Universidade Federal do Rio de Janeiro
Escola Politécnica

LEVANTAMENTO DAS CURVAS TORQUE X VELOCIDADE DE UM MOTOR DE INDUÇÃO DAHLANDER COM ACESSO A TODOS OS TERMINAIS

Guilherme Gomes Barquette

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Richard Magdalena Stephan

Rio de Janeiro
Março de 2021

LEVANTAMENTO DAS CURVAS TORQUE X VELOCIDADE DE UM MOTOR DE INDUÇÃO DAHLANDER COM ACESSO A TODOS OS TERMINAIS

Guilherme Gomes Barquette

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO ELETRICISTA.

Examinado por:

Prof. Richard Magdalena Stephan, Dr.Ing.

Prof. Antônio Carlos Ferreira, Ph.D.

Eng. Adilson Carlos Machado, M.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
MARÇO DE 2021

Gomes Barquette, Guilherme

LEVANTAMENTO DAS CURVAS TORQUE X VELOCIDADE DE UM MOTOR DE INDUÇÃO DAHLANDER COM ACESSO A TODOS OS TERMINAIS/Guilherme Gomes Barquette. – Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2021.

XII, 65 p.: il.; 29, 7cm.

Orientador: Richard Magdalena Stephan

Projeto de Graduação – UFRJ/ Escola Politécnica/ Curso de Engenharia Elétrica, 2021.

Referências Bibliográficas: p. 55 – 55.

1. Motor de Indução. 2. Dahlander. 3. Curvas características. I. Magdalena Stephan, Richard. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Elétrica. III. Título.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer imensamente à minha família pelo apoio e incentivo em todos esses anos de faculdade. Agradeço muito também a todos os meus colegas de turma, em especial aos que passaram noites em claro estudando ao meu lado e me ajudando quando precisei durante essa jornada.

Agradeço muito também ao professor Richard Stephan, por ter me orientado ao longo dos últimos meses sempre com muita paciência e sabedoria neste trabalho de conclusão de curso. Agradeço muito aos técnicos André Luís Barbosa de Oliveira e Sérgio Ferreira dos Santos, que tanto me auxiliaram e ensinaram enquanto estive no Laboratório de Máquinas Elétricas, não só ao longo deste trabalho, mas em vários momentos da Universidade.

Agradeço ainda à empresa WEG S.A., que proporcionou um modelo de motor específico ao Laboratório de Máquinas Elétricas que possui um enorme valor didático para os alunos do curso de Engenharia Elétrica da UFRJ. Em especial, um agradecimento aos profissionais Sebastião Lauro Nau, Adilson Carlos Machado, Maicon Joaquim e Vladimir Martins que mais se envolveram com o projeto.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/ UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

LEVANTAMENTO DAS CURVAS TORQUE X VELOCIDADE DE UM MOTOR DE INDUÇÃO DAHLANDER COM ACESSO A TODOS OS TERMINAIS

Guilherme Gomes Barquette

Março/2021

Orientador: Richard Magdalena Stephan

Curso: Engenharia Elétrica

Este trabalho objetiva realizar um levantamento experimental das curvas características de torque $\times$ velocidade de um motor do tipo Dahlander com acesso a 12 terminais, verificando se as curvas encontradas estão de acordo com as propostas pela teoria. Esse tipo específico de motor de indução trifásico possui características que permitem a comutação do número de polos na razão 2:1 do seu enrolamento de estator (ou seja, número de polos duas vezes maior em uma forma de ligação do que na outra), permitindo, portanto, um controle do motor em duas velocidades distintas.

O motor utilizado é um motor Dahlander modelo W22 Premium, da WEG S.A., feito fora de linha de produção. A cooperação entre a WEG S.A. e a UFRJ permitiu que o projeto e a fabricação desse motor fossem executados conforme as necessidades didáticas do LABMAQ, sem custo para a Universidade. Esse motor possui um enorme valor didático, como será visto ao longo do texto.

No trabalho, são ainda abordados diversos conceitos para o entendimento da estrutura e do funcionamento dos motores de indução, assim como as particularidades de um motor de indução do tipo Dahlander. Os resultados encontrados para o motor utilizado são expostos e discutidos nos capítulos finais.

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Engineer.

SURVEY OF CHARACTERISTIC CURVES OF A DAHLANDER TYPE INDUCTION MOTOR WITH ACCESS TO ALL COILS

Guilherme Gomes Barquette

March/2021

Advisor: Richard Magdalena Stephan

Course: Electrical Engineering

This work aims to perform an experimental survey of the characteristic curves of Torque x Speed of a Dahlander-type motor with 12 terminals access, checking if the curves found are in accordance with the proposed by the theory. This specific type of three-phase induction motor has characteristics that allow the switching of the number of poles in the 2: 1 ratio of its stator winding, allowing, therefore, the motor to run at two different speeds.

The motor used is a Dahlander type W22 Premium model, from WEG S.A., made outside of the traditional production line. This engine was manufactured by the company on demand for the Laboratory of Electrical Machines of UFRJ (LABMAQ), having a big didactic value for the students of the institution.

In this work, several concepts are also explained to understand the structure and operation of induction motors, as well as the particularities of a Dahlander induction motor. The results found for the motor used are exposed and discussed in the final chapters.

Sumário

Lista de Figuras **ix**

Lista de Tabelas **xi**

1 Introdução **1**

1.1 Motivação 1

1.2 Objetivo 2

1.3 Organização do trabalho 2

2 Motor de Indução **3**

2.1 Introdução 3

2.2 Aspectos construtivos 4

2.2.1 Estator 4

2.2.2 Rotor 5

2.3 Características dos enrolamentos 6

2.3.1 Terminologias das bobinas 7

2.3.2 Passo de uma bobina 7

2.3.3 Enrolamentos concêntricos e imbricados 8

2.3.4 Camadas dos enrolamentos 8

2.4 Constituição dos polos 8

2.5 Princípios de funcionamento 9

2.6 Circuito equivalente 11

2.7 Fluxo de potência e perdas 13

2.8 Equações de conjugado 16

3 O Motor Dahlander **20**

3.1 Definição 20

3.2 História de Robert Dahlander 21

3.3 Variação do número de polos 21

3.4 Motor com 4 níveis de tensão 23

3.5 Ligações das fases do motor Dahlander 25

3.6 Curvas características 27

3.6.1 Conjugado constante (a) 27
3.6.2 Potência constante (b) 28
3.6.3 Torque variável (ventilador) (c) 29

4 Procedimento experimental **31**
4.1 Método experimental utilizado 31
4.2 Equipamentos utilizados 35
4.2.1 Motor Dahlander utilizado 35
4.2.2 Dinanômetro de 10 HP 41
4.2.3 Autotransformador variável 44
4.2.4 Tacômetro e amperímetro 45

5 Resultados obtidos **46**
5.1 Configuração tipo Dahlander 46
5.1.1 Torque constante 46
5.1.2 Potencia constante 47
5.1.3 Torque variável (ventilador) 48
5.1.4 Análise dos resultados encontrados 49
5.2 Configuração 4 níveis de tensão 52

6 Conclusão **54**

Referências Bibliográficas **55**

A Patente do motor Dahlander **56**

B Configuração 4 níveis de tensão **59**

C Configuração Torque Constante **60**

D Configuração Potência Constante **62**

E Configuração Torque Ventilador **64**

Lista de Figuras

2.1 Estator típico de um motor de indução com enrolamento imbricado. . 5
2.2 Rotor gaiola de esquilo. 6
2.3 Rotor bobinado de motores de indução. 6
2.4 Modelo de circuito para um motor de indução (estator e motor conectados por um transformador ideal de relação a_{eff}). 13
2.5 Modelo do circuito equivalente por fase do motor de indução. 13
2.6 Diagrama de fluxo de potência e perdas de um motor de indução. . . 16
2.7 Circuito equivalente por fase de um motor de indução com indicação do Thèvenin. 17
2.8 Circuito equivalente simplificado com o Teorema de Thèvenin. 18
2.9 Curva característica de torque x velocidade de um motor de indução. 19

3.1 Divisão de enrolamentos da fase a em duas bobinas a_1 e a_2. 22
3.2 Duplicação do número de polos em função do sentido das correntes na fase a. 22
3.3 Configuração Δ-paralelo. 23
3.4 Configuração Y-paralelo. 24
3.5 Configuração Δ-série. 24
3.6 Configuração Y-série. 25
3.7 Curvas características para cada uma das configurações (a) Torque Constante (b) Potência Constante e (c) Torque Variável. 27
3.8 Conexão de torque constante. 28
3.9 Curvas características da conexão torque constante. 28
3.10 Conexão de potência constante. 29
3.11 Curvas características da conexão potência constante. 29
3.12 Conexão de torque variável (ventilador). 30
3.13 Curvas características da conexão torque variável (ventilador). 30

4.1 Bancada de teste com acoplamento motor-gerador CC. 31
4.2 Esquema de uma bancada de teste para motores de indução (MI). . . 32

4.3 Esquemático do circuito equivalente da bancada de teste (gerador acoplado como carga no MI). 32
4.4 Curvas típicas de torque × velocidade de um motor de indução e de um gerador de corrente contínua. 34
4.5 Curvas típicas de torque × velocidade e corrente × velocidade em um motor de indução. 34
4.6 Dados de placa do motor utilizado (4 Níveis de Tensão). 36
4.7 Dados de placa do motor utilizado (Dahlander). 36
4.8 Configuração Y-série na placa "Dahlander"do motor utilizado. 37
4.9 Configuração Y-série na placa "4 Níveis de Tensão"do motor utilizado. 38
4.10 Nova configuração proposta para placa "Dahlander"do motor utilizado. 38
4.11 Nova configuração proposta para placa "Dahlander"do motor utilizado. 39
4.12 Placa do dinamômetro de 10 HP. 41
4.13 Dinamômetro de 10 HP utilizado. 42
4.14 Balança conectada ao gerador CC que constitui o dinamômetro. . . . 42
4.15 Reostato e banco de resistores utilizados no experimento. 43
4.16 Autotransformador variável utilizado no experimento. 44
4.17 Tacômetro óptico utilizado no experimento. 45
4.18 Amperímetro utilizado no experimento. 45

5.1 Curvas de torque × velocidade plotados com os dados obtidos (baixas e altas velocidades). 49
5.2 Legenda ampliada das curvas de torque × velocidade. 49

Lista de Tabelas

3.1 Proporção do torque em cada configuração no motor com 4 níveis de tensão (torque da configuração Δ-paralelo é a referência) 25
3.2 Tensão sobre cada bobina em cada configuração, em que V é a tensão de linha. 26
3.3 Fator de proporcionalidade do torque em cada configuração. 26

4.1 Dados de placa do motor utilizado. 35
4.2 Dados do motor fornecidos pela WEG para a configuração de 4 níveis de tensão. 40
4.3 Dados do motor fornecidos pela WEG para a configuração Dahlander. 40
4.4 Correntes nominais no motor utilizado. 41
4.5 Dados da placa do dinamômetro de 10 HP. 41

5.1 Dados de torque, corrente e velocidade obtidos na configuração torque constante de baixa velocidade. 46
5.2 Dados de torque, corrente e velocidade obtidos na configuração torque constante de alta velocidade. 47
5.3 Dados de torque, corrente e velocidade obtidos na configuração potência constante de baixa velocidade. 47
5.4 Dados de torque, corrente e velocidade obtidos na configuração potência constante de alta velocidade. 47
5.5 Dados de torque, corrente e velocidade obtidos na configuração torque ventilador de baixa velocidade. 48
5.6 Dados de torque, corrente e velocidade obtidos na configuração torque ventilador de alta velocidade. 48
5.7 Comparação de proporcionalidade esperada nos valores teóricos e nos valores obtidos no experimento. 50
5.8 Comparação dos valores dados pela WEG e os encontrados no experimento para a configuração Torque Constante. 51
5.9 Comparação dos valores dados pela WEG e os encontrados no experimento para a configuração Potência Constante. 51

5.10 Comparação dos valores dados pela WEG e os encontrados no experimento para a configuração Torque Ventilador. 51
5.11 Valores de velocidade e corrente encontrados para as configurações de 4 níveis de tensão. 53
5.12 Comparação dos valores dados pela WEG e os encontrados no experimento para as configurações de 4 níveis de tensão. 53

Capítulo 1

Introdução

1.1 Motivação

Este trabalho compõe uma continuação de outros dois trabalhos de conclusão de curso feitos previamente no LABMAQ (Laboratório de Máquinas Elétricas da UFRJ). O primeiro deles, o trabalho de Hugo Oliveira [1], objetivava analisar as curvas características de um motor de indução com acesso a todos os enrolamentos (motor margarida), de forma que as bobinas desse motor fossem configuradas para replicar o funcionamento de um motor Dahlander. O segundo trabalho, de Rafael Bourguignon e Thadeu Lima [2], objetivava analisar também a possibilidade de se obter uma operação tipo Dahlander em um motor de quatro polos e três tensões nominais, através da reconfiguração das ligações em seu terminal de contato. Ambos os trabalhos concluíram que não é possível alcançar as curvas características de torque $\times$ velocidade de um motor de tipo Dahlander a partir de motores que não possuem uma construção própria para a operação Dahlander. Os aspectos construtivos específicos de um motor de tipo Dahlander podem ser vistos na seção 3.1 deste trabalho.

Outros dois trabalhos feitos no LABMAQ que também valem ser ressaltados são os trabalhos de Eduardo Telles [3], que utilizou o método de análise através de componentes harmônicos no estudo de um motor de indução do tipo Dahlander, e o trabalho de Tiago José Moraes [4], que se propôs a realizar um levantamento de curvas características de um motor Dahlander tradicional.

A empresa WEG S.A. disponibilizou para o LABMAQ um motor Dahlander com acesso a todos os 12 terminais, modelo W22 Premium, feito fora de linha de produção. Apesar de não ser comprado em larga escala pelas indústrias, devido ao seu custo elevado, ele possui um alto valor didático, e será o objeto de estudos no presente trabalho. A WEG se mostrou uma grande parceira fornecendo-o para o LABMAQ e ele será de grande uso em estudos futuros dos alunos da universidade,

contribuindo para o seu desenvolvimento profissional.

1.2 Objetivo

Objetivamos realizar um levantamento experimental das curvas características de torque $\times$ velocidade de um motor do tipo Dahlander com acesso a 12 terminais e verificar se os resultados obtidos estão de acordo com os esperados pela teoria e com os valores dos dados fornecidos pela própria WEG.

Serão apresentados alguns conceitos construtivos e princípios de funcionamento de motores de indução, assim como uma explicação de como mudanças em seus enrolamentos alteram o seu funcionamento. Os métodos experimentais realizados e os equipamentos necessários para o levantamento das curvas características são descritos ao longo desse trabalho.

1.3 Organização do trabalho

No capítulo 2, serão abordados os principais aspectos construtivos e os princípios de funcionamento teóricos dos motores de indução, que são essenciais para se entender o procedimento experimental adotado.

No capítulo 3, serão abordados os aspectos construtivos específicos para a configuração de um motor de indução para o tipo Dahlander. São ainda apresentadas as curvas características teóricas esperadas e, também, abordados aspectos gerais dos motores de indução de 4 níveis de tensão.

No capítulo 4, é apresentado o método experimental adotado para se encontrar as curvas desejadas, além de uma descrição detalhada de todos os equipamentos utilizados no processo.

No capítulo 5, são expostos resultados obtidos no procedimento experimental. Além disso, os resultados também são comparados com os valores teóricos esperados e com os dados fornecidos pela WEG.

No capítulo 6, há a conclusão do trabalho com base nas análises feitas.

Capítulo 2

Motor de Indução

2.1 Introdução

O funcionamento das máquinas elétricas de corrente contínua, síncronas e assíncronas se baseia na interação entre dois campos magnéticos: do estator e do rotor. No caso das máquinas síncronas e de corrente contínua, esses campos magnéticos são gerados por dois circuitos distintos: o circuito de campo, que se encontra no estator nas máquinas de corrente contínua e no rotor nas máquinas síncronas, e o circuito de armadura, que se encontra no rotor nas máquinas de corrente contínua e no estator nas máquinas síncronas. Nesses dois tipos de máquinas, o circuito de campo necessita estar conectado a um sistema de alimentação para seu devido funcionamento.[5]

No caso das máquinas de corrente alternada trifásicas de indução (também chamadas de "máquinas assíncronas"), a tensão do rotor, que produz a corrente e o campo magnético neste, é induzida nos enrolamentos do rotor a partir do campo magnético gerado no estator (o que explica o nome "de indução"), em vez de fornecida diretamente. O motor assíncrono tradicional pode ser entendido como dois circuitos elétricos em movimento relativo de rotação, nos quais apenas um desses circuitos (o de estator) é ligado ao sistema de alimentação, enquanto o outro (rotor) recebe energia através de indução eletromagnética em seus condutores, gerando o segundo campo magnético. Há exceções a esse modelo clássico, como os motores de indução duplamente alimentados, mas eles não serão objeto de estudo neste trabalho. A denominação de "motor assíncrono" se refere ao fato de que há uma diferença entre a velocidade do campo magnético girante produzido no estator e a velocidade no rotor, diferentemente do que ocorre nas máquinas síncronas.

Os motores de indução são bastante utilizados na indústria devido ao fato de apresentarem facilidades em sua fabricação, manutenção e operação. Por conta dessa sua simplicidade, também apresentam custos mais reduzidos em comparação

aos outros motores elétricos em uma mesma faixa de potência nominal, além de uma longa vida útil.

Entretanto, esse tipo de motor também apresenta algumas desvantagens, como é o caso das altas correntes que são necessárias para a sua partida e a sua não operação em uma velocidade fixa conforme variação da carga aplicada em seu eixo. Porém, existem algumas técnicas que podem ser implementadas com o objetivo de solucionar tais problemas. Para a redução da corrente de partida, por exemplo, pode-se utilizar equipamentos elétricos como autotransformadores ou chaves estrela-triângulo, além da própria configuração Dahlander, que será abordada mais detalhadamente no capítulo 3. Já para o controle de velocidade dos rotores no motor de indução, pode-se utilizar técnicas provenientes da eletrônica de potência. [6].

2.2 Aspectos construtivos

Apesar de haver diferentes tipos de motores, pode-se dizer que, estruturalmente, a maioria deles possui os seguintes componentes em sua construção: estator, rotor, mancais e uma carcaça protetora. A carcaça protetora e os mancais servem para proteções físicas e de influências externas, enquanto que o estator e o rotor serão abordados com maiores detalhes nos próximos itens.

2.2.1 Estator

Os estatores são a parte estacionária dos motores, conforme visto na figura 2.1. O estator é constituído, em geral, por três partes principais: núcleo, enrolamentos e carcaça. O núcleo é a parte ferromagnética do circuito do estator; a carcaça é um elemento de proteção aos componentes internos do estator; os enrolamentos são as bobinas (basicamente um grupo de espiras enroladas) posicionadas em ranhuras internas envolta do núcleo.

O núcleo e os enrolamentos formam uma espécie de eletroímã responsável por produzir o campo magnético que fará o rotor girar. O estator é bobinado, sendo cada bobina um conjunto de espiras. O enrolamento de uma fase é, normalmente, composto por mais de uma bobina, que podem ser conectadas em série ou em paralelo. [5]

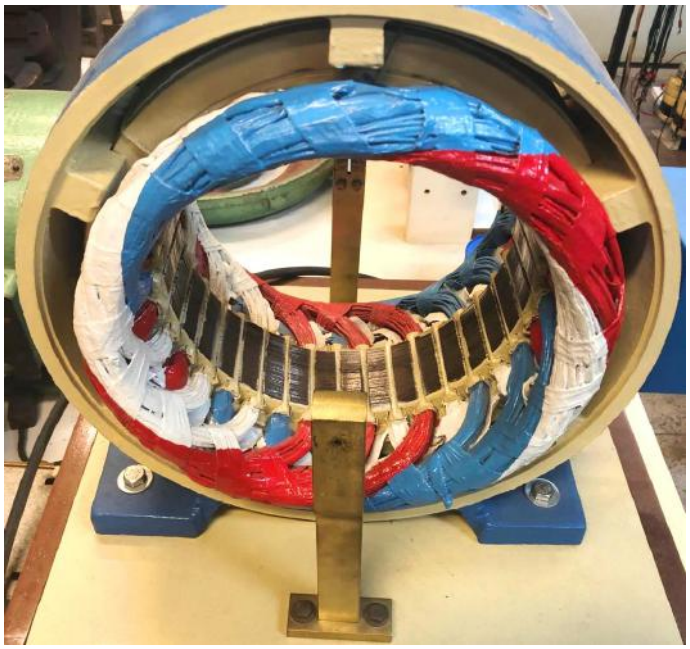


Figura 2.1: Estator típico de um motor de indução com enrolamento imbricado.

2.2.2 Rotor

O rotor é a parte girante do motor. O rotor também é constituído, em geral, por três partes principais: núcleo, enrolamentos e eixo. O núcleo é a parte ferromagnética do circuito do rotor; os enrolamentos são dispostos em ranhuras longitudinais em torno da circunferência do núcleo do rotor; o eixo se baseia na parte na qual é montado o conjunto formado pelo núcleo e enrolamentos do rotor.

Em um motor de indução, o rotor pode ser de dois tipos: o rotor “gaiola de esquilo” e o rotor bobinado. O rotor do tipo "gaiola de esquilo"(figura 2.2) consiste em barras condutoras encaixadas dentro de ranhuras na superfície do rotor e postas em curto-circuito em suas extremidades por anéis.

Já o rotor bobinado (figura 2.3) possui um conjunto completo de enrolamentos trifásicos similares ao enrolamento do estator; as três fases dos enrolamentos do rotor são usualmente ligadas em Y e suas pontas conectadas a anéis condutores [5]. Uma das principais vantagens da utilização do rotor bobinado é que ele nos permite conectar resistências em série com o rotor, a fim de diminuirmos a corrente de partida do motor de indução. Tal método aumenta as perdas ôhmicas no motor, porém é um dos métodos de menor custo e de maior simplicidade no controle da corrente e do torque de partida. Entretanto, o rotor do tipo gaiola de esquilo acaba sendo mais utilizado por conta de sua simplicidade de fabricação e manutenção.

Figura 2.2: Rotor gaiola de esquilo.

Figura 2.3: Rotor bobinado de motores de indução.

2.3 Características dos enrolamentos

Em um projeto de uma máquina elétrica, as características dos enrolamentos são fundamentais de serem analisadas, uma vez que elas influenciam diversas características do funcionamento da máquina, como fluxo, impedância, polaridades etc.

Antes de analisarmos os tipos de enrolamentos apresentados nas máquinas de corrente alternada, é necessário que se faça a explicação das terminologias mais comuns utilizadas nos estudos dos enrolamentos.

2.3.1 Terminologias das bobinas

- Espira: é uma volta completa de um condutor, que pode ser constituído por um único fio ou então por mais de um fio em paralelo;
- Bobina: é um grupo de espiras que será alocado em uma ranhura; esse número de espiras varia de acordo com o projeto do motor;
- Grupo de bobinas: é o conjunto de uma ou mais bobinas que formam um polo magnético; esse número de bobinas por grupo varia de acordo com o projeto do motor;
- Enrolamento: é o conjunto total de todos os grupos de bobinas do motor.

2.3.2 Passo de uma bobina

O passo polar é representado pela distância ângular entre dois polos adjacentes da máquina. Ele pode ser medido (em graus mecânicos) através da equação 2.1. [5]

$$P_p = \frac{360°}{P} \tag{2.1}$$

Em que:
- P_p é o passo polar em graus mecânicos
- P é o número de polos da máquina

Se o passo polar for igual ao ângulo ocupado pela bobina do estator, então temos o chamado passo pleno. Porém, se esse ângulo for menor do que o passo polar, teremos o chamado passo fracionário (ou passo encurtado). O passo encurtado pode ser calculado, em graus elétricos, pela equação 2.2 a seguir.

$$p = \frac{\theta_m}{P_p} \times 180° \tag{2.2}$$

Em que:
- P_p é o passo polar, em graus mecânicos
- p é passo encurtado, em graus elétricos
- θ_m é o ângulo mecânico coberto pela bobina, em graus

Em geral, a distribuição do fluxo na realidade acaba não sendo perfeitamente senoidal, já que apresenta os harmônicos juntos da componente fundamental senoidal. Porém, essas componentes harmônicas são indesejáveis, sendo umas das técnicas para eliminar esses harmônicos o uso de enrolamentos de passo encurtado. [5]

2.3.3 Enrolamentos concêntricos e imbricados

As máquinas de corrente alternada apresentam dois tipos principais de configuração para o tipo de ligação dos enrolamentos: os enrolamentos concêntricos (ou "em espiral") e os enrolamentos imbricados (ou tipo "diamante").

No enrolamento do tipo concêntrico, temos as espiras se encontrando nas ranhuras de forma concêntrica (com o mesmo centro), formando um enrolamento em espiral. No modelo de enrolamentos do tipo imbricado, todas as espiras apresentam o mesmo tamanho, mas os centros dessas espiras são fisicamente diferentes. [5]

Esses tipos de enrolamento são subdivididos em duas categorias diferentes: os enrolamentos de passo pleno e os de passo encurtado (fracionário). O enrolamento de passo pleno apresenta o passo das bobinas igual ao passo polar; o enrolamento de passo fracionário apresenta uma distância entre os dois lados de uma mesma bobina sendo menor (ou maior, em casos excepcionais) que a do passo pleno. [3] [5]

2.3.4 Camadas dos enrolamentos

Quando uma ranhura do estator contém apenas uma bobina, dizemos que esse é um enrolamento de camada única, enquanto que, quando tem duas bobinas, dizemos que é um enrolamento de camada dupla. [7]

As bobinas de estator são montadas quase sempre em camadas duplas, uma vez que são mais facilmente fabricados (são necessárias menos ranhuras para um dado número de bobinas) e têm conexões de terminais mais simples do que os enrolamentos de camada única. Os enrolamentos de camada única são usados, geralmente, apenas em máquinas de pequeno porte (menos de 10 kW).[7]

2.4 Constituição dos polos

Uma das técnicas mais utilizadas para a alteração no número de polos em uma máquina de indução é a técnica dos "enrolamento por polos consequentes". Esse método nos permite fazer com que o número de grupos de bobinas por fase seja igual ou ao número de polos ou ao número de pares de polos (2 polos para cada grupo de bobinas). Portanto, esse método permite alterar facilmente o número de polos do enrolamento do estator de um motor de indução na razão 2:1 (basta alterar as conexões entre as bobinas). [5]

Em um primeiro momento, pode-se conectar os dois grupos de bobinas de forma que as correntes nas bobinas dos dois grupos se encontrem em sentidos opostos, fazendo com que cada grupo tenha uma polaridade diferente. Isso fará com que o número de grupos de bobinas por fase seja igual ao número de polos.

Em um segundo momento, pode-se conectar os dois grupos de bobinas de forma que as correntes nas bobinas dos dois grupos se encontrem em igual sentido. Ambos os grupos terão, portanto, a mesma polaridade e o fluxo magnético desta máquina deverá retornar ao estator entre os dois grupos, produzindo polos magnéticos consequentes de polaridades diferentes. Isso fará com que o número de grupos de bobinas por fase seja igual ao número de pares de polos.[5]

Pode-se obter ambas as configurações de polos tanto em ligações em série quanto em paralelo. Isso irá influenciar diretamente no comportamento do motor, uma vez que as configurações em série ou paralelo modificam a tensão em cada bobina do motor para uma mesma tensão de entrada aplicada. Portanto, pode-se ter diferentes torques induzidoes no motor, uma vez que o torque induzido é diretamente proporcional ao quadrado da tensão em cada bobina e ao número de polos, conforme veremos mais adiante na seção 2.8.

2.5 Princípios de funcionamento

Quando o estator é alimentado por um conjunto trifásico de tensões equilibradas, isso resultará em um conjunto trifásico de correntes circulando no estator. Tais correntes geram um campo magnético B_s girante. Denominamos Velocidade Síncrona a velocidade de rotação do campo girante do estator, que pode ser calculada através da equação 2.3 a seguir. [5]

$$n_s = \frac{120.f_s}{P} \tag{2.3}$$

Em que:
- n_s é a velocidade síncrona (em RPM)
- f_s é a frequência da alimentação do sistema aplicado ao estator (em Hertz)
- P é o número de polos da máquina

Esse campo magnético girante B_s passa pelas barras do rotor, produzindo uma tensão induzida nelas. Tal tensão induzida pode ser calculada pela equação 2.4 :

$$E_{ind} = (v \times B) \cdot l \tag{2.4}$$

Em que:
- E_{ind} é a tensão induzida em uma dada barra
- v é a velocidade da barra em relação ao campo magnético
- B é o vetor densidade de fluxo magnético
- l é o comprimento da barra condutora

O movimento relativo do rotor em relação ao campo magnético do estator é o que resultará em uma tensão induzida no rotor e, consequentemente, em um fluxo de correntes induzidas nesse. Porém, como o rotor possui uma estrutura indutiva, a corrente de pico do rotor estará atrasada em relação à tensão de pico do rotor. Esse fluxo de correntes no rotor gera um outro campo magnético girante B_R. [5]

Com isso pode-se observar que, se o rotor estivesse girando na própria velocidade síncrona, as barras do rotor ficariam estacionárias em relação ao campo magnético e não haveria uma tensão induzida. Com a tensão induzida sendo nula, não haveria corrente nem campo magnético no rotor, fazendo o conjugado induzido ser nulo também e o rotor perderia velocidade por contas das perdas por atrito. Concluímos então que o motor de indução pode ganhar velocidade até próximo da velocidade síncrona.

Uma vez que o comportamento de um motor de indução depende da tensão e da corrente do rotor, é preferível então falarmos em termos de uma velocidade relativa. Para tanto, pode-se definir dois termos que serão importantes na análise do movimento relativo do rotor e dos campos magnéticos: a velocidade de escorregamento (definida como a diferença entre a velocidade síncrona e a velocidade do rotor, conforme visto na equação 2.5), e o escorregamento (definido como a diferença entre as velocidades do rotor e a síncrona, em relação à velocidade síncrona, expressa em uma base por unidade ou percentagem, conforme visto na equação 2.6).

$$n_{esc} = n_s - n \tag{2.5}$$

Em que:
- n_{esc} é a velocidade de escorregamento
- n_s é a velocidade síncrona
- n é a velocidade mecânica do eixo do motor

$$s = \frac{n_s - n}{n_s}(\times 100\%) \tag{2.6}$$

Em que:
- s é o escorregamento
- n_s é a velocidade síncrona
- n é a velocidade mecânica do eixo do motor

Pode-se ainda resolver a equação 2.6 em relação à velocidade mecânica e relacioná-la com a equação 2.3 para chegarmos à equação 2.7 a seguir.

$$n = (1 - s).n_s = (1 - s).\frac{120.f_s}{P} \tag{2.7}$$

Assim como no funcionamento de um transformador elétrico, um motor de indução também funciona induzindo tensões e correntes no rotor da máquina. Entretanto, a analogia ao transformador se distingue do motor de indução por conta de a frequência no secundário do motor de indução (rotor) não ser necessariamente igual à frequência do primário (estator). A frequência no rotor pode ser calculada através da equação 2.8 a seguir:

$$f_R = s.f_s \tag{2.8}$$

Em que:
- f_R é a frequência no rotor
- s é o escorregamento
- f_s é a frequência do estator

2.6 Circuito equivalente

Uma análise de um modelo de circuito equivalente se mostra bastante útil para verificarmos aspectos como as perdas no motor de indução e seu funcionamento. O circuito equivalente mais comumente apresentado é uma representação monofásica do circuito do motor, na qual fica subentendido que as outras fases são semelhantes, porém com tensões e correntes defasadas de 120°. Também é válido ressaltar que essa simplificação só é válida para motores balanceados, isto é, com enrolamentos simétricos e alimentados por tensões balanceadas.

Conforme já dito, pode-se traçar uma analogia do circuito equivalente de um motor de indução com o circuito equivalente de um transformador, no qual o circuito do estator representaria o primário do transformador e o circuito do rotor representaria o secundário do transformador. Uma vez que a potência é fornecida somente ao circuito de estator do motor, a máquina de indução também pode ser chamada de "máquina de excitação simples". Como o motor de indução não tem um circuito de campo independente, seu modelo de circuito equivalente não possui nenhuma fonte de tensão interna.

A diferença entre a tensão terminal e a força contraeletromotriz no entreferro do nosso modelo de circuito é a queda de tensão na impedância de dispersão do estator, que pode ser calculada como $Z_1 = R_1 + jX_1$, em que R_1 representa a resistência dos

materiais condutores do estator e X_1 representa a reatância de dispersão do estator.

A reatância de magnetização do motor de indução X_M apresenta um valor consideravelmente menor que o valor de reatância de magnetização de um transformador tradicional, uma vez que no motor de indução é necessário um entreferro de ar que aumenta bastante a relutância do caminho de fluxo e reduz o acoplamento entre os enrolamentos primário e secundário (estator e rotor, respectivamente). A relutância maior devido ao entreferro de ar exige que uma corrente de magnetização maior seja necessária para obtermos um dado nível de fluxo.

Para representarmos as perdas nos materiais magnéticos do núcleo, colocamos uma resistência R_c no modelo. Entretanto, uma vez que o paralelo dessa resistência com a reatância X_M resulta, aproximadamente, na própria reatância X_M, pode-se usar essa aproximação se desejarmos, desconsiderando R_c (faremos isso em seções posteriores).

O circuito equivalente do rotor é análogo ao circuito do secundário de um transformador tradicional, mas curtocircuitado. Assim como fazemos na análise dos transformadores, pode-se referir o circuito do rotor para o lado do estator. Nesse circuito, R_2 representa a resistência dos materiais condutores do rotor e X_2 representa a reatância de dispersão do rotor. Entretanto, agora temos que colocar um componente a mais nesse circuito para representar os efeitos da variação do escorregamento na tensão induzida e, consequentemente, nas correntes das barras condutoras do rotor. Os efeitos devido ao fato da variação do escorregamento alterar a tensão induzida e a corrente nas barras condutoras do rotor pode ser tratados como causados por uma impedância variável; fazemos essa compensação dividindo o fator R_2 da impedância do rotor pelo escorregamento s.

Chegamos então à conclusão de que a impedância do rotor pode ser representada por $Z_2 = R_2/s + jX_2$, que já inclui os efeitos devido ao escorregamento variável do rotor. Quanto maior for o movimento relativo entre os campos magnéticos do rotor e do estator, maiores serão a tensão e a frequência do rotor e, quanto maior a carga, maior será o escorregamento.

A partir desses conhecimentos, pode-se elaborar modelos de circuitos equivalentes para o motor de indução, que são mostrados nas figuras 2.4 e 2.5 a seguir.

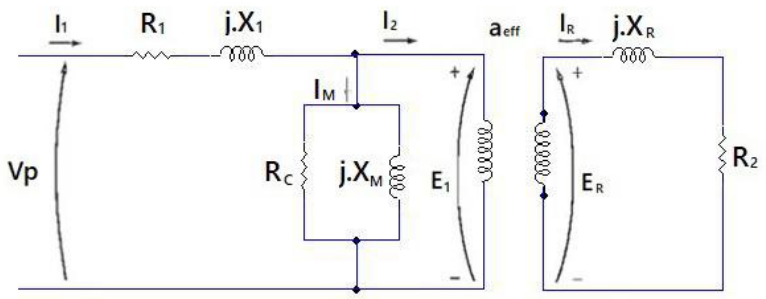


Figura 2.4: Modelo de circuito para um motor de indução (estator e motor conectados por um transformador ideal de relação a_{eff}).

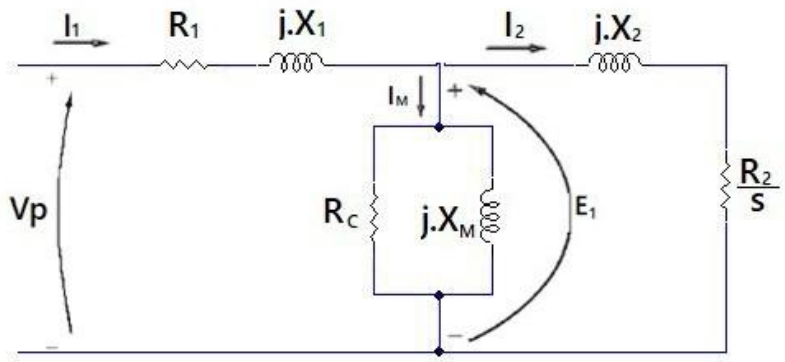


Figura 2.5: Modelo do circuito equivalente por fase do motor de indução.

2.7 Fluxo de potência e perdas

Em um motor de indução comum, os enrolamentos do secundário (rotor) estão em curto-circuito, de modo que não há saída elétrica, mas sim mecânica. A potência de entrada de um motor de indução pode ser calculada pela equação 2.9 a seguir, na qual V_L e I_L são grandezas de linha e $cos\theta$ é o fator de potência. [5]

$$P_{in} = \sqrt{3}.V_L.I_L.cos\theta \tag{2.9}$$

As primeiras perdas encontradas na máquina são as perdas ôhmicas nos enrolamentos do estator (perdas no cobre do estator). Essas perdas podem ser reduzidas utilizando um material condutor de melhor qualidade (menor resistência). Tais perdas ôhmicas podem ser calculadas através da equação 2.10 a seguir, na qual I_1 é a corrente de fase.

$$P_{os} = 3.R_1.I_1^2 \tag{2.10}$$

Ainda no estator, temos também as perdas no núcleo do estator, que são perdas por histerese e por correntes de Foucault (correntes parasitas) na frequência do estator (P_{hfs}). As perdas por histerese são perdas provocadas pela propriedade dos materiais ferromagnéticos de apresentarem um atraso entre a indução e o campo magnético, enquanto que as perdas por correntes parasitas ocorrem quando um campo magnético variável surge no núcleo quando uma corrente alternada está fluindo pelo seu enrolamento, induzindo uma tensão no núcleo e gerando tais correntes.

O estator é composto por chapas de metal laminadas e revestidas com material isolante para diminuir essas perdas. Pode-se ainda usar materiais que apresentem um laço de histerese mais estreito para que possamos diminuir tais perdas. Se transformarmos o resistor R_c do núcleo em uma condutância G_c, essas perdas podem ser calculadas através da equação 2.11 a seguir.

$$P_{hf} = 3.E_1^2.G_c \tag{2.11}$$

Em que E_1 é a tensão no núcleo $E_1 = V_p - I_1.(R_1 + j.X_1)$.

A potência resultante após essas duas perdas citadas é a potência que será transferida ao rotor da máquina através do entreferro. Essa potência é denominada potência de entreferro (P_{ef}) e pode ser calculada através da equação 2.12 a seguir.

$$P_{ef} = 3.I_2^2.\frac{R_2}{s} = P_{in} - P_{os} - P_{hfs} \tag{2.12}$$

Após a transferência da potência ao rotor, analogamente ao que houve no circuito do estator, uma parte dessa potência é novamente perdida por perdas ôhmicas no circuito do rotor (P_{or}) e por perdas no núcleo do rotor (P_{hfr}), que são perdas por histerese e por correntes de Foucault (correntes parasitas) na frequência do rotor. As perdas no núcleo do rotor são muito pequenas quando comparadas às perdas no núcleo do estator. As perdas ôhmicas no circuito do rotor podem ser calculadas através da equação 2.13 a seguir.

$$P_{or} = 3.I_2^2.R_2 = s.P_{ef} \tag{2.13}$$

Após essas perdas, chegamos à potência interna do motor, que é a potência efetivamente convertida em potência mecânica. Essa potência pode ser calculada segundo a equação 2.14 a seguir:

$$P_m = P_{ef} - P_{or} = (1 - s).P_{ef} \tag{2.14}$$

Ainda ocorrem também perdas por atrito, por ventilação e perdas suplementares (P_{av}). Quanto maior a velocidade de um motor de indução, maiores serão as perdas por atrito, ventilação e suplementares, porém menores serão suas perdas no núcleo. Por conta disso, algumas vezes essas categorias de perdas são combinadas e chamadas de perdas rotacionais, que são consideradas constantes com a velocidade variável, uma vez que elas variam em sentidos opostos. As perdas por atrito podem ser reduzidas melhorando a lubrificação entre o rotor e os mancais.

A potência restante após todas essas perdas é a chamada potência de saída (ou potência no eixo) P_{out}. Essa potência pode ser calculada através da equação 2.15 a seguir.

$$P_{out} = P_m - P_{av} \tag{2.15}$$

Para calcular a eficiência de um motor de indução, pode-se dividir a potência de saída pela potência de entrada e atingirmos um valor percentual, seguindo a equação 2.16 a seguir. A eficiência de um motor ideal é caracterizada como $\eta = 1 - s$.

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}}.100 \tag{2.16}$$

Pode-se entender melhor as perdas de potência que ocorrem ao longo do motor de indução analisando o diagrama da figura 2.6 a seguir:

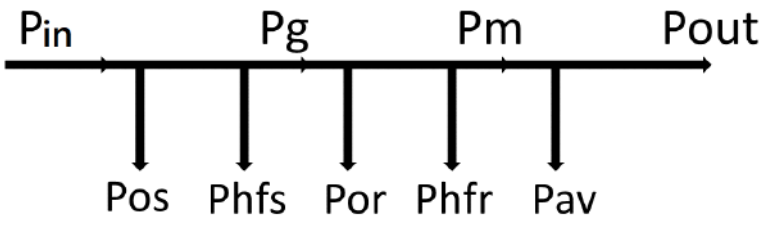


Figura 2.6: Diagrama de fluxo de potência e perdas de um motor de indução.

2.8 Equações de conjugado

A potência mecânica desenvolvida pela máquina é um produto entre o conjugado induzido e a velocidade de rotação. O conjugado induzido (ou desenvolvido) T_{ind} de uma máquina pode ser definido como o torque gerado pela conversão interna de potência elétrica em mecânica.[5]

O conjugado induzido difere do conjugado realmente disponível nos terminais do motor em um valor igual aos torques de atrito e ventilação da máquina. O torque induzido pode então ser calculado através da equação 2.17, enquanto o torque de saída pode ser calculado através da equação 2.18, nas quais ω_m é a velocidade angular no eixo da máquina.

$$T_{ind} = \frac{P_m}{\omega_m} \tag{2.17}$$

$$T_{saida} = \frac{P_{out}}{\omega_m} \tag{2.18}$$

Vale ressaltar que, da equação 2.7, chegamos à seguinte equação análoga 2.19:

$$\omega_m = (1 - s).\omega_s \tag{2.19}$$

Se substituirmos as equações 2.14 e 2.19 na equação 2.17, temos a equação 2.20 a seguir:

$$T_{ind} = \frac{(1 - s).P_{ef}}{(1 - s).\omega_s} = \frac{P_{ef}}{\omega_s} \tag{2.20}$$

Essa equação é especialmente útil, uma vez que ela expressa o conjugado induzido diretamente em termos da potência de entreferro e da velocidade síncrona (que não varia para uma dada frequência e número de polos).

Pode-se ainda usar o circuito equivalente do motor de indução e seu diagrama de fluxo de potência para desenvolvermos uma expressão genérica do conjugado induzido.

Se pegarmos a equação 2.12 e a substituirmos na equação 2.20, chegamos à equação 2.21 a seguir:

$$T_{ind} = \frac{3.I_2^2.(R_2/s)}{\omega_s} \tag{2.21}$$

Tal equação diz que, se I_2 puder ser calculada, então a potência de entreferro e o conjugado induzido da máquina poderão ser calculados também. A forma mais simples de calcular I_2 é determinando o equivalente de Thévenin da parte do circuito que está à esquerda das cruzes demarcadas no circuito equivalente, conforme pode-se ver na figura 2.7 a seguir.

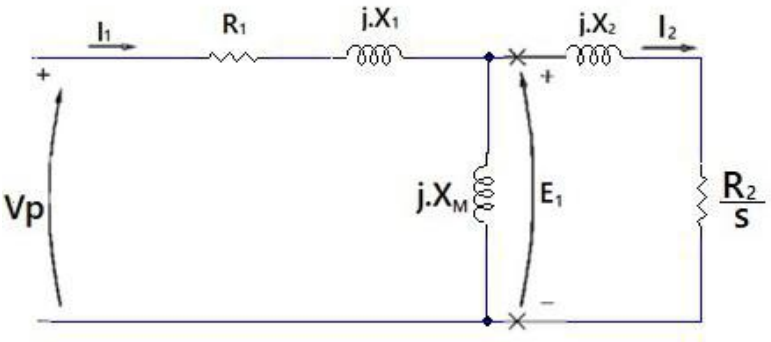


Figura 2.7: Circuito equivalente por fase de um motor de indução com indicação do Thèvenin.

O Teorema de Thévenin estabelece que qualquer circuito linear visto de um ponto pode ser representado por uma fonte de tensão (igual à tensão do ponto em circuito aberto) em série com uma impedância (que é igual à impedância do circuito vista deste ponto).

Primeiramente, abrimos o circuito nos pontos demarcados e encontramos a tensão resultante de circuito aberto nesse ponto; depois, encontramos a impedância de Thévenin curtocircuitando a fonte V_P e calculando a impedância equivalente Z_{eq}.

Após isso, chegamos às equações que nos dão a tensão equivalente de Thévenin (equação 2.22) e a impedância equivalente de Thévenin (equação 2.23). Consideramos ainda, nessas duas equações, aproximações de $X_M >> X_1$ e $X_M + X_1 >> R_1$.

$$V_{th} = V_P.\frac{jX_M}{R_1 + j(X_1 + X_M)} \approx V_P.\frac{X_M}{X_1 + X_M} \tag{2.22}$$

$$Z_{th} = R_{TH} + jX_{TH} = \frac{jX_M.(R_1 + jX_1)}{R_1 + j(X_1 + X_M)} \tag{2.23}$$

Separando nossa impedância equivalente de Thèvenin (equação 2.23) em R_{th} e X_{th}, temos as seguintes aproximações das equações 2.24 e 2.25 a seguir:

$$R_{th} \approx R_1 \left(\frac{X_M}{X_1 + X_M}\right)^2 \tag{2.24}$$

$$X_{th} \approx X_1 \tag{2.25}$$

Chegamos, então, ao circuito equivalente de Thèvenin mostrado na figura 2.8.

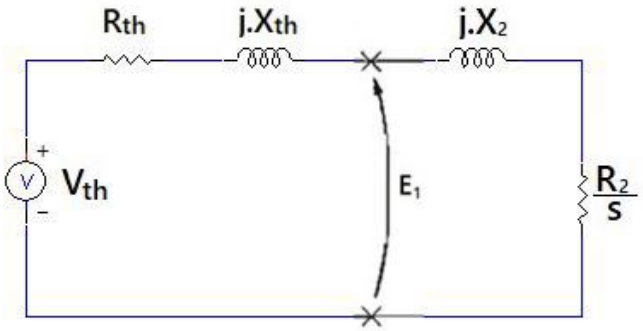


Figura 2.8: Circuito equivalente simplificado com o Teorema de Thèvenin.

A corrente I_2 é a corrente que circula no interior do circuito equivalente dado pela figura 2.8. Fazendo os cálculos apropriados e se utilizando das equações 2.22, 2.23, 2.24 e 2.25, chegamos à equação 2.26 a seguir, que nos dá o módulo da corrente circulante I_2:

$$I_2 = \frac{V_{th}}{\sqrt{(R_{th} + R_2/s)^2 + (X_{th} + X_2)^2}} \tag{2.26}$$

Finalmente, pode-se substituir a equação 2.26 na equação 2.21, o que nos dá a seguinte equação 2.27 para o cálculo do conjugado induzido, dependendo apenas dos valores da alimentação, dos parâmetros da máquina e do valor de escorregamento.

$$T_{ind} = \frac{3.V_{th}^2.R_2/s}{\omega_s.[(R_{th} + R_2/s)^2 + (X_{th} + X_2)^2} \tag{2.27}$$

A partir da equação 2.27, pode-se encontrar uma curva característica de torque $\times$ velocidade para o motor de indução operando em regime permanente, que pode ser vista na figura 2.9 a seguir.

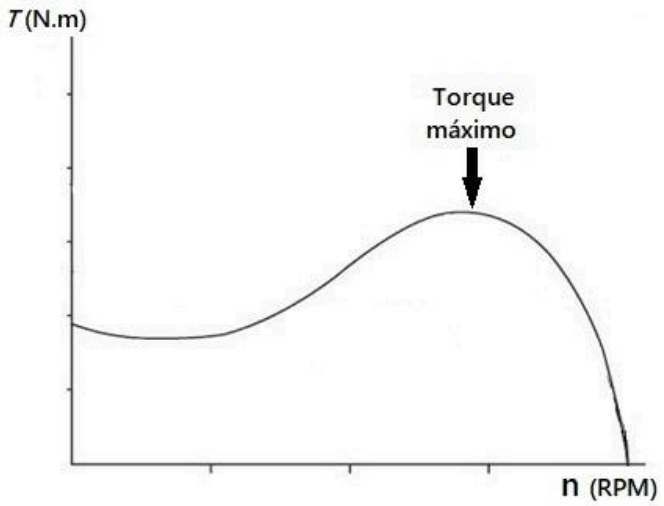


Figura 2.9: Curva característica de torque x velocidade de um motor de indução.

A equação2.27 e a teoria de máquinas de corrente contínua serão utilizadas posteriormente, no capítulo 4, na descrição do método experimental utilizado para se obter os dados desejados.

A seguir, no capítulo 3, serão abordados os aspectos construtivos específicos para a configuração de um motor de indução para o tipo Dahlander. Serão ainda apresentadas as curvas características teóricas esperadas e, também, abordados aspectos gerais dos motores de indução de 4 níveis de tensão.

Capítulo 3

O Motor Dahlander

3.1 Definição

O motor Dahlander consiste em um motor elétrico de indução trifásico no qual é empregado o sistema conhecido como enrolamento por polos consequentes (seção 2.4), o que permite que seu acionamento seja feito em duas velocidades diferentes com uma mesma tensão de alimentação.

Conforme pode-se observar na equação 2.3, a velocidade síncrona do motor pode ser alterada caso haja variação em seu número de polos ou na frequência do sistema. Entretanto, o método de controle de velocidade pela frequência, denominado "método de controle contínuo de velocidade", deve ser acompanhado da utilização de controladores que possuem custo elevado [4]. Portanto, a solução mais econômica seria a velocidade síncrona do motor ser diretamente afetada pela mudança do número de polos, assim como a sua curva característica de torque $\times$ velocidade.

As velocidades encontradas pela alteração no número de polos em um motor Dahlander são na relação de 2:1, ou seja, o número de polos é duas vezes maior em uma configuração do que na outra. O motor Dahlander costuma ter seis bobinas em seu estator e, dependendo da configuração usada para ligar essas bobinas, o motor apresenta diferentes curvas de torque $\times$ velocidade quando opera em baixa velocidade (maior número de polos) ou em alta velocidade (menor número de polos).

No entanto, o motor Dahlander também apresenta algumas desvantagens, como por exemplo possuir um rápido desgaste mecânico devido às mudanças bruscas de velocidade, além de que esse tipo de conexão produz alta distorção harmônica durante o deslocamento dos polos [3]. O motor Dahlander é requisitado em aplicações onde é necessária apenas uma mudança discreta das velocidades do motor, como ventiladores, trituradores, guindastes, guinchos, elevadores etc.

3.2 História de Robert Dahlander

Robert Dahlander foi um engenheiro sueco, nascido em 9 de junho de 1870 em Gotemburgo, Suécia. Ele estudou física na Royal Technical University de Estocolmo até 1890 e trabalhou para a empresa de eletrotécnica ASEA desde 1893. [8]

Em 1897 foi quando ele desenvolveu o circuito Dahlander, relatando como que a velocidade dos motores assíncronos poderia ser reduzida pela metade dobrando-se o número de polos. A ligação Dahlander foi constituída em uma época onde não existiam ainda inversores eletrônicos, sendo uma importante forma de se controlar a velocidade de motores de indução. Sua patente pode ser vista na seção anexa "Patente do motor Dahlander "desse trabalho.

Foram realizados diversos testes e ensaios sobre a teoria proposta por Dahlander entre os anos de 1905 a 1907, sob a direção do próprio Dahlander. A partir disso, Dahlander formulou a conclusão de que para as operações ferroviárias dificilmente poderia haver um "modo de operação mais simples e mais barato do que a corrente alternada monofásica usada". Em 1908, ele se tornou diretor das obras de gás e eletricidade em Estocolmo. [8]

3.3 Variação do número de polos

Para que haja a comutação dos polos, através dos polos consequentes, o motor Dahlander deve obedecer a uma configuração de construção específica, baseada em: rotor do tipo Gaiola de Esquilo; estator com enrolamento imbricado de dupla camada e passo encurtado de 50%. [9]

O rotor do motor Dahlander deve ser do tipo gaiola de esquilo que, conforme discutido anteriormente, possui suas barras condutoras curtocircuitadas e tem o seu número de polos determinado pela indução do estator. Ou seja, quando há comutação no número de polos do estator, alterando as conexões terminais externamente, há também no rotor, não havendo necessidade da utilização de dispositivos extras para alterar o número de polos do enrolamento do rotor.

Quanto ao estator, esse deve possuir o enrolamento do tipo imbricado de dupla camada, para que opere sob as duas diferentes configurações de números de polos. O enrolamento de uma camada não é apropriado, uma vez que aparecem intensos campos harmônicos superiores que prejudicam o motor na partida por conta do menor número de polos.[5]

O passo encurtado de 50% em relação ao passo pleno nas bobinas imbricadas do estator é o que permite o enrolamento ter espaço para os polos consequentes e operar nas duas velocidades. Dessa maneira, quando tivermos o dobro do número de polos em relação ao número de bobinas, as bobinas terão o passo de 100%. No

método de enrolamento por polos tradicional, cada bobina acaba por gerar um polo do motor, uma vez que metade do grupo de bobinas estará polarizada como Norte e, a outra metade, como Sul. Porém, o método dos polos consequentes permite a polarização de todas as bobinas em um mesmo sentido, forçando polos de sentidos opostos entre as bobinas e dobrando o número de polos. [4] [9]

Pode-se, então, dividir os enrolamentos de cada fase em duas bobinas, conforme figura 3.1 [6] a seguir, na qual pode-se ver a fase a sendo composta pelas bobinas a_1 e a_2.

Figura 3.1: Divisão de enrolamentos da fase a em duas bobinas a_1 e a_2.

O sentido da corrente em cada uma das bobinas é o que define o número de polos do estator da máquina. Com isso, poderemos fazer com que a polarização das bobinas de cada fase seja em sentidos diferentes ou em sentidos iguais. Quando polarizadas em sentidos diferentes, o número de polos é o menor; quando polarizadas em sentidos iguais, o motor opera com o número de polos igual ao dobro do número de bobinas, conforme pode-se analisar na figura 3.2 [6] a seguir .

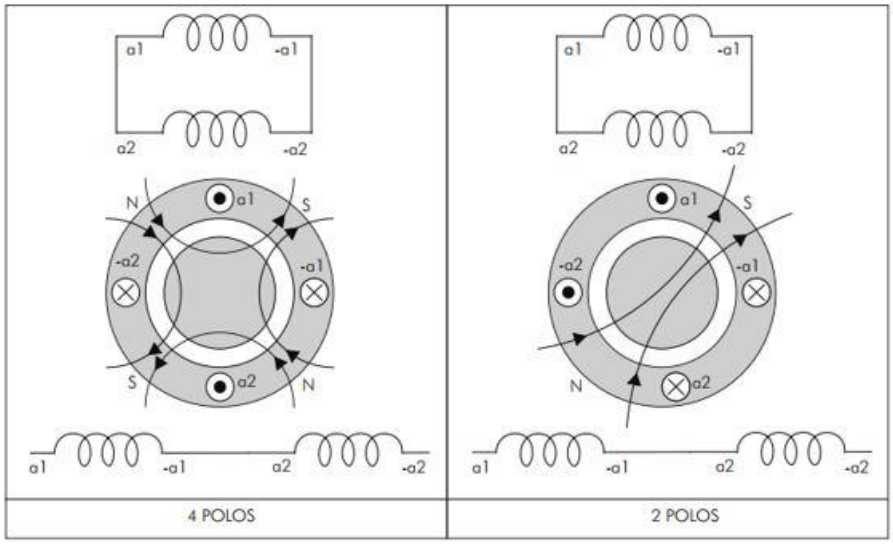


Figura 3.2: Duplicação do número de polos em função do sentido das correntes na fase a.

3.4 Motor com 4 níveis de tensão

Os motores que disponibilizam acesso a um número suficiente de terminais da máquina podem ser operados com mais de uma tensão de entrada, uma vez que permitem conexões dos seus enrolamentos de diversas configurações.

Um motor com acesso a 12 terminais permite que o motor opere em 4 níveis de tensão de entrada, sendo geralmente 3 tensões nominais e uma para a partida do motor. Há também a possibilidade de o motor de 4 níveis de tensão ser alimentado com a mesma tensão, mudando-se apenas a configuração, o que pode ser feito para que se tenha uma partida suave do motor.

Pode-se citar, como exemplo, o motor W22 Premium, da WEG S.A, utilizado neste trabalho. Ele possui tensões de alimentação de 220. 380. 440 e 760 V. Cada uma dessas tensões de entrada deve obedecer a configurações específicas para que haja 220 V de tensão em cada bobina.

A configuração de alimentação 220 V será a configuração delta-paralelo; nesse caso, a tensão sob cada bobina será a própria tensão de linha. A configuração de alimentação 380 V será a configuração estrela-paralelo; nesse caso, a tensão em cada bobina será o valor de $(380\ /\sqrt{3})$, que nos dá o valor de 220 V em cada bobina. As figuras 3.3 e 3.4 demonstram as conexões feitas para essas duas configurações.

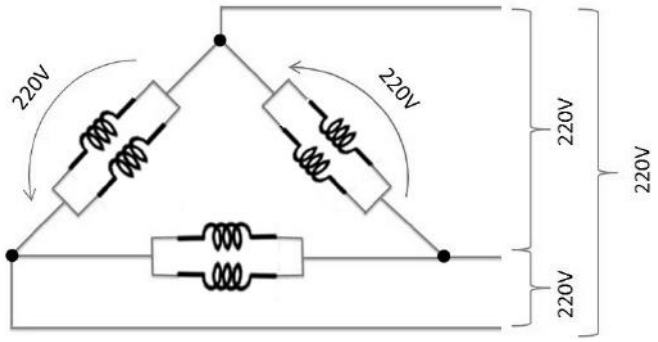


Figura 3.3: Configuração Δ-paralelo.

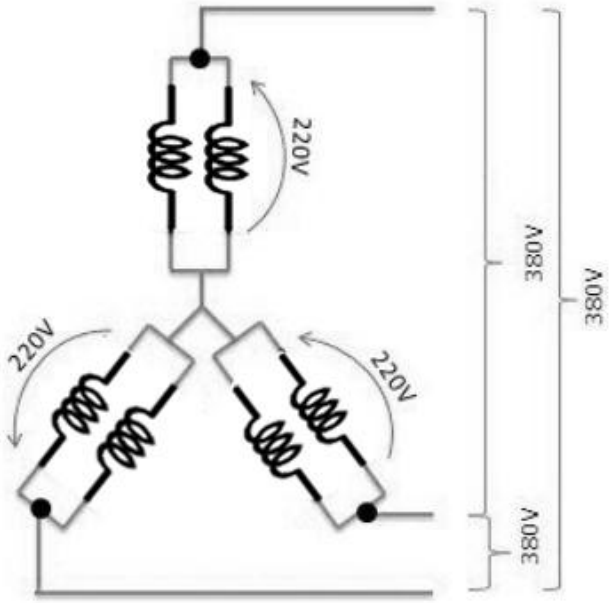


Figura 3.4: Configuração Y-paralelo.

A configuração de alimentação 440 V será a configuração delta-série; nesse caso, a tensão sob cada bobina será a própria tensão de linha dividida pelas duas bobinas, ou seja, 220 V em cada bobina.

A configuração de alimentação 760 V será a configuração estrela-série; nesse caso, a tensão em cada bobina será o valor de $(760\ /\sqrt{3})$ dividido por duas bobinas, ou seja, 220 V em cada bobina. Essa tensão de 760V só é utilizada para a partida do motor, amenizando os impactos de um dos principais problemas que encontramos na operação de máquinas de indução, que são as correntes de partida muito elevadas. Porém, esse nível de tensão não é disponibilizado usualmente, mesmo na indústria, sendo, portanto, o motor acionado usualmente em um dos três níveis de tensão menores. As figuras 3.5 e 3.6 demonstram as conexões feitas para essas duas configurações.

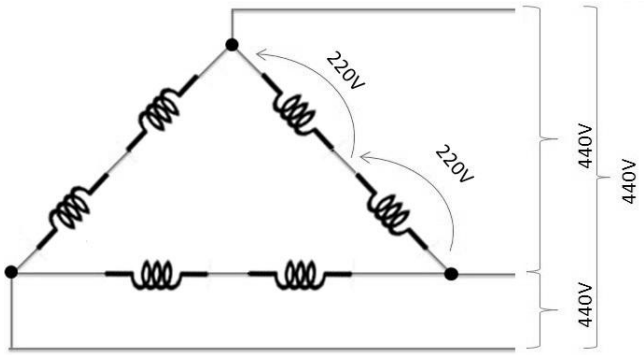


Figura 3.5: Configuração Δ-série.

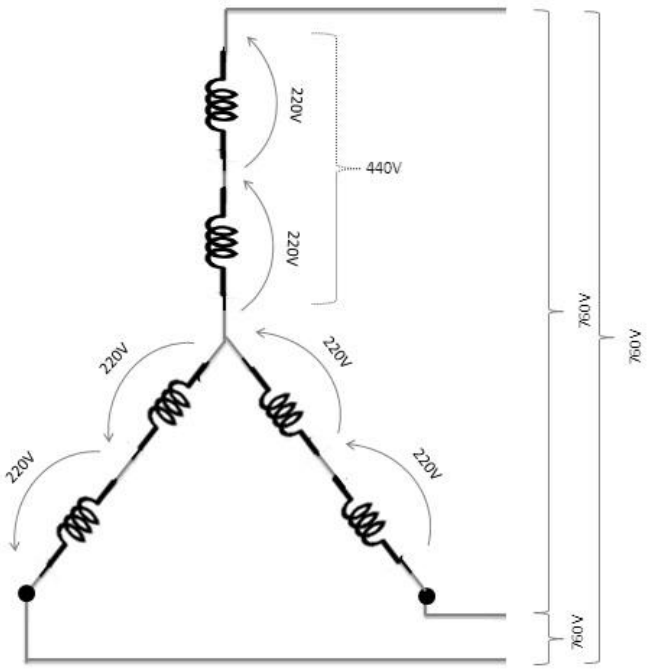


Figura 3.6: Configuração Y-série.

O torque em cada uma das configurações dos motores de 4 níveis de tensão obedece à equação 2.27, sendo, portanto, função do quadrado da tensão aplicada sobre cada bobina. Mantendo-se o valor da tensão de alimentação constante e desconsiderando-se demais alterações (como possíveis variações na dispersão ou na resistência do material condutor da máquina), os valores de torque esperados obedecem, aproximadamente, à seguinte proporção para cada configuração vista na tabela 3.1 a seguir, na qual tomamos como referência o torque encontrado na configuração Δ-paralelo. [6]

Tabela 3.1: Proporção do torque em cada configuração no motor com 4 níveis de tensão (torque da configuração Δ-paralelo é a referência)

	Proporcionalidade do Torque
Δ-paralelo	1
Y-paralelo	1/3
Δ-série	1/4
Y-série	1/12

3.5 Ligações das fases do motor Dahlander

Além da possibilidade de trabalharmos em duas configurações com número de polos distintos, as três fases de um enrolamento em ligação Dahlander podem ser agrupadas também em estrela ou triângulo, sendo que as duas bobinas de cada fase

podem ainda ser conectadas em série ou paralelo. Com isso, concluímos que temos a possibilidade de 8 configurações distintas possíveis.

Conforme já abordado na seção 3.4, se considerarmos V como a tensão de linha, pode-se montar a tabela 3.2 a seguir de tensão sobre cada bobina.

Tabela 3.2: Tensão sobre cada bobina em cada configuração, em que V é a tensão de linha.

	2n polos		n polos	
Ligação	Δ	Y	Δ	Y
Série	V/2	$V/2.\sqrt{3}$	V/2	$V/2.\sqrt{3}$
Paralelo	V	$V/\sqrt{3}$	V	$V/\sqrt{3}$

E, a partir da tabela 3.2 e da equação 2.27, pode-se montar a tabela 3.3 de fator de proporcionalidade de torque para as possíveis configurações de ligação de um motor Dahlander.

Tabela 3.3: Fator de proporcionalidade do torque em cada configuração.

	2n polos		n polos	
Ligação	Δ	Y	Δ	Y
Série	1 (a)	1/3 (c)	1/2 (b)	1/6
Paralelo	4	4/3 (b)	2	2/3 (a),(c)

Vale reparar que as proporções encontradas na 3.1 se mantêm na tabela 3.3. Ou seja, pode-se concluir que a proporcionalidade do torque para o caso de um motor de indução do tipo Dahlander é mantida para o caso de um motor de indução de 4 níveis de tensão operando com a mesma tensão de entrada (variando apenas as configurações).

Pode-se ligar o motor em todas as 8 possíveis conexões se houver acesso a todos os 12 terminais do motor. Porém, por motivos de segurança, os motores desenvolvidos pelos fabricantes costumam ter apenas 6 terminais acessíveis aos usuários, para que haja menos possibilidades do usuário realizar conexões erradas que danificarão o motor.

Dentre os 8 diferentes pares de montagem possíveis, 6 configurações são as mais utilizadas na indústria (sinalizadas na tabela 3.3 com as letras a, b e c), uma vez que as outras configurações apresentam ou uma corrente de partida muito elevada (que ocorre nas ligações triângulo-paralelo) ou um conjugado muito reduzido (que ocorre na ligação estrela-série de alta velocidade). Um esboço comparando as curvas características de cada uma dessas três configurações principais pode ser visto na

figura 3.7 a seguir [6], na qual pode-se ver as curvas de torque constante (a), potência constante (b) e torque ventilador (c).

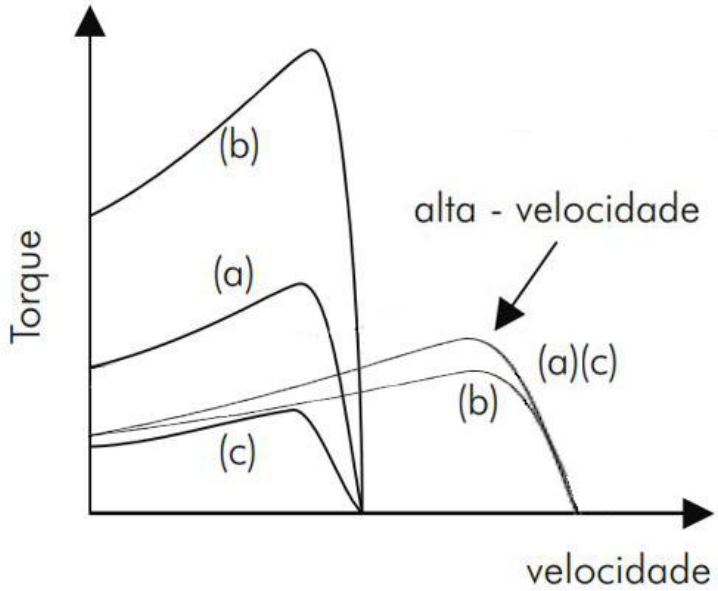


Figura 3.7: Curvas características para cada uma das configurações (a) Torque Constante (b) Potência Constante e (c) Torque Variável.

Uma observação a ser feita é que a curva em alta velocidade da configuração de potência constante não deve ser exatamente igual às curvas de alta velocidade de torque constante e torque variável, diferentemente do que é mostrado na maioria dos livros. Na realidade, as curvas devem apresentar valores seguindo as proporções mostradas na tabela 3.3.

3.6 Curvas características

3.6.1 Conjugado constante (a)

Essa configuração proporcionará uma capacidade de torque semelhante em ambas as velocidades de operação, o que não acontece nas configurações de potência constante e torque variável. Para essa configuração, as fases devem ser conectadas conforme demonstrado na figura 3.8 [6].

Se conectarmos T1, T2 e T3 às linhas de alimentação e mantivermos T4, T5 e T6 abertos, isso resultará na configuração de baixa velocidade; se conectarmos T4, T5 e T6 às linhas de alimentação e mantivermos T1, T2 e T3 conectados, isso resultará na configuração de alta velocidade. Os esboços das curvas esperadas para essa configuração podem ser vistos na figura 3.9 a seguir [6], porém respeitando as proporcionalidades mostradas na tabela 3.3.

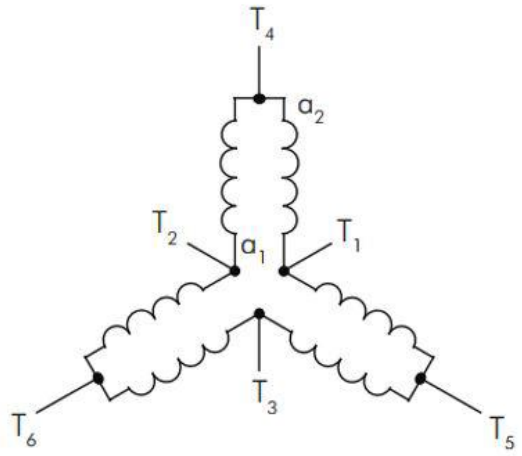


Figura 3.8: Conexão de torque constante.

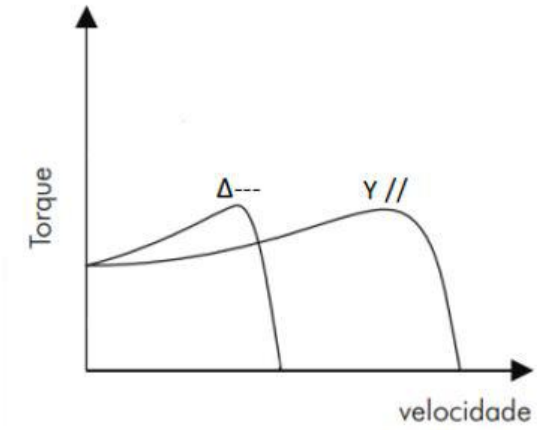


Figura 3.9: Curvas características da conexão torque constante.

3.6.2 Potência constante (b)

Nessa configuração, a potência se mostra aproximadamente constante em ambos os modos de velocidade. Quando a velocidade da máquina passa da maior para a menor, o conjugado aumenta significativamente, uma vez que se relaciona inversamente com a velocidade, conforme visto na equação 2.27. Para essa configuração, as fases devem ser conectadas conforme demonstrado na figura 3.10 a seguir [6].

Se conectarmos T1, T2 e T3 às linhas de alimentação e mantivermos T4, T5 e T6 abertos, isso resultará na configuração de alta velocidade; se conectarmos T4, T5 e T6 às linhas de alimentação e mantivermos T1, T2 e T3 conectados, isso resultará na configuração de baixa velocidade. Os esboços das curvas esperadas para essa configuração podem ser vistos na figura 3.11 a seguir [6], porém respeitando as proporcionalidades mostradas na tabela 3.3.

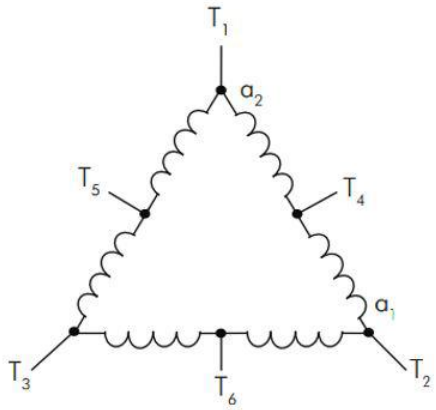


Figura 3.10: Conexão de potência constante.

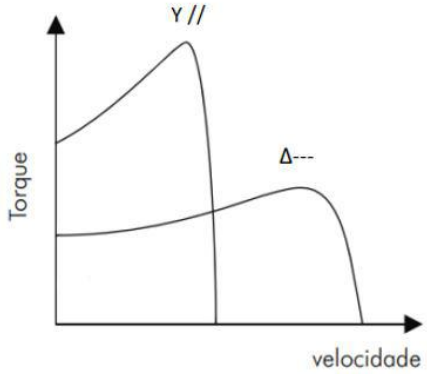


Figura 3.11: Curvas características da conexão potência constante.

3.6.3 Torque variável (ventilador) (c)

Nessa configuração, quando a velocidade da máquina passa da maior para a menor, a capacidade de conjugado aumenta significativamente, uma vez que se relaciona inversamente com a velocidade, conforme visto na equação 2.27. Para essa configuração, as fases devem ser conectadas conforme demonstrado na figura 3.12 [6].

Se conectarmos T1, T2 e T3 às linhas de alimentação e mantivermos T4, T5 e T6 abertos, isso resultará na configuração de baixa velocidade; se conectarmos T4, T5 e T6 às linhas de alimentação e mantivermos T1, T2 e T3 conectados, isso resultará na configuração de alta velocidade.

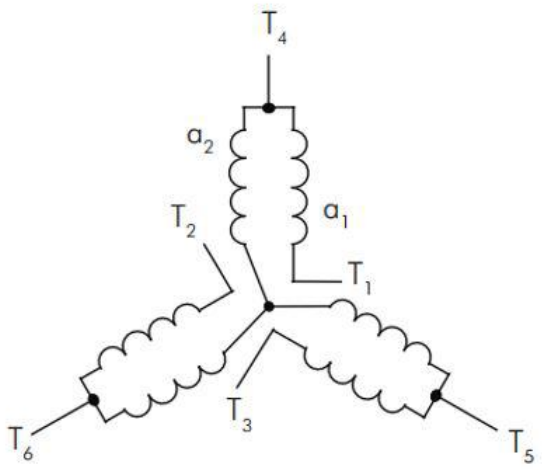


Figura 3.12: Conexão de torque variável (ventilador).

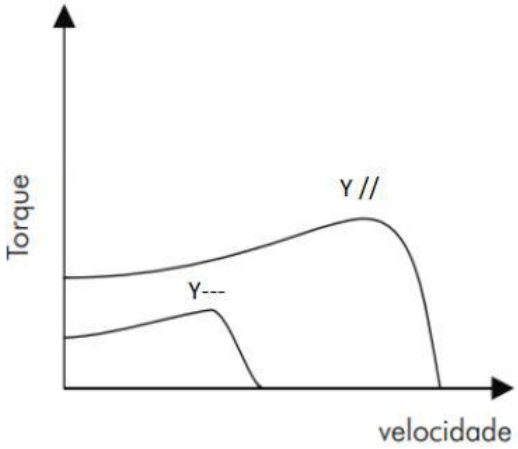


Figura 3.13: Curvas características da conexão torque variável (ventilador).

As curvas das figuras 3.8, 3.10 e 3.12 e as tabelas 3.1 e 3.3 serão comparadas com os resultados encontrados pelo procedimento experimental no capítulo 5.

No capítulo 4, a seguir, é apresentado o método experimental adotado para se encontrar as curvas desejadas, além de uma descrição detalhada de todos os equipamentos utilizados no processo.

Capítulo 4

Procedimento experimental

4.1 Método experimental utilizado

O método utilizado para traçar as curvas de torque x velocidade do motor Dahlander se baseia no acoplamento do eixo do motor de indução a um gerador de corrente contínua de excitação independente. Pode-se variar a carga no eixo do motor através de um banco de resistores (R) ou através do campo de excitação (ϕ).

A bancada de testes pode ser vista na figura 4.1 , enquanto que um modelo desenhado dessa bancada pode ser visto na figura 4.2 a seguir [6]. Pode-se ver um esquemático também do circuito equivalente de um gerador de corrente contínua (operando em regime permanente) com uma carga resistiva R na figura 4.3.

Figura 4.1: Bancada de teste com acoplamento motor-gerador CC.

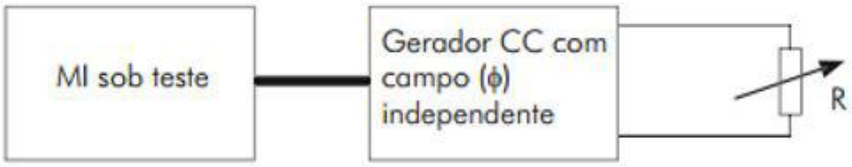


Figura 4.2: Esquema de uma bancada de teste para motores de indução (MI).

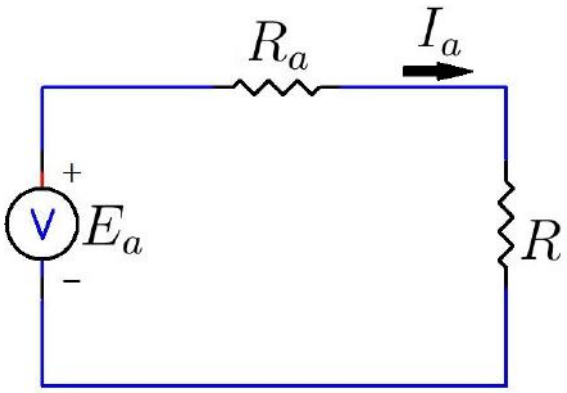


Figura 4.3: Esquemático do circuito equivalente da
bancada de teste (gerador acoplado como carga no MI).

Pode-se calcular as tensões desse circuito através da equação 4.1 a seguir.

$$E_a = (R_a + R).I_a \tag{4.1}$$

Em que:
- E_a é a força eletromotriz
- R_a é a resistência de armadura
- R é a carga resistiva
- I_a é a corrente de armadura

Pode-se também calcular as grandezas de torque e de força eletromotriz no gerador de corrente contínua através das equações 4.2 e 4.3 a seguir.

$$E_a = k_w.\varphi.\Omega \tag{4.2}$$

$$T = k_t.\varphi.I_a \tag{4.3}$$

Em que:
- k_w e k_t são constantes que dependem das características da máquina
- φ é o fluxo magnético
- Ω é a velocidade de rotação da máquina de corrente contínua
- T é o torque no eixo da máquina

Substituindo-se a equação 4.2 na equação 4.1 e fazendo as devidas alterações algébricas, chegamos à equação 4.4 a seguir.

$$I_a = \frac{k_w.\varphi}{(R_a + R)}.\Omega \tag{4.4}$$

Pode-se ainda substituir a equação 4.4 na equação 4.3, que nos dá a equação 4.5 a seguir.

$$T = \frac{k_t.k_w.\varphi^2}{(R_a + R)}.\Omega \tag{4.5}$$

Analisando a equação 4.5, pode-se perceber que o torque de carga exigido pelo gerador CC varia linearmente com a sua velocidade, para valores de R e φ constantes.

Além disso, percebemos que também pode-se alterar esse valor de carga exigido pelo motor variando a carga resistiva do gerador ou, então, o fluxo de campo desse. A alteração dos valores de qualquer uma dessas duas grandezas provocará uma variação no coeficiente angular da curva de torque do gerador.

Precisamos, então, encontrar um ponto de operação, que será caracterizado pela interseção entre a curva de torque do motor e a curva de carga do gerador. Pode-se observar, na figura 4.4, um esboço desses valores, com os valores possíveis para torque x velocidade no gerador nas retas e os valores possíveis para torque x velocidade no motor na curva.

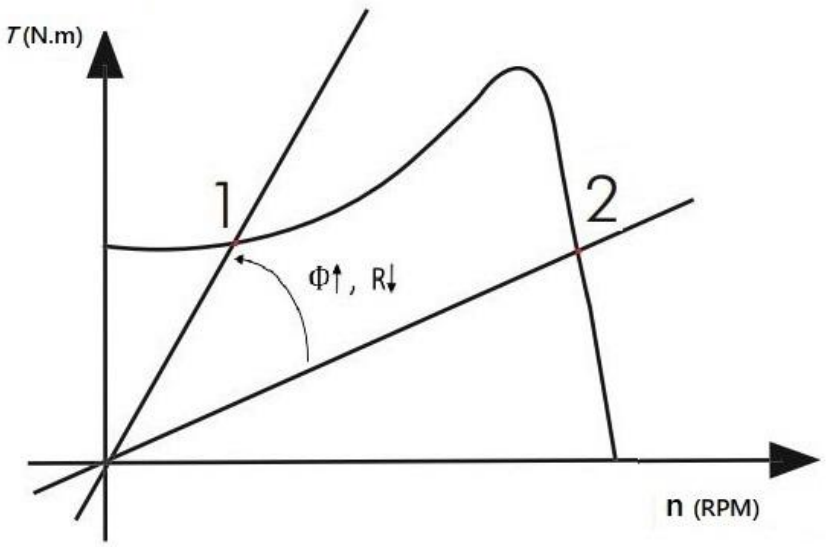


Figura 4.4: Curvas típicas de torque × velocidade de um motor de indução e de um gerador de corrente contínua.

O acoplamento gerador-motor funciona de maneira estável na interseção dessas curvas, que podem ser vistas nos pontos 1 e 2 da figura 4.4. Entretanto, a operação do sistema no ponto 1 é desaconselhável, uma vez que nesse ponto há um escorregamento muito elevado, o que resulta em correntes elevadas no rotor, conforme pode-se ver comparando-se as curvas de torque × velocidade e corrente × velocidade na figura 4.5 a seguir.

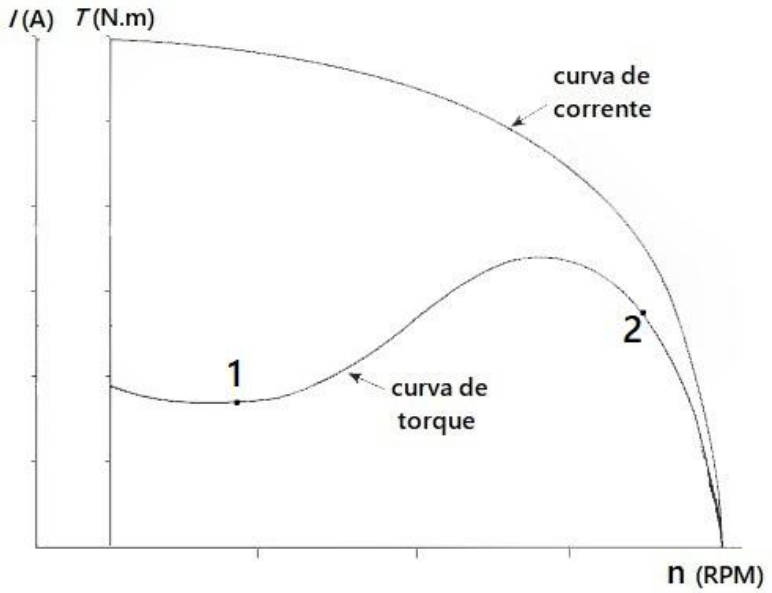


Figura 4.5: Curvas típicas de torque × velocidade e corrente × velocidade em um motor de indução.

O motor é então acionado inicialmente a vazio, introduzindo-se gradualmente as resistências e/ou aumentando o fluxo de campo no gerador CC para que atinjamos os pontos da curva do motor mais próximos do ponto de operação em 2.

As medições foram feitas até os valores de torque máximo de cada curva, para que não haja correntes excessivamente elevadas (figura 4.5).

Um amperímetro foi utilizado para que fossem monitorados os valores de corrente, a fim de que não se atinja valores excessivos que possam danificar o motor.

A seguir, serão apresentados os equipamentos utilizados durante o procedimento experimental proposto neste trabalho.

4.2 Equipamentos utilizados

4.2.1 Motor Dahlander utilizado

O motor de indução utilizado para o experimento é o motor de indução do tipo Dahlander W22 Premium, da WEG S.A., disponível no LABMAQ.

Seus dados de placa e foto encontram-se na tabela 4.1 e nas figuras 4.6 e 4.7 a seguir.

Tabela 4.1: Dados de placa do motor utilizado.

WEG S.A.	
MOTOR DE INDUÇÃO - ROTOR TIPO GAIOLA	
MODELO:	W22 Premium 15574376
POTÊNCIA:	2,20 (3,00) kW
TENSÃO:	220/380/440 V
CORRENTE:	7,77/4,50/3,89 A
VELOCIDADE:	3487 RPM
FS:	1,00
FREQUÊNCIA:	60 Hz
FP:	0.89
RENDIMENTO:	83,5%
ISOLAMENTO:	F
AMB:	40 °C
CAT:	N
IP:	55
REGS2:	60 minutos
DT:	80 K
IP/IN:	7,0
ALT:	1000
PESO:	35 kg

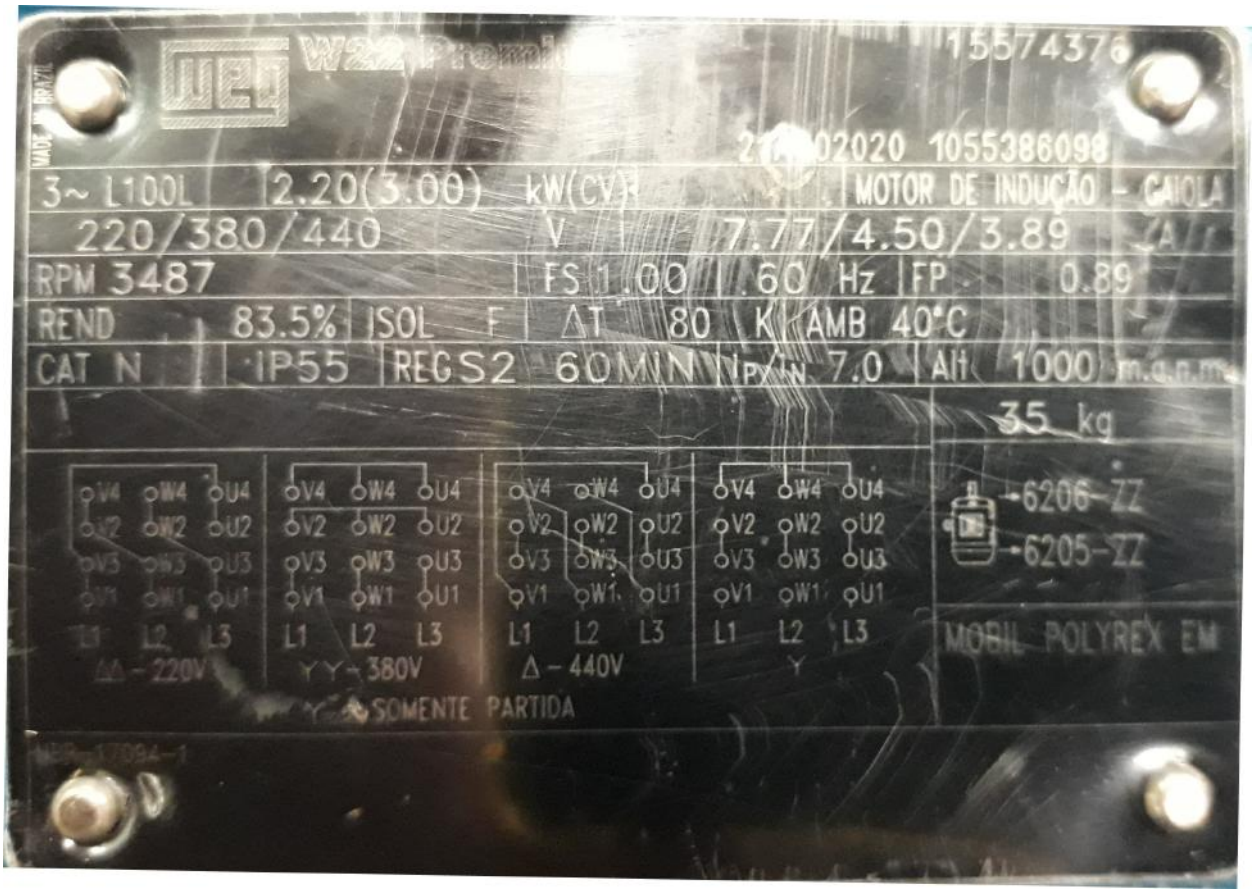


Figura 4.6: Dados de placa do motor utilizado (4 Níveis de Tensão).

Figura 4.7: Dados de placa do motor utilizado (Dahlander).

Esse motor se particulariza por dar acesso a 12 terminais, diferentemente do modelo do Dahlander tradicional, que usualmente disponibilizaria apenas 6 terminais. Isso é geralmente feito dessa forma para que não haja erros consideráveis de conexão por parte do operador que venham a danificar a máquina.

Uma vez que temos acesso aos 12 terminais, esse motor também opera em 4 níveis de tensão diferentes (220. 380. 440 e 760 V). A tensão de 760 V, que é obtida na configuração estrela-série, só é utilizada para a partida do motor. Porém, essa tensão de 760 V não é disponibilizada usualmente, mesmo na indústria, sendo, portanto, o motor acionado usualmente em um dos três níveis de tensão menores, conforme já dito anteriormente.

A operação como um motor de 4 níveis de tensão é em 2 polos (velocidade

síncrona de 3600 RPM). Já as configurações de tipo Dahlander são alimentadas sempre em 380V, de acordo com o indicado na placa do motor. Os motores com configuração Dahlander já são, em geral, mais caros na indústria; esse motor, porém, com acesso aos 12 terminais, teria um preço ainda mais elevado, uma vez que foi um motor feito manualmente. Por conta disso, esse motor não possui um real interesse industrial; porém tem um interesse didático.

Diversos testes foram realizados com o motor seguindo as instruções de conexões indicadas pelas placas. O resultado da configuração estrela-série para o motor Dahlander (motor com configuração torque variável em baixa velocidade – 4 polos), porém, não mostrou um resultado condizente com o esperado de acordo com a placa. O resultado deveria ser da máquina funcionando em 4 polos, mas o resultado prático foi de 2 polos.

Comparando os dados das placas do motor Dahlander (figura 4.7) e do motor de 4 níveis de tensão (figura 4.6), pode-se perceber que há a inversão do sentido da corrente em uma (e somente uma) bobina de cada fase, alterando o número de polos. Porém, na configuração estrela-série, foram invertidas as correntes que passam nas duas bobinas de cada fase, não havendo, portanto, mudança no número de polos da máquina. Tal comparação pode ser vista nas figuras esquemáticas 4.8 e 4.9 a seguir.

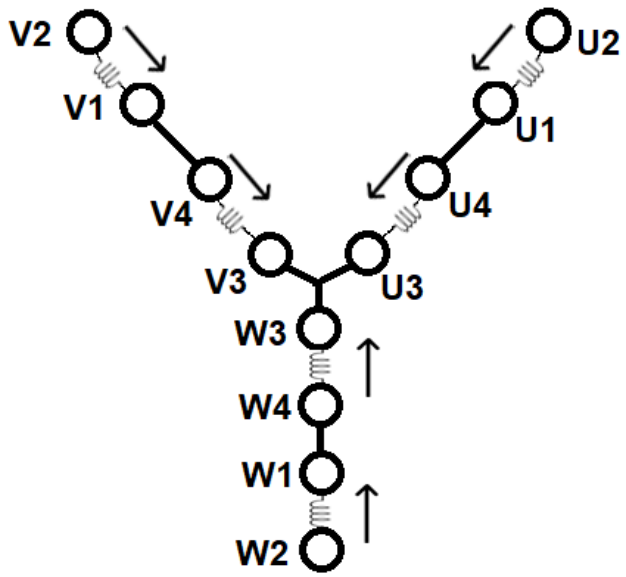


Figura 4.8: Configuração Y-série na placa "Dahlander"do motor utilizado.

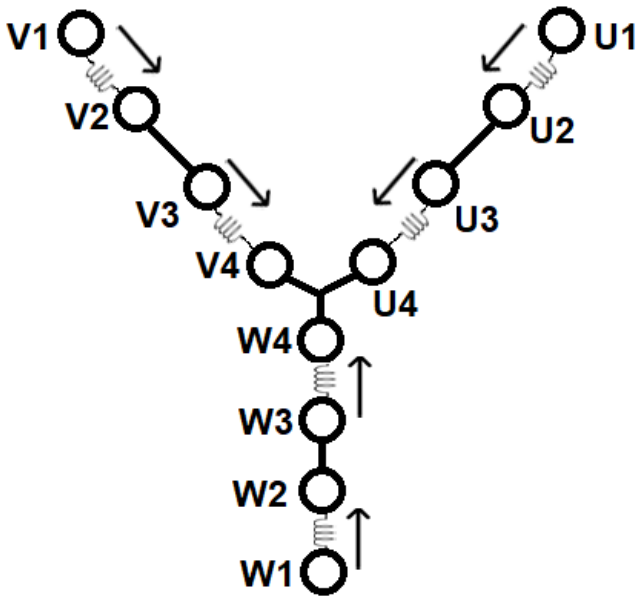


Figura 4.9: Configuração Y-série na placa "4 Níveis de Tensão"do motor utilizado.

Tal erro pode ser explicado justamente pelo fato de a placa do motor Dahlander ter sido feita fora de uma linha de produção, estando, portanto, mais suscetível a erros. A nova proposta, então, invertendo o sentido apenas de uma das bobinas de cada fase, pode ser vista nas figuras 4.10 e 4.11 a seguir.

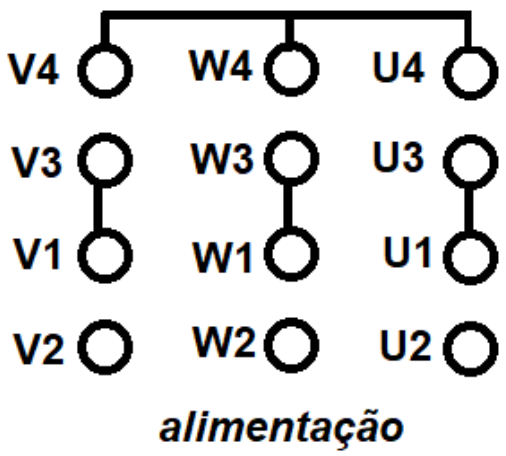


Figura 4.10: Nova configuração proposta para placa "Dahlander"do motor utilizado.

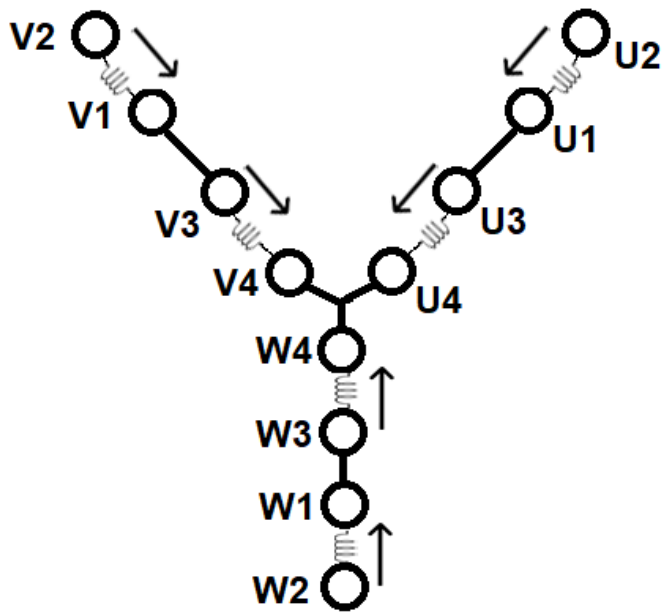


Figura 4.11: Nova configuração proposta para placa "Dahlander"do motor utilizado.

Os dados do motor utilizado, fornecidos pela própria WEG, encontram-se nos anexos a esse trabalho. Os dados para o motor com configuração para os 4 níveis de tensão encontram-se na seção anexa Configuração 4 níveis de tensão ; os dados para o motor com configurações Dahlander se encontram nas seções anexas Configuração Torque Constante , Configuração Potência Constante e Configuração Torque Ventilador. Esses dados podem ainda ser vistos condensados nas tabelas 4.2 e 4.3 a seguir, nas quais μ é o rendimento da máquina.

Dentre esses dados, os das correntes nominais para cada configuração estão, ainda, expostos também na tabela 4.4 a seguir e, através deles, foi possível deduzir a corrente nominal que circula em cada enrolamento. Os experimentos foram realizados tentando ao máximo não ultrapassar essas correntes nominais em cada bobina, para que não haja dano no motor.

Tabela 4.2: Dados do motor fornecidos pela WEG
para a configuração de 4 níveis de tensão.

	4 Níveis de Tensão
Tensão (V)	220 / 380 / 440 / 760
Polos	2
Potência$_{nom}$ (kW)	2,2
Torque$_{nom}$ $(N.m)$	6,03
n_{nom} (RPM)	3487
s_{nom} $(\%)$	3,14
I_{nom} (A)	7,8 / 4,5 / 3,9
I_p/I_{nom}	6,5
I_{vazio} (A)	2,1 / 1,2 / 1,0
$\mu_{25\%}$	74,6
$\mu_{50\%}$	82,0
$\mu_{75\%}$	83,0
$\mu_{100\%}$	83,5
$cos(\phi)_{25\%}$	0,63
$cos(\phi)_{50\%}$	0,81
$cos(\phi)_{75\%}$	0,88
$cos(\phi)_{100\%}$	0,89

Tabela 4.3: Dados do motor fornecidos pela WEG
para a configuração Dahlander.

	Torque Constante		**Potência Constante**		**Torque Ventilador**	
Tensão (V)	380		380		380	
Polos	4	2	4	2	4	2
Potência$_{nom}$ (kW)	1,1	2,2	2,2	2,2	0,6	2,2
Torque$_{nom}$ $(N.m)$	5,99	6,03	12,2	6,12	3,02	6,03
n_{nom} (RPM)	1756	3487	1726	3435	1741	3487
s_{nom} $(\%)$	2,44	3,14	4,11	4,58	3,28	3,14
I_{nom} (A)	3,26	4,50	5,66	4,57	1,42	4,50
I_p/I_{nom}	6,8	6,5	5,5	5,4	5,2	9,5
I_{vazio} (A)	2,50	1,20	3,60	0,90	0,80	1,20
$\mu_{25\%}$	57,5	74,7	63,3	74,2	64,2	74,7
$\mu_{50\%}$	79,5	82,0	80,0	79,5	80,0	82,0
$\mu_{75\%}$	83,0	83,0	82,0	80,0	82,0	83,0
$\mu_{100\%}$	84,0	83,5	82,0	80,3	82,0	83,5
$cos(\phi)_{25\%}$	0,30	0,63	0,37	0,70	0,40	0,63
$cos(\phi)_{50\%}$	0,42	0,81	0,53	0,86	0,56	0,81
$cos(\phi)_{75\%}$	0,54	0,88	0,66	0,89	0,68	0,88
$cos(\phi)_{100\%}$	0,61	0,89	0,72	0,91	0,71	0,89

Tabela 4.4: Correntes nominais no motor utilizado.

	CONFIGURAÇÃO			
	D-paralelo	**Y-paralelo**	**D-série**	**Y-série**
Corrente nominal (A)	7,77	4,50	3,88	2,25
Corrente em cada bobina (A)	2,25	2,25	2,25	2,25

4.2.2 Dinanômetro de 10 HP

A carga do motor é um dinamômetro constituído por um gerador de corrente contínua de excitação independente ligado a uma balança. A placa desse gerador CC está apresentada na tabela 4.5 e na figura 4.12. O gerador pode ser visto na figura 4.13 e a balança na figura 4.14.

Tabela 4.5: Dados da placa do dinamômetro de 10 HP.

MAWDSLEY'S LTD			
TO BSS: 2613757		**INSULATION CLASS:** E	
ENCL: SP		RATING: **CONT**	**YEAR:** 1969
COMPD GENERATOR		**SHUNT COMPD MOTOR**	
VOLTS: 110	**AMPS:** 55	**VOLTS:** 125	**AMPS**: 55
kW: 6	**RPM:** 1800/3000	**HP:** 75	**RPM:** 1800/3000
TO ABSORB: 10 HP			
TORQUE ARM RADICUS: 15,75//		**EXC. VOLTS (IF SEP. EXC):** 125	
$HP = \frac{INDICATORREADING \times RPM}{4000}$			

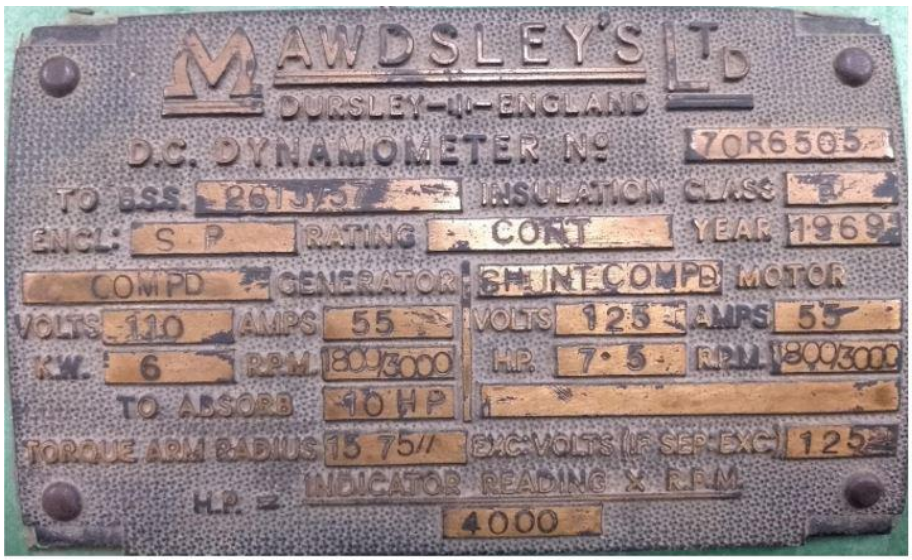


Figura 4.12: Placa do dinamômetro de 10 HP.

Figura 4.13: Dinamômetro de 10 HP utilizado.

Figura 4.14: Balança conectada ao gerador CC que constitui o dinamômetro.

O estator do gerador não está diretamente fixado à bancada, uma vez que queremos que o torque seja medido. Porém, há um suporte que fixa os mancais, o que permite o estator ficar livre para girar, com apenas os mancais presos à bancada. A medição da força aplicada é feita através de uma balança conectada à sua carcaça; o conjunto composto pelo gerador e pela balança é denominado dinamômetro.

Na carcaça do gerador de corrente contínua há uma balança, conforme visto na figura 4.14. Ela apresenta medição de grandeza na unidade de libra-força (lbf). Pode-se utilizar, então, a fórmula mostrada na própria placa do gerador para obtermos o valor da potência em HP, conforme visto na figura 4.12.

Porém, é interessante que trabalhemos com a unidade de Newton-metros ($N.m$). Para isso, lembramos que o torque medido em $N.m$ se relaciona com a potência em Watts através da seguinte equação 4.6:

$$T(N.m) = \frac{P(W)}{\Omega(rad/s)} = \frac{P(W)}{\Omega(RPM)}.\frac{30}{\pi} \tag{4.6}$$

Lembramos também que $1HP = 745,7W$ e, com base na equação informada na placa (figura 4.12) e utilizando a equação 4.6 acima, pode-se fazer as seguintes manipulações algébricas:

$$P(HP) = \frac{F(lbf) \times \Omega(RPM)}{4000} \tag{4.7}$$

$$P(W) = P(HP) \times 745,7 = \frac{F(lbf) \times \Omega(RPM) \times 745,7}{4000} \tag{4.8}$$

$$T(N.m) = \frac{P(W)}{\Omega(RPM)}.\frac{30}{\pi} = \frac{F(lbf) \times 745,7}{4000}.\frac{30}{\pi} \tag{4.9}$$

Que nos leva, finalmente, à seguinte equação 4.10:

$$T(N.m) = F(lbf) \times 1,78 \tag{4.10}$$

O reostato, mostrado na figura 4.15, é ligado ao circuito de armadura do gerador de corrente contínua da figura 4.13. Ele permite alterar o valor da resistência do circuito esquemático exemplificado na figura 4.2, além de permitir também uma alteração no campo do gerador de excitação independente.

Tais variações fazem com que o coeficiente angular da curva de torque do gerador também varie, conforme visto na figura 4.4.

Figura 4.15: Reostato e banco de resistores utilizados no experimento.

4.2.3 Autotransformador variável

Foi utilizado ainda um autotransformador variável (figura 4.16) para que tenhamos um controle maior da tensão alimentando o motor de indução. O autotransformador variável nos permite ir variando lentamente a tensão na partida do motor, evitando assim uma mudança brusca na tensão de alimentação do motor durante a sua partida.

Por motivos de disponibilidade no laboratório, o autotransformador variável não foi acionado em uma tensão superior a 220 V, sendo essa a tensão aplicada em todos os experimentos abordados ao longo desse trabalho. Com isso, algumas configurações do motor não atingiram suas velocidades nominais, já que foram alimentados com tensão abaixo da nominal também.

Figura 4.16: Autotransformador variável utilizado no experimento.

4.2.4 Tacômetro e amperímetro

Foram utilizados também um tacômetro óptico (figura 4.17), modelo Minipa MDT-2238ª, para medir o número de rotações por minutos do motor, e um amperímetro (figura 4.18) para medir a corrente circulante no motor, a fim de evitar sobrecargas e superaquecimentos que danificassem o motor.

Figura 4.17: Tacômetro óptico utilizado no experimento.

Figura 4.18: Amperímetro utilizado no experimento.

Capítulo 5

Resultados obtidos

Utilizando o método experimental descrito no item 4.1, obtivemos os dados mostrados nessa seção. A tensão de alimentação utilizada em todas as obtenções de dados foi de 220 V.

5.1 Configuração tipo Dahlander

5.1.1 Torque constante

Os dados para a configuração torque constante em baixa velocidade (4 polos) se encontram na tabela 5.1 a seguir. Os dados para a configuração torque constante em alta velocidade (2 polos) se encontram na tabela 5.2 a seguir.

Tabela 5.1: Dados de torque, corrente e velocidade obtidos na configuração torque constante de baixa velocidade.

Velocidade (RPM)	**Corrente (A)**	**Torque (lbf)**	**Torque (N.m)**
1772	1,82	0,5	0,89
1748	2,3	1,0	1,78
1722	2,9	1,50	2,67
1691	3,6	2,0	3,56
1542	6,0	3,0	5,34

Tabela 5.2: Dados de torque, corrente e velocidade obtidos na configuração torque constante de alta velocidade.

Velocidade (RPM)	**Corrente (A)**	**Torque (lbf)**	**Torque (N.m)**
3483	2,9	0,6	1,068
3420	3,8	1,0	1,78
3335	5,2	1,5	2,67
3180	7,0	2,0	3,56
2848	9,5	2,1	3,738

5.1.2 Potencia constante

Os dados para a configuração potência constante em baixa velocidade (4 polos) se encontram na tabela 5.3 a seguir. Os dados para a configuração potência constante em alta velocidade (2 polos) se encontram na tabela 5.4 a seguir.

Tabela 5.3: Dados de torque, corrente e velocidade obtidos na configuração potência constante de baixa velocidade.

Velocidade (RPM)	**Corrente (A)**	**Torque (lbf)**	**Torque (N.m)**
1761	2,6	1,0	1,78
1740	3,16	1,5	2,67
1722	3,7	2,0	3,56
1678	2,0	3,0	5,34
1490	3,20	4,2	7,476

Tabela 5.4: Dados de torque, corrente e velocidade obtidos na configuração potência constante de alta velocidade.

Velocidade (RPM)	**Corrente (A)**	**Torque (lbf)**	**Torque (N.m)**
3404	1,16	0,6	1,068
3295	4,0	1,0	1,78
3092	5,6	1,4	2,492

5.1.3 Torque variável (ventilador)

Os dados para a configuração torque variável em baixa velocidade (4 polos) se encontram na tabela 5.5 a seguir. Os dados para a configuração torque variável em alta velocidade (2 polos) se encontram na tabela 5.6 a seguir. Na configuração torque ventilador em baixa velocidade, a corrente não apresentou valores acima do valor nominal, o que nos permitiu coletar pontos na região à esquerda do valor de torque máximo.

Tabela 5.5: Dados de torque, corrente e velocidade obtidos na configuração torque ventilador de baixa velocidade.

Velocidade (RPM)	**Corrente (A)**	**Torque (lbf)**	**Torque (N.m)**
500	1,3	0,35	0,623
1540	0,85	0,4	0,712
1556	0,84	0,45	0,8
1567	0,83	0,47	0,836
1570	0,82	0,48	0,854
1577	0,83	0,49	0,872
1600	0,80	0,5	0,89
1633	0,68	0,4	0,712
1666	0,6	0,3	0,534
1733	0,381	0,15	0,267

Tabela 5.6: Dados de torque, corrente e velocidade obtidos na configuração torque ventilador de alta velocidade.

Velocidade (RPM)	**Corrente (A)**	**Torque (lbf)**	**Torque (N.m)**
3480	2,95	0,6	1,068
3413	3,9	1,0	1,78
3303	5,4	1,5	2,67
3158	7,2	2,0	3,56
3023	8,2	2,1	3,738

5.1.4 Análise dos resultados encontrados

Os dados das tabelas foram plotados utilizando o software MatLab e as curvas encontradas podem ser vistas na figura 5.1 a seguir, cuja legenda encontra-se de maneira ampliada na figura 5.2.

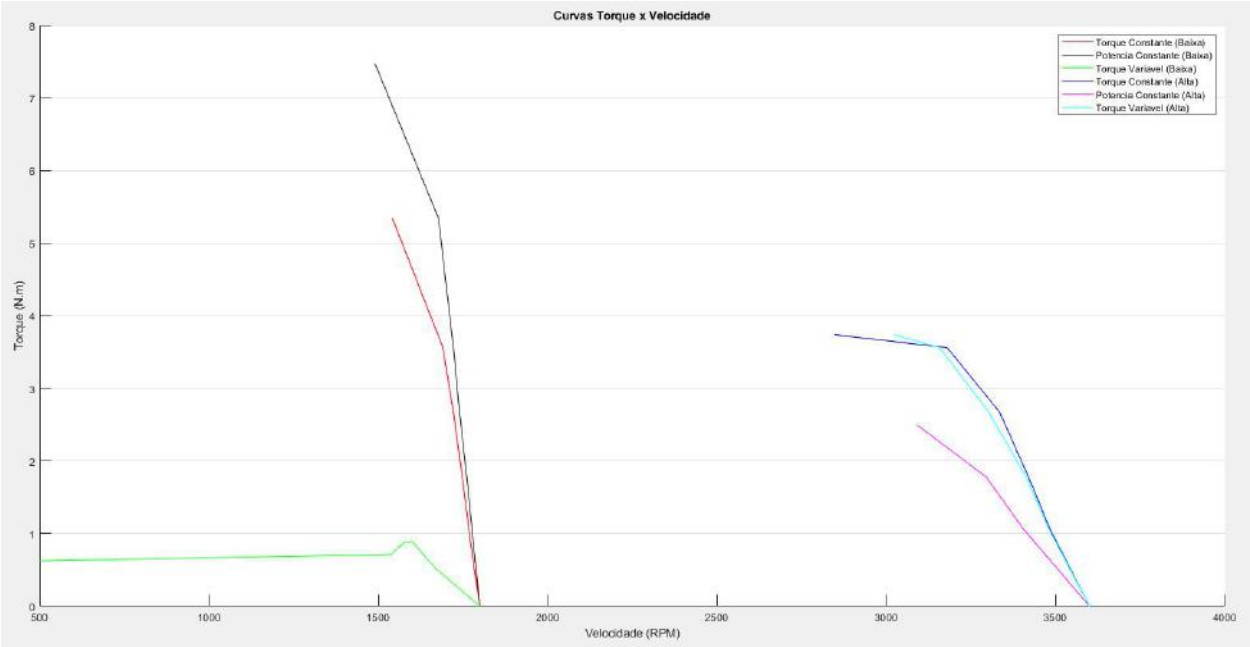


Figura 5.1: Curvas de torque × velocidade plotados com os dados obtidos (baixas e altas velocidades).

Figura 5.2: Legenda ampliada das curvas de torque × velocidade.

Os resultados encontrados serão analisados, primeiramente, de maneira qualitativa segundo a figura 3.7 e, posteriormente, de maneira quantitativa segundo a tabela 3.3.

As curvas encontradas na figura 5.1 apresentaram o resultado esperado quando comparada à figura 3.7. Percebe-se que, nas curvas de menor velocidade (4 polos), o torque máximo encontrado para a configuração de potência constante apresentou o maior torque das três curvas, enquanto que a configuração de torque variável apresentou o menor torque máximo das três, o que era o esperado. Quanto às curvas de alta velocidade (2 polos), pode-se notar que as curvas das configurações de torque constante e torque variável se encontram bastante próximas, conforme o esperado.

Analisando-se quantitativamente, em comparação com a tabela 3.3, se colocarmos como referencial o valor encontrado para o torque máximo na configuração potência constante em baixa velocidade, os resultados esperados podem ser comparados com os obtidos segundo a tabela 5.7 a seguir.

Tabela 5.7: Comparação de proporcionalidade esperada nos valores teóricos e nos valores obtidos no experimento.

	4 polos		**2 polos**	
	Esperado	**Medido**	**Esperado**	**Medido**
Torque constante	1	1	2/3	2,1/3
Potência constante	4/3	4,2/3	1/2	0,93/2
Torque variável	1/3	0,5/3	2/3	2,1/3

Conforme pode-se analisar, os resultados tiveram diferenças muito pequenas comparadas aos valores esperados. O único resultado que apresentou uma discrepância relevante em relação ao esperado foi o de torque máximo encontrado para a configuração de torque variável em baixa velocidade. O resultado esperado seria em torno de 1,78 $N.m$, porém o resultado medido foi de apenas 0,89 $N.m$, apresentando um erro relativo de 50%.

Os valores teóricos esperados foram calculados considerando-se algumas aproximações, como por exemplo uma dispersão constante, o que faz com que o torque seja aproximadamente proporcional ao quadrado da tensão aplicada a cada bobina e ao número de polos.

Além disso, também foram consideradas que a tensão em cada bobina era a própria tensão de linha aplicada (configurações em delta) ou a tensão de linha aplicada dividida por $\sqrt{3}$ (configurações em estrela). Porém, na prática, há perdas nas resistências que influenciam nas tensões sobre as bobinas, que não foram consideradas nesse modelo teórico.

Portanto, uma hipótese para o erro na configuração torque variável em baixa velocidade pode ser a de que tais perdas começam a ter maior influência nas tensões nas bobinas.

Pode-se comparar, ainda, os dados encontrados para o torque máximo com os dados de torque do motor fornecidos pela WEG (Configuração Torque Constante , Configuração Potência Constante e Configuração Torque Ventilador). Com isso, os dados das configurações Torque Constante, Potência Constante e Torque Ventilador podem ser comparados com os dados encontrados no experimento através das tabelas 5.8 , 5.9 e 5.10 , respectivamente.

Tabela 5.8: Comparação dos valores dados pela WEG e os encontrados no experimento para a configuração Torque Constante.

	Torque Constante				**Medidos**	
Tensão (V)	380		220		220	
Polos	4	2	4	2	4	2
Torque nominal (N.m)	5,99	6,03	2,0	2,02	-	
Torque máximo (N.m)	22,762	18,693	7,6	6,26	5,34	3,738

Tabela 5.9: Comparação dos valores dados pela WEG e os encontrados no experimento para a configuração Potência Constante.

	Potência Constante				**Medidos**	
Tensão (V)	380		220		220	
Polos	4	2	4	2	4	2
Torque nominal (N.m)	12,2	6,12	4,089	2,051	-	
Torque máximo (N.m)	31,72	13,464	10,632	4,512	7,476	2,492

Tabela 5.10: Comparação dos valores dados pela WEG e os encontrados no experimento para a configuração Torque Ventilador.

	Torque Ventilador				**Medidos**	
Tensão (V)	380		220		220	
Polos	4	2	4	2	4	2
Torque nominal (N.m)	3,02	6,03	1,012	2,021	-	
Torque máximo (N.m)	7,55	18,693	2,53	6,265	0,872	3,738

De forma qualitativa, pode-se perceber que os valores respeitaram os resultados esperados e obedecem a uma proporção bastante próxima à proporção proposta pelos dados da WEG. O caso com uma maior distância do esperado é, novamente, o caso da configuração de torque ventilador, na tabela 5.10.

As diferenças quantitativas encontradas entre os dados obtidos e os fornecidos pela WEG podem ser explicadas por diferentes aspectos. O primeiro que pode-se destacar seria o fato de os valores fornecidos pela WEG resultarem de cálculos analíticos empregados no projeto de máquinas, não sendo, portanto, valores experimentais, como é o caso dos dados obtidos neste trabalho.

O segundo fator que pode ter influenciado nos dados obtidos e expostos ao longo desse trabalho é que os equipamentos de medição do LABMAQ da UFRJ (incluindo o dinamômetro utilizado no procedimento experimental) não passaram por uma calibração ou manutenção oficiais (ou seja, realizadas por algum órgão oficial, como o INMETRO). Isso se deve ao fato de que esses procedimentos de calibração e manutenção são bastante custosos; normalmente, laboratórios que possuem certificação do INMETRO prestam serviços diversos e cobram por esses serviços, conseguindo, portanto, dinheiro para manter os serviços de rastreamento do INMETRO.

O LABMAQ e a maior parte dos outros laboratórios do Departamento de Engenharia Elétrica (DEE) da UFRJ têm se dedicado nos últimos anos quase que exclusivamente a atividades pedagógicas que objetivam apenas a formação dos alunos do curso de engenharia elétrica, tendo pouco espaço para a realização de atividades que objetivem o desenvolvimento de novas tecnologias ou com fins lucrativos em parceria com a indústria.

5.2 Configuração 4 níveis de tensão

Também foram feitos testes para as conexões do motor de 4 níveis de tensão, seguindo as configurações indicadas pela placa (figura 4.6).

Uma vez que essas configurações não são o objetivo deste trabalho, o intuito principal seria apenas verificar se as configurações operariam em 2 polos. Os dados coletados para cada configuração encontram-se na tabela 5.11 a seguir. Porém, também foram coletados dados de torque máximo em cada uma das configurações, a fim de se comparar os dados obtidos com os dados fornecidos pela WEG (tabela 5.12). Todas as configurações foram alimentadas com 220V.

Assim como feito na seção anterior, pode-se converter os valores fornecidos pela WEG (Configuração 4 níveis de tensão) e compararmos com os valores encontrados no experimento. Tal comparação pode ser vista na tabela 5.12 a seguir.

Tabela 5.11: Valores de velocidade e corrente encontrados para as configurações de 4 níveis de tensão.

	Velocidade (RPM)	**Corrente (A)**
Δ-paralelo	3575	3,1
Y-paralelo	3519	2,0
Δ-série	3489	1,8
Y-série	3249	1,87

Tabela 5.12: Comparação dos valores dados pela WEG e os encontrados no experimento para as configurações de 4 níveis de tensão.

	4 Níveis de Tensão	**Medidos**
Tensão (V)	220	220
Polos	2	2
Torque nominal (N.m)	6,03 / 2,021 / 1,508 / 0,505	-
Torque máximo (N.m)	18,693 / 6,266 / 4,675 / 1,566	14,24 / 4,984 / 4,094 / 1,78

Analisando os resultados encontrados, chegamos à mesma conclusão que na seção anterior: proporcionalmente, os resultados correspondem ao esperado, apesar de haver diferenças quantitativas. As diferenças entre os valores encontrados e os fornecidos pela WEG poderiam ser explicadas pelos mesmos motivos citados na seção anterior também.

Capítulo 6

Conclusão

O experimento concluiu com sucesso que o motor de indução do tipo Dahlander W22 Premium, da WEG S.A., disponível no LABMAQ do DEE da UFRJ, apresenta as curvas características conforme esperado pela teoria dos motores do tipo Dahlander. O experimento também concluiu que o motor opera com 2 polos nas configurações de um motor de 4 níveis de tensão, conforme o esperado. As diferenças entre os resultados encontrados e os resultados esperados (teóricos e/ou fornecidos pela própria WEG) podem ser explicadas por alguns fatores já comentados na seção 5.1,4 deste trabalho.

Um sutil engano na placa do motor Dahlander foi identificado após a realização de testes e deve ser consertado na própria placa. O fato se justifica pelo motor estar fora da linha de produção regular da WEG e ter sido fabricado apenas com o objetivo de contribuir para o aprendizado dos alunos da UFRJ. O motor Dahlander de 12 pontas utilizado nesse trabalho fará parte das aulas didática do LABMAQ.

Esse trabalho atingiu os objetivos esperados e complementou trabalhos anteriores realizados no LABMAQ da UFRJ. Dentre esses, vale destacar os trabalhos de Hugo Oliveira [1] e Thadeu e Rafael [2], que concluíram que máquinas que não possuíam todas as configurações próprias de um motor Dahlander não alcançaram resultados condizentes com o esperado pela teoria para esse tipo de configuração.

Sugere-se como proposta de trabalho futuro a elaboração de um experimento envolvendo a utilização do motor Dahlander utilizado neste trabalho que possa ser incorporado como uma aula na disciplina de Laboratório de Máquinas Elétricas.

Referências Bibliográficas

[1] DE LIMA OLIVEIRA, H. "LEVANTAMENTO DAS CURVAS CARACTERÍSTICAS DE UM MOTOR DE INDUÇÃO COM ACESSO A TODAS AS BOBINAS", *Projeto de Graduação: UFRJ*, Setembro 2018.

[2] DE OLIVEIRA, R. B., LIMA, T. P. S. "AVALIAÇÃO DA UTILIZAÇÃO DE UM MOTOR DE MÚLTIPLAS TENSÕES COMO UM MOTOR DAHLANDER", *Projeto de Graduação: UFRJ*, Março 2020.

[3] TELLES, E. C. "ANÁLISE DE OPERAÇÃO DE UM MOTOR DE INDUÇÃO COM ENROLAMENTO DAHLANDER", *Projeto de Graduação: UFRJ*, Setembro 2010.

[4] DOS SANTOS MORAES, T. J. "LEVANTAMENTO DE CURVAS CARACTERÍSTICAS DE UM MOTOR DE INDUÇÃO COM ENROLAMENTO DAHLANDER", *Projeto de Graduação: UFRJ*, Agosto 2012.

[5] CHAPMAN, S. J. *Electric Machinery Fundamentals.* 4 ed. New York - United States, McGraw-Hill, 2005.

[6] STEPHAN, R. M. *Acionamento, comando e controle de Máquinas Elétricas.* 1 ed. Rio de Janeiro - RJ - Brasil, Ciência Moderna, 2013.

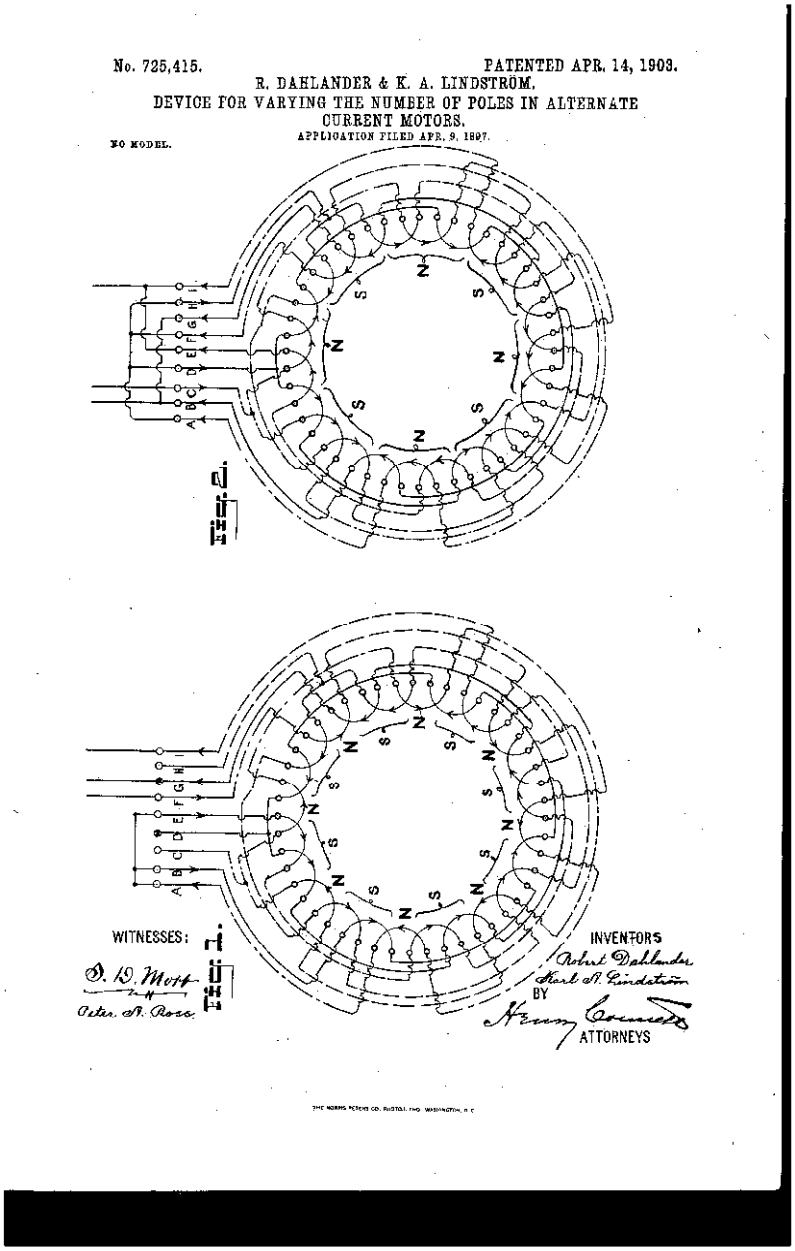
[7] FITZGERALD, A. E., KINGSLEY, C., UMANS, S. D. *Máquinas Elétricas.* 6 ed. São Paulo - SP - Brasil, Bookman, 2006.

[8] WIKIPEDIA, Dezembro 2019. Disponível em: <`https://de.wikipedia.org/wiki/Robert_Dahlander`>.

[9] MUÑOZ, N. T. *Cálculo de Enrolamentos de Máquinas Elétricas e Sistemas de Alarme.* 4 ed. Rio de Janeiro - RJ - Brasil, Biblioteca Técnica Freitas Bastos, 1987.

Apêndice A

Patente do motor Dahlander



No. 725,415. PATENTED APR. 14, 1903.

R. DAHLANDER & K. A. LINDSTRÖM.

DEVICE FOR VARYING THE NUMBER OF POLES IN ALTERNATE CURRENT MOTORS.

APPLICATION FILED APR. 9, 1897.

NO MODEL.

FIG. 2.

FIG. 7.

WITNESSES:

D. D. Mott

Peter A. Ross

INVENTORS

Robert Dahlander

Karl A. Lindström

BY

Henry Connett

ATTORNEYS

THE NORRIS PETERS CO. PHOTO-LITHO. WASHINGTON, D. C.

UNITED STATES PATENT OFFICE.

ROBERT DAHLANDER AND KARL ARVID LINDSTRÖM, OF WESTERÅS, SWEDEN, ASSIGNORS TO GENERAL ELECTRIC COMPANY, OF SCHENECTADY, NEW YORK.

DEVICE FOR VARYING THE NUMBER OF POLES IN ALTERNATE-CURRENT MOTORS.

SPECIFICATION forming part of Letters Patent No. 725,415, dated April 14, 1903.

Application filed April 9, 1897. Serial No. 631,363. (No model.)

To all whom it may concern:

Be it known that we, ROBERT DAHLANDER, engineer, and KARL ARVID LINDSTRÖM, engineer, subjects of the King of Sweden and Norway, and residents of Westerås, in the Kingdom of Sweden, have invented certain new and useful Improvements in Devices for Varying the Number of Poles in Alternate-Current Motors, of which the following is a specification.

This invention relates to that class of drum-windings for alternating-current motors in which the conductors are so arranged and connected that by simply varying the coupling of the same the number of poles, and consequently the speed of rotation of the motor, may be altered. In the winding which we have devised the conductors are so arranged that each two adjacent conductors or groups of conductors of one phase embrace one of the conductors or groups of conductors of each of the other phases. In other words, the winding is so arranged that the conductors or groups of conductors for the several phases follow each other in regular progression around the member on which they are wound. The conductors are connected to form separate windings for the several phases, and the winding for each phase is divided into two sections with the terminal connections so arranged that the windings may be connected either in such a manner that the current will flow in the same direction through both sections of each winding or in such a manner that the direction of current-flow in one of the sections will be reversed.

In the accompanying drawings, which illustrate an embodiment of our invention, Figure 1 represents diagrammatically a drum-winding for a three-phase motor with the windings so connected as to produce a field having sixteen poles, and Fig. 2 is a similar diagram representing the same winding connected to produce a field having only eight poles.

Referring to the figures of the drawings, the small circles indicate the relative positions of the conductors or groups of conductors which constitute the drum-winding, it being understood that the drawings are diagrams merely and that an actual winding may comprise a number of conductors for each of the small circles shown in the drawings. The end connections of the windings are indicated by the full and dotted lines connecting the small circles to one another and to the terminals A to I, inclusive.

By tracing the circuits from terminal to terminal it will be found that A and F are the end terminals, and C the middle terminal, of one winding; B and G the end terminals, and D the middle terminal, of another winding, and E and I the end terminals, and H the middle terminal, of the third winding.

With the terminal connections arranged as shown in Fig. 1 the windings for the three phases are connected together at one end and at the other end are connected each to one of the three-phase mains, the three middle terminals being left on open circuit. This connection gives sixteen poles, as indicated by the letters N S in Fig. 1.

By making use of the middle terminals it is possible, however, to reverse the direction of current-flow in one of the sections of each of the three windings, and with the conductors arranged as shown in the drawings such a reversal will give a field having only eight poles.

In Fig. 2 we have shown an arrangement of terminal connections which may be used to obtain the smaller number of poles. These connections are such that the two sections of each winding are connected in multiple, the end terminals A and F being connected together and the end terminals B and G and E and I being also similarly connected. The three-phase mains are then connected one to the end terminals B and G, another to the end terminals E and I, and the third to the middle terminal C of the other winding, the end terminals A and F of this latter winding being connected to the middle terminals D and H of the other two windings to complete the common connection. In the arrangement shown in the drawings the windings are always connected in Y.

The arrangement of connections above described—namely, with the two sections of each winding connected in series for the larger number of poles and in multiple for the

smaller number—will give in both cases about the same ratio of the current when the motor is running idle to the watt-current.

It will be noted that in making the connections, as illustrated in Figs. 1 and 2, the connections of all nine of the terminals are changed in changing from one number of poles to the other; but evidently our invention is not limited to the particular arrangement shown in the drawings. Any suitable arrangement of the terminal connections may be employed, and it is even possible to reduce the number of terminals to seven by connecting the extremities of the three windings at one end to a common terminal.

What we claim as new, and desire to secure by Letters Patent of the United States, is—

1. A non-synchronous motor, having primary drum-windings suited to the maximum number of poles n, with the free ends of the windings provided with terminals, and also with other terminals so connected as to divide each of the said windings into halves, whereby in coupling up in different ways, different pole-numbers may be obtained.

2. A non-synchronous motor, having primary drum-windings with the free ends of said windings provided with terminals, and said windings also provided with other terminals so connected as to divide each of the windings into halves, the halves of said windings being coupled in series so as to obtain the maximum number of poles n, the beginning, end and middle of each winding having terminals, by the coupling of which in different ways, the pole-numbers n and $\frac{n}{2}$ are obtained, both halves of each winding being coupled in parallel for the smaller pole-number.

3. A polyphase motor having drum-windings for obtaining two different pole-numbers and rates of rotative speed, the one rate being double that of the other, the windings for each phase being divided into two halves and the conductors being so arranged that each two adjacent conductors or groups of conductors of one phase embrace one of the conductors or groups of conductors of each of the other phases, whereby in coupling together such halves in different ways, different pole-numbers may be obtained.

4. A polyphase motor having drum-windings for obtaining two different pole-numbers and rates of rotative speed, the conductors being so arranged that each two adjacent conductors or groups of conductors of one phase embrace one of the conductors or groups of conductors of each of the other phases and the winding for each phase being divided into halves with the two halves coupled in series, and terminals connected to the joining-points of said halves, whereby the windings for each phase are provided with three terminals which may be coupled in such a manner as to obtain either of two pole-numbers at will.

5. A polyphase motor having drum-windings comprising a separate winding for each phase, each of said separate windings comprising two sections, means for connecting the said windings to a polyphase source and to each other with the two sections of each separate winding in series with one another for one number of poles, and means for changing the connections so that the two sections of each winding will be connected in multiple, with the direction of current-flow reversed in one of said sections, to produce another different number of poles.

6. A three-phase motor having drum-windings comprising a separate winding for each phase, each of said separate windings comprising two sections, means for connecting the said windings to a three-phase source and to each other in such a manner as to produce a field having a certain number of poles, and means for changing the connections so as to reverse the direction of current-flow in one of the sections of each winding, thereby producing a field having half or double the number of poles.

7. A three-phase motor having three drum-windings with the conductors so arranged that each two adjacent conductors or groups of conductors of one phase embrace one of the conductors or groups of conductors of each of the other phases, the said conductors being connected to form separate windings for the several phases, each separate winding comprising two sections, and terminal connections so arranged that the said windings may be connected to a three-phase source and to each other, either in such a manner that the current will flow in the same direction through the two sections of each winding, or in such a manner that the direction of current-flow in one of the sections will be reversed.

8. A three-phase motor having three drum-windings with the conductors so arranged that each two adjacent conductors or groups of conductors of one phase embrace one of the conductors or groups of conductors of each of the other phases, the said conductors being connected to form separate windings for the several phases, each separate winding comprising two sections, and means for connecting said windings either in such a manner that the current will flow in the same direction through the two sections of each winding, or in such a manner that the direction of current-flow in one of the sections will be reversed.

In witness whereof we have hereunto signed our names in the presence of two subscribing witnesses.

ROBERT DAHLANDER.
KARL ARVID LINDSTRÖM.

Witnesses:
E. J. TODEN,
F. G. LONNQUIST.

Apêndice B

Configuração 4 níveis de tensão

FOLHA DE DADOS

Motor Trifásico de Indução - Rotor de Gaiola

Cliente	:		
Linha do produto	:		
Carcaça	: 100L	Tempo de rotor bloqueado	: 7 s (quente) 13 s (frio)
Potência	: 2.2 kW (3 HP-cv)	Elevação de temperatura[4]	: 80 K
Número de polos	: 2	Regime de serviço	: S2, 60 min
Frequência	: 60 Hz	Temperatura ambiente	: -20 °C a +40 °C
Tensão nominal	: 220/380/440 V	Altitude	: 1000 m
Corrente nominal	: 7.77/4.50/3.88 A	Grau de proteção	: IP55
Corrente de partida	: 50.5/29.3/25.2 A	Método de refrigeração	: TFVE
Ip/In (p.u.)	: 6.5	Forma construtiva	: B3D
Corrente a vazio	: 2.10/1.20/1.04 A	Sentido de rotação[1]	: Ambos
Rotação nominal	: 3487 rpm		
Escorregamento	: 3.14 %	Método de partida	: Partida direta
Conjugado nominal	: 6.03 Nm	Massa aproximada[3]	: 36.0 kg
Conjugado de partida	: 240 %	Categoria	: N
Conjugado mínimo	: 210 %		
Conjugado máximo	: 310 %		
Classe do isolamento	: F		
Fator de serviço	: 1.00		
Momento de inércia (J)	: 0.0069 kgm²		

Potência	Partida	25%	50%	75%	100%
Rendimento (%)	-	74.6	82.0	83.0	83.5
Fator de potência	0.74	0.63	0.81	0.88	0.89

Tipo de carga acionada: -
Conjugado da carga: -
Inércia da carga (J=GD²/4): -

	Dianteiro	Traseiro
Tipo de mancal	6206-ZZ	6205-ZZ
Intervalo de lubrificação	-	-
Quantidade de lubrificante	-	-
Tipo de lubrificante	MOBIL POLYREX EM	

Notas:
- FD auxiliar Dahlander: 200528/2020

PARA APROVAÇÃO
( ) Aprovado
( ) Aprovado com comentários
( ) Não aprovado

Normas				
	Especificação	: IEC 60034-1 / ABNT NBR 17094-1	Vibração	: IEC 60034-14
	Ensaios	: IEC 60034-2 / ABNT NBR 17094-3	Tolerância	: IEC 60034-1 / ABNT NBR 17094-1
	Ruído	: IEC 60034-9		

Esta revisão substitui e cancela a anterior, a qual deverá ser eliminada.
(1) Olhando a ponta de eixo dianteira do motor.
(2) Medido a 1m e com tolerância de +3dB(A).
(3) Massa aproximada sujeito a alteração após fabricação.
(4) Em 100% da carga nominal.

Os valores indicados são valores médios com base em ensaios e para alimentação em rede senoidal, sujeitos as tolerâncias das norma ABNT-NBR 17094-1.

Rev.	Resumo das modificações	Executado	Verificado	Data

Executor	mjoaquim	189241/2020	
Verificador	ariadner	Página	Revisão
Data	26/05/2020	1/1	1

Propriedade de WEG S/A. Proibida a reprodução sem autorização prévia.

Apêndice C

Configuração Torque Constante

FOLHA DE DADOS

Motor Trifásico de Indução - Rotor de Gaiola

Cliente	:		
Linha do produto	:		
Carcaça	: 100L	Método de refrigeração	: TFVE
Classe do isolamento	: F	Forma construtiva	: B3D
Regime de serviço	: S2, 60 min	Sentido de rotação¹	: Ambos
Temperatura ambiente	: -20 °C a +40 °C	Método de partida	: Partida direta
Altitude	: 1000 m	Massa aproximada³	: 36.0 kg
Grau de proteção	: IP55	Momento de inércia (J)	: 0.0069 kgm²
Categoria	: N		

Potência		1.1 kW (1.5 HP-cv)	2.2 kW (3 HP-cv)
Número de polos		4	2
Frequência		60 Hz	60 Hz
Tensão nominal		380 V	380 V
Corrente nominal		3.26 A	4.50 A
Corrente de partida		22.2 A	29.3 A
Ip/In (p.u.)		6.8	6.5
Corrente a vazio		2.50 A	1.20 A
Rotação nominal		1756 rpm	3487 rpm
Escorregamento		2.44 %	3.14 %
Conjugado nominal		5.99 Nm	6.03 Nm
Conjugado de partida		280 %	240 %
Conjugado máximo		380 %	310 %
Fator de serviço		1.00	1.00
Elevação de temperatura⁴		80 K	80 K
Tempo de rotor bloqueado		17 s (quente) 31 s (frio)	17 s (quente) 31 s (frio)
Rendimento (%)	25%	57.7	74.7
	50%	79.5	82.0
	75%	83.0	83.0
	100%	84.0	83.5
Fator de potência	Partida	0.74	0.74
	25%	0.30	0.63
	50%	0.42	0.81
	75%	0.54	0.88
	100%	0.61	0.89

	Dianteiro	Traseiro
Tipo de mancal	6206-ZZ	6205-ZZ
Intervalo de lubrificação	-	-
Quantidade de lubrificante	-	-
Tipo de lubrificante	MOBIL POLYREX EM	

PARA APROVAÇÃO
( ) Aprovado
( ) Aprovado com comentários
( ) Não aprovado

Esta revisão substitui e cancela a anterior, a qual deverá ser eliminada.
(1) Olhando a ponta de eixo dianteira do motor.
(2) Medido a 1m e com tolerância de +3dB(A).
(3) Massa aproximada sujeito a alteração após fabricação.
(4) Em 100% da carga nominal.

Os valores indicados são valores médios com base em ensaios e para alimentação em rede senoidal, sujeitos as tolerâncias das norma ABNT-NBR 17094-1.

Rev.	Resumo das modificações	Executado	Verificado	Data

Executor	mjoaquim		200528/2020-A	
Verificador	ariadner		Página	Revisão
Data	26/05/2020		1/2	0

Propriedade de WEG S/A. Proibida a reprodução sem autorização prévia.

FOLHA DE DADOS

Motor Trifásico de Indução - Rotor de Gaiola

Cliente :

Linha do produto :

Notas:
- FD princial (2p 220/380/440V) - 189241/2020
- Dahlander 12 cabos

- Seq. Desempenho A: Torque constante T/YY:
  - 4/2p - 380//380V - 1.1 // 2.2kW
- Seq. Desempenho B: Potência constante YY/T:
  - 4/2p - 440//440V - 2.2 // 2.2kW
- Seq. Desempenho C: Torque variável Y/YY:
  - 4/2p - 380//380V - 0.55 // 2.2kW

PARA APROVAÇÃO
( ) Aprovado
( ) Aprovado com comentários
( ) Não aprovado

Normas				
	Especificação:	IEC 60034-1 / ABNT NBR 17094-1	Vibração	: IEC 60034-14
	Ensaios	: IEC 60034-2 / ABNT NBR 17094-3	Tolerância	: IEC 60034-1 / ABNT NBR 17094-1
	Ruído	: IEC 60034-9		

Rev.	Resumo das modificações	Executado	Verificado	Data

Executor	mjoaquim		200528/2020-A	
Verificador	ariadner		Página	Revisão
Data	26/05/2020		2/2	0

Propriedade de WEG S/A. Proibida a reprodução sem autorização prévia.

Apêndice D

Configuração Potência Constante

FOLHA DE DADOS

Motor Trifásico de Indução - Rotor de Gaiola

Cliente	:
Referência do cliente	:
Linha do produto	: -

Carcaça	: 100L	Método de refrigeração	: IC411 - TFVE
Classe do isolamento	: F	Forma construtiva	: B3D
Regime de serviço	: S2, 60 min	Sentido de rotação¹	: Ambos
Temperatura ambiente	: -20 °C a +40 °C	Método de partida	: Partida direta
Altitude	: 1000 m	Massa aproximada³	: 36,0 kg
Grau de proteção	: IP55	Momento de inércia (J)	: 0,0069 kgm²
Categoria	: N		

Potência		2,2 kW (3 HP-cv)	2,2 kW (3 HP-cv)
Número de polos		4	2
Frequência		60 Hz	60 Hz
Tensão nominal		380 V	380 V
Corrente nominal		5,66 A	4,57 A
Corrente de partida		31,1 A	24,7 A
Ip/In (p.u.)		5,5	5,4
Corrente a vazio		3,60 A	0,900 A
Rotação nominal		1726 rpm	3435 rpm
Escorregamento		4,11 %	4,58 %
Conjugado nominal		12,2 Nm	6,12 Nm
Conjugado de partida		200 %	170 %
Conjugado máximo		260 %	220 %
Fator de serviço		1,00	1,00
Elevação de temperatura⁴		80 K	80 K
Tempo de rotor bloqueado		17 s (quente) 31 s (frio)	17 s (quente) 31 s (frio)
Rendimento (%)	25%	63,3	74,2
	50%	80,0	79,5
	75%	82,0	80,0
	100%	82,0	80,3
Fator de potência	Partida	0,74	0,74
	25%	0,37	0,70
	50%	0,53	0,86
	75%	0,66	0,89
	100%	0,72	0,91

	Dianteiro	Traseiro
Tipo de mancal	6206-ZZ	6205-ZZ
Intervalo de lubrificação	-	-
Quantidade de lubrificante	-	-
Tipo de lubrificante	MOBIL POLYREX EM	

Esta revisão substitui e cancela a anterior, a qual deverá ser eliminada.

(1) Olhando a ponta de eixo dianteira do motor.

(2) Medido a 1m e com tolerância de +3dB(A).

(3) Massa aproximada sujeito a alteração após fabricação.

(4) Em 100% da carga nominal.

Os valores indicados são valores médios com base em ensaios e para alimentação em rede senoidal, sujeitos as tolerâncias das norma ABNT-NBR 17094-1.

Rev.	Resumo das modificações	Executado	Verificado	Data

Executor	mjoaquim		200528/2020-B	
Verificador	ariadner		Página	Revisão
Data	02/06/2020		1/2	1

Propriedade de WEG S/A. Proibida a reprodução sem autorização prévia.

FOLHA DE DADOS

Motor Trifásico de Indução - Rotor de Gaiola

Cliente	:
Referência do cliente	:

Linha do produto	: -

Notas:
- FD princial (2p 220/380/440V) - 189241/2020
- Dahlander 12 cabos

- Seq. Desempenho A: Torque constante T/YY:
  - 4/2p - 380//380V - 1.1 // 2.2kW
- Seq. Desempenho B: Potência constante YY/T:
  - 4/2p - 380//380V - 2.2 // 2.2kW
- Seq. Desempenho C: Torque variável Y/YY:
  - 4/2p - 380//380V - 0.55 // 2.2kW

Normas

Especificação	: IEC 60034-1 / ABNT NBR 17094-1	Vibração	: IEC 60034-14
Ensaios	: IEC 60034-2 / ABNT NBR 17094-3	Tolerância	: IEC 60034-1 / ABNT NBR 17094-1
Ruído	: IEC 60034-9		

Rev.	Resumo das modificações	Executado	Verificado	Data

Executor	mjoaquim		200528/2020-B	
Verificador	ariadner		Página	Revisão
Data	02/06/2020		2/2	1

Propriedade de WEG S/A. Proibida a reprodução sem autorização prévia.

Apêndice E

Configuração Torque Ventilador

FOLHA DE DADOS

Motor Trifásico de Indução - Rotor de Gaiola

Cliente	:		
Linha do produto	:		
Carcaça	: 100L	Método de refrigeração	: TFVE
Classe do isolamento	: F	Forma construtiva	: B3D
Regime de serviço	: S2, 60 min	Sentido de rotação[1]	: Ambos
Temperatura ambiente	: -20 °C a +40 °C	Método de partida	: Partida direta
Altitude	: 1000 m	Massa aproximada[3]	: 36.0 kg
Grau de proteção	: IP55	Momento de inércia (J)	: 0.0069 kgm²
Categoria	: N		

Potência		0.55 kW (0.75 HP-cv)	2.2 kW (3 HP-cv)
Número de polos		4	2
Frequência		60 Hz	60 Hz
Tensão nominal		380 V	380 V
Corrente nominal		1.42 A	4.50 A
Corrente de partida		7.38 A	42.8 A
Ip/In (p.u.)		5.2	9.5
Corrente a vazio		0.800 A	1.20 A
Rotação nominal		1741 rpm	3487 rpm
Escorregamento		3.28 %	3.14 %
Conjugado nominal		3.02 Nm	6.03 Nm
Conjugado de partida		150 %	240 %
Conjugado máximo		250 %	310 %
Fator de serviço		1.00	1.00
Elevação de temperatura[4]		80 K	80 K
Tempo de rotor bloqueado		17 s (quente) 31 s (frio)	17 s (quente) 31 s (frio)
Rendimento (%)	25%	64.2	74.7
	50%	80.0	82.0
	75%	82.0	83.0
	100%	83.0	83.5
Fator de potência	Partida	0.74	0.74
	25%	0.40	0.63
	50%	0.56	0.81
	75%	0.68	0.88
	100%	0.71	0.89

	Dianteiro	Traseiro
Tipo de mancal	6206-ZZ	6205-ZZ
Intervalo de lubrificação	-	-
Quantidade de lubrificante	-	-
Tipo de lubrificante	MOBIL POLYREX EM	

PARA APROVAÇÃO
( ) Aprovado
( ) Aprovado com comentários
( ) Não aprovado

Esta revisão substitui e cancela a anterior, a qual deverá ser eliminada.
(1) Olhando a ponta de eixo dianteira do motor.
(2) Medido a 1m e com tolerância de +3dB(A).
(3) Massa aproximada sujeito a alteração após fabricação.
(4) Em 100% da carga nominal.

Os valores indicados são valores médios com base em ensaios e para alimentação em rede senoidal, sujeitos as tolerâncias das norma ABNT-NBR 17094-1.

Rev.	Resumo das modificações	Executado	Verificado	Data

Executor	mjoaquim	200528/2020-C	
Verificador	ariadner	Página	Revisão
Data	26/05/2020	1/2	0

Propriedade de WEG S/A. Proibida a reprodução sem autorização prévia.

FOLHA DE DADOS

Motor Trifásico de Indução - Rotor de Gaiola

Cliente :

Linha do produto :

Notas:
- FD princial (2p 220/380/440V) - 189241/2020
- Dahlander 12 cabos

- Seq. Desempenho A: Torque constante T/YY:
  - 4/2p - 380//380V - 1.1 // 2.2kW
- Seq. Desempenho B: Potência constante YY/T:
  - 4/2p - 440//440V - 2.2 // 2.2kW
- Seq. Desempenho C: Torque variável Y/YY:
  - 4/2p - 380//380V - 0.55 // 2.2kW

PARA APROVAÇÃO
( ) Aprovado
( ) Aprovado com comentários
( ) Não aprovado

Normas				
	Especificação	: IEC 60034-1 / ABNT NBR 17094-1	Vibração	: IEC 60034-14
	Ensaios	: IEC 60034-2 / ABNT NBR 17094-3	Tolerância	: IEC 60034-1 / ABNT NBR 17094-1
	Ruído	: IEC 60034-9		

Rev.	Resumo das modificações	Executado	Verificado	Data

Executor	mjoaquim		200528/2020-C	
Verificador	ariadner		Página	Revisão
Data	26/05/2020		2/2	0

Propriedade de WEG S/A. Proibida a reprodução sem autorização prévia.