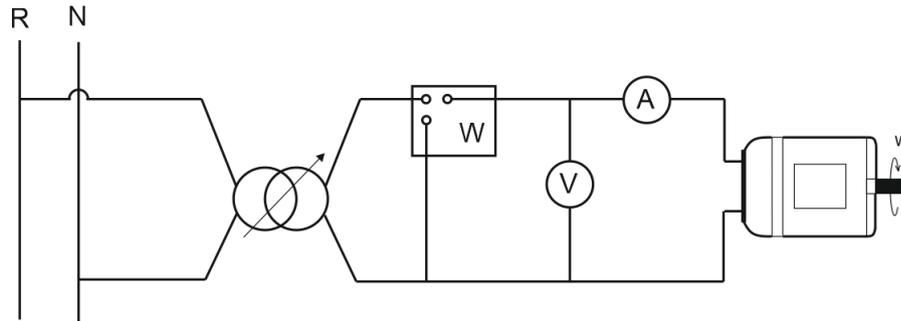
4.3.2 $x_{1m} = x'_2$

$$Z_e = \frac{53.2}{4.3} = 12.37\Omega$$

$$X_e = \sqrt{Z_e^2 - R_e^2} = 10.381\Omega$$

$$x_1 = x'_2 = 5.19\Omega$$

Figura 22 – Ensaio com o motor a vazio.



Fonte: Própria autoria, 2018.

4.4 Ensaio com o motor a vazio

O motor foi submetido a tensão nominal na rede de 220V 60Hz e mensurou-se então a potência, rotação e corrente.

Tabela 6 – Dados do ensaio de motor a vazio.

V_t (V)	P (W)	n (rpm)	I_a (A)
220	170	1794	3.67

$$\cos(\theta) = \frac{170}{220 \cdot 3.67} = 0.2105$$

$$\theta = \cos^{-1} 0.2105 = 77.85^\circ$$

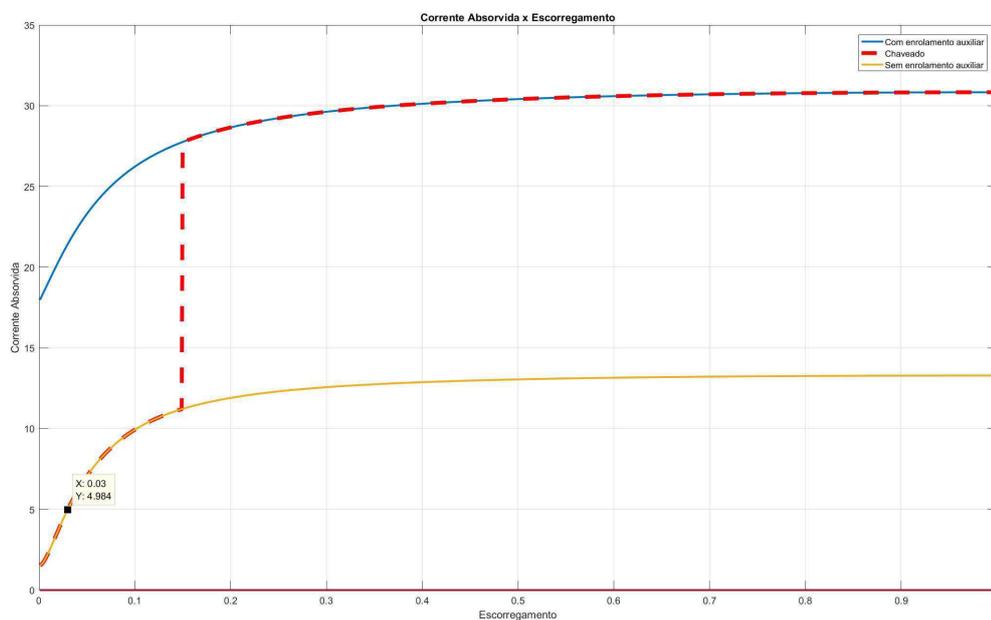
$$V_{ab} = 220 - 3.67 \angle 77.85^\circ \left[4.496 + \frac{2.23}{4} + j \left(5.19 + \frac{5.19}{2} \right) \right] = 215.22 \angle -5.65^\circ V$$

$$x_\phi = \frac{2 \cdot 215.22}{3.67} = 116.636 \Omega$$

4.5 Curvas características - MATLAB

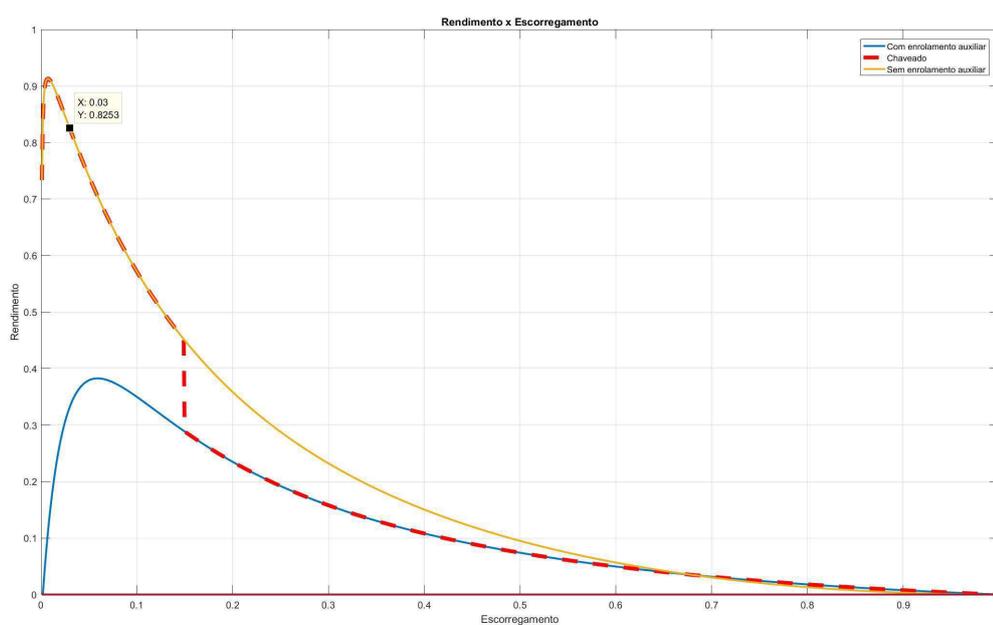
Para todas as figuras plotadas como resultado, o enrolamento auxiliar foi desativado ao atingir-se um escorregamento de 15%.

Figura 23 – Corrente de entrada x Escorregamento.



Na figura23 observa-se a corrente nominal de entrada no valor de 4.96A.

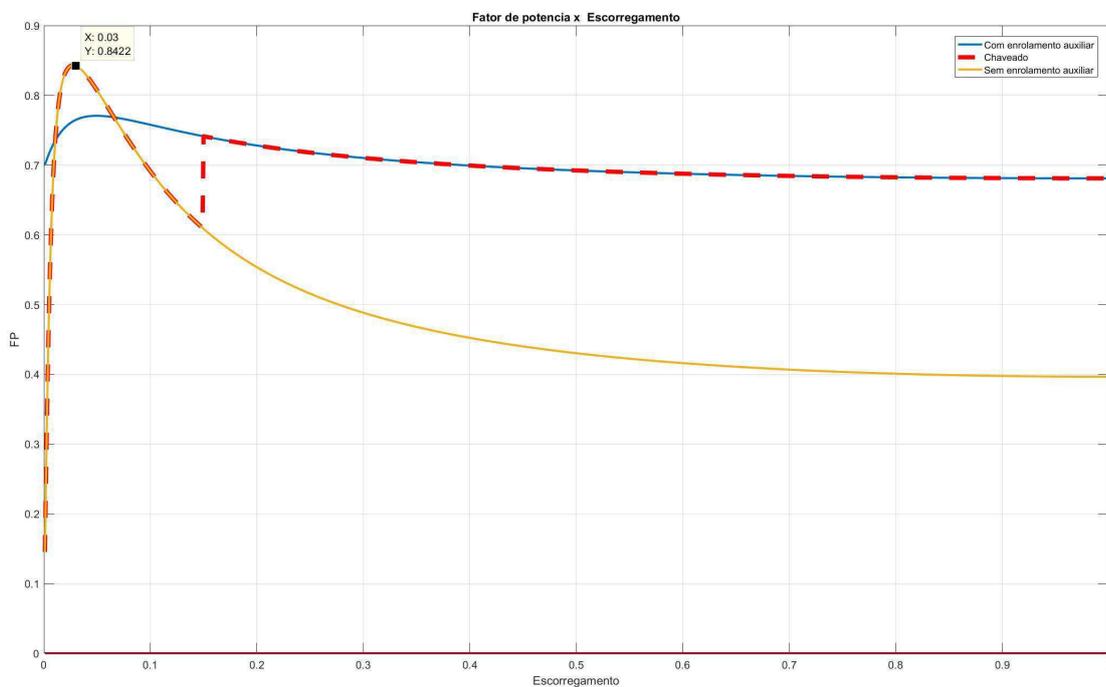
Figura 24 – Rendimento x Escorregamento.



Na figura24 observa-se um rendimento no valor de $\eta = 82.\%$. Conforme esperado

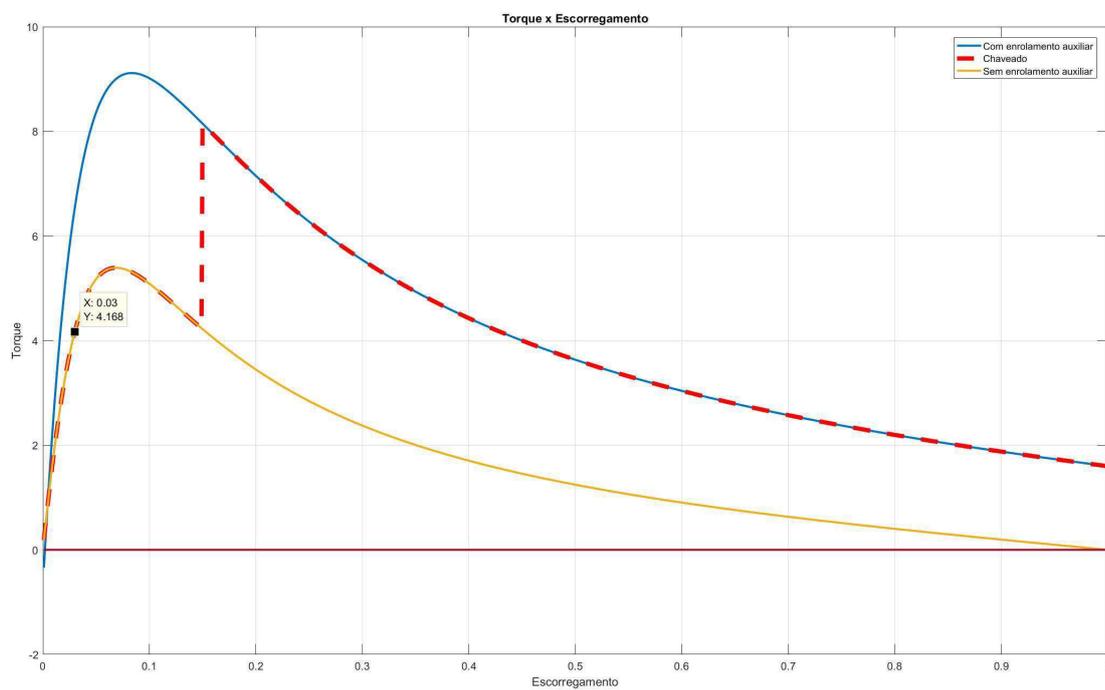
pelos dados de placa do fabricante.

Figura 25 – Fator de Potência x Escorregamento.



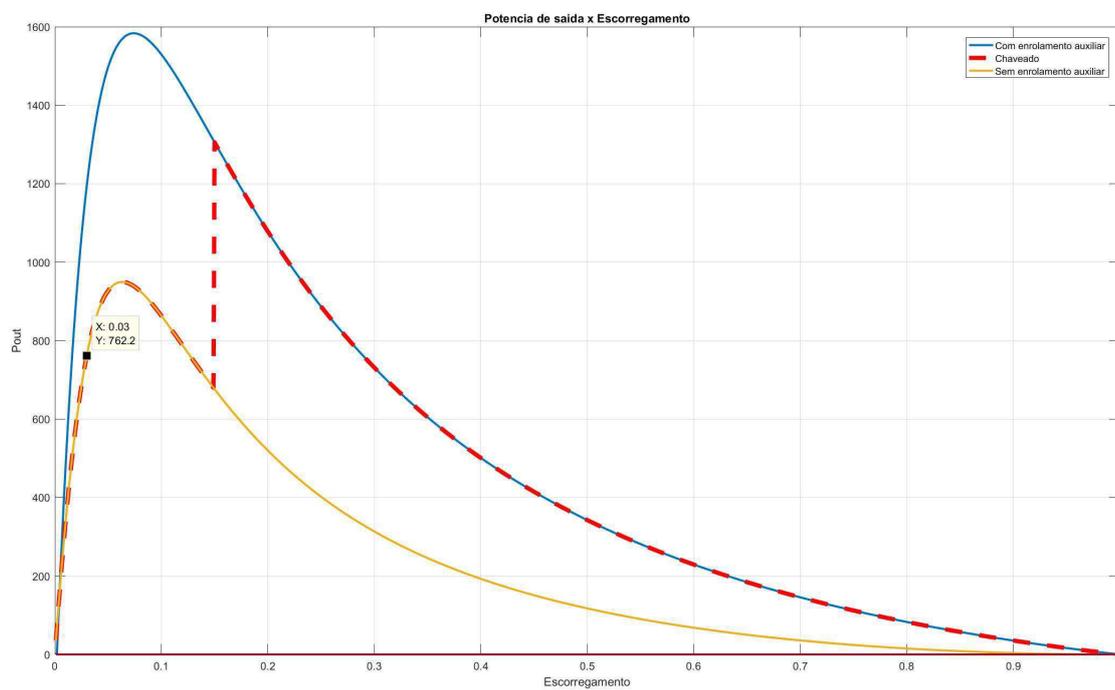
Na figura?? observa-se fator de potência no valor de 0,84, conforme especificado pelos dados de placa do fabricante.

Figura 26 – Torque x Escorregamento.



Na figura26 observa-se um torque no valor de 4.15N.m.

Figura 27 – Potência no eixo x Escorregamento.



Na figura27 observa-se uma potência de saída $P_{out} = 762$, conforme esperado pelos dados de placa do fabricante.

5 Conclusão

Este estudo detalhou o motor assíncrono monofásico através de um estudo sobre seu comportamento e suas características além da teoria sobre o funcionamento do motor assíncrono monofásico de forma geral.

Após obter uma representação do motor através de um circuito elétrico equivalente, realizase os experimentos para determinação dos parâmetros da máquina e, posteriormente, calcula-se características importantes para a descrição de uma máquina assíncrona como o FP, torque, potência de saída, rendimento, etc.

Este estudo também possibilitou a criação de um protótipo de bancada para ensaios com o motor assíncrono monofásico de fase dividida cujo a tabela para coleta de medições encontra-se anexa a este documento. Além disso, os cálculos aqui efetuados servem de referência para os resultados obtidos nos experimentos.

Com a conclusão deste estudo e a verificação dos resultados concluímos a viabilidade da instalação deste experimento, ficando como sugestão para trabalhos futuros a montagem final da bancada além de medições extras para consolidação dos dados.

Referências

FITZGERALD, A. E. *Electric machinery*. [S.l.]: McGraw-Hill, 1961. Citado 3 vezes nas páginas 20, 24 e 27.

SEN, P. C. *Principle of electric machines and power electronics*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 1997. Citado 5 vezes nas páginas 19, 20, 21, 22 e 34.

TORO, V. D. *Electric machines and power systems*. [S.l.]: Prentice-Hall, 1994. Citado 10 vezes nas páginas 19, 20, 22, 23, 25, 26, 27, 35, 36 e 37.

Apêndices

APÊNDICE A – Algoritmos desenvolvidos no Matlab

```

clc
clear all

X1      = 5.19;
X2      = 5.19*2;
R1      = 4.496;
R2      = 2.2314;
Xmag    = 133.636*2;
V       = 220;
f       = 60;
a       = 1; %relacao de espiras Na/Nm

R1a     = 13.76;
X1a     = 2.31;

ws      = 1800*2*pi / f;

passo   = 0.001;
s       = passo: passo: 0.999;

Zin     = 1:1:length(s);
Zb      = 1:1:length(s);
Zf      = 1:1:length(s);
I1      = 1:1:length(s);
I1_mod  = 1:1:length(s);
FP      = 1:1:length(s);
Prot    = zeros(length(s));
Pout    = 1:1:length(s);
T       = 1:1:length(s);
Pgb     = 1:1:length(s);
Pgf     = 1:1:length(s);
Pmec    = 1:1:length(s);
Pin     = 1:1:length(s);
Irf     = 1:1:length(s);
Inrb    = 1:1:length(s);

n=1;
while s(n)<0.15
    Zf(n)      = i*0.5*Xmag*(i*0.5*X2+0.5*(R2/s(n)))/(0.5*R2/s(n)+i*0.5*sqrt(
(Xmag+X2)));
    Zb(n)      = i*0.5*Xmag*(i*0.5*X2+0.5*(R2/(2-s(n))))/(0.5*R2/(2-s(n))+i*0.5*sqrt(
5*(Xmag+X2)));
    Zin(n)     = (R1+real(Zf(n))+real(Zb(n)))+i*(X1+i*mag(Zf(n))+i*mag(Zb(n)));

    I1(n)      = V/Zin(n);

    I1_mod1(n) = abs(I1(n));
    FP1(n)     = cos(angl e(I1(n)));

    Pgf(n)     = real(Zf(n))*(abs(I1(n))^2);
    Pgb(n)     = real(Zb(n))*(abs(I1(n))^2);

    T1(n)      = (I1_mod1(n)^2)*(real(Zf(n))-real(Zb(n)))/ws;
end

```

```

%Préc( n)      = T( n) *ws*( 1- s( n) );
Préc( n)      = ( Pgf( n) - Pgb( n) )*( 1- s( n) );

Pin( n)       = V*( I1_ mod1( n) ) *FP1( n);
Prot( n)      = 0;

Pout1( n)     = Préc( n) - Prot( n);

if( Pout1( n) < 0)
    Pout1( n) = 0;
end

rendiment o1( n) = Pout1( n) / Pin( n);
n=n+1;
end

%com cap
for n=n:1:length(s)
    Vmf = (V/2)*(1-i/a);
    Vmb = (V/2)*(1+i/a);

    ZR1a= R1a+i*X1a;

    Z1a = ZR1a;

    Z1m = R1+i*X1;

    Zo = (1/2)*(Z1a/(a^2)+Z1m);
    Zd = (1/2)*(Z1a/(a^2)-Z1m);

    Zf( n) = i*0.5*Xmag*(i*0.5*X2+0.5*(R2/s( n) ))/(0.5*R2/s( n) +i*0.5*(Xmag+X2));
    Zb( n) = i*0.5*Xmag*(i*0.5*X2+0.5*(R2/(2-s( n) )))/(0.5*R2/(2-s( n) )+i*0.5*(Xmag+X2));

    Imf( n) = (Vmf*(Zo+Zb( n) )+Vmb*Zd)/((Zo+Zf( n) )*(Zo+Zb( n) )-(Zd^2));
    Imb( n) = (Vmb*(Zo+Zf( n) )+Vmf*Zd)/((Zo+Zf( n) )*(Zo+Zb( n) )-(Zd^2));

    Im( n) = Imf( n) +Imb( n);
    Ia( n) = (i*Imf( n) -i*Imb( n) )/a;

    I1( n) = Im( n) +Ia( n);
    I1_ mod1( n) = abs( I1( n) );
    FP1( n) = cos( angl e( I1( n) ));

    Pin( n) = V*( I1_ mod1( n) ) *FP1( n);
    Pgf( n) = 2*real( Zf( n) )*( abs( Imf( n) )^2);
    Pgb( n) = 2*real( Zb( n) )*( abs( Imb( n) )^2);
    Préc( n) = ( Pgf( n) - Pgb( n) )*( 1- s( n) );
    Pout1( n) = Préc( n) - Prot( n);

    rendement o1( n) = Pout1( n) / Pin( n);

```

```
T1(n) = (Pgf(n) - Pgb(n)) / ws;  
end
```

```
figure(1)  
plot(s, Pout1);  
title('Potencia de saida em funcao do escorregamento');  
xlabel('Escorregamento');  
ylabel('Pout');  
grid on
```

```
figure(2)  
plot(s, I1_mod1);  
title('Corrente Absorvida em funcao do escorregamento');  
xlabel('Escorregamento');  
ylabel('Corrente Absorvida');  
grid on
```

```
figure(3)  
plot(s, T1);  
title('Torque x Escorregamento');  
xlabel('Escorregamento');  
ylabel('Torque');  
grid on
```

```
figure(4)  
plot(s, FP1);  
title('Fator de potencia x Escorregamento');  
xlabel('Escorregamento');  
ylabel('FP');  
grid on
```

```
figure(5)  
plot(s, rendimento1);  
title('Rendimento x Escorregamento');  
xlabel('Escorregamento');  
ylabel('Rendimento');  
grid on
```

```
figure(11)  
plot(s, Pin);  
title('Rendimento x Escorregamento');  
xlabel('Escorregamento');  
ylabel('Rendimento');  
grid on
```

```
for n=1:1:length(s)  
    Vmf = (V/2)*(1-i/a);  
    Vrb = (V/2)*(1+i/a);  
  
    ZR1a= R1a+i*X1a;  
  
    Z1a = ZR1a;
```

```

Z1m = R1+i *X1;

Zo  = ( 1/2)*( Z1a/( a^2)+Z1m);
Zd  = ( 1/2)*( Z1a/( a^2)- Z1m);

Zf( n) = i *0. 5*Xmag*( i *0. 5*X2+0. 5*( R2/s( n) ))/( 0. 5*R2/s( n)+i *0. 5*( Xmag+X2));
Zb( n) = i *0. 5*Xmag*( i *0. 5*X2+0. 5*( R2/( 2- s( n) )))/( 0. 5*R2/( 2- s( n) )+i *0. 5*
(Xmag+X2));

Imf( n) = ( Vmf*( Zo+Zb( n) )+Vmb*Zd) / (( Zo+Zf( n) )*( Zo+Zb( n) ) - ( Zd^2));
I mb( n) = ( Vmb*( Zo+Zf( n) )+Vmf *Zd) / (( Zo+Zf( n) )*( Zo+Zb( n) ) - ( Zd^2));

Im( n) = Imf( n)+I mb( n);
Ia( n) = ( i *Imf( n) - i *I mb( n) ) / a;

I1( n) = Im( n)+Ia( n);
I1_mod( n) = abs( I1( n) );
FP( n) = cos( angl e( I1( n) ));

Pin( n) = V*( I1_mod( n) ) *FP( n);
Pgf( n) = 2*real( Zf( n) )*( abs( Imf( n) )^2);
Pgb( n) = 2*real( Zb( n) )*( abs( I mb( n) )^2);
Pprec( n) = ( Pgf( n) - Pgb( n) )*( 1- s( n) );
Pout( n) = Pprec( n) - Prot( n);

if Pout( n) <0
    Pout( n) = 0;
end

rendimento( n) = Pout( n) / Pin( n);

T( n) = ( Pgf( n) - Pgb( n) ) / ws;

end

figure(6)
plot(s, Pout, 'LineWdth', 2);
title('Potencia de saida em funcao do escorregamento');
xlabel('Escorregamento');
ylabel('Pout');
grid on
hold on

figure(7)
plot(s, I1_mod, 'LineWdth', 2);
title('Corrente Absorvida em funcao do escorregamento');
xlabel('Escorregamento');
ylabel('Corrente Absorvida');
grid on
hold on

figure(8)
plot(s, T, 'LineWdth', 2);
title('Torque x Escorregamento');

```

```

xlabel('Escorregamento');
ylabel('Torque');
grid on
hold on

```

```

figure(9)
plot(s, FP, 'LineWidth', 2);
title('Fator de potencia em funcao do escorregamento');
xlabel('Escorregamento');
ylabel('FP');
grid on
hold on

```

```

figure(10)
plot(s, rendimento, 'LineWidth', 2);
title('Rendimento x Escorregamento');
xlabel('Escorregamento');
ylabel('Rendimento');
grid on
hold on

```

```

Zin      = zeros(length(s));
Zb       = zeros(length(s));
Zf       = zeros(length(s));
I1       = zeros(length(s));
I1_mod   = zeros(length(s));
FP       = zeros(length(s));
Prot     = zeros(length(s));
Pout     = zeros(length(s));
T        = zeros(length(s));
Pgb      = zeros(length(s));
Pgf      = zeros(length(s));
Pmec     = zeros(length(s));
Pin      = zeros(length(s));
Inr      = zeros(length(s));
Inb      = zeros(length(s));
rendimento = zeros(length(s));

```

```

for n=1:length(s)
    Zf(n) = i*0.5*Xmag*(i*0.5*X2+0.5*(R2/s(n)))/(0.5*R2/s(n)+i*0.5*
(Xmag+X2));
    Zb(n) = i*0.5*Xmag*(i*0.5*X2+0.5*(R2/(2-s(n))))/(0.5*R2/(2-s(n))+i*0.
5*(Xmag+X2));
    Zin(n) = (R1+real(Zf(n))+real(Zb(n)))+i*(X1+i*mag(Zf(n))+i*mag(Zb(n)));

    I1(n) = V/Zin(n);

    I1_mod(n) = abs(I1(n));
    FP(n) = cos(angle(I1(n)));

    Pgf(n) = real(Zf(n))*(abs(I1(n))^2);
    Pgb(n) = real(Zb(n))*(abs(I1(n))^2);

```

```
T(n) = (I1_mod(n)^2)*(real(Zf(n))-real(Zb(n)))/ws;
```

```
%Pmec(n) = T(n)*ws*(1-s(n));
```

```
Pmec(n) = (Pgf(n)-Pgb(n))*(1-s(n));
```

```
Pin(n) = V*(I1_mod(n))*FP(n);
```

```
Prot(n) = 0;
```

```
Pout(n) = Pmec(n) - Prot(n);
```

```
rendimento(n) = Pout(n)/Pin(n);
```

```
end
```

```
figure(6)
```

```
plot(s, Pout1, '--', 'color', 'red', 'LineWidth', 4);
```

```
plot(s, Pout, 'LineWidth', 2);
```

```
title('Potencia de saída x Escorregamento');
```

```
xlabel('Escorregamento');
```

```
ylabel('Pout');
```

```
legend('Com enrolamento auxiliar', 'Chaveado', 'Sem enrolamento auxiliar')
```

```
grid on
```

```
hold off
```

```
figure(7)
```

```
plot(s, I1_mod1, '--', 'color', 'red', 'LineWidth', 4);
```

```
plot(s, I1_mod, 'LineWidth', 2);
```

```
title('Corrente Absorvida x Escorregamento');
```

```
xlabel('Escorregamento');
```

```
ylabel('Corrente Absorvida');
```

```
legend('Com enrolamento auxiliar', 'Chaveado', 'Sem enrolamento auxiliar')
```

```
grid on
```

```
hold off
```

```
figure(8)
```

```
plot(s, T1, '--', 'color', 'red', 'LineWidth', 4);
```

```
plot(s, T, 'LineWidth', 2);
```

```
title('Torque x Escorregamento');
```

```
xlabel('Escorregamento');
```

```
ylabel('Torque');
```

```
legend('Com enrolamento auxiliar', 'Chaveado', 'Sem enrolamento auxiliar')
```

```
grid on
```

```
hold off
```

```
figure(9)
```

```
plot(s, FP1, '--', 'color', 'red', 'LineWidth', 4);
```

```
plot(s, FP, 'LineWidth', 2);
```

```
title('Fator de potência x Escorregamento');
```

```
xlabel('Escorregamento');
```

```
ylabel('FP');
```

```
legend('Com enrolamento auxiliar', 'Chaveado', 'Sem enrolamento auxiliar')
```

```
grid on
```

```
hold off
```

```
figure(10)
```

```
plot(s, rendimento1, '--', 'color', 'red', 'LineWidth', 4);  
plot(s, rendimento, 'LineWidth', 2);  
title('Rendimento x Escorregamento');  
xlabel('Escorregamento');  
ylabel('Rendimento');  
legend('Com enrolamento auxiliar', 'Chaveado', 'Sem enrolamento auxiliar')  
grid on  
grid on  
hold off
```

APÊNDICE B – Guia de experimentos

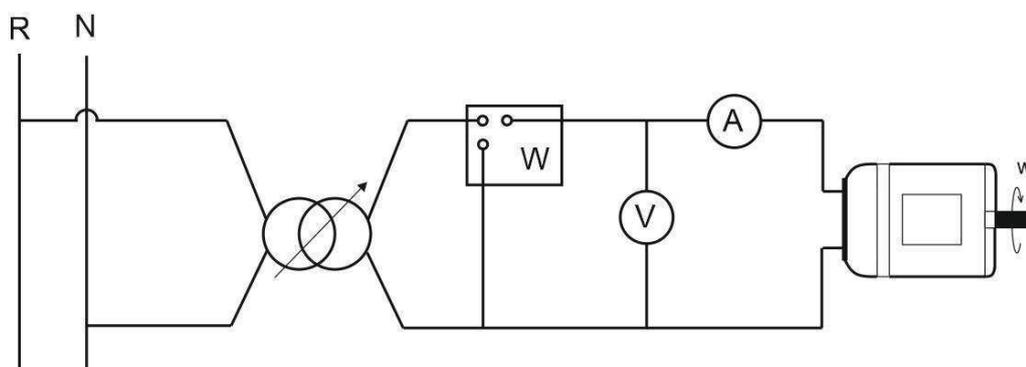


UFCG - Universidade Federal de Campina Grande
 Centro de Engenharia Elétrica e Informática
 Departamento de Engenharia Elétrica
 Laboratório de Máquinas Elétricas

Aluno: _____ Bancada: _____.

Tipo de motor: _____.

Máquina Assíncrona Monofásica – Caracterização



1. Resistência a frio enrolamento principal

$V_{ccf}(V)$			
$I_{ccf}(A)$	$(0,75) I_{nom}$	I_{nom}	$(0,75) I_{nom}$

2. Resistência a frio enrolamento auxiliar

$V_{ccf}(V)$			
$I_{ccf}(A)$	$(0,75) I_{nom}$	I_{nom}	$(0,75) I_{nom}$

3. Impedância a frio enrolamento auxiliar

$V_{ccf}(V)$			
$I_{ccf}(A)$	$(0,75) I_{nom}$	I_{nom}	$(0,75) I_{nom}$

4. A vazio

V_t (V)	220	200	180	160	140	120	100	80	60
I_a (A)									
Ω (rpm)									
W_1 (w)									
P (w)									

5. Rotor Bloqueado

I_{nom} (A)		V_t (V)		W_1 (w)		P (w)	
---------------	--	-----------	--	-----------	--	---------	--

6. Resistência a quente enrolamento principal

V_{ccf} (V)			
I_{ccf} (A)	$(0,75) I_{nom}$	I_{nom}	$(0,75) I_{nom}$