



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

Francisco Maerle Pinto Araújo

**Projeto de uma bancada de ensaios e estudo de  
um motor assíncrono monofásico de capacitor  
de partida**

Campina Grande, Paraíba

Março de 2018

Francisco Maerle Pinto Araújo

**Projeto de uma bancada de ensaios e estudo de um motor assíncrono monofásico de capacitor de partida**

*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: Eletrotécnica

Orientador: Edgar Roosevelt Braga Filho, D. Sc

Campina Grande, Paraíba

Março de 2018

---

Francisco Maerle Pinto Araújo

Projeto de uma bancada de ensaios e estudo de um motor assíncrono monofásico de capacitor de partida/ Francisco Maerle Pinto Araújo. – Campina Grande, Paraíba, Março de 2018-

66 p. : il. ; 30 cm.

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

---

Francisco Maerle Pinto Araújo

## **Projeto de uma bancada de ensaios e estudo de um motor assíncrono monofásico de capacitor de partida**

*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  
Março de 2018

*Dedico este trabalho à minha mãe,  
Maristela, e ao meu pai Assis.*

# Agradecimentos

Agradeço aos meus pais Francisco de Assis e Maristela Ferreira, que tanto batalharam para que eu chegasse até aqui, dedicados no meu crescimento como pessoa. A todos os cuidados que obtive e necessidades supridas, sem eles nada disso seria possível. Também à minha irmã, Mariana Pinto, pelo apoio em tantas etapas de vida e pelas atitudes e maneira de ser que a torna uma irmã invejável. Muito obrigado!

Aos meus amigos e colegas de universidade André Rodrigues, André Wild, Breno Borborema, Clarisse Barros, Eudes Rodrigo, Jarbas Mariz, Luca Alves, Magno Torres, Mateus Sarmiento, Matheus Costa, Renan Freire, Sanny Emanuelle, Yllber Oliveira e Yuri Medeiros pela parceria e todo o apoio ao longo dessa jornada.

Ao meu orientador Edgar Roosevelt, pelos conhecimentos compartilhados e pelo exemplo de comprometimento e afincamento na execução de seus trabalhos. Também ao professor Pedro Luiz, pela amizade e acompanhamento no programa de monitoria onde tive o primeiro e intenso contato com a docência.

A Adail e Tchai, pela dedicação com que executam suas funções, pela preocupação verdadeira com o sucesso de todos os estudantes e sobretudo pelo aspecto humano com que tratam as pessoas.

À Universidade Federal de Campina Grande, em geral, por ter me dado a oportunidade de adquirir uma grande carga de novos conhecimentos e ensinamentos, assim como ter-me aberto portas para o mundo inteiro.

*“Não adianta tentar mudar a natureza humana. Ela tem sido a mesma por muito tempo.  
Em vez disso, deve-se ir atrás de ferramentas. Ferramentas novas criam práticas novas.  
Ferramentas melhores fazem práticas melhores.”*  
*(Buckminster Fuller)*

# Resumo

A análise do desempenho de máquinas elétricas, frente a diversas aplicações que possam ser impostas às mesmas, é um fator crucial para sua produção, comercialização, manutenção e recuperação num mundo fortemente industrializado. Neste trabalho foram estudados conceitos básicos a cerca da constituição e algumas teorias que tornam possível o funcionamento do motor monofásico assíncrono com partida a capacitor. Foram desenvolvidos diferentes métodos para a sua representação, na forma de circuitos elétricos equivalentes, onde seus parâmetros principais de projeto são devidamente auferidos a partir de uma série de testes com o objetivo de ilustrar de modo qualitativo e quantitativo o desempenho eletromecânico do motor. Além disso, com o objetivo de aprimorar a qualidade do ensino dos alunos da disciplina de Máquinas Elétricas da Universidade Federal de Campina Grande, é desenvolvida a construção de bancadas experimentais para a realização de todos os ensaios aqui estudados. A bancada foi testada e simulações foram feitas para validar os dados obtidos e viabilizar a sua implementação definitiva no laboratório da instituição.

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

# Abstract

The analysis of the performance of electric machines, in order to face different applications that may be imposed on them, is a crucial factor for their production, commercialization, maintenance and recovery in a highly industrialized world. In this work it is studied basic concepts about the constitution and some theories that make possible the operation of the asynchronous single phase motor with starting capacitor. Different methods have been developed for its representation, in the form of equivalent electrical circuits, where its main design parameters are properly obtained from a series of tests with the objective to illustrate, qualitatively and quantitatively, the electromechanical performance of the motor. In addition, aspiring the improvement of the teaching quality of the students of the Electrical Machines discipline offered by the Federal University of Campina Grande, the construction of experimental benches is developed to carry out all the tests studied here. The bench was tested and simulations were made to validate the data obtained and to validate its definitive implementation in the institution's laboratory.

**Keywords:** asynchronous motor; single phase motor; capacitor-start; laboratory; electrical machines.

# Lista de ilustrações

Figura 1 – Motor monofásico assíncrono com capacitor de partida . . . . .	20
Figura 2 – Estator da máquina de indução monofásica . . . . .	21
Figura 3 – Rotor da máquina de indução monofásica . . . . .	21
Figura 4 – Partes constituintes da máquina de indução monofásica . . . . .	22
Figura 5 – Elementos de conversão de energia eletromecânica . . . . .	23
Figura 6 – A produção de um campo magnético girante por meio de correntes trifásicas . . . . .	24
Figura 7 – Torque em máquinas monofásicas assíncronas sem enrolamento auxiliar para partida . . . . .	24
Figura 8 – Esquema do estator e do rotor de um motor monofásico . . . . .	25
Figura 9 – Fluxo do estator e do rotor . . . . .	25
Figura 10 – Campo pulsante e campos girantes . . . . .	26
Figura 11 – Dinâmica do campo pulsante em relação aos campos girantes . . . . .	27
Figura 12 – Seção transversal de um motor de indução monofásico . . . . .	27
Figura 13 – Sistema de tensões de quatro fases desequilibrado . . . . .	28
Figura 14 – Sistema bifásico como um caso especial do sistema de quatro fases simétrico desequilibrado . . . . .	29
Figura 15 – Representação do motor bifásico desequilibrado por meio de um motor de sequência positiva acoplado a um motor idêntico de sequência negativa . . . . .	30
Figura 16 – Circuito equivalente do motor bifásico desequilibrado pelo conjunto de sequência positiva e para a sequência negativa . . . . .	31
Figura 17 – Circuito equivalente de um motor de indução monofásico baseado na teoria de componentes simétricos . . . . .	33
Figura 18 – Circuito equivalente de um motor de indução monofásico operando num escorregamento $s$ . . . . .	34
Figura 19 – Campos girantes no motor de capacitor de partida . . . . .	35
Figura 20 – Circuito equivalente representando as reações do campo progressivo e retrógrado vistos pelo enrolamento principal . . . . .	36
Figura 21 – Circuito equivalente generalizado para máquinas bifásicas . . . . .	38
Figura 22 – Circuito equivalente generalizado para máquinas bifásicas . . . . .	39
Figura 23 – O fluxo de potência de um motor monofásico de indução . . . . .	40
Figura 24 – Motor de indução com capacitor de partida . . . . .	42
Figura 25 – Diagrama vetorial do motor de indução com capacitor de partida . . . . .	43
Figura 26 – Característica torque velocidade do motor de indução com capacitor de partida . . . . .	43
Figura 27 – Placa de identificação do motor utilizado neste trabalho . . . . .	44

Figura 28 – Ligação do motor monofásico de partida a capacitor . . . . .	45
Figura 29 – Desenho esquemático de acesso aos terminais da bancada . . . . .	46
Figura 30 – Protótipo da bancada de experimentos do motor . . . . .	47
Figura 31 – Laboratório de Máquinas Elétricas da Universidade Federal de Campina Grande . . . . .	47
Figura 32 – Circuito equivalente de um motor de indução monofásico em teste com rotor bloqueado . . . . .	49
Figura 33 – Circuito equivalente de um motor de indução monofásico em vazio . . . . .	51
Figura 34 – Instrumentação utilizada . . . . .	52
Figura 35 – Configuração para a estimação da resistência dos enrolamentos da máquina . . . . .	53
Figura 36 – Montagem para medição da impedância do enrolamento auxiliar . . . . .	54
Figura 37 – Ensaio com o rotor bloqueado . . . . .	55
Figura 38 – Ensaio com o motor a vazio . . . . .	56
Figura 39 – Tensão nos capacitores x Velocidade em pu . . . . .	57
Figura 40 – Corrente de entrada x Velocidade em pu . . . . .	58
Figura 41 – Rendimento x Velocidade em pu . . . . .	58
Figura 42 – Fator de Potência x Velocidade em pu . . . . .	59
Figura 43 – Torque x Velocidade em pu . . . . .	59
Figura 44 – Potência no eixo x Velocidade em pu . . . . .	60
Figura 45 – Folha de dados do modelo do motor em estudo oferecido pelo fabricante . . . . .	61

# 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

$\alpha$	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
$\Phi_a$	Fluxo magnético do enrolamento auxiliar do estator
$\Phi_b$	Fluxo magnético do enrolamento principal do estator
$\Phi_{ba}$	Fluxo magnético retrógrado do enrolamento auxiliar
$\Phi_{bm}$	Fluxo magnético retrógrado do enrolamento principal
$\Phi_f$	Fluxo magnético progressivo
$\Phi_{fa}$	Fluxo magnético progressivo do enrolamento auxiliar
$\Phi_{fm}$	Fluxo magnético progressivo do enrolamento principal
$\Phi_r$	Fluxo magnético do rotor
$\Phi_s$	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
$\theta$	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
$x_\phi$	reatância de magnetização do motor
$\tau_{mec}$	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

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>18</b>
1.1	Objetivos	18
1.2	Estrutura do Trabalho	18
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>20</b>
2.1	Constituição do motor monofásico assíncrono	20
2.2	Torque induzido em uma máquina AC	22
2.3	Teoria do duplo campo girante	25
2.4	Componentes simétricos aplicados a motores bifásicos desequilibrados	28
2.5	Circuito equivalente aplicável para vários motores monofásicos de indução	34
2.6	Torque e potência dos motores monofásicos	39
2.6.1	Motor operando apenas com o enrolamento principal	40
2.6.2	Motor operando com enrolamento auxiliar	41
2.7	Motor de Partida a Capacitor	42
<b>3</b>	<b>CONSTRUÇÃO DA BANCADA</b>	<b>44</b>
<b>4</b>	<b>ENSAIOS PARA MODELAGEM DO MOTOR</b>	<b>48</b>
4.1	Resistência dos enrolamentos do estator	48
4.1.1	Medição de resistência a frio e a quente - Enrolamento principal	48
4.1.2	Medição direta para o enrolamento auxiliar	49
4.2	Impedância dos enrolamentos referidas ao estator - Ensaio com o rotor bloqueado	49
4.3	Reatância de magnetização $x_\phi$ - Ensaio com o motor a vazio	50
<b>5</b>	<b>RESULTADOS EXPERIMENTAIS</b>	<b>52</b>
5.1	Instrumentação utilizada	52
5.2	Resistência dos enrolamentos do estator	52
5.2.1	Valor de $r_{1m}$	52
5.2.2	Valor de $r_{1a}$ e $x_{1a}$	54
5.3	Impedância dos enrolamentos referidas ao estator - Ensaio com o rotor bloqueado	55
5.3.1	Valor de $r'_2$	55
5.3.2	Valor de $x_{1m} = x'_2$	55
5.3.3	Valor de $x_C$	56

5.4	Reatância de magnetização $x_\phi$ - Ensaio com o motor a vazio . . . .	56
5.5	Parâmetros . . . . .	57
5.6	Simulação em Matlab com os parâmetros da máquina . . . . .	57
5.7	Validação dos resultados . . . . .	60
6	CONCLUSÃO . . . . .	62
	REFERÊNCIAS . . . . .	63
	<b>APÊNDICES</b>	<b>64</b>
	<b>APÊNDICE A – ALGORITMOS DESENVOLVIDOS NO MATLAB</b>	<b>65</b>
	<b>APÊNDICE B – GUIA DE EXPERIMENTOS . . . . .</b>	<b>66</b>

# 1 Introdução

As máquinas elétricas são elementos fundamentais para a existência e desenvolvimento de uma sociedade industrial como a atual e estão presentes nos mais variados processos de produção. As máquinas assíncronas ou de indução correspondem às máquinas mais utilizadas no mercado devido ao fato de serem relativamente baratas e conseguirem manter boa performance por longos intervalos de tempo. Igualmente importante, os motores assíncronos monofásicos de baixa potência se encontram na maioria dos equipamentos domésticos (geladeiras, ventiladores, máquinas de lavar), onde os mesmos são alimentados pela rede elétrica monofásica local.

Comparativamente às máquinas de indução trifásica, os motores monofásicos não possuem partida própria, pois para a partida é necessário um campo girante a uma velocidade rotórica inicialmente nula. Isso, por sua vez, implica a presença de dois enrolamentos no estator, movimentados espacialmente em  $90^\circ$  e com desvio de fase da corrente em um dos enrolamentos em até  $90^\circ$  em relação ao outro. Devido ao fato de possuírem um enrolamento extra que funciona apenas no momento de partida, as máquinas monofásicas caracterizam-se por serem maiores e mais pesadas quando comparadas à uma máquina trifásica de mesma potência.

A classificação destas máquinas ocorre de acordo com o método de partida empregada. Alguns tipos comuns são os de fase dividida, capacitor de partida, capacitor permanente e de duplo capacitor.

## 1.1 Objetivos

Este trabalho terá como objetivo o estudo do comportamento do motor assíncrono monofásico de capacitor de partida, através de um modelo matemático que considere os efeitos presentes neste tipo de máquina, tendo seus parâmetros e características técnicas principais determinados a partir de uma série de testes, tornando possível a sua instalação para futura disponibilização na realização de experimentos laboratoriais para os alunos na disciplina de Máquinas Elétricas da graduação da Universidade Federal de Campina Grande.

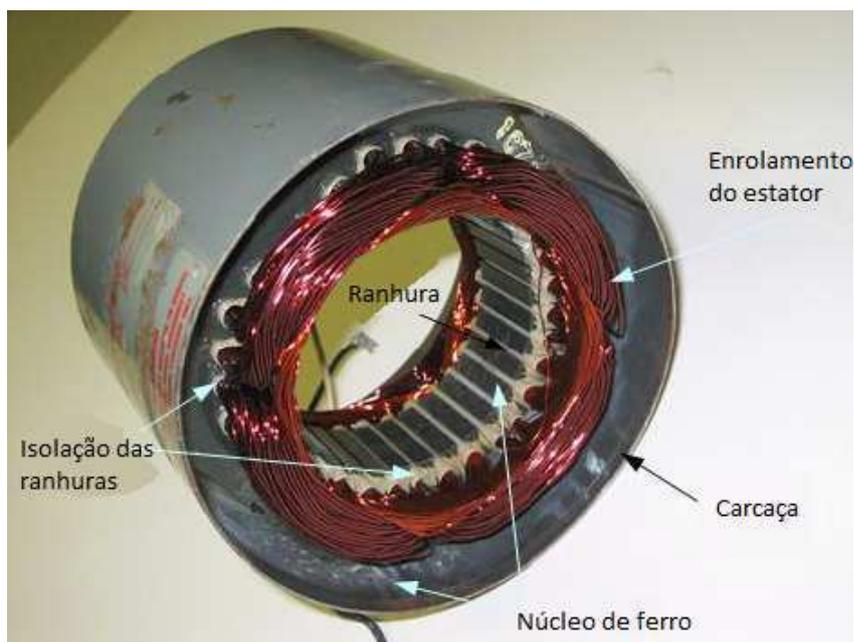
## 1.2 Estrutura do Trabalho

Este trabalho está organizado da seguinte maneira: No Capítulo 2 é apresentado inicialmente do que se compõe uma máquina monofásica, acompanhado de uma revisão

bibliográfica apresentando referenciais teóricos de como é originado o torque capaz de fazer girar o eixo de uma máquina, os efeitos do campo magnético face a uma alimentação monofásica, além da obtenção de circuitos equivalentes do motor de partida a capacitor contendo os principais parâmetros de projeto que possibilitam a descrição da sua performance. No Capítulo 3, é apresentada a bancada que será disponibilizada para experimentos no laboratório. No Capítulo 4, é dado um suporte teórico a cerca dos testes a serem realizados, e por fim, no Capítulo 5, os resultados obtidos pelos mesmos.



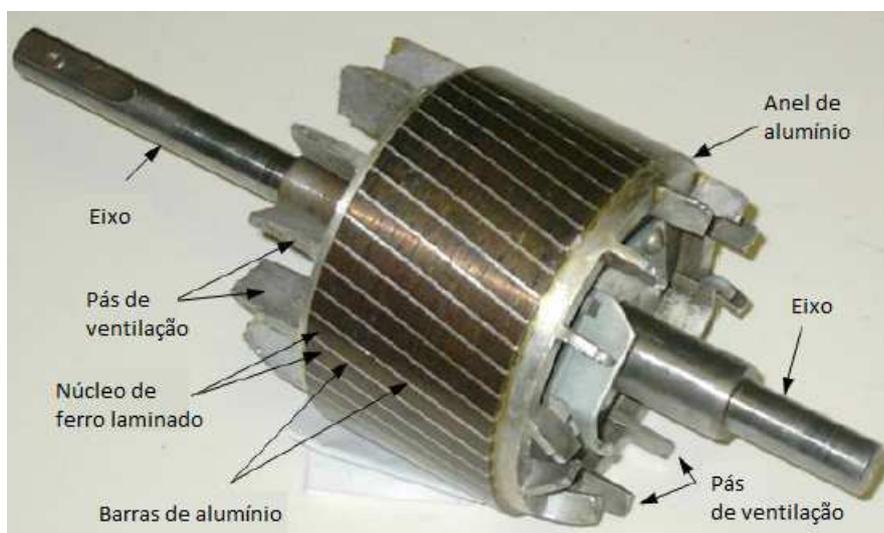
Figura 2 – Estator da máquina de indução monofásica.



Fonte: Adaptado de (MARQUES, 2005)

Um rotor de gaiola de esquilo, [3](#), é a parte rotativa do motor de indução comum. Consiste em um cilindro de laminação de aço, com condutores de alumínio ou cobre embutidos em sua superfície. Em operação, o enrolamento do rotor tem corrente induzida pelo campo do estator e produz seu próprio campo magnético. A interação das duas fontes de campo magnético produz torque no rotor. Ao ajustar a forma das barras no rotor, as características de velocidade-torque do motor podem ser alteradas, para minimizar a corrente de partida ou para maximizar o torque de baixa velocidade, por exemplo.

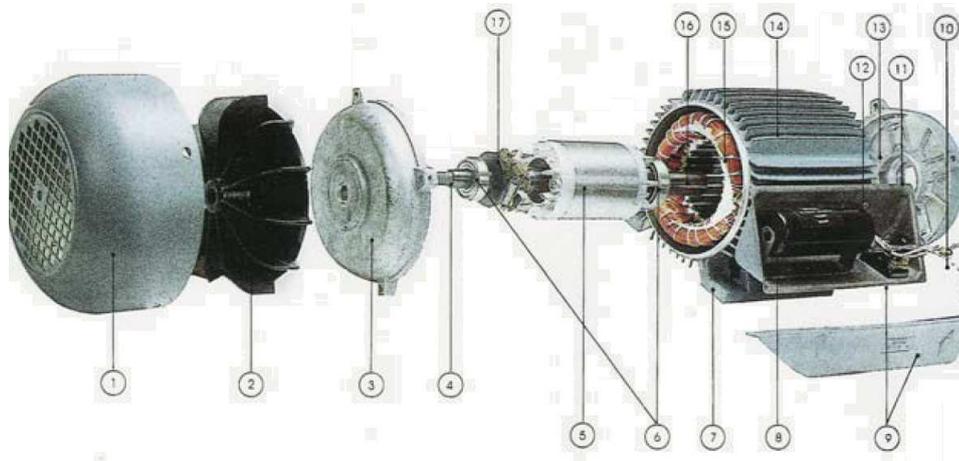
Figura 3 – Rotor da máquina de indução monofásica.



Fonte: Adaptado de (MARQUES, 2005)

Outras peças constituintes de um motor de indução pode ser visto na Figura 4.

Figura 4 – Partes constituintes da máquina de indução monofásica.



- |                          |   |
|--------------------------|---|
| 1. Tampa do ventilador;  | 9. Caixa de capacitor e tampa;                |
| 2. Ventilador;           | 10. Prumo;                                    |
| 3. Tampa do motor;       | 11. Manga de aço;                             |
| 4. Eixo do rotor;        | 12. Terminal de conexões;                     |
| 5. Rotor;                | 13. Tampa do motor;                           |
| 6. Enrolamentos;         | 14. Carcaça;                                  |
| 7. Base da montagem;     | 15. Enrolamentos do estator;                  |
| 8. Capacitor de partida; | 16. Estator;                                  |
|                          | 17. Chave centrífuga e montagem de mecanismo; |

Fonte: Adaptado de (MARQUES, 2005)

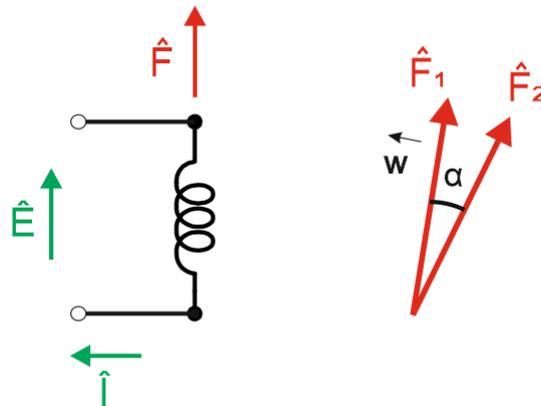
## 2.2 Torque induzido em uma máquina AC

A conversão eletromecânica de energia relaciona as forças elétricas e magnéticas do átomo com a força mecânica aplicada à matéria e ao movimento. Como resultado desta relação, a energia elétrica pode ser convertida em energia mecânica, e vice-versa, através das máquinas elétricas.

Na maioria das máquinas elétricas, exceto nas máquinas de ímãs permanentes, o campo magnético (ou fluxo) é produzido pela passagem de uma corrente elétrica através de bobinas enroladas em materiais ferromagnéticos. (SEN, 1997). Nas máquinas AC, síncronas ou assíncronas, sobre condições normais de operação, existem dois campos magnéticos presentes – um campo magnético no circuito do rotor e outro campo magnético no circuito do estator girando com a mesma velocidade. A interação destes dois circuitos produz o torque na máquina, da mesma maneira que acontece com dois ímãs permanentes. (CHAPMAN, 2011).

$$\tau_{mec} = k\mathcal{F}_s\mathcal{F}_r \sin(\alpha)$$

Figura 5 – Elementos de conversão de energia eletromecânica.

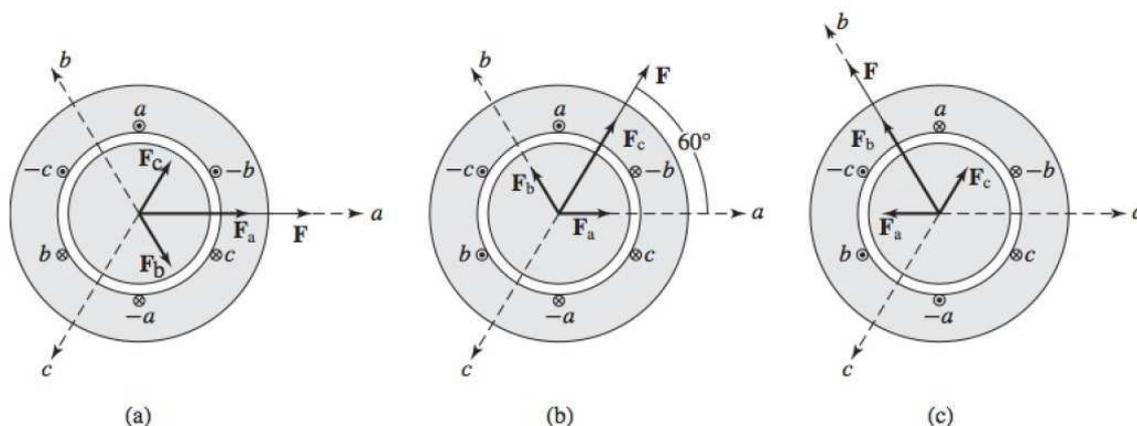


Fonte: Própria autoria, 2018.

Um motor monofásico, como o nome indica, é projetado para operar a partir de uma fonte monofásica de tensão. Na sua forma básica, estes motores consistem em um enrolamento de estator distribuído e um rotor de gaiola. A tensão de alimentação AC é aplicada ao estator, em que há uma única bobina na qual circula uma corrente alternada, que, por sua vez, cria uma distribuição de campo pulsante, caracterizado por ser fixo no espaço e de módulo variável. (TORO, 1994).

O fato de que forças magnetomotrizes no entreferro de uma máquina excitada por uma fonte de corrente alternada poder ser decomposta em ondas progressivas girantes é um passo conceitual importante na compreensão das máquinas CA. A velocidade de rotação deste campo magnético girante é conhecido por velocidade síncrona  $w_s$ . (FITZGERALD, 1961). Sendo o rotor formado por barras de caminho fechado - de acordo com a Lei de Faraday - um campo magnético variante sobre o mesmo fará com que uma tensão seja induzida em suas barras. A tensão induzida nas barras do rotor produzem correntes que caminham sobre as mesmas. Tem-se, então, uma situação onde uma corrente elétrica trafega por um circuito fechado em um campo magnético. De acordo com Lei de força de Lorentz, uma força eletromagnética será produzida nas voltas/barras do rotor e o mesmo dará início à rotação. Para o caso da máquina trifásica, correntes balanceadas dispostas espacialmente a  $120^\circ$  produzem o campo magnético girante.

Figura 6 – A produção de um campo magnético girante por meio de correntes trifásicas.



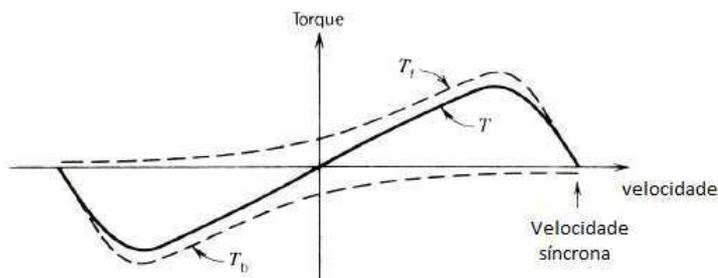
Fonte: (FITZGERALD, 1961)

Portanto, o arranjo básico do motor monofásico faz com que o mesmo não tenha toque de partida. Se, de alguma forma, o rotor for colocado em movimento em qualquer sentido, ele vai desenvolver um torque diferente de zero naquele sentido e, desta forma, fazer com que o motor atinja uma velocidade normal. O problema é, portanto, modificar a configuração do motor de forma que se obtenha um campo girante, dando ao rotor um torque de partida não nulo. (TORO, 1994).

Usualmente existem enrolamentos bifásicos no estator, espacialmente dispostos a  $90^\circ$  um do outro como no caso polifásico, mas ambos conectados à mesma fonte de potência monofásica. Se as impedâncias das duas fases possuem ângulos diferentes, as correntes estarão defasadas e um conjugado é desenvolvido para partir e acionar o motor.

O diagrama da Figura 7 ilustra a relação entre torque e velocidade de uma máquina de indução monofásica na sua forma básica sem ação de partida.

Figura 7 – Torque em máquinas monofásicas assíncronas sem enrolamento auxiliar para partida.

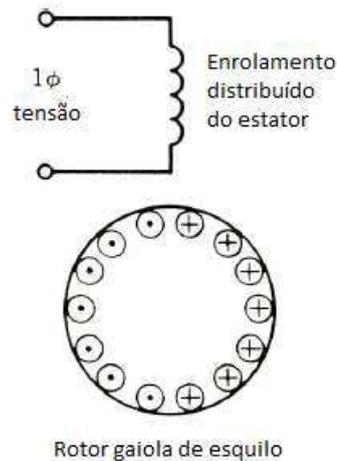


Fonte: Adaptado de (SEN, 1997).

## 2.3 Teoria do duplo campo girante

Motores do tipo de indução tem rotores de gaiola e uma fase única distribuída no estator. (SEN, 1997).

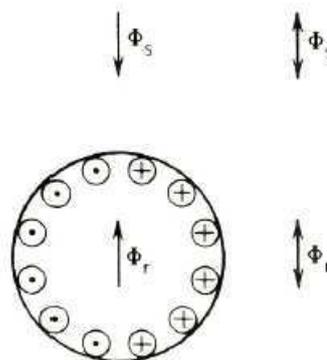
Figura 8 – Esquema do estator e do rotor de um motor monofásico.



Fonte: Adaptado de (SEN, 1997)

Considerando, primeiramente, o rotor parado e o enrolamento do estator sendo percorrido por uma corrente ac, uma fmm pulsante e conseqüentemente um fluxo magnético  $\Phi_s$  é estabelecido na máquina ao longo do eixo do enrolamento do estator. (SEN, 1997).

Figura 9 – Fluxo do estator e do rotor.



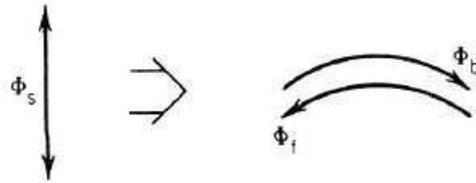
Fonte: (SEN, 1997)

Pela lei de Lenz, o fluxo magnético no rotor  $\Phi_r$  produzido pela corrente induzida nos enrolamentos do rotor produzida pelo fluxo magnético do estator  $\Phi_s$  tendem a se opor um ao outro. Como o ângulo entre estes fluxos é nulo, nenhum torque de partida é desenvolvido. (SEN, 1997).

A resposta a esse problema repousa na modificação do motor de forma que ele se aproxime das condições que ocorrem no motor de indução bifásico. Para obter um campo magnético girante de amplitude constante e velocidade linear constante no motor bifásico, duas condições devem ser satisfeitas: duas bobinas com eixos defasados no espaço por  $90^\circ$  e correntes circulando nestas bobinas deslocadas no tempo por  $90^\circ$  graus com módulos tais que as fmm's sejam iguais. Se as correntes estiverem defasadas no tempo por um valor inferior a  $90^\circ$  mas superior a  $0^\circ$  ou não fornecerem fmm's iguais, um campo girante pode ainda ser desenvolvido mas o lugar geométrico do vetor de fluxo resultante será uma elipse e não um círculo. Evidentemente, itens de desempenho como fator de potência e rendimento serão mais pobres que no caso ideal, mas isso não é tão importante, porque os motores são de potência relativamente pequena. (TORO, 1994).

A operação desta fase única pode ser explicada e analisada pela teoria do duplo campo girante, onde um campo pulsante (fmm ou fluxo magnético) é equivalente a dois campos girantes com metade da magnitude original mas girando a mesma velocidade síncrona em direções opostas. (SEN, 1997)

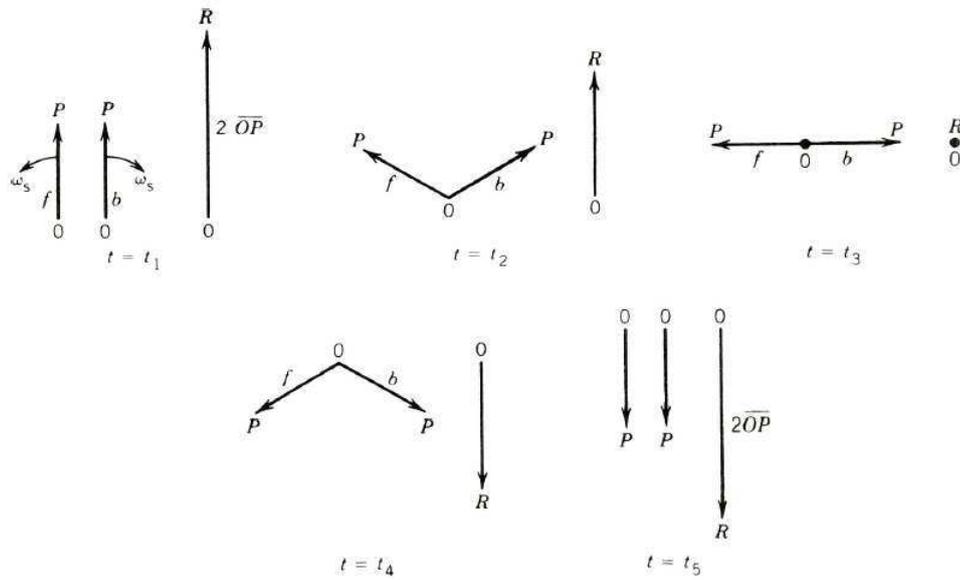
Figura 10 – Campo pulsante e campos girantes.



Fonte: Adaptado de (SEN, 1997).

Este fenômeno pode ser provado tanto graficamente quanto matematicamente. (SEN, 1997).

Figura 11 – Dinâmica do campo pulsante em relação aos campos girantes.



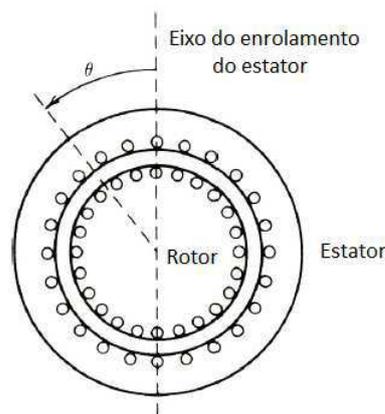
Fonte: Adaptado de (SEN, 1997).

Matematicamente, a fmm ao longo da posição  $\theta$  é

$$F(\theta) = Ni \cos(\theta)$$

onde  $N$  é o número efetivo de voltas do enrolamento do estator. (SEN, 1997).

Figura 12 – Seção transversal de um motor de indução monofásico.



Fonte: Adaptado de (SEN, 1997).

Sendo

$$i = I_{max} \cos(\omega t)$$

tem-se que

$$F(\theta) = NI_{max} \cos(\omega t) \cos(\theta)$$

e aplicando uma identidade trigonométrica trivial,

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

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

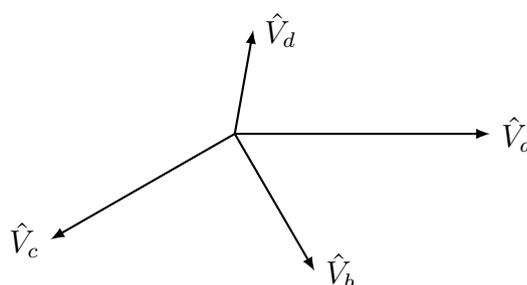
Onde  $F_f$  representa a fmm girante na direção de  $\theta$ , e  $F_b$  representa a fmm girante na direção oposta. (SEN, 1997).

## 2.4 Componentes simétricos aplicados a motores bifásicos desequilibrados

O motor monofásico pode ser analisado como um caso especial de um motor bifásico desequilibrado, que, por sua vez, podem ser considerados em termos de circuitos bifásico equilibrados através do emprego de componentes simétricos. (TORO, 1994)

O estudo de componentes simétricos para um sistema de quatro fases é estudado como uma generalização para a análise de sistemas bifásicos. Um sistema de quatro fases desequilibrado pode ser representado, por exemplo, pelo conjunto de fases mostrado na Figura 13.

Figura 13 – Sistema de tensões de quatro fases desequilibrado.



Fonte: Adaptado de (TORO, 1994).

Estas fases podem ser decompostas em

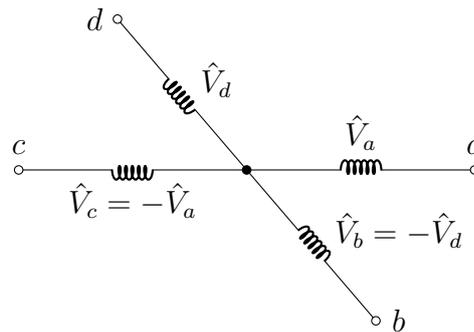
$$\begin{aligned}\hat{V}_a &= \hat{V}_1 + \hat{V}_2 + \hat{V}_3 + \hat{V}_0 \\ \hat{V}_b &= a\hat{V}_1 + a^3\hat{V}_2 + a^2\hat{V}_3 + \hat{V}_0 \\ \hat{V}_c &= a^2\hat{V}_1 + a\hat{V}_2 + \hat{V}_3 + \hat{V}_0 \\ \hat{V}_d &= a^3\hat{V}_1 + a\hat{V}_2 + a^2\hat{V}_3 + \hat{V}_0\end{aligned}$$

onde a teoria de componentes simétricos fornece as instruções sobre como calcular as componentes de sequência positiva e negativa como

$$\begin{aligned}a &= 1\angle -90^\circ = -j \\ \hat{V}_0 &= \frac{1}{4}(\hat{V}_a + \hat{V}_b + \hat{V}_c + \hat{V}_d) \\ \hat{V}_1 &= \frac{1}{4}(\hat{V}_a + j\hat{V}_b - \hat{V}_c - j\hat{V}_d) \\ \hat{V}_2 &= \frac{1}{4}(\hat{V}_a - j\hat{V}_b - \hat{V}_c + j\hat{V}_d) \\ \hat{V}_3 &= \frac{1}{4}(\hat{V}_a - \hat{V}_b + \hat{V}_c - \hat{V}_d)\end{aligned}$$

O sistema bifásico desequilibrado pode ser representado no de 4 fases onde  $\hat{V}_c$  e  $\hat{V}_b$  são, respectivamente, iguais a  $-\hat{V}_a$  e  $-\hat{V}_d$ . (TORO, 1994)

Figura 14 – Sistema bifásico como um caso especial do sistema de quatro fases simétrico desequilibrado.



Fonte: Adaptado de (TORO, 1994).

onde

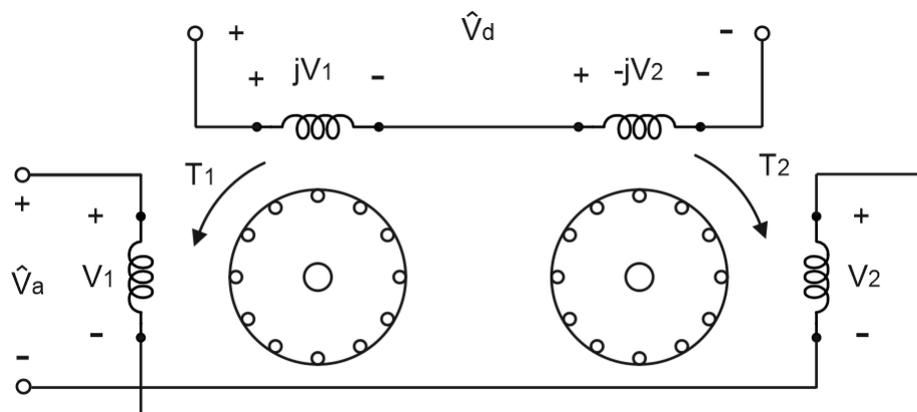
$$\begin{aligned}\hat{V}_0 &= \frac{1}{4}(\hat{V}_a + \hat{V}_b + \hat{V}_c + \hat{V}_d) = \frac{1}{4}(\hat{V}_a - \hat{V}_d - \hat{V}_a + \hat{V}_d) = 0 \\ \hat{V}_1 &= \frac{1}{4}(\hat{V}_a + j\hat{V}_b - \hat{V}_c - j\hat{V}_d) = \frac{1}{4}(\hat{V}_a - j\hat{V}_d + \hat{V}_a - j\hat{V}_d) = \frac{1}{2}(\hat{V}_a - j\hat{V}_d) \\ \hat{V}_2 &= \frac{1}{4}(\hat{V}_a - j\hat{V}_b - \hat{V}_c + j\hat{V}_d) = \frac{1}{4}(\hat{V}_a + j\hat{V}_d + \hat{V}_a + j\hat{V}_d) = \frac{1}{2}(\hat{V}_a + j\hat{V}_d) \\ \hat{V}_3 &= \frac{1}{4}(\hat{V}_a - \hat{V}_b + \hat{V}_c - \hat{V}_d) = \frac{1}{4}(\hat{V}_a + \hat{V}_d - \hat{V}_a - \hat{V}_d) = 0\end{aligned}$$

e

$$\begin{aligned}\hat{V}_a &= \hat{V}_1 + \hat{V}_2 + \hat{V}_3 + \hat{V}_0 = \hat{V}_1 + \hat{V}_2 \\ \hat{V}_d &= a^3\hat{V}_1 + a\hat{V}_2 + a^2\hat{V}_3 + \hat{V}_0 = j\hat{V}_1 - j\hat{V}_2\end{aligned}$$

Os componentes de sequência positiva em cada tensão de fase desequilibrada  $\hat{V}_1$  e  $j\hat{V}_1$ , podem ser considerados como contribuintes para criar um campo magnético girante que interage com o enrolamento do rotor para produzir um torque de sequência positiva,  $T_1$ . Ao mesmo tempo, os componentes de sequência negativa em cada fase,  $\hat{V}_2$  e  $-j\hat{V}_2$  podem ser considerados como se associando para criar um campo magnético girante de direção oposta, que interage com o enrolamento do rotor para produzir um torque de sequência negativa  $T_2$ . Existe, porém, na realidade, apenas um par de bobinas de estator e um só rotor, mas o efeito é o mesmo que houvesse dois pares idênticos de bobinas de estator e dois rotores idênticos, mecanicamente acoplados. Evidentemente, o rotor responde ao torque resultante, que é a diferença entre  $T_1$  e  $T_2$ . (TORO, 1994)

Figura 15 – Representação do motor bifásico desequilibrado por meio de um motor de sequência positiva acoplado a um motor idêntico de sequência negativa.

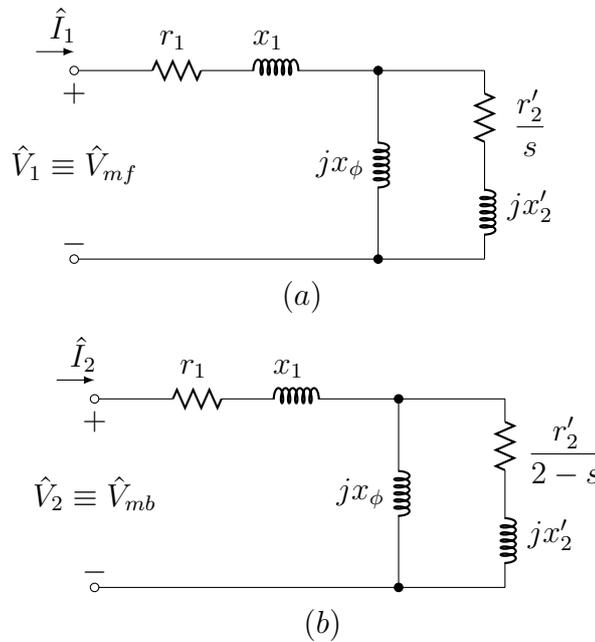


Fonte: Adaptado de (TORO, 1994).

O circuito equivalente para cada enrolamento (principal e auxiliar) consiste, então, em duas partes: uma representando a resposta do motor ao conjunto de tensões de seqüência

positiva e outra representando a resposta ao conjunto de sequência negativa. Devido a cada sequência de tensões ser um conjunto equilibrado, o circuito equivalente, expresso em base por fase, é similar ao usado para o motor trifásico equilibrado que está reproduzido na Figura 16 (a). A tensão de sequência positiva aplicada ao enrolamento principal no estator,  $\hat{V}_1$ , é a responsável pela componente de campo progressivo do enrolamento principal, sendo referida mais a frente neste texto como  $\hat{V}_{mf}$ . A grandeza  $r_1$  é a resistência do enrolamento do motor. A grandeza  $x_\phi$  é a reatância de magnetização total associada com o circuito magnético do motor. A reatância de dispersão do rotor referida ao estator, por fase, é designada como  $x'_2$ , e  $r'_2$  é a resistência do rotor, por fase, referida ao estator. O emprego de  $r'_2/s$  implica que o rotor gira no sentido do campo girante de sequência positiva ou progressivo.

Figura 16 – Circuito equivalente do motor bifásico desequilibrado pelo (a) conjunto de sequência positiva e para (b) o de sequência negativa.



Fonte: Adaptado de (TORO, 1994).

O circuito equivalente do motor bifásico desequilibrado, em resposta ao conjunto de sequência negativa equilibrado, está mostrado na Figura 16 (b). O raciocínio que produz esse resultado é o mesmo do motor de indução trifásico equilibrado, visto que a situação entre o motor e o campo progressivo é a mesma. Contudo, a situação é diferente entre o rotor que gira no sentido progressivo e o campo que gira no sentido retrógrado. Agora, o escorregamento do motor, em relação a esse campo, é

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

Sendo possível, também, expressar o escorregamento retrógrado  $s_b$  em termos do escorregamento progressivo  $s$  da seguinte forma

$$s_b = 1 + 1 - s = 2 - s.$$

Como consequência, os parâmetros associados com a seção do circuito equivalente onde os efeitos do campo retrógrado são indicados devem ser representados em termos da resistência  $r'_2/(2 - s)$  para representar a potência transferida através do entreferro, juntamente com uma reatância de dispersão  $x'_2$ . (TORO, 1994)

A corrente na rede resultante na fase a é

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

e, na fase d, é obtida de forma similar, como

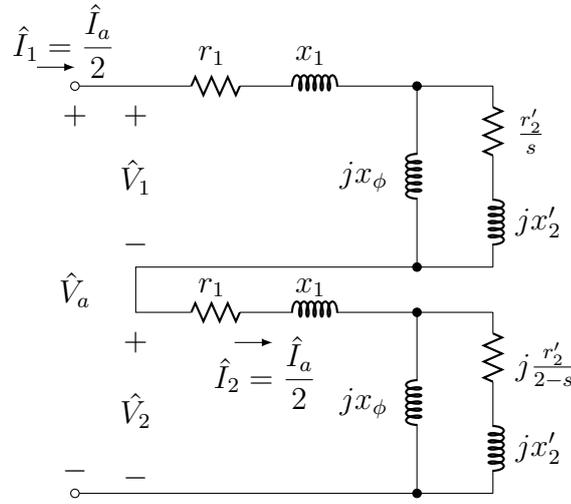
$$\hat{I}_d = j\hat{I}_1 - j\hat{I}_2 \quad (2.2)$$

Sendo o motor monofásico um caso especial onde apenas uma fase é usada, temos uma situação onde a corrente  $\hat{I}_d$  da Eq. 2.2 é necessariamente zero, devido à ausência da fase d. Isso faz com que as correntes de sequência positiva e negativa no motor monofásico sejam idênticas. Segue-se da Eq. 2.1 que

$$\hat{I}_1 = \hat{I}_2 = \frac{\hat{I}_a}{2} \quad (2.3)$$

Portanto, devido às correntes de sequência positiva e negativa serem as mesmas, uma associação em série dos circuitos equivalentes individuais torna-se permissível. (TORO, 1994).

Figura 17 – Circuito equivalente de um motor de indução monofásico baseado na teoria de componentes simétricos.



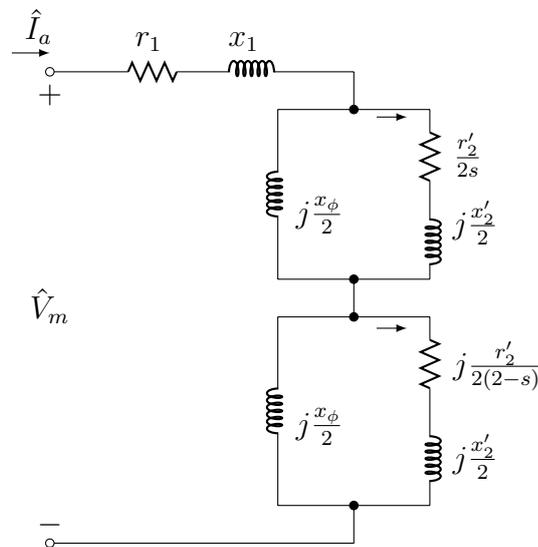
Fonte: Adaptado de (TORO, 1994).

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

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

$$\begin{aligned} \hat{V}_1 &= \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2} \hat{V}_a \\ \hat{V}_2 &= \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} \hat{V}_a \end{aligned} \tag{2.4}$$

Figura 18 – Circuito equivalente de um motor de indução monofásico operando num escorregamento  $s$ .



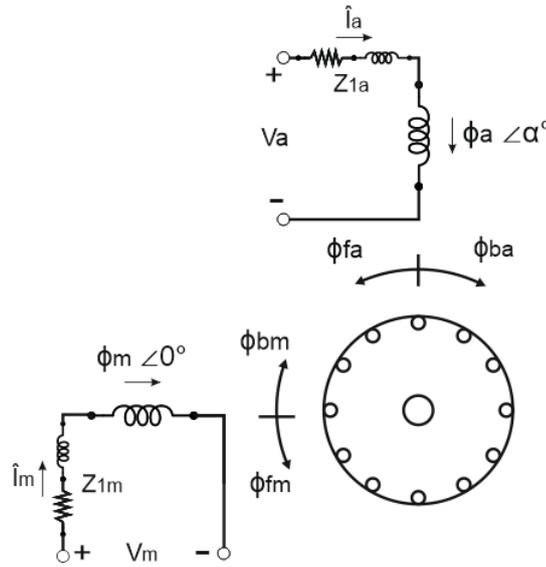
Fonte: Adaptado de (TORO, 1994).

## 2.5 Circuito equivalente aplicável para vários motores monofásicos de indução

Um motor de indução monofásico com apenas um enrolamento de estator não consegue produzir nenhum torque de partida. No sentido de fazer o motor girar, uma configuração especial é requerida. Depois de atingir certa velocidade, o motor consegue produzir o torque apenas com o enrolamento do estator. (SEN, 1997)

O método mais simples de dar a partida ao motor de indução monofásico é prover um enrolamento auxiliar, em adição ao enrolamento principal, colocados com seus eixos defasados espacialmente a 90 graus e com as impedâncias dos dois circuitos feitas de tal forma que as correntes entre os enrolamentos principal e auxiliar fiquem defasadas. (SEN, 1997).

Figura 19 – Campos girantes no motor de capacitor de partida.



Fonte: Adaptado de (FITZGERALD, 1961).

Um campo progressivo de amplitude constante seria possível se o conjunto de fasores de corrente  $\hat{I}_{mf}$  e  $\hat{I}_{af}$  nos enrolamentos  $m$  e  $a$ , respectivamente, satisfizerem a relação

$$N_a \hat{I}_{af} = j N_m \hat{I}_{mf} \quad \Rightarrow \quad \hat{I}_{af} = j \frac{\hat{I}_{mf}}{a}$$

onde  $a$  é a relação efetiva de espiras  $N_a/N_m$ . Por espiras efetivas quer se dizer o número de voltas corrigidas para que o efeito da distribuição dos enrolamentos alcance a distribuição espacial da força magnetomotriz fundamental. (FITZGERALD, 1961)

Igualmente, um campo retrógrado de amplitude constante resultaria se outro conjunto de fasores de corrente  $\hat{I}_{mb}$  e  $\hat{I}_{ab}$  satisfizessem a relação

$$N_a \hat{I}_{ab} = -j N_m \hat{I}_{mb} \quad \Rightarrow \quad \hat{I}_{ab} = -j \frac{\hat{I}_{mb}}{a}$$

Com estas duas correntes ocorrendo simultaneamente, as correntes de enrolamento  $\hat{I}_m$  e  $\hat{I}_a$  no caso seriam

$$\hat{I}_m = \hat{I}_{mf} + \hat{I}_{mb} \tag{2.5}$$

$$\hat{I}_a = \hat{I}_{af} + \hat{I}_{ab} = j \frac{\hat{I}_{mf}}{a} - j \frac{\hat{I}_{mb}}{a} \tag{2.6}$$

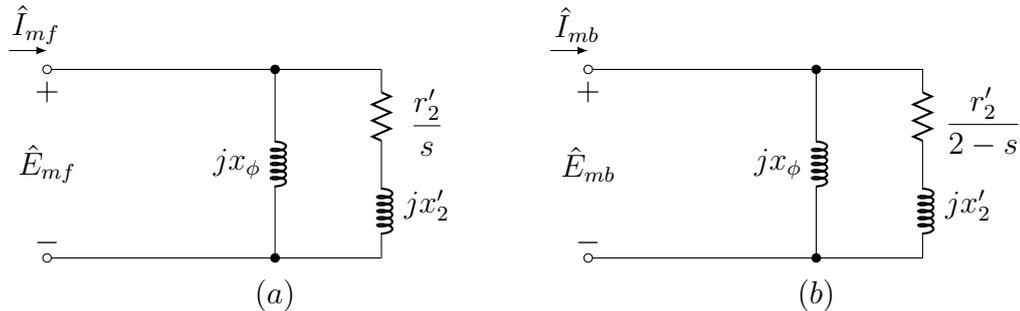
Compare com as equações 2.1 e 2.2. A solução destas correntes para as correntes componentes  $\hat{I}_{mf}$  e  $\hat{I}_{mb}$  em termos das correntes dos enrolamentos  $\hat{I}_m$  e  $\hat{I}_a$  fica

$$\hat{I}_{mf} = \frac{1}{2}(\hat{I}_m - ja\hat{I}_a)$$

$$\hat{I}_{mb} = \frac{1}{2}(\hat{I}_m + ja\hat{I}_a)$$

Nota-se que  $a\hat{I}_a$  é simplesmente a corrente no enrolamento  $a$  referida ao enrolamento  $m$ , como na teoria de transformadores. A partir do ponto de vista do enrolamento  $m$ , as reações internas dos campos progressivo e retrógrado são semelhantes às dos motores bifásicos equilibrados. À vista do enrolamento  $m$ , as impedâncias  $Z_f$  e  $Z_b$  são dadas pelos circuitos equivalentes da Fig. 20 e as componentes de força eletromotriz de reação  $\hat{E}_{mf}$  e  $\hat{E}_{mb}$  geradas pelos campos progressivo e retrógrado, respectivamente, se igualam a tensão sobre estas impedâncias. (FITZGERALD, 1961)

Figura 20 – Circuito equivalente representando as reações do (a) campo progressivo e (b) retrógrado vistos pelo enrolamento principal.



Fonte: Adaptado de (FITZGERALD, 1961).

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

A força eletromotriz de reação total  $\hat{E}_m$  do enrolamento principal  $m$  é

$$\hat{E}_m = \hat{E}_{mf} + \hat{E}_{mb} = \hat{I}_{mf}Z_f + \hat{I}_{mb}Z_b \quad (2.7)$$

Por conta da relação de espiras do estator, as componentes de força magnetomotriz de reação geradas no enrolamento auxiliar será  $a$  vezes as componentes que correspondem ao enrolamento  $m$ . Por causa da direção que os campos rotacionam, a componente

progressiva gerada no enrolamento a está adiantada da componente correspondente gerada no enrolamento m e a componente retrógrada gerada no enrolamento a atrasada da correspondente gerada no enrolamento m. (FITZGERALD, 1961)

A força eletromotriz de reação total  $\hat{E}_m$  do enrolamento auxiliar a é

$$\hat{E}_a = ja\hat{E}_{mf} - ja\hat{E}_{mb} = ja\hat{I}_{mf}Z_f - ja\hat{I}_{mb}Z_b \quad (2.8)$$

Substituição das equações 2.5, 2.6, 2.7 e 2.8 nas equações dos circuitos dos enrolamentos do estator,

$$\hat{V}_m = \hat{I}_m Z_{1m} + \hat{E}_m \quad (2.9)$$

$$\hat{V}_a = \hat{I}_a Z_{1a} + \hat{E}_a \quad (2.10)$$

rearranjando os termos destas equações e multiplicando 2.10 por  $-j/a$ , tem-se que

$$\hat{V}_m = \hat{I}_{mf}(Z_{1m} + Z_f) + \hat{I}_{mb}(Z_{1m} + Z_b) \quad (2.11)$$

$$-j\frac{\hat{V}_a}{a} = \hat{I}_{mf}\left(\frac{Z_{1a}}{a^2} + Z_f\right) - \hat{I}_{mb}\left(\frac{Z_{1a}}{a^2} + Z_b\right) \quad (2.12)$$

Somando 2.11 e 2.12 e dividindo o resultado por 2, assim como subtraindo 2.12 de 2.11 e também dividindo este resultado por 2, tem-se

$$\frac{1}{2}\left(\hat{V}_m - j\frac{\hat{V}_a}{a}\right) = \hat{I}_{mf}\left(\frac{1}{2}\left(\frac{Z_{1a}}{a^2} + Z_{1m}\right) + Z_f\right) - \hat{I}_{mb}\frac{1}{2}\left(\frac{Z_{1a}}{a^2} + Z_b\right) \quad (2.13)$$

$$\frac{1}{2}\left(\hat{V}_m + j\frac{\hat{V}_a}{a}\right) = -\hat{I}_{mf}\frac{1}{2}\left(\frac{Z_{1a}}{a^2} - Z_{1m}\right) + \hat{I}_{mb}\left(\frac{1}{2}\left(\frac{Z_{1a}}{a^2} + Z_{1m}\right) + Z_b\right) \quad (2.14)$$

Considerando as tensões de componente simétricas referidas à fase m

$$\hat{V}_{mf} = \frac{1}{2}\left(\hat{V}_m - j\frac{\hat{V}_a}{a}\right) \quad (2.15)$$

$$\hat{V}_{mb} = \frac{1}{2}\left(\hat{V}_m + j\frac{\hat{V}_a}{a}\right) \quad (2.16)$$

e, para simplificação de notação, fazendo

$$Z_o = \frac{1}{2}\left(\frac{Z_{1a}}{a^2} + Z_{1m}\right) \quad (2.17)$$

$$Z_d = \frac{1}{2} \left( \frac{Z_{1a}}{a^2} - Z_{1m} \right) \quad (2.18)$$

tem-se que

$$\hat{V}_{mf} = \hat{I}_{mf}(Z_o + Z_f) - \hat{I}_{mb}Z_d \quad (2.19)$$

$$\hat{V}_{mb} = -\hat{I}_{mf}Z_d + \hat{I}_{mb}(Z_o + Z_b) \quad (2.20)$$

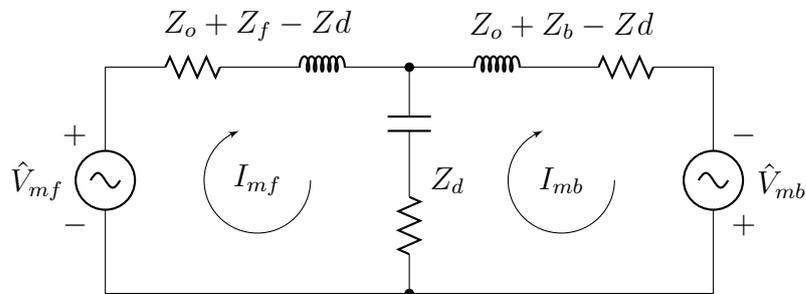
que podem ser resolvidas como

$$\hat{I}_{mf} = \frac{\hat{V}_{mf}(Z_o + Z_b) + \hat{V}_{mb}Z_d}{(Z_o + Z_f)(Z_o + Z_b) - Z_d^2} \quad (2.21)$$

$$\hat{I}_{mb} = \frac{\hat{V}_{mb}(Z_o + Z_f) + \hat{V}_{mf}Z_d}{(Z_o + Z_f)(Z_o + Z_b) - Z_d^2} \quad (2.22)$$

Estas equações tornam possível a representação do motor pelo circuito equivalente mostrado da Figura 21.

Figura 21 – Circuito equivalente generalizado para máquinas bifásicas.



Fonte: Adaptado de (FITZGERALD, 1961).

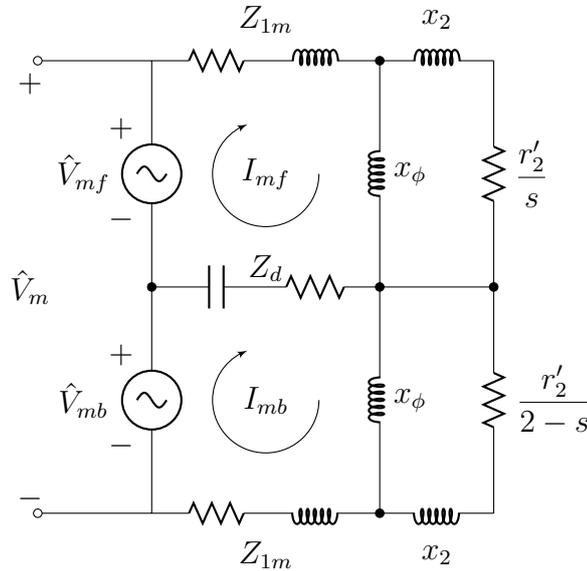
Como, segundo as equações 2.17 e 2.18,

$$Z_o - Z_d = Z_{1m}$$

um circuito equivalente pode então ser redesenhado (Figura 22), onde a impedância  $Z_d$  é representada como capacitiva, pois é o que ela é quando o caso de motor capacitivo. Além disso, ela atua como um acoplamento - assim como uma impedância mútua - entre os campos progressivo e retrógrado e expressa a maneira de como esses campos influenciam um oa outro. A corrente que passa por ela é

$$\hat{I}_{mf} - \hat{I}_{mb} = -ja\hat{I}_a$$

Figura 22 – Circuito equivalente generalizado para máquinas bifásicas.



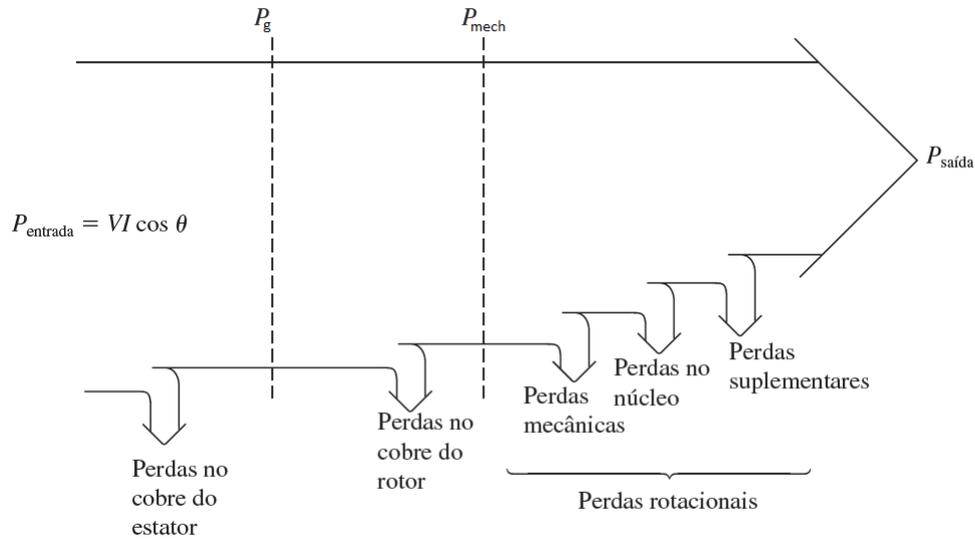
Fonte: Adaptado de (FITZGERALD, 1961).

## 2.6 Torque e potência dos motores monofásicos

Com os circuitos equivalentes da máquina disponíveis e seus parâmetros conhecidos, é possível fazer uma análise quantitativa do desempenho das mesmas. A curva de torque-velocidade resultante que se aplica ao longo da faixa de sua operação não é obtida por um processo tão direto como o motor de indução trifásico. A razão é que as componentes de tensão de sequência positiva e negativa (equações 2.4) variam com o escorregamento. Conseqüentemente, quando a curva de torque-velocidade resultante é obtida, deve-se ter cuidado para calcular  $T_1$  e  $T_2$  para um dado escorregamento, calculando primeiramente os valores de  $\hat{V}_1$  e  $\hat{V}_2$  válidos para o escorregamento considerado. (TORO, 1994).

Um diagrama de fluxo de potência, que faz a relação entre a potência de saída com a potência de entrada de um motor assíncrono, pode ser representado com a Figura X a seguir.

Figura 23 – O fluxo de potência de um motor monofásico de indução.



Fonte: (CHAPMAN, 2011).

### 2.6.1 Motor operando apenas com o enrolamento principal

Como pode-se verificar na Figura 18, circuito equivalente do motor em operação com apenas o enrolamento principal, a potência total  $P_{gf}$  entregue ao campo progressivo pelo enrolamento principal do estator é obtida por

$$P_{gf} = I_{mf}^2 \frac{R_f}{2} \quad (2.23)$$

Similarmente, a potência total entregue ao campo retrógrado será

$$P_{gb} = I_{mb}^2 \frac{R_b}{2}. \quad (2.24)$$

O que corresponde uma potência entregue ao entreferro

$$P_g = P_{gf} - P_{gb}. \quad (2.25)$$

Os torques correspondentes são

$$T_f = \frac{P_{gf}}{\omega_s} \quad T_b = \frac{P_{gb}}{\omega_s}. \quad (2.26)$$

e o torque eletromecânico total a diferença

$$T = T_f - T_b = \frac{P_g}{\omega_s} \quad (2.27)$$

A potência elétrica convertida em forma mecânica é

$$P_{mec} = Tw_m = Tw_s(1 - s) = P_g(1 - s) \quad (2.28)$$

A potência no eixo é

$$P_{eixo} = P_{mec} - P_{rot} \quad (2.29)$$

onde  $P_{rot}$  representa as perdas rotacionais da máquina. E por fim, tem-se o torque no eixo, que é

$$\tau_{eixo} = \frac{P_{eixo}}{w_m}. \quad (2.30)$$

## 2.6.2 Motor operando com enrolamento auxiliar

Para o caso onde os dois enrolamentos do motor estão em operação, se as constantes do motor e as tensões aplicadas forem conhecidas e um valor de escorregamento for assumido, as componentes de corrente progressiva e retrógrada no enrolamento  $m$ , 2.21 e 2.22, podem ser encontradas.

A potência entregue ao entreferro devido aos campos de sequência progressiva no enrolamento  $m$  do estator é  $I_{mf}^2 R_f$ , e sendo o comportamento interno dos componentes de campo progressivo no motor a mesma para um motor balanceado, uma contribuição semelhante é gerado pela fase  $a$ . Portanto, para um motor bifásico balanceado, a potência total  $P_{gf}$  entregue ao campo progressivo pelas duas fases do estator seria

$$P_{gf} = 2I_{mf}^2 R_f \quad (2.31)$$

Similarmente, a potência total entregue ao campo retrógrado é

$$P_{gb} = 2I_{mb}^2 R_b \quad (2.32)$$

Os torques correspondentes são

$$T_f = \frac{P_{gf}}{w_s} \quad T_b = \frac{P_{gb}}{w_s} \quad (2.33)$$

O torque eletromecânico resultante é

$$T = T_f - T_b = \frac{2}{w_s}(I_{mf}^2 R_f - I_{mb}^2 R_b) \quad (2.34)$$

A potência elétrica convertida em forma mecânica é

$$P_{mec} = Tw_m = Tw_s(1 - s) = (P_{gf} - P_{gb})(1 - s) \quad (2.35)$$

A potência no eixo é

$$P_{eixo} = P_{mec} - P_{rot} \quad (2.36)$$

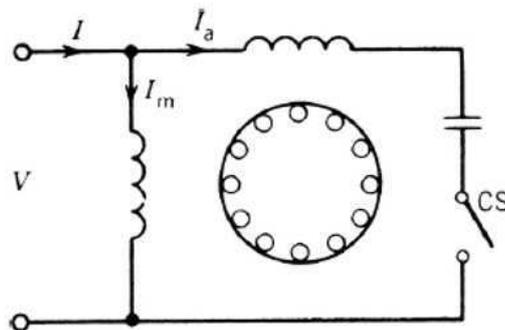
onde  $P_{rot}$  representa as perdas rotacionais da máquina. E por fim, tem-se o torque no eixo, que é

$$\tau_{eixo} = \frac{P_{eixo}}{\omega_m}. \quad (2.37)$$

## 2.7 Motor de Partida a Capacitor

Em motores de indução monofásicos do tipo capacitor de partida, como o mostrado na Figura 24, o torque de partida é obtido pelo uso de um capacitor em série com o enrolamento auxiliar. Este enrolamento é em seguida desconectado quando o motor atinge a velocidade de trabalho (ou algumas vezes antes dela ser atingida) geralmente através de uma chave centrífuga.

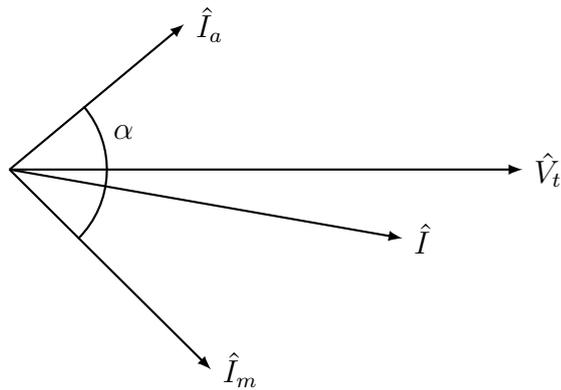
Figura 24 – Motor de indução com capacitor de partida.



Fonte: Adaptado de (TORO, 1994).

Um capacitor possui um valor típico, para uma máquina de 0.5hp, de  $300\mu F$ . Esta configuração aumenta a defasagem entre as correntes como pode-se observar no diagrama vetorial abaixo.

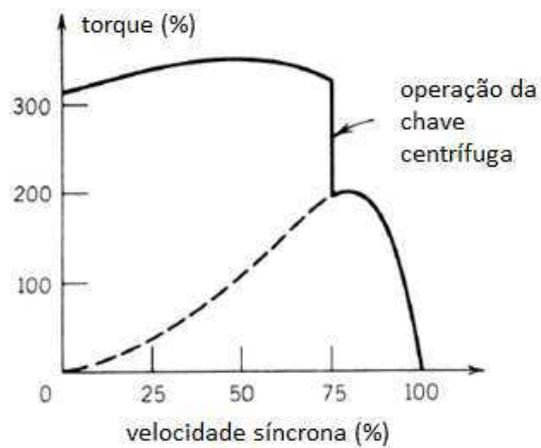
Figura 25 – Diagrama vetorial do motor de indução com capacitor de partida.



Fonte: Adaptado de (SEN, 1997).

Porque o capacitor se conecta ao circuito apenas no momento da partida, pode-se usar um simples do tipo eletrolítico que não adiciona muito o custo. A característica torque velocidade é mostrada na Figura 26. (SEN, 1997).

Figura 26 – Característica torque velocidade do motor de indução com capacitor de partida.

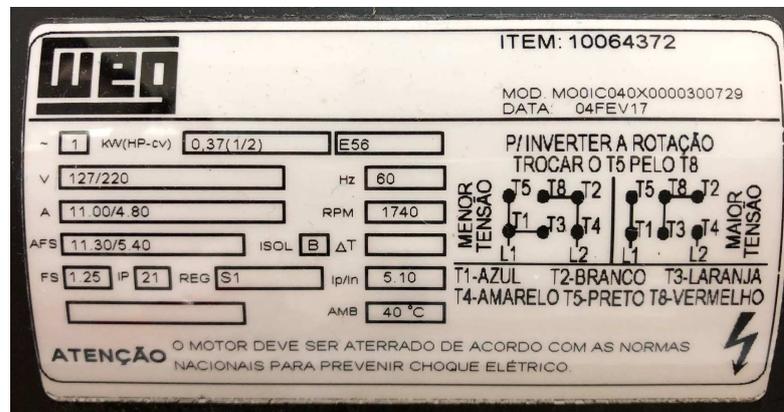


Fonte: Adaptado de (SEN, 1997).

### 3 Construção da Bancada

Para realização deste trabalho, foi adquirido o motor monofásico de partida a capacitor da marca WEG modelo 10064372, já mostrado na Figura 1, onde demais informações acerca de suas características nominais e de projeto podem ser encontradas na sua placa de identificação exposta na Figura 27 a seguir. Por apresentar 6 terminais, sabe-se automaticamente que a máquina pode girar em dois sentidos e operar em dois níveis de tensões diferentes.

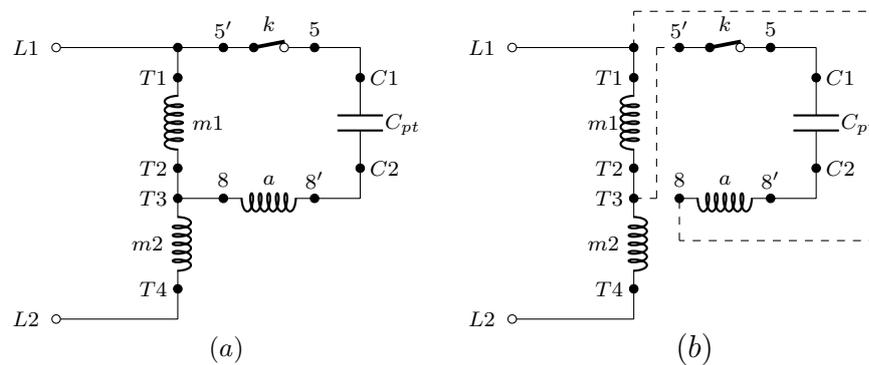
Figura 27 – Placa de identificação do motor utilizado neste trabalho.



Fonte: Própria autoria, 2018.

Com a ajuda do técnico Adalberto da UFCG, foi feita a identificação dos terminais da máquina para que o acesso aos mesmos fossem arranjados de forma a atender às séries de testes realizadas tanto neste trabalho como futuramente pelos estudantes na disciplina de Laboratório de Máquinas Elétricas. Os circuitos elétricos equivalentes para cada sentido de rotação podem ser representados como mostrados na Figura 28.

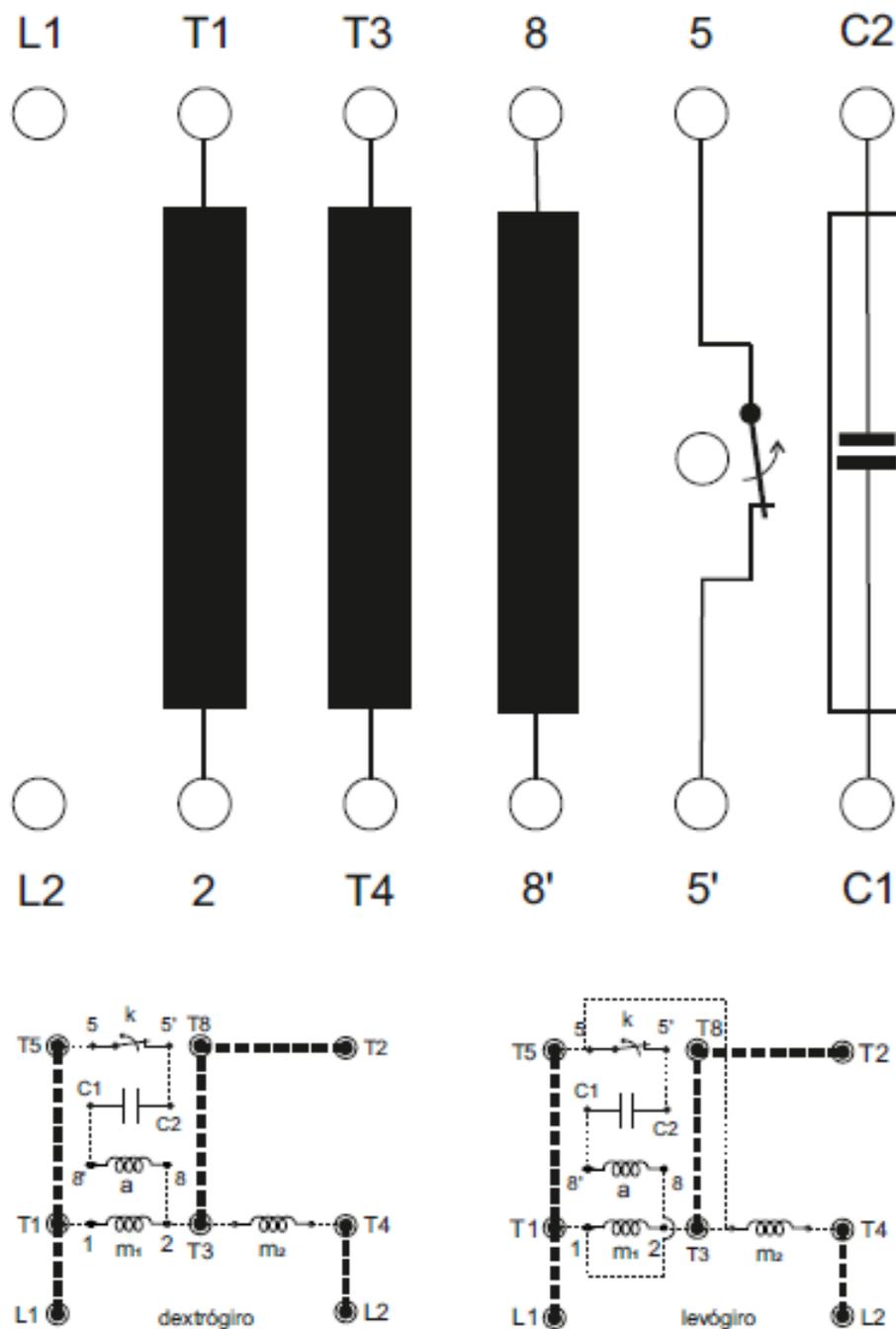
Figura 28 – Ligação do motor monofásico de partida a capacitor. (a) Rotor girando no sentido horário. (b) rotor girando no sentido anti-horário.



Fonte: Própria autoria, 2018.

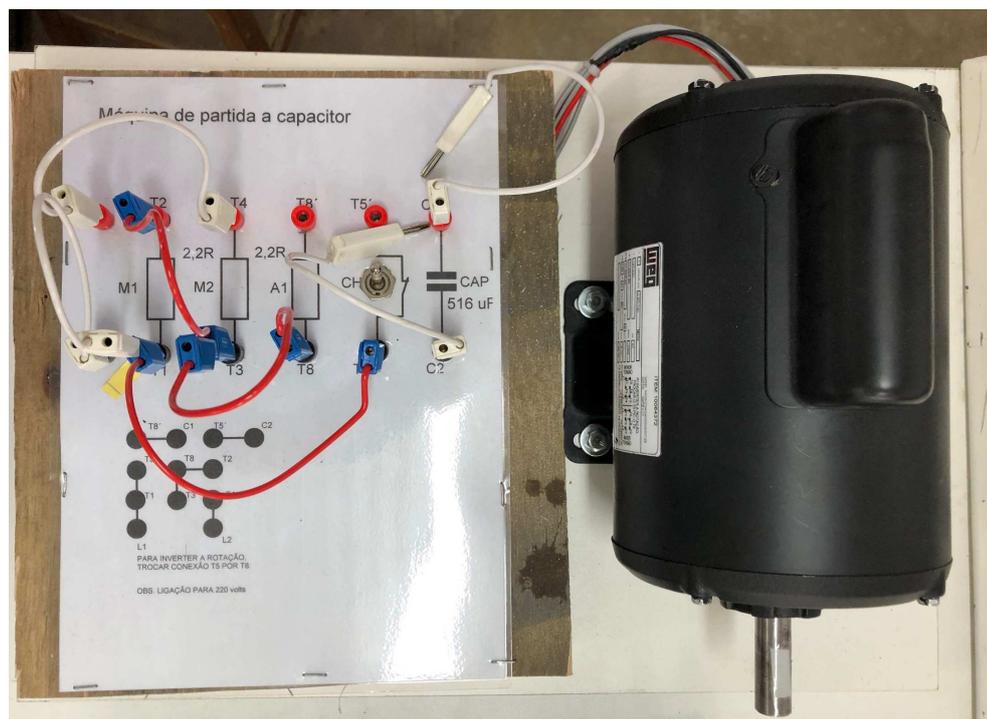
Em seguida foi idealizado um desenho esquemático (Figura 29) feito a partir do software Corel Draw, de forma que os componentes existentes dentro da máquina ficassem visíveis de uma forma bastante didática aos alunos. O desenho será impresso e fixado logo ao lado da máquina como pode ser visto na figura 30.

Figura 29 – Desenho esquemático de acesso aos terminais da bancada.



Fonte: Própria autoria, 2018.

Figura 30 – Protótipo da bancada de experimentos do motor.



Fonte: Própria autoria, 2018.

Figura 31 – Laboratório de Máquinas Elétricas da Universidade Federal de Campina Grande.



Fonte: Yllber Oliveira, 2018.

## 4 Ensaio para modelagem do motor

Testes de rotor bloqueado e a vazio podem ser utilizados para fornecer informação sobre os parâmetros que compõem o circuito equivalente da máquina de indução monofásica. (TORO, 1994).

Os dados do teste de rotor bloqueado são usados para mostrar informações a respeito das reatâncias de dispersão e da resistência do enrolamento do rotor referida ao estator. A determinação destes parâmetros é aproximada porque o procedimento associado envolve hipóteses simplificadoras. (TORO, 1994).

### 4.1 Resistência dos enrolamentos do estator

#### 4.1.1 Medição de resistência a frio e a quente - Enrolamento principal

A partir da aplicação de tensão contínua nos terminais do enrolamento e com o auxílio de um amperímetro, pode-se estimar o valor da resistência deste enrolamento seguindo a Lei de Ohm. O valor considerado deve ser referenciada à temperatura de  $75^{\circ}\text{C}$ , utilizando as expressões de recorrência 4.1 e 4.2 ora medindo a resistência da máquina a frio, ora medindo-a a quente.

$$T_2 = T_1 + \frac{R_Q - R_F}{R_F} (234.5 + T_1) \quad (4.1)$$

$$r_1 = R_Q + R_Q \frac{75 - T_2}{234.5 + T_2} \quad (4.2)$$

onde

$T_1$ : Temperatura ambiente (considerada igual a  $25^{\circ}$ );

$T_2$ : 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).

### 4.1.2 Medição direta para o enrolamento auxiliar

Como o enrolamento auxiliar não chega a esquentar com o motor a trabalho, pois o mesmo serve apenas para dar partida à máquina, sua impedância pode ser estimada sem a necessidade de referenciá-la a uma temperatura normal de trabalho. Portanto, aplica-se o mesmo método para calcular as resistências do enrolamento principal apenas a frio, ou seja, à temperatura ambiente.

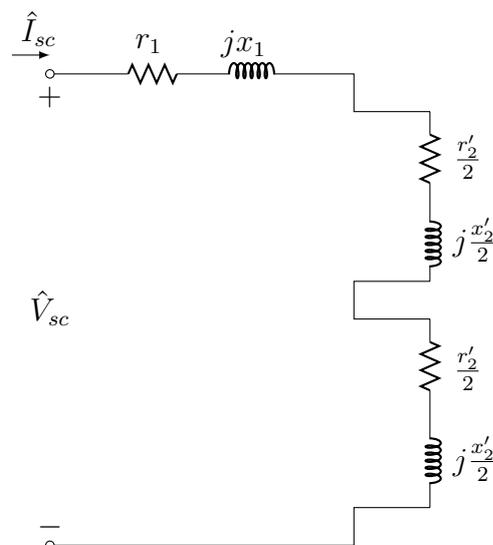
Para calcular também a reatância do enrolamento auxiliar, remove-se a ponte retificadora, aplica-se uma tensão ac em seus terminais, 8 e 8' como pode ser visto na Figura 29, e com a ajuda de um amperímetro tem-se a impedância total  $Z_{1a}$  do enrolamento. Sua reatância será

$$x_{1a} = \sqrt{Z_{1a}^2 - r_{1a}^2} \quad (4.3)$$

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

De acordo com o circuito equivalente da Figura 18, a primeira hipótese a considerar é que, para  $s = 1$ , ou seja, com o rotor da máquina em estado estacionário, a impedância  $x_\phi/2$  seja bem maior que  $r'_2/2 + jx'_2/2$ , podendo a última ser eliminada. O circuito equivalente então reduziria-se à forma representada na Figura 32.

Figura 32 – Circuito equivalente de um motor de indução monofásico em teste com rotor bloqueado.



Fonte: Adaptado de (TORO, 1994).

Designados os valores medidos de tensão, corrente e potência, obtidos no teste de rotor bloqueado, como  $V_{sc}$ ,  $I_{sc}$  e  $P_{sc}$ , respectivamente, segue-se então que a impedância equivalente referida à bobina do estator é

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

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

Para calcular  $r'_2$ , subtrai-se o valor da resistência equivalente  $R_e$  estimada do valor encontrado da resistência do enrolamento  $r_1$  nos outros ensaios.

$$r'_2 = R_e - r_1$$

O valor da reatância de dispersão equivalente é obtido por

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

Nota-se que

$$X_e = x_1 + x'_2$$

e considerando que

$$x_1 = x'_2$$

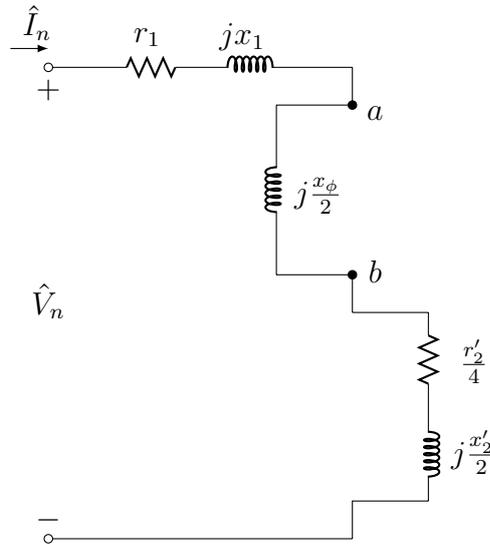
a reatância de dispersão do enrolamento do estator e a reatância de dispersão do rotor referida ao estator é, respectivamente,

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

### 4.3 Reatância de magnetização $x_\phi$ - Ensaio com o motor a vazio

O único parâmetro do circuito equivalente que falta calcular é a reatância de magnetização  $x_\phi$ . Seu valor pode ser determinado pelos dados de ensaio em vazio e pelo conhecimento de  $x_1$ ,  $x'_2$  e  $r'_2$ . O procedimento pode ser visto referindo-se ao circuito equivalente da Figura 33, onde considera-se o escorregamento  $s$  com um valor muito próximo a zero e a impedância  $r_2/4 + jx_2/2$  sendo muitas vezes menor que  $jx_\phi/2$ . (TORO, 1994).

Figura 33 – Circuito equivalente de um motor de indução monofásico em vazio.



Fonte: Adaptado de (TORO, 1994).

Designada as leituras dos instrumentos para tensão, corrente e potência no teste em vazio, o cálculo de  $x_\phi$  requer fundamentalmente o conhecimento da tensão entre a e b na Figura 33. (TORO, 1994).

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

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

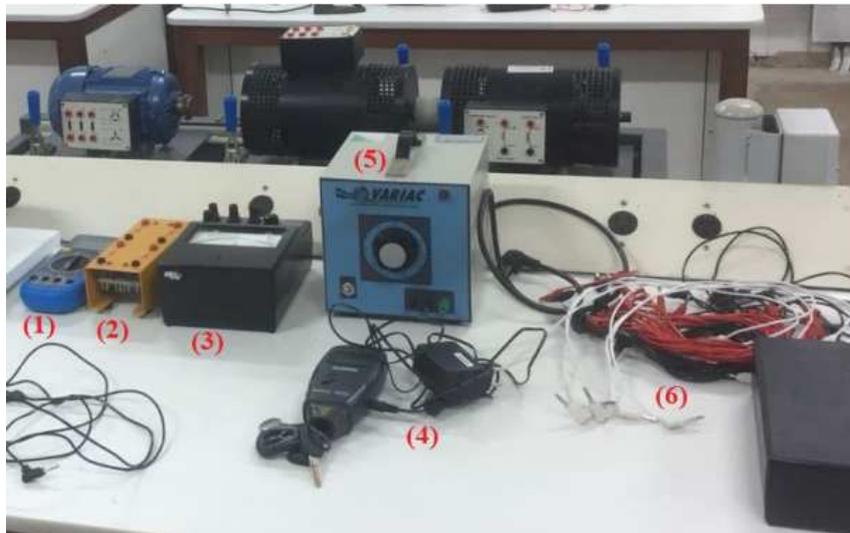
$$\frac{x_\phi}{2} = \frac{V_{ab}}{I_n}$$

## 5 Resultados Experimentais

### 5.1 Instrumentação utilizada

Para os ensaios fez-se necessário a utilização de dois multímetros digitais, um na forma de voltímetro e outro como amperímetro (1); um retificador monofásico para retificar a tensão ac, possibilitando a medição da resistência a quente e a frio (2); wattímetro utilizado pra medição de potência (3); tacômetro para ler as rotações do eixo do motor (4); Variac para regular a tensão em nível desejado (5) e cabos para realizar as conexões (6).

Figura 34 – Instrumentação utilizada.



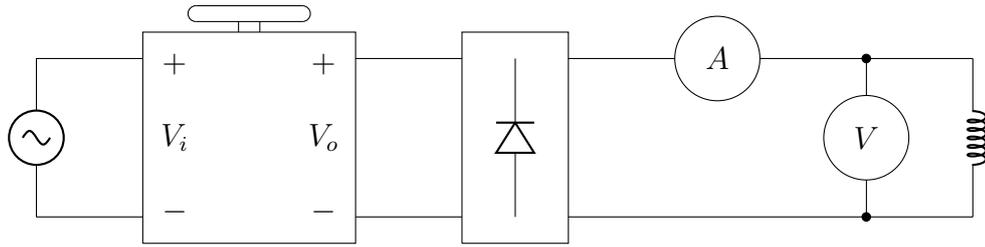
Fonte: Própria autoria, 2018.

### 5.2 Resistência dos enrolamentos do estator

#### 5.2.1 Valor de $r_{1m}$

O experimento foi realizado supondo uma temperatura ambiente de 25°C, em que utilizando uma ponte retificadora monofásica, aplicou-se diferentes tensões no enrolamento principal da máquina, obtendo assim respectivas correntes DC. Fazendo a razão  $V/I$ , calcula-se a resistência.

Figura 35 – 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.

$V(V)$	$I(A)$
2.2	0.48
3.93	0.9
7	1.62
10.26	2.36

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

$V(V)$	$I(A)$
2.55	0.55
4.23	0.91
7.26	1.56
10.26	2.19

As resistências são estimadas a partir da média aritmética das diferentes leituras.

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

$R_F(\Omega)$	$R_Q(\Omega)$
4.45	4.66

Segundo as Equações 4.1 e 4.2

$$T_2 = 25 + \frac{4.66 - 4.45}{4.45} (234.5 + 25) = 37.01^\circ C$$

$$r_{1m} = 4.66 + 4.66 \frac{75 - 37.01}{234.5 + 37.01} = 5.31\Omega$$

### 5.2.2 Valor de $r_{1a}$ e $x_{1a}$

Realizando procedimento similar para o enrolamento principal, aplica-se aqui diferentes tensões no enrolamento auxiliar da máquina, terminais 8 e 8' como pode ser visto na Figura 29.

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

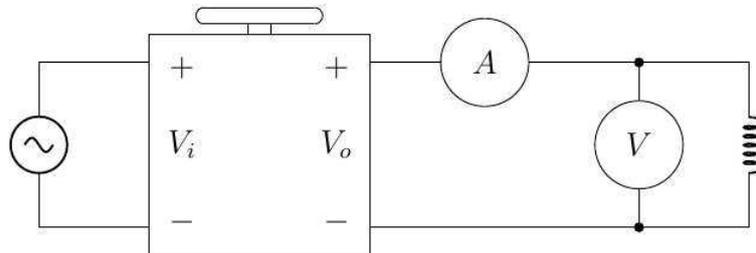
$V(V)$	$I(A)$
1.47	0.58
2.17	0.87
4.4	1.76
6.6	2.63

Fazendo a média aritmética, tem-se

$$r_{1a} = 2.51\Omega$$

Retirando a ponte retificadora monofásica, aplicou-se novamente diferentes tensões, anotando suas respectivas correntes e fazendo a razão  $V/I$ , tendo a impedância.

Figura 36 – Montagem para medição da impedância do enrolamento auxiliar.



Fonte: Própria autoria, 2018.

Tabela 5 – Tensão e corrente para cálculo de resistência do enrolamento auxiliar.

$V(V)$	$I(A)$
6.92	0.47
10.52	1.06
14.1	1.9
17.9	2.86

Fazendo a média aritmética, tem-se

$$Z_{1a} = 9.57\Omega$$

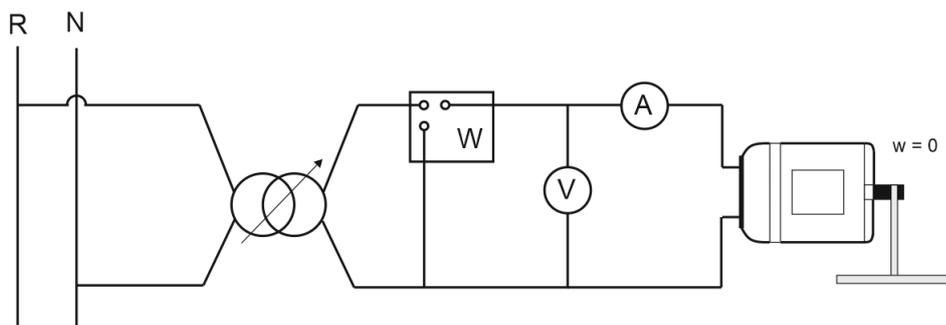
Logo, a reatância será

$$x_{1a} = \sqrt{9.57^2 - 2.51^2} = 9.24\Omega$$

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

Com motor tendo o seu eixo bloqueado, aplica-se paulatinamente uma tensão em seus terminais até que a corrente atinja o seu valor nominal, 4.8A. Anota-se a tensão, corrente e potência medidas, valores que se encontram na Tabela 6 para o motor em questão.

Figura 37 – Ensaio com o rotor bloqueado.



Fonte: Própria autoria, 2018.

Tabela 6 – Dados do ensaio de motor com o rotor bloqueado.

$I_n$ (A)	$V_t$ (V)	P(w)
4.8	66	190

#### 5.3.1 Valor de $r'_2$

$$R_e = \frac{190}{4.8^2} = 8.25\Omega$$

$$r'_2 = R_e - r_{1m} = 2.94\Omega$$

#### 5.3.2 Valor de $x_{1m} = x'_2$

$$Z_e = \frac{66}{4.8} = 13.75\Omega$$

$$X_e = \sqrt{Z_e^2 - R_e^2} = 11\Omega$$

$$x_1 = x_2' = 5.5\Phi$$

### 5.3.3 Valor de $x_C$

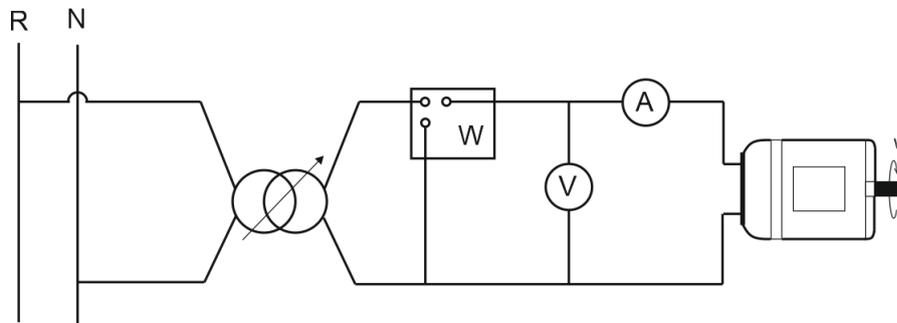
O capacitor acoplado à máquina em série com o enrolamento auxiliar tem um valor de  $516\mu F$ . Portanto sua reatância  $x_C$  é

$$x_C = -\frac{1}{\omega C} = -\frac{1}{2\pi f \cdot C} = -51.41\Omega$$

## 5.4 Reatância de magnetização $x_\phi$ - Ensaio com o motor a vazio

Após o ensaio do rotor bloqueado, fora feito o de motor a vazio. O motor tendo seu eixo sem nenhuma carga acoplada foi submetido a tensão nominal na rede de 220V 60Hz. Em seguida, foi medido potência, rotação e corrente e anotado os valores na Tabela 7.

Figura 38 – Ensaio com o motor a vazio.



Fonte: Própria autoria, 2018.

Tabela 7 – Dados do ensaio de motor a vazio.

$V_t$ (V)	$P$ (W)	$n$ (rpm)	$I_a$ (A)
220	180	1793	3.9

$$\cos(\theta) = \frac{180}{220 \cdot 3.9} = 0.2098$$

$$\theta = \cos^{-1} 0.2098 = 77.58^\circ$$

$$V_{ab} = 220 - 3.9 \angle 77.58^\circ \left[ 5.31 + \frac{2.94}{4} + j \left( 5.5 + \frac{5.5}{2} \right) \right] = 210.59 \angle 10.33V$$

$$x_\phi = \frac{2 \cdot 210.59}{3.9} = 107.99\Omega$$

## 5.5 Parâmetros

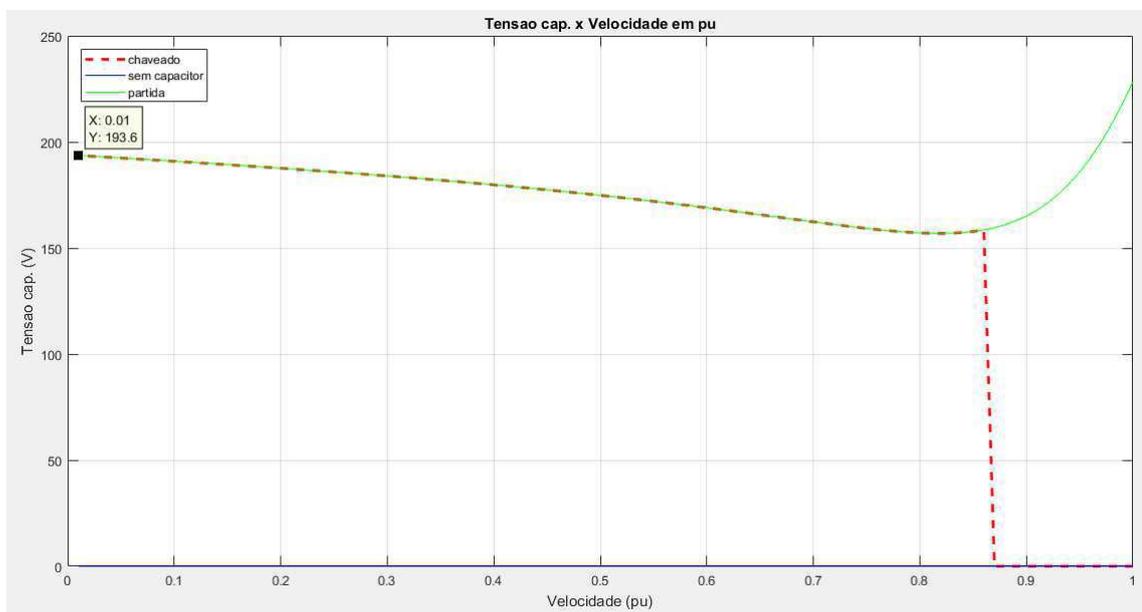
Após realizado todos os testes, tem-se todos os parâmetros suficientes para representar o motor a partir dos circuitos equivalentes

Tabela 8 – Parâmetros do motor monofásico estudado.

$r_{1m}(\Omega)$	$r_{1a}(\Omega)$	$x_{1m}(\Omega)$	$x_{1a}(\Omega)$	$r'_2(\Omega)$	$x'_2(\Omega)$	$x_\phi(\Omega)$	$x_C(\Omega)$
5.31	2.51	5.50	9.24	2.94	5.50	107.99	-51.41

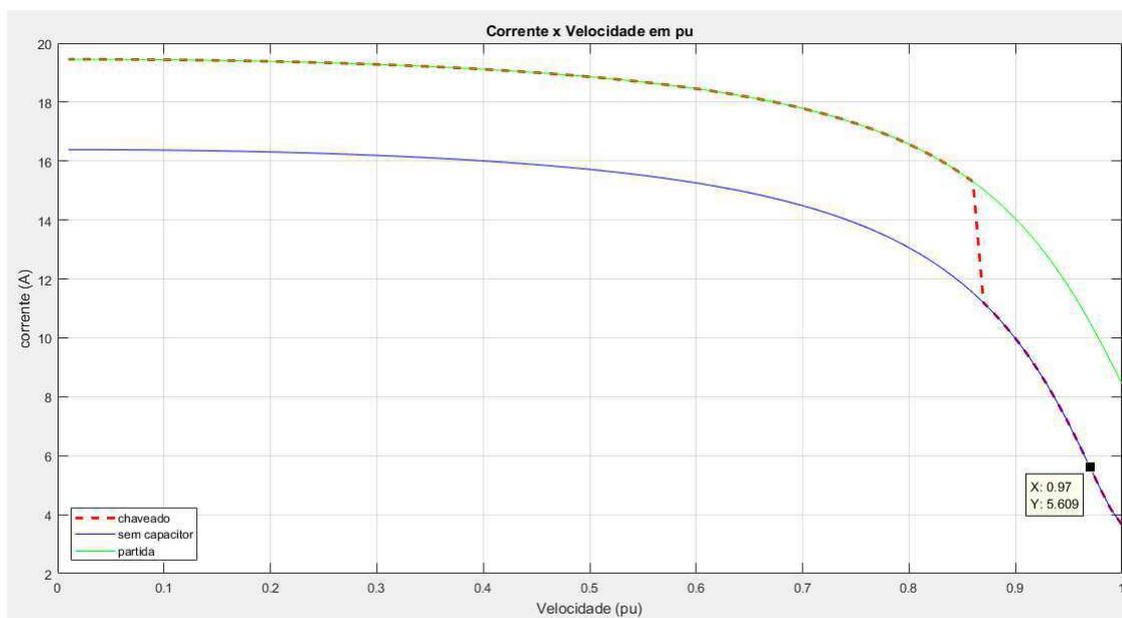
## 5.6 Simulação em Matlab com os parâmetros da máquina

Figura 39 – Tensão nos capacitores x Velocidade em pu.



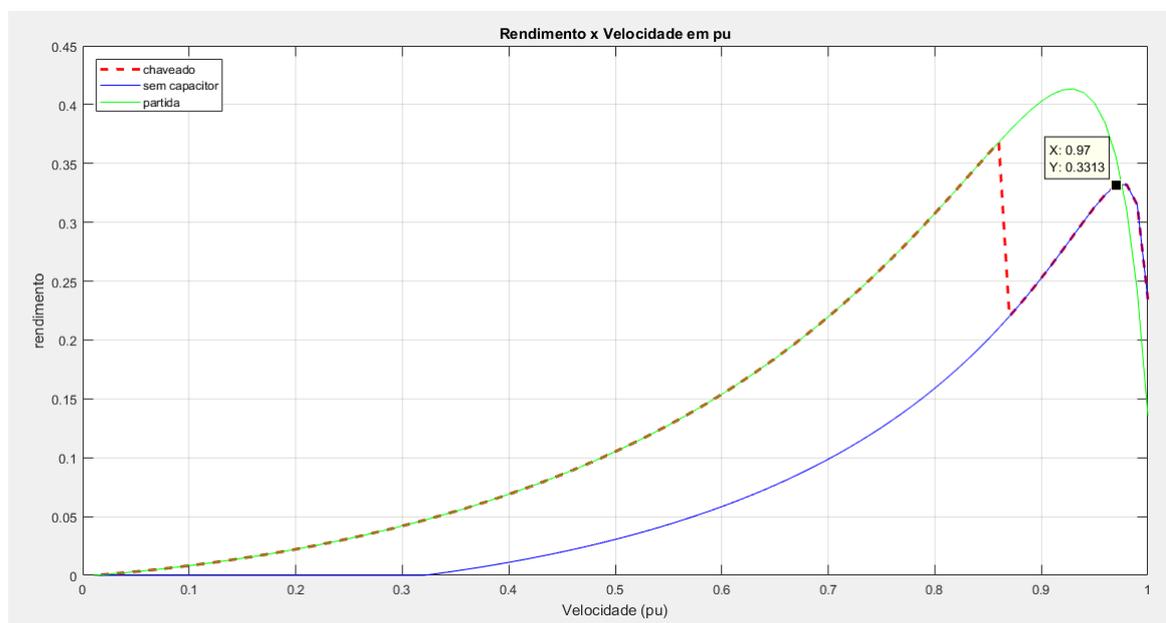
$$V_{C_{max}} = 193.6V$$

Figura 40 – Corrente de entrada x Velocidade em pu.



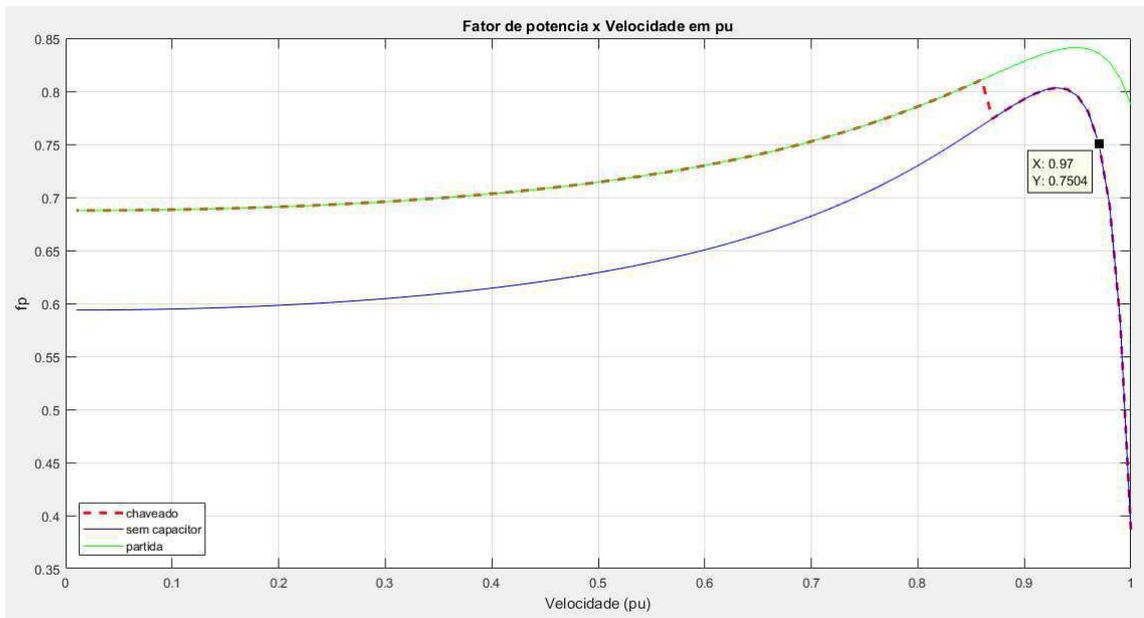
$$I_{part} = 19.45A \quad I_{pc} = 5.609A$$

Figura 41 – Rendimento x Velocidade em pu.



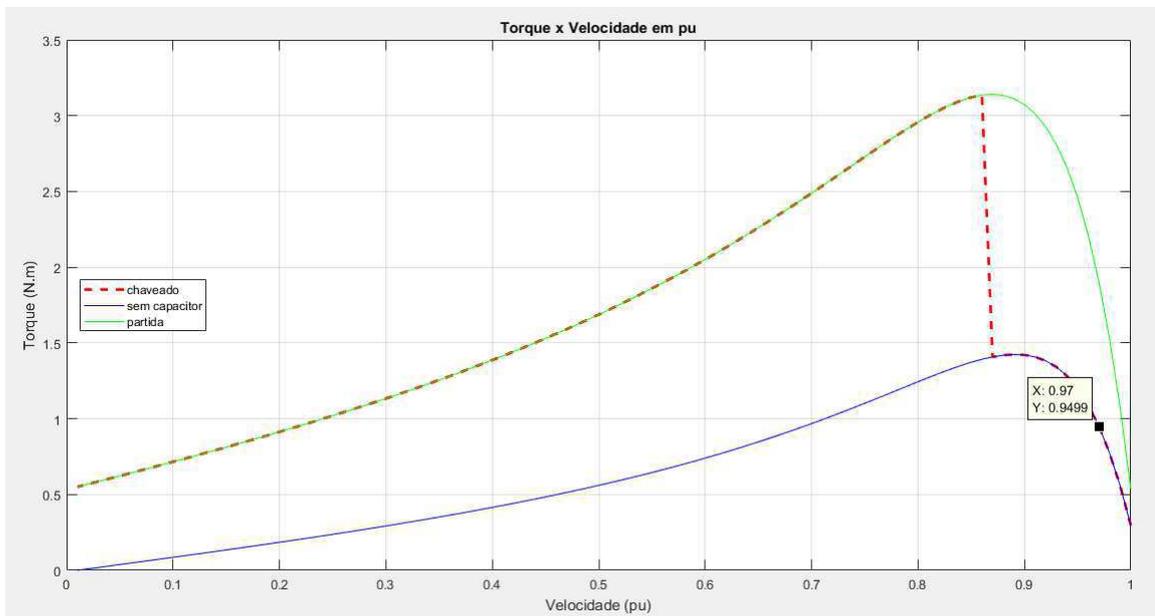
$$\eta = 33.13\%$$

Figura 42 – Fator de Potência x Velocidade em pu.



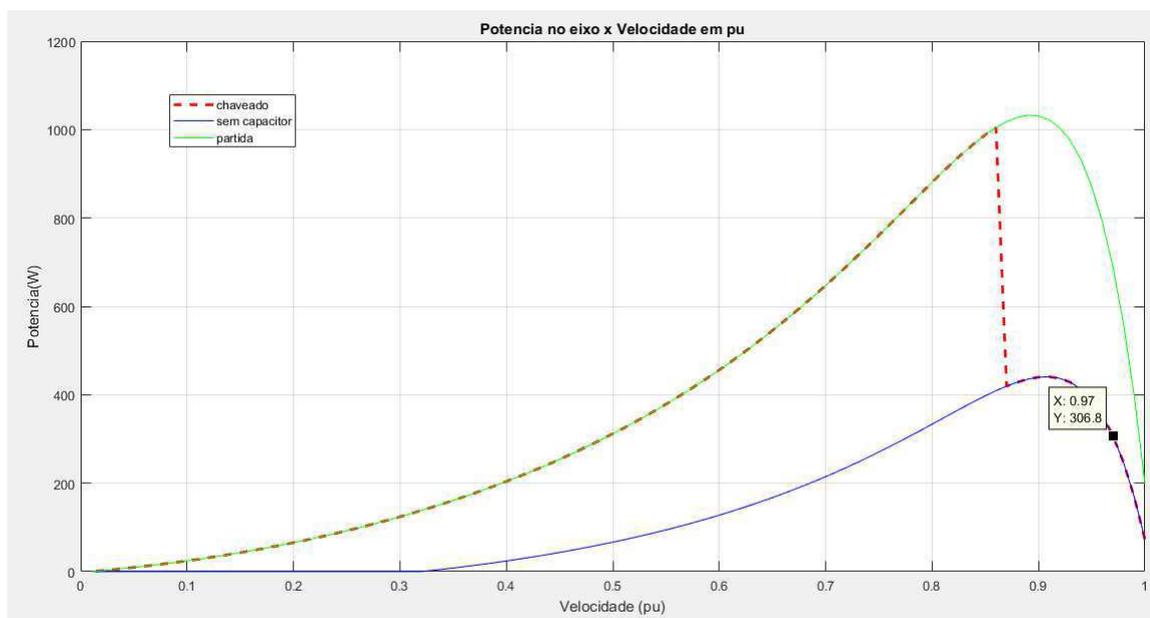
$$fp = 0.7504$$

Figura 43 – Torque x Velocidade em pu.



$$\tau_{part} = 0.5501N \cdot m \quad \tau_{pc} = 0.9499N \cdot m \quad \tau_{max} = 3.135N \cdot m$$

Figura 44 – Potência no eixo x Velocidade em pu.



$$P_o = 306.8W$$

## 5.7 Validação dos resultados

Após concluída as simulações, pode-se comparar os dados obtidos com os disponíveis no catálogo do modelo do motor utilizado neste trabalho oferecido no site de compra da empresa fornecedora, Figura 45.

Figura 45 – Folha de dados do modelo do motor em estudo oferecido pelo fabricante.

<b>FOLHA DE DADOS</b>				
Motor Monofásico de Indução - Rotor de Gaiola				
<b>MOTOR 0,5CV 4 POLOS 127V / 220V CARÇAÇA E56 IP-21</b>				
Linha do produto		: Motor Monofásico Nema 48 e 56 IP21 - PEAL		Código do produto : 10064372
Carçaça	: E56	Tempo de rotor bloqueado	: 6 s (quente)	
Potência	: 0,37 kW (0,5 HP-cv)	Regime de serviço	: S1	
Número de polos	: 4	Temperatura ambiente	: -20 °C a +40 °C	
Frequência	: 60 Hz	Altitude	: 1000 m	
Tensão nominal	: 127/220 V	Grau de proteção	: IP21	
Corrente nominal	: 11,0/4,80 A	Método de refrigeração	: IC01 - ODP	
Corrente de partida	: 56,1/24,5 A	Forma construtiva	: B3D	
Ip/In (p.u.)	: 5,1	Sentido de rotação <sup>1</sup>	: Ambos	
Corrente a vazio	: 10,3/4,00 A	Nível de ruído <sup>2</sup>	: -	
Rotação nominal	: 1740 rpm	Método de partida	: Partida direta	
Escorregamento	: 3,33 %	Peso <sup>3</sup>	: 11,4 kg	
Conjugado nominal	: 0,207 kgfm			
Conjugado de partida	: 300 %			
Conjugado mínimo	: 255 %			
Conjugado máximo	: 260 %			
Classe do isolamento	: B			
Fator de serviço	: 1,25	Tipo de carga acionada		
Momento de inércia (J)	: 0,0000 kgm <sup>2</sup>	: -		
Potência	50%	75%	100%	Conjugado da carga
Rendimento (%)	44,0	52,5	56,5	: 0,207 kgfm
Fator de potência	0,46	0,55	0,62	Inércia da carga (J=GD <sup>2</sup> /4)
				: 0 kgm <sup>2</sup>
				Esforços na fundação
Tipo de mancal	Dianteiro	Traseiro	Tração máxima	
	6203-ZZ	6202-ZZ	: -	
Intervalo de lubrificação	-	-	Compressão máxima	
Quantidade de lubrificante	-	-	: -	
Tipo de lubrificante	MOBIL POLYREX EM			

## 6 Conclusão

Neste trabalho foi estudado o motor assíncrono de partida a capacitor, fazendo primeiramente um estudo da teoria a cerca dos princípios fundamentais comuns a todos os tipos de motores monofásicos. Tornou-se possível, desta maneira, representá-los por um circuito equivalente contendo todos os parâmetros requeridos para uma caracterização fiel e análise do desempenho da máquina.

Tendo o conhecimento dos elementos internos principais que constituem a máquina em questão, o esquema de ligação desenvolvido e construído por meio de uma bancada anexada adjacente ao motor pôde oferecer acesso aos terminais de todos os componentes do motor com bastante flexibilidade para a realização de diferentes tipos de ensaios.

Os ensaios realizados, e teoricamente explicados, propiciaram, conforme a teoria, o levantamento dos principais dados do motor, estes que são comumente verificados pelo consumidor na hora de sua compra para destiná-los à sua correta aplicação, seja ela doméstica ou industrial.

Tendo concluído, assim, o estudo teórico, a construção das bancadas e a validação dos testes realizados, verifica-se a viabilidade da implementação e disponibilização das bancadas existentes para a realização de experimentos na disciplina Laboratório de Máquinas Elétricas ofertada pelo Departamento de Engenharia Elétrica e Informática da Universidade de Campina Grande.

Para trabalhos futuros, sugere-se o estudo e a realização de testes das máquinas monofásicas assíncronas em seu regime transitório, assim como a utilização de simuladores de carga para uma melhor validação prática dos resultados. O desenvolvimento de métodos e algoritmos mais refinados para a estimação dos parâmetros nominais poderiam contribuir também consideravelmente a com redução de erros obtidos na prática.

# Referências

CHAPMAN, S. J. *Electric machinery fundamentals*. [S.l.]: McGraw-Hill, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 40.

FITZGERALD, A. E. *Electric machinery*. [S.l.]: McGraw-Hill, 1961. Citado 7 vezes nas páginas 23, 24, 35, 36, 37, 38 e 39.

MARQUES, G. *Máquinas de indução monofásicas*. [S.l.]: Ulisboa, 2005. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 22.

SEN, P. C. *Principle of electric machines and power electronics*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 1997. Citado 8 vezes nas páginas 22, 24, 25, 26, 27, 28, 34 e 43.

TORO, V. D. *Electric machines and power systems*. [S.l.]: Prentice-Hall, 1994. Citado 17 vezes nas páginas 23, 24, 26, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 39, 42, 48, 49, 50, 51 e 53.

# Apêndices

# APÊNDICE A – Algoritmos desenvolvidos no Matlab

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% TORQUE, CORRENTE E POTENCIA %%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% DA MAQUINA MONOFASICA COM PARTIDA A CAPACITOR %%%%%%%%%%
```

```
clc
clear
```

```
q=2;
f=60;
V=220;           %t ensao de fase
s=0.01:0.01:1;  %escorregamento
ns=120*f/q;      %velocidade s°ncrona
ws=ns*2*pi/f;
n=(1-s)*ns;      %velocidade mecânica
```

```
%parametros descobertos pelo teste a vazio e rotor bloqueado
```

```
r1m = 5.31;
x1m = 5.5;
r1a = 2.51;
x1a = 9.24;
r2 = 2.94;
x2 = 5.5;
C = 51.6*10^-6
xphi = 107.99;
%rela'ção de espiras do enrolamento principal com o secundário
a = 1;
```

```
%impedancia do capacitor de partida
```

```
rcp = 0;
xcp = -1/(2*pi*f*C);
zcp = rcp+i*xcp;
```

```
vmf = (V/2)*(1-i/a);
vmb = (V/2)*(1+i/a);
```

```
%impedancia dos enrolamentos principal e auxiliar
```

```
z1m = r1m+i*x1m;
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% resultado chaveado %%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% sem capacitor de partida %%%%%%%%%%
```

```
n=1;
```

```
while s(n) < 0.15
```

```
    %Eua'pes da Figura 15
```

```
    zf(n) = 0.5*i*xphi*(i*x2+(r2/s(n)))/(r2/s(n)+i*(xphi+x2));
```

```
    zb(n) = 0.5*i*xphi*(i*x2+(r2/(2-s(n)))/(r2/(2-s(n))+i*(xphi+x2));
```

```
    I(n) = V/(z1m+zf(n)+zb(n));
```

```
    fp(n) = cos(angle(I(n)));           %Potar
```

```
    Vc(n) = 0;                          %Potar
```

```
%Eq 2.23 e 2.24
```

```
Pgf(n) = 0.5*(abs(I(n)))^2*real(zf(n));
```

```
Pgb(n) = 0.5*(abs(I(n)))^2*real(zb(n));
```

```

Prot(n) = 37;

Pnec(n) = (Pgfn - Pgbn) * (1 - sn);
Tnec(n) = (Pgfn - Pgbn) / ws;           %Plotar
Pent(n) = V * abs(I(n)) * fp(n);
Pout(n) = Pnec(n) - Prot(n);           %Plotar
if Pout(n) < 0
    Pout(n) = 0;
end
if Tnec(n) < 0
    Tnec(n) = 0;
end
N(n) = Pout(n) / Pent(n);              %Plotar
n = n + 1;
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

for n=n:1:length(s)
    %Impedancia do enrolamento auxiliar com capacitor
    z1a = r1a + i * (x1a + zcp);

    %Eq 2.17 e 2.18
    zo = (1/2) * (z1a / (a^2) + z1m);
    zd = (1/2) * (z1a / (a^2) - z1m);

    %Equaes da Figura 19
    zf(n) = i * xphi * (i * x2 + (r2 / sn)) / (r2 / sn + i * (xphi + x2));
    zb(n) = i * xphi * (i * x2 + (r2 / (2 - sn))) / (r2 / (2 - sn) + i * (xphi + x2));

    %Eq 2.21 e 2.22
    Inf(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);

    %Eq 2.5 e 2.6
    Im(n) = Inf(n) + Imb(n);
    Ia(n) = i * Inf(n) / a - i * Imb(n) / a;
    I(n) = Im(n) + Ia(n);               %Plotar valor absoluto

    fp(n) = cos(angle(I(n)));          %Plotar
    Vc(n) = Ia(n) * zcp;               %Plotar valor absoluto

    %Eq 2.23 e 2.24
    Pgf(n) = 2 * (abs(Inf(n)))^2 * real(zf(n));
    Pgb(n) = 2 * (abs(Imb(n)))^2 * real(zb(n));

    Prot(n) = 37;

    Pnec(n) = (Pgfn - Pgbn) * (1 - sn);
    Tnec(n) = (Pgfn - Pgbn) / ws;      %Plotar
    if Tnec(n) < 0
        Tnec(n) = 0;
    end
    Pent(n) = V * abs(I(n)) * fp(n);

```

```

Pout(n) = Pmec(n);           %Plotar
if Pout(n) < 0
    Pout(n) = 0;
end
N(n) = Pout(n)/Pent(n);     %Plotar
if N(n) < 0
    N(n) = 0;
end
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% resultado isolado %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% sem capacitor de partida %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

for n=1:1:length(s)
    %Eques da Figura 15
    zfs(n)=0.5*i*xphi*(i*x2+(r2/s(n)))/(r2/s(n)+i*(xphi+x2));
    zbs(n)=0.5*i*xphi*(i*x2+(r2/(2-s(n)))/(r2/(2-s(n))+i*(xphi+x2));

    Im(n) = V/(z1m+zfs(n)+zbs(n));

    fps(n) = cos(angle(Im(n)));           %Plotar
    Vcs(n) = 0;                          %Plotar

    %Eq 2.23 e 2.24
    Pgfs(n) = 0.5*(abs(Im(n))^2*real(zfs(n)));
    Pgbs(n) = 0.5*(abs(Im(n))^2*real(zbs(n)));

    Prot(n) = 37;

    Pmecs(n) = (Pgfs(n)-Pgbs(n))*(1-s(n));
    Tmecs(n) = (Pgfs(n)-Pgbs(n))/ws;     %Plotar
    Pents(n) = V*abs(Im(n))*fps(n);
    Pouts(n) = Pmecs(n)-Prot(n);        %Plotar
    if Pouts(n) < 0
        Pouts(n) = 0;
    end
    if Tmecs(n) < 0
        Tmecs(n) = 0;
    end
    Ns(n) = Pouts(n)/Pents(n);          %Plotar
    n = n + 1;
end

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% resultado isolado %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% com capacitor de partida %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

for n=1:1:length(s)
    %Impedancia do enrolamento auxiliar com capacitor
    z1ap = r1a+i*(x1a+zcp);

    %Eq 2.17 e 2.18
    zop = (1/2)*(z1ap/(a^2)+z1m);
    zdp = (1/2)*(z1ap/(a^2)-z1m);

    %Eques da Figura 19

```

```
zfp(n)=i*xphi*(i*x2+(r2/s(n)))/(r2/s(n)+i*(xphi+x2));
zbp(n)=i*xphi*(i*x2+(r2/(2-s(n))))/(r2/(2-s(n))+i*(xphi+x2));
```

%Eq 2.21 e 2.22

```
Irfp(n) = (vmf*(zop+zbp(n))+vmb*zdp)/((zop+zfp(n))*(zop+zbp(n))-zdp^2);
Irbp(n) = (vmb*(zop+zfp(n))+vmf*zdp)/((zop+zfp(n))*(zop+zbp(n))-zdp^2);
```

%Eq 2.5 e 2.6

```
Imp(n) = Irfp(n)+Irbp(n);
Iap(n) = i*Irfp(n)/a - i*Irbp(n)/a;
Ip(n) = Imp(n)+Iap(n); %Plotar valor absoluto
```

```
fpp(n) = cos(angl e(Ip(n))); %Plotar
Vcp(n) = Iap(n)*zcp; %Plotar valor absoluto
```

%Eq 2.23 e 2.24

```
Pgfp(n) = 2*(abs(Irfp(n)))^2*real(zfp(n));
Pgbp(n) = 2*(abs(Irbp(n)))^2*real(zbp(n));
```

```
Prot(n) = 37;
```

```
Precp(n) = (Pgfp(n)-Pgbp(n))*(1-s(n));
Trecp(n) = (Pgfp(n)-Pgbp(n))/ws; %Plotar
if Trecp(n) < 0
    Trecp(n) = 0;
```

```
end
Pentp(n) = V*abs(Ip(n))*fpp(n);
Poutp(n) = Precp(n); %Plotar
if Poutp(n) < 0
    Poutp(n) = 0;
```

```
end
Np(n) = Poutp(n)/Pentp(n); %Plotar
if Np(n) < 0
    Np(n) = 0;
```

end

end

%%  
 %%% FIGURAS %%%  
 %%%

```
h=1.01-s;
```

```
figure(1)
plot(h, Pout, '- -', 'color', 'red', 'LineWidth', 2);
title('Potencia no eixo x Velocidade em pu');
xlabel('Velocidade (pu)');
ylabel('Potencia(W)');
hold on
plot(h, Pouts, 'color', 'blue');
hold on
plot(h, Poutp, 'color', 'green');
legend('chaveado', 'sem capacitores', 'partida', 'location', 'northwest');
grid on
```

```
figure(2)
```

```
plot(h, Trec, '--', 'color', 'red', 'LineW dt h', 2);
title('Torque x Velocidade em pu');
xlabel('Velocidade (pu)');
ylabel('Torque (N.m)');
hold on
plot(h, Trecs, 'color', 'blue');
hold on
plot(h, Trecp, 'color', 'green');
legend('chaveado', 'sem capacidade', 'partida', 'localizacao', 'west');
grid on
```

```
figure(3)
plot(h, fp, '--', 'color', 'red', 'LineW dt h', 2);
title('Factor de potencia x Velocidade em pu');
xlabel('Velocidade (pu)');
ylabel('fp');
hold on
plot(h, fps, 'color', 'blue');
hold on
plot(h, fpp, 'color', 'green');
legend('chaveado', 'sem capacidade', 'partida', 'localizacao', 'southwest');
grid on
```

```
figure(4)
plot(h, N, '--', 'color', 'red', 'LineW dt h', 2);
title('Rendimento x Velocidade em pu');
xlabel('Velocidade (pu)');
ylabel('rendimento');
hold on
plot(h, Ns, 'color', 'blue');
hold on
plot(h, Np, 'color', 'green');
legend('chaveado', 'sem capacidade', 'partida', 'localizacao', 'northwest');
grid on
```

```
figure(5)
plot(h, abs(I), '--', 'color', 'red', 'LineW dt h', 2);
title('Corrente x Velocidade em pu');
xlabel('Velocidade (pu)');
ylabel('corrente (A)');
hold on
plot(h, abs(Ims), 'color', 'blue');
hold on
plot(h, abs(Ip), 'color', 'green');
legend('chaveado', 'sem capacidade', 'partida', 'localizacao', 'southwest');
grid on
```

```
figure(6)
plot(h, abs(Vc), '--', 'color', 'red', 'LineW dt h', 2);
title('Tensao cap. x Velocidade em pu');
xlabel('Velocidade (pu)');
ylabel('Tensao cap. (V)');
hold on
plot(h, abs(Vcs), 'color', 'blue');
hold on
```

```
plot(h, abs(Vcp), 'color', 'green');  
legend('chaveado', 'sem capacitor', 'partida', 'location', 'northwest');  
grid on
```

## APÊNDICE B – Guia de experimentos

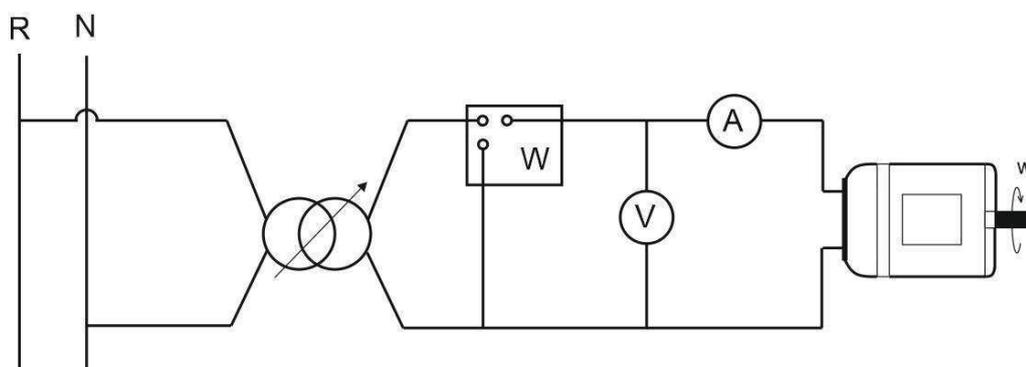


UFCG - Universidade Federal de Campina Grande  
 Centro de Engenharia Elétrica e Informática  
 Departamento de Engenharia Elétrica  
 Laboratório de Máquinas Elétricas

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)									
$\Omega$ (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)	$(0,75) I_{nom}$	$I_{nom}$	$(0,75) I_{nom}$