

**ROBSON DIEGO DA SILVA OLIVEIRA**

**DIMENSIONAMENTO DE UM MOTOR ELÉTRICO DE INDUÇÃO COM ÍMÃS  
PERMANENTES (NdFeB) VISANDO APLICAÇÕES NA MOBILIDADE ELÉTRICA**

Guaratinguetá - SP  
2016

ROBSON DIEGO DA SILVA OLIVEIRA

DIMENSIONAMENTO DE UM MOTOR ELÉTRICO DE INDUÇÃO COM ÍMÃS  
PERMANENTES (NdFeB) VISANDO APLICAÇÕES NA MOBILIDADE ELÉTRICA

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Elétrica.

Orientador (a): Prof. Dr. Teófilo Miguel de Souza

Guaratinguetá - SP  
2016

|      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| O48d | <p>Oliveira, Robson Diego da Silva</p> <p>Dimensionamento de um motor elétrico de indução com ímãs permanentes (NdFeB) visando aplicações na mobilidade elétrica / Robson Diego da Silva Oliveira – Guaratinguetá, 2016.</p> <p>49 f : il.</p> <p>Bibliografia: f. 46-47</p> <p>Trabalho de Graduação em Engenharia Elétrica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2016.</p> <p>Orientador: Prof. Dr. Teófilo Miguel de Souza</p> <p>1. Motores elétricos de indução 2. Ímãs permanentes 3. Mobilidade iônica I. Título</p> <p>CDU 621.313.333</p> |
|------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

**ROBSON DIEGO DA SILVA OLIVEIRA**

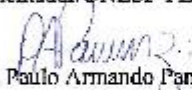
ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO  
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE  
"GRADUADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA"

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE  
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

  
Prof. Dr. LEONARDO MESQUITA  
Coordenador

**BANCA EXAMINADORA:**

  
Prof. Dr. Teófilo Miguel de Souza  
Orientador/UNESP-FEG

  
Prof. Dr. Paulo Armando Panúzio  
CIIG - UNESP

  
Eng. Eletricista Ryadhi Chagas Gouvêa  
Membro externo

Dezembro de 2016

## **DADOS CURRICULARES**

### **ROBSON DIEGO DA SILVA OLIVEIRA**

|                   |                                                                                                                                                    |
|-------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>NASCIMENTO</b> | 10.10.1990 – Guaratinguetá / SP                                                                                                                    |
| <b>FILIAÇÃO</b>   | Nilton Mário de Oliveira<br>Maristela Vieira da Silva Oliveira                                                                                     |
| <b>2006/2008</b>  | Curso Técnico – Eletrônica<br>Colégio Técnico Industrial de Guaratinguetá (CTIG) - UNESP                                                           |
| <b>2011/2016</b>  | Curso de Graduação – Engenharia Elétrica<br>Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá –<br>Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho” |

A todos aqueles que tornaram possível este momento, em especial aos meus pais Nilton e Maristela, que me auxiliaram nesta trajetória desde o seu início.

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar agradeço a Deus, fonte da vida e da graça. Agradeço pela minha vida, minha inteligência, minha família e meus amigos.

Agradeço aos meus pais, Nilton e Maristela, por terem me oferecido suporte em todos os momentos da minha vida acadêmica e por terem me guiado nas minhas escolhas. E à minha irmã, Nathalia, por ter feito também parte dessa minha trajetória.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Teófilo Miguel de Souza que sempre me incentivou. Sem a sua orientação, dedicação e auxílio, o estudo aqui apresentado seria praticamente impossível.

Aos funcionários da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá pela dedicação e alegria no atendimento.

Agradeço à empresa WEG S.A. e ao professor Dr. José Leandro Casa Nova Almeida por todo apoio dado na realização desse trabalho.

Por fim, aos companheiros de Faculdade que trilharam este caminho junto comigo e que sempre me ajudaram.

“É muito melhor lançar-se em busca de conquistas grandiosas, mesmo expondo-se ao fracasso, do que alinhar-se com os pobres de espírito, que nem gozam muito nem sofrem muito, porque vivem numa penumbra cinzenta, onde não conhecem nem vitória, nem derrota.”

Theodore Roosevelt

OLIVEIRA, R. D. S. **Dimensionamento de um motor elétrico de indução com ímãs permanentes (NdFeB) visando aplicações na mobilidade elétrica**. 2016. 49 f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2016.

## **RESUMO**

Este trabalho aborda o dimensionamento de uma máquina síncrona com ímãs permanentes no interior do rotor a partir de um motor de indução trifásico com rotor gaiola de esquilo, com objetivo de aplicação na mobilidade elétrica (aviões, carros, barcos e motos, etc.) para a melhoria de performance (aumento no torque). Além disso, substituem-se diversos materiais de partes do motor (carcaça, fios elétricos, eixo, rotor), visando a diminuição da sua massa, aspecto crucial na mobilidade elétrica. Apresenta-se a metodologia deste dimensionamento, detalhando passo-a-passo os cálculos necessários. O projeto utilizou-se de um motor de indução trifásico com rotor gaiola de esquilo de 40 cv e 4 polos da empresa WEG S.A, o qual atenderia o mínimo valor de torque e rotação necessárias à aplicação desse trabalho. A partir dos dados construtivos do motor, tanto mecânicos quanto elétricos, como número de ranhuras, número de polos e tensão de funcionamento, pôde-se calcular os parâmetros necessários ao projeto, tais como a densidade de fluxo magnético e inclinação dos blocos de ímãs, e por fim a especificação correta das dimensões e tipos de ímãs a serem utilizados. Apresenta-se também um aplicativo em Excel, que calcula automaticamente todos os parâmetros do projeto, facilitando para o projetista. Como resultado da substituição dos materiais, o motor apresentou uma redução de 32,8% de sua massa. Para projetos futuros, pretende-se confirmar a melhora da performance do motor através da construção de um protótipo, com as mesmas dimensões e características utilizadas no cálculo desse projeto.

**PALAVRAS-CHAVE:** Ímãs permanentes. Mobilidade elétrica. Inclinação dos ímãs permanentes.

OLIVEIRA, R. D. S. **Sizing of an induction electric motor with permanent magnets (NdFeB) looking for applications in electric mobility.** 2016. 49 f. Graduation work (Graduation in Electrical Engineering) – College of Engineering of Guaratinguetá campus, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2016.

### **ABSTRACT**

This paper describes the sizing of a synchronous machine with permanent magnets inside the rotor from a three-phase induction motor with squirrel cage rotor, aiming the application in electric mobility (airplanes, cars, boats and motorcycles, etc.) for performance improvement (increased in torque). In addition, different materials of engine parts (housing, electric wires, shaft, rotor) are replaced, looking for the reduction of their mass, a crucial aspect in electric mobility. The methodology of this sizing is presented detailing step-by-step the calculations, that are necessary. The project was based on a three-phase induction motor with squirrel cage rotor, 40 cv and four-pole, from WEG S.A., that attend the minimum amount of torque and rotation required to apply at this work. The mechanical and electrical motor construction data, such as the number of grooves, number of poles and operating voltage, became possible estimate the parameters required for the sizing, such as the magnetic flux density and the inclination of the blocks magnets, and finally the correct specification of the dimensions and types of magnets to be used. Also, it presents an application in Excel, which automatically calculates all the parameters of the project, making it easier for the designer. As a result of the replacement of the materials, the engine presented a reduction of 32.8% of its mass. For future projects, it is intended to confirm the improvement of the engine performance through the construction of a prototype, with the same dimensions and characteristics used in the calculation of this project.

**KEYWORDS:** Permanent magnets. Electric mobility. Inclination of permanent magnets.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                   |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 – Esquemático de um motor elétrico .....                                 | 16 |
| Figura 2 – Quadro Geral de motores elétricos .....                                | 17 |
| Figura 3 – Evolução dos motores elétricos .....                                   | 17 |
| Figura 4 – Motor de indução, vista em corte .....                                 | 19 |
| Figura 5 – Estator.....                                                           | 20 |
| Figura 6 – Rotor.....                                                             | 21 |
| Figura 7 – Passo da bobina: (a) passo integral, (b) passo fracionário .....       | 22 |
| Figura 8 – Classificação básica das máquinas de ímãs permanentes .....            | 23 |
| Figura 9 – Curva de magnetização: (1) laço de histerese, (2) curva original ..... | 24 |
| Figura 10 – Veículo elétrico à bateria.....                                       | 26 |
| Figura 11 – Rotor com os ímãs inclinados .....                                    | 27 |
| Figura 12 – Fluxograma geral.....                                                 | 28 |
| Figura 13 – Vista planificada do enrolamento do estator .....                     | 30 |
| Figura 14 – Distribuição dos 4 polos de ímãs no rotor.....                        | 36 |
| Figura 15 – Rotor com os ímãs fixados .....                                       | 37 |
| Figura 16 – Desenho motor 40 cv.....                                              | 40 |
| Figura 17 – Dimensões do motor utilizado.....                                     | 41 |
| Figura 18 – Parâmetros do motor e do enrolamento.....                             | 42 |
| Figura 19 – Cálculos realizados pelo aplicativo .....                             | 43 |
| Figura 20 – Tabelas resumo com os resultados do aplicativo .....                  | 44 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                             |    |
|-----------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 – Propriedades básicas dos principais ímãs .....                   | 24 |
| Tabela 2 – Especificações técnicas do motor de indução .....                | 29 |
| Tabela 3 – Especificações do enrolamento do estator .....                   | 29 |
| Tabela 4 – Cálculo da densidade de fluxo do estator por polo por fase ..... | 33 |
| Tabela 5 – Especificações dos ímãs de Neodímio N35 .....                    | 34 |
| Tabela 6 – Cálculos para o entreferro .....                                 | 36 |
| Tabela 7 – Comparação entre massas .....                                    | 39 |

## LISTA DE SÍMBOLOS

|                |                                                          |
|----------------|----------------------------------------------------------|
| $A_g$          | Área do corte transversal por polo do entreferro         |
| $A_m$          | Área do corte transversal por polo do ímã                |
| $B_e$          | Remanência ou Indução magnética do estator               |
| $B_m$          | Remanência ou Indução magnética do ímãs                  |
| $C_m$          | Comprimento total dos ímãs por polo                      |
| $C_\Phi$       | Fator de fluxo concentrado                               |
| $D_{int\ est}$ | Diâmetro interno do estator                              |
| $e$            | Espessura do ímã                                         |
| $f$            | Frequência                                               |
| $f_d$          | Fator de distribuição                                    |
| $f_e$          | Fator de enrolamento ou passo                            |
| $\cos \varphi$ | Fator de potência                                        |
| $g$            | Entreferro                                               |
| $g_{ferro}$    | Entreferro entre o estator e as bordas de ferro do rotor |
| $H_c$          | Força Coercitiva                                         |
| $I$            | Corrente                                                 |
| $n$            | Rotação                                                  |
| $N_f$          | Número de espiras por fase                               |
| $N_t$          | Número de espiras totais                                 |
| $N_g$          | Número de espiras por grupo                              |
| $L$            | Comprimento do estator                                   |
| $L_{int\ est}$ | Comprimento interno do estator                           |
| $L_m$          | Largura do ímã                                           |
| $p$            | Polos                                                    |
| $P$            | Potência                                                 |
| $PC$           | Coefficiente de permeância                               |
| $q$            | Número de ranhuras por polo por fase                     |
| $Q$            | Ranhuras do estator                                      |

## SUMÁRIO

|          |                                                               |           |
|----------|---------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO .....</b>                                       | <b>14</b> |
| 1.1      | CONSIDERAÇÕES GERAIS.....                                     | 14        |
| 1.2      | MOTIVAÇÃO.....                                                | 14        |
| 1.3      | OBJETIVO .....                                                | 15        |
| 1.4      | ESTRUTURA DO TRABALHO .....                                   | 15        |
| 1.5      | MOTORES ELÉTRICOS .....                                       | 16        |
| 1.6      | MOTOR SÍNCRONO .....                                          | 18        |
| 1.7      | MOTOR ASSÍNCRONO (MOTOR DE INDUÇÃO) .....                     | 18        |
| 1.8      | PRINCIPAIS PARTES DE UM MOTOR ELÉTRICO .....                  | 20        |
| 1.8.1    | Estator.....                                                  | 20        |
| 1.8.2    | Rotor.....                                                    | 20        |
| 1.9      | CONCEITOS GERAIS .....                                        | 21        |
| 1.9.1    | Enrolamento concentrado .....                                 | 21        |
| 1.9.2    | Enrolamento distribuído .....                                 | 21        |
| 1.9.3    | Passo da bobina .....                                         | 22        |
| 1.10     | AS MÁQUINAS DE ÍMÃS PERMANENTES .....                         | 22        |
| 1.11     | CONCEITOS BÁSICOS SOBRE MAGNETISMO .....                      | 24        |
| 1.11.1   | O neodímio .....                                              | 25        |
| 1.12     | MOBILIDADE ELÉTRICA.....                                      | 25        |
| <b>2</b> | <b>METODOLOGIA PARA A INSERÇÃO DOS ÍMÃS PERMANENTES .....</b> | <b>27</b> |
| 2.1      | INTRODUÇÃO AO PROJETO.....                                    | 27        |
| 2.2      | DESENVOLVIMENTO DOS CÁLCULOS PARA O PROJETO .....             | 29        |
| 2.2.1    | Especificações .....                                          | 29        |
| 2.2.2    | Cálculos da densidade de fluxo do estator.....                | 31        |

|          |                                                                  |           |
|----------|------------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.2.3    | Determinação das dimensões e dos tipos de ímãs permanentes ..... | 33        |
| 2.2.4    | Entreferro .....                                                 | 35        |
| 2.2.5    | Ângulo de inclinação .....                                       | 36        |
| <b>3</b> | <b>RESULTADO COMPARATIVO E APLICATIVO .....</b>                  | <b>39</b> |
| 3.1      | SUBSTITUIÇÃODOS MATERIAIS .....                                  | 39        |
| 3.2      | APLICATIVO EXCEL .....                                           | 42        |
| <b>4</b> | <b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS .....</b>         | <b>45</b> |
|          | <b>REFERÊNCIAS .....</b>                                         | <b>46</b> |
|          | <b>ANEXO A – DADOS FORNECIDOS PELA EMPRESA WEG S.A. ....</b>     | <b>48</b> |

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Este trabalho apresenta o estudo teórico do dimensionamento de um motor elétrico com ímãs permanentes a partir de um motor elétrico de indução, com o objetivo de ser utilizado em mobilidade elétrica, como aviões, carros, barcos e motos, bem como um aplicativo para tal.

Com os formulários e metodologias adequadas foram calculados os dados necessários para o efetivo dimensionamento. E por fim foi possível fazer uma comparação entre o motor elétrico de indução gaiola de esquilo com o motor de ímãs permanentes projetado, comparando a massa total de cada.

## 1.2 MOTIVAÇÃO

A crescente dependência energética do petróleo e o enorme impacto ambiental resultado da utilização de combustíveis fósseis, torna necessário encontrar soluções menos poluentes para as deslocamentos. A mobilidade urbana assume aqui um papel preponderante pois é nesse ambiente onde as soluções de mobilidade elétrica melhor se enquadram oferecendo vantagens competitivas face à utilização de motores de combustão que utilizam combustíveis fósseis (ANDORINHA, 2012). Algumas das vantagens da mobilidade elétrica são: menor custo de operação que o veículo convencional, não produz emissões locais, não emite ruído e, como é alimentado à eletricidade, tem potencial para diminuir os consumos de petróleo ao passo que possibilita, também, uma maior quota de energias renováveis (COSTA, 2014).

Portanto, a fim de se utilizar na mobilidade elétrica em geral, como carros, motos, aviões, barcos, teve-se como motivação o dimensionamento de um motor elétrico no qual algumas relações pretenderiam ser melhoradas, como a relação massa x potência do motor.

### 1.3 OBJETIVO

O objetivo do trabalho é converter um motor de indução trifásico gaiola de esquilo, 4 polos (40 cv), em uma máquina síncrona com um novo rotor recoberto com ímãs permanentes de neodímio, a fim de se melhorar a performance do mesmo, como o aumento do torque, para que fosse utilizado em mobilidade elétrica, como em aviões, barcos, carros e motos. Projeta-se também a substituição de materiais do motor, afim de se reduzir a massa do mesmo.

Através dos formulários e da metodologia para a realização do projeto de modificação do motor de indução trifásico, cria-se também um aplicativo em Excel para que o usuário consiga realizar o dimensionamento do motor de uma forma mais rápida e direta.

### 1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho de graduação é apresentado em quatro capítulos.

O primeiro capítulo apresenta os motores elétricos, dando um breve resumo sobre seus tipos e componentes principais. Dá-se maior atenção às máquinas de ímãs permanentes, apresentando conceitos básicos sobre magnetismo e dos principais tipos de ímãs existentes. Por fim, comenta-se brevemente sobre a mobilidade elétrica, alvo principal da aplicação de tais motores. Este capítulo também cita a motivação para tal trabalho ser realizado, além do objetivo que o mesmo pretende atingir.

O segundo capítulo é voltado para apresentação dos formulários e da metodologia necessária para a realização do projeto. É apresentada a sequência correta de cálculos para o dimensionamento do motor elétrico com ímãs permanentes, além de tabelas e citações para o melhor entendimento e organização dos dados obtidos.

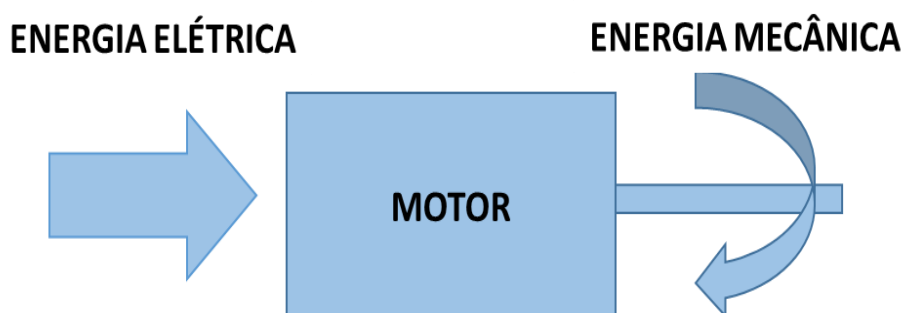
No terceiro capítulo são apresentados os resultados e um aplicativo feito em Excel, que tem como objetivo facilitar para o usuário os cálculos apresentados no Capítulo 2. Além disso, é feita uma comparação entre o motor projetado e o motor de indução em relação a sua massa, após a substituição dos materiais.

No quarto capítulo apresenta-se a conclusão, sintetizando todo o conteúdo pesquisado, desde a análise inicial até o alcance dos objetivos. Também apresenta sugestões para trabalhos futuros.

## 1.5 MOTORES ELÉTRICOS

Basicamente, o motor é um conversor eletromecânico que, baseado em princípios eletromagnéticos, converte energia elétrica em energia mecânica, ou vice-versa, quando passa a se chamar gerador (SANTOS *et al.*, 2006). A Figura 1 ilustra tal conversão.

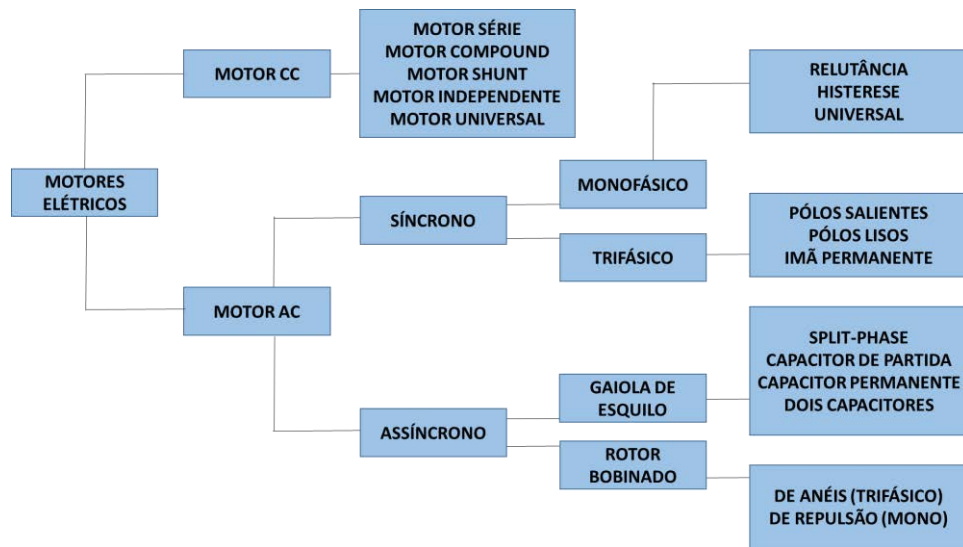
Figura 1 – Esquemático de um motor elétrico



Fonte: Autor

Os motores elétricos podem ser confeccionados nas mais variadas formas e configurações, de acordo com as características desejadas de funcionamento e aplicação. De modo geral podem ser classificados segundo sua forma de alimentação (LOCATELLI, 2002). São divididos em duas grandes famílias: a primeira é a família dos motores acionados por corrente contínua (motores cc). A segunda é a dos motores acionados por corrente alternada (motores ca) (FILHO, 2000). A Figura 2 apresenta um quadro geral dos motores elétricos.

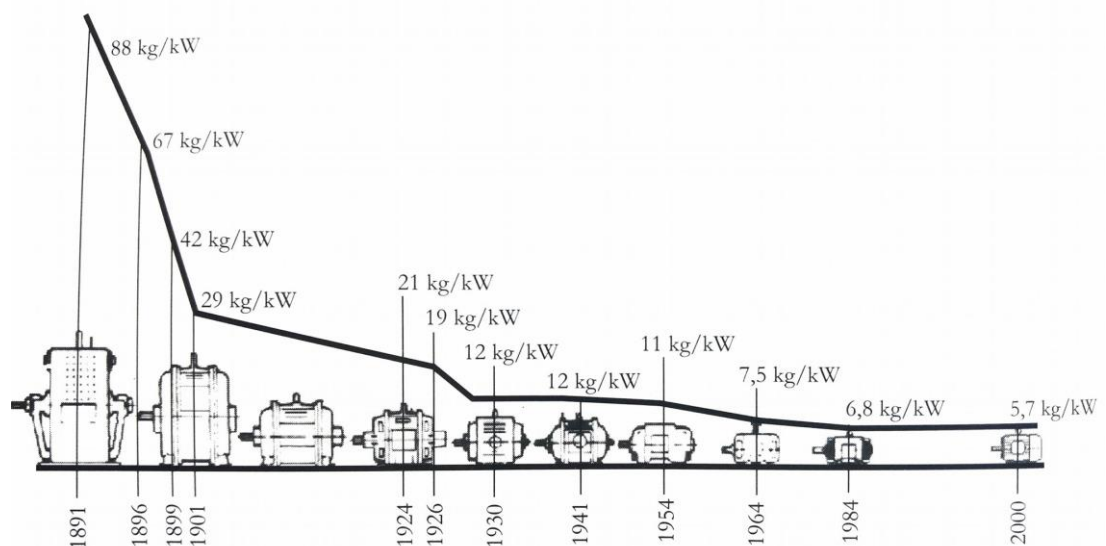
Figura 2 – Quadro Geral de motores elétricos



Fonte: Autor

Desde sua invenção, os motores elétricos vêm sofrendo uma série de desenvolvimentos e melhorias. Um bom exemplo é a relação peso-potência que em 1891, ano de sua criação, era da ordem de 88 kg/kW, passou para 5,7 kg/kW em 2000, como mostrado na Figura 3 (SANTOS *et al.*, 2006).

Figura 3 – Evolução dos motores elétricos

Fonte: (SANTOS *et al.*, 2006)

Dar-se-á maior atenção aos motores de corrente alternada, os quais são divididos em motores síncronos e assíncronos (motor de indução), como visto na Figura 2.

## 1.6 MOTOR SÍNCRONO

Os motores síncronos possuem um enrolamento trifásico alojado nas ranhuras do pacote magnético do estator (carcaça), que quando ligado à rede de alimentação, produz um campo magnético girante. Construtivamente podem ser fabricados com rotor de ímã permanente, com rotor bobinado alimentado em corrente contínua, ou de relutância.

Seu rotor sendo constituído por um ímã permanente, ou por rotor bobinado alimentado em corrente contínua formando um eletroímã, ou através de pólos salientes (de relutância), tende a se “grudar” ao campo do estator girando assim na mesma velocidade. Desta forma, a velocidade do rotor está em sincronismo com o campo magnético girante do estator (LOCATELLI, 2002).

Segundo Souza (2012), as principais vantagens e desvantagens do motor síncrono são:

Vantagem:

- Velocidade constante até a carga máxima.

Desvantagens:

- Alto custo;
- Manutenção difícil e cara;
- Não é autossuficiente na partida sendo necessário um rotor tipo gaiola para colocá-lo em movimento.

## 1.7 MOTOR ASSÍNCRONO (MOTOR DE INDUÇÃO)

Os rotores não giram à mesma velocidade do campo magnético girante. O estator é igual do motor síncrono assim como a alimentação de corrente alternada (SOUZA, 2012). São divididos em dois tipos: motor gaiola ou em curto-circuito, e motor de rotor bobinado ou em anéis. A Figura 4 ilustra o motor de indução.

Como foco do projeto, segundo Souza (2012), o motor gaiola tem como principais vantagens e desvantagens:

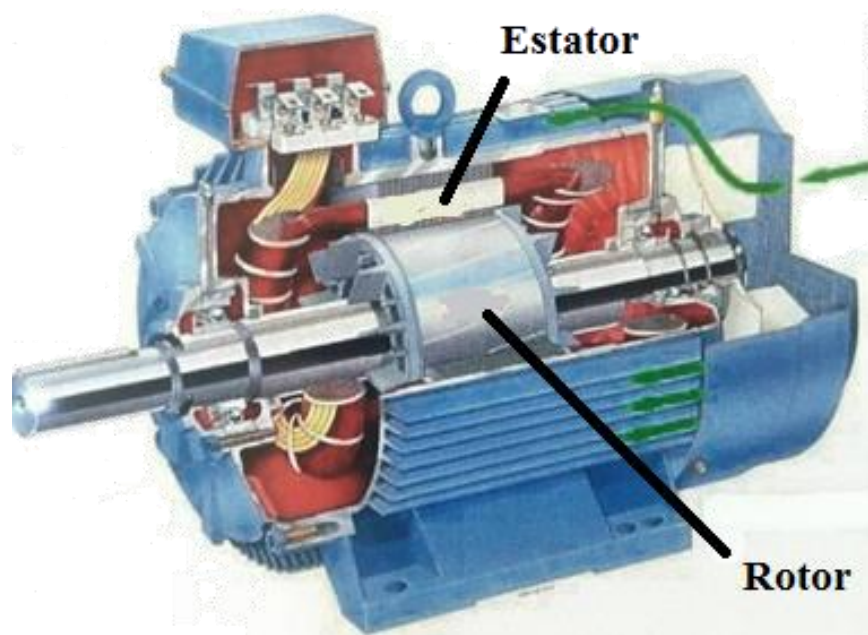
Vantagens:

- Baixo custo;
- Pouca manutenção;
- É o tipo mais utilizado, não necessitando de dispositivos especiais de alimentação;
- Fácil instalação.

Desvantagens:

- Corrente alta na partida (9 a 15 vezes o valor da corrente nominal);
- Não há variação em sua velocidade.

Figura 4 – Motor de indução, vista em corte



Fonte: (Adaptado de SOUZA, 2012)

## 1.8 PRINCIPAIS PARTES DE UM MOTOR ELÉTRICO

### 1.8.1 Estator

Parte fixa da máquina construída de chapas de aço laminadas, na qual são colocados os enrolamentos de armadura com alimentação trifásica, defasadas de  $120^\circ$ . Os enrolamentos são dispostos espacialmente de tal forma que as correntes de todas as fases contribuem positivamente na geração de uma onda de fluxo magnético girante ou campo girante (DIAS *et al.*, 2005). O estator é ilustrado pela Figura 5.

Figura 5 – Estator



Fonte: ELEFRAN (2016)

### 1.8.2 Rotor

Parte girante da máquina também construída de chapas de aço laminadas na qual são colocados os enrolamentos de campo (DIAS *et al.*, 2005). A Figura 6 ilustra um rotor.

Nos motores para aplicação normal, os rotores são do tipo gaiola. As bobinas do rotor não se constituem num enrolamento parecido com o estator. O conjunto de barras é curto-circuitado em ambas as extremidades, dando uma forma muito parecida com uma gaiola cilíndrica, razão do nome desse tipo de rotor (DEL TORO, 1994).

Figura 6 – Rotor



Fonte: DIRACDELTA (2016)

## 1.9 CONCEITOS GERAIS

### 1.9.1 Enrolamento concentrado

Segundo Muñoz (1987), nos enrolamentos “concentrados”, cada grupo de bobinas ocupa apenas duas ranhuras, o número de bobinas por grupo reduz-se a um, isto é, uma ranhura por fase e por pólo.

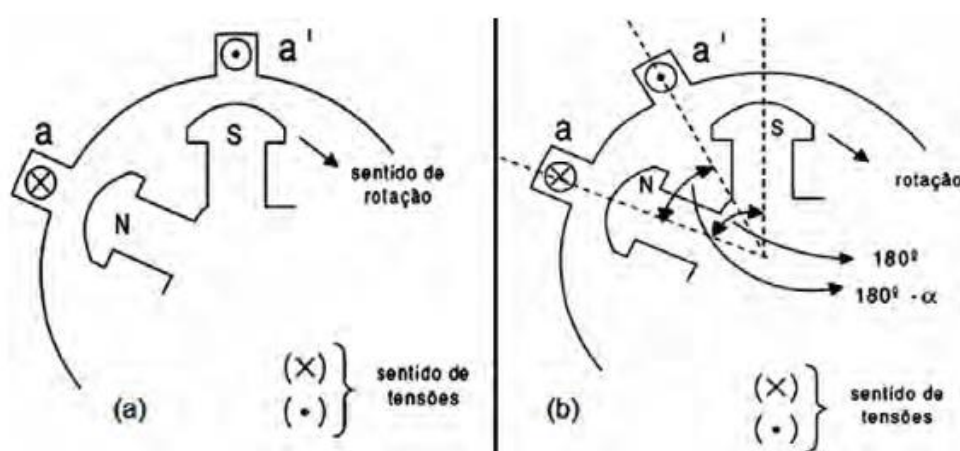
### 1.9.2 Enrolamento distribuído

No caso dos enrolamentos distribuídos, cada grupo contém duas ou mais bobinas que ocupam várias ranhuras por fase por polo (MUÑOZ, 1987).

### 1.9.3 Passo da bobina

Chama-se passo normal, passo total, passo integral, passo longo ou passo completo, quando o passo da bobina é igual ao passo polar (180 graus elétricos); em caso contrário é chamado de passo fracionário, passo parcial ou passo curto, porque o vão da bobina é diferente do passo polar (MUÑOZ, 1987). A Figura 7 ilustra os dois passos.

Figura 7 – Passo da bobina: (a) passo integral, (b) passo fracionário



Fonte: Almeida (2010)

## 1.10 AS MÁQUINAS DE ÍMÃS PERMANENTES

As aplicações das máquinas síncronas de ímãs permanentes estão aumentando exponencialmente devido à redução significativa no custo dos materiais magnéticos e à descoberta de novos materiais com melhores características (ELOSEGUI *et al.*, 2007), como o neodímio, que são utilizados no projeto por razões técnicas e econômicas.

Os principais tipos de máquinas com ímãs permanentes são os motores de passo, as máquinas síncronas e as máquinas de corrente contínua. As diversas configurações de máquina apresentam grande variedade de orientação do fluxo magnético e dependem do tipo de ímã permanente, ímãs permanentes inseridos no rotor ou estator, trifásico, bifásico ou monofásico e ampla faixa de rotação (KALOKIRIS *et al.*, 2007). A Figura 8 ilustra a classificação básica das máquinas de ímãs permanentes.

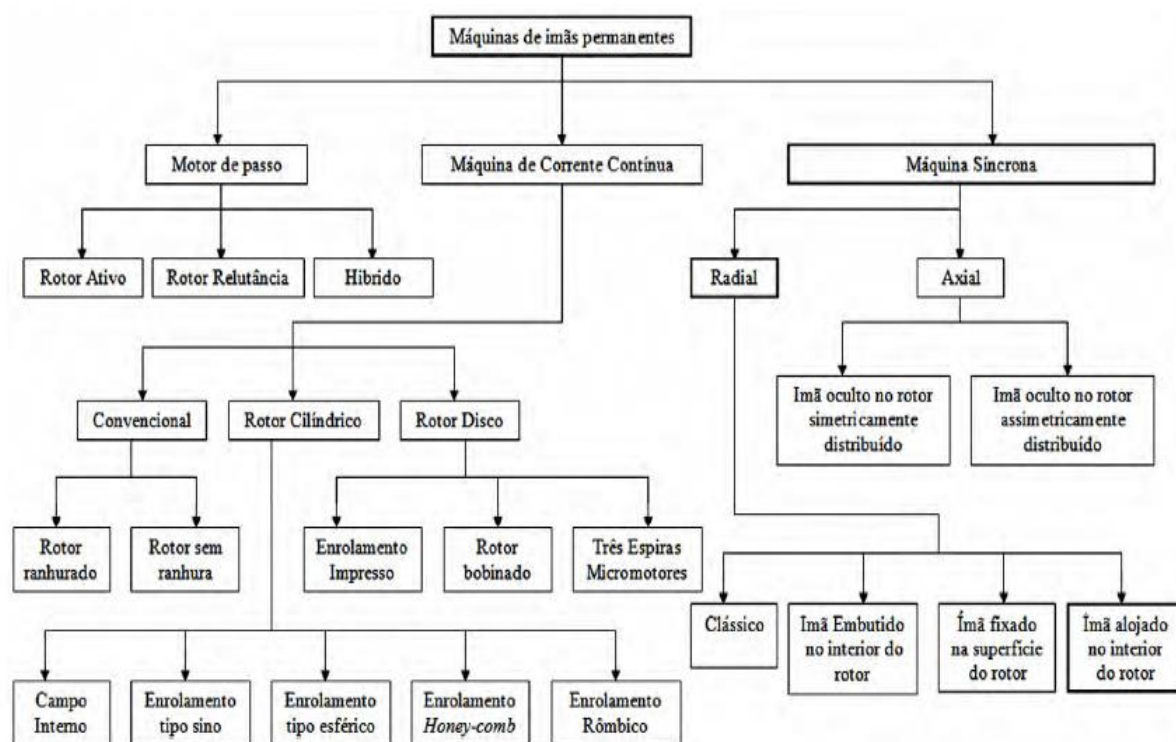
As máquinas de ímãs permanentes encontram ampla gama de aplicações em diversos domínios, tais como os equipamentos domésticos, automóveis, transporte, equipamento aeronáutico, ferramentas elétricas, brinquedos, equipamentos de som e equipamentos de saúde que vão de potências desde microwatts até megawatts (COEY, 2002).

Tem como vantagem a facilidade da variação da velocidade, pela simples variação da tensão em seus terminais. Outra vantagem é que aplicando-se rotação ao seu eixo, tornam-se geradores de corrente contínua com tensão diretamente proporcional à velocidade, podendo assim também serem utilizados como tacômetros de baixo custo.

Como desvantagem tem geralmente uma baixa vida útil devido ao atrito e faiscamento no conjunto escova-comutador, podendo produzir ruídos eletromagnéticos de interferência em circuitos eletrônicos (LOCATELLI, 2002).

Apesar de serem muito promissoras, essas máquinas têm apresentado muitos desafios para chegar a seu estágio atual, em termos de custos, ondulação de torque, ruído, vibrações e a redução da confiabilidade devido ao grande número de componentes (HWANG *et al.*, 2004).

Figura 8 – Classificação básica das máquinas de ímãs permanentes

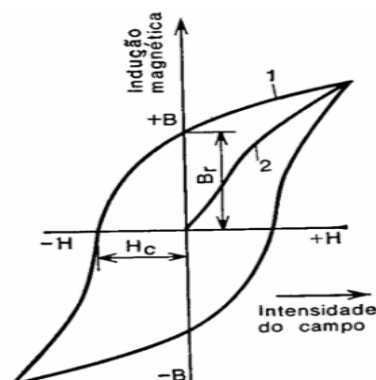


Fonte: (ALMEIDA, 2010); (GIERAS; WING, 1997); (HENDERSHOT; MILLER, 1994)

### 1.11 CONCEITOS BÁSICOS SOBRE MAGNETISMO

Na Figura 9 é apresentada a curva de magnetização típica de um material ferromagnético, bem como a Tabela 1 que faz uma comparação entre os quatro principais tipos de ímãs permanentes.

Figura 9 – Curva de magnetização: (1) laço de histerese, (2) curva original



Fonte: (ALMEIDA, 2010)

Os parâmetros importantes para os materiais magnéticos são: a remanência ( $B_r$ ) que é a indução magnética que se conserva no corpo magnetizado, depois de anulada a intensidade do campo aplicado, a força coercitiva ( $H_c$ ) que é a intensidade de campo que tem de ser aplicada para a desmagnetização de um material magnético e a temperatura de curie ( $^{\circ}\text{C}$ ) que é a temperatura na qual o domínio magnético é destruído, isto é, a temperatura de desmagnetização (ALMEIDA, 2010).

Tabela 1 – Propriedades básicas dos principais ímãs

| Propriedades                   | Unidades             | Ferritas anisotrópicas | Neodímio   | Alnico     | Samário-cobalto |
|--------------------------------|----------------------|------------------------|------------|------------|-----------------|
| Remanência ( $B_r$ )           | Tesla                | 0,35 a 0,43            | 1,0 a 1,3  | 0,6 a 1,35 | 0,7 a 1,05      |
| Força Coercitiva ( $H_c$ )     | kA/m                 | 180 a 400              | 800 a 1900 | 40 a 130   | 800 a 1500      |
| Resistividade ( $\rho$ )       | $\mu\Omega\text{cm}$ | > 10.000               | 150        | 47         | 86              |
| Temperatura máxima de trabalho | $^{\circ}\text{C}$   | 400                    | 80 a 200   | 500 a 550  | 250 a 350       |
| Temperatura de curie           | $^{\circ}\text{C}$   | 450                    | 310 a 350  | 850        | 700 a 800       |
| Massa específica               | $\text{kg/m}^3$      | 4900                   | 7400       | 7300       | 8200            |

Fonte: (ALMEIDA, 2010); (HENDERSHOT e MILLER, 1994); (FITZGERALD; KUSKO; KINGSLEY, 2006)

### 1.11.1 O neodímio

Com a descoberta de uma segunda geração de ímãs de neodímio (Nd), tem sido alcançado um progresso no que diz respeito à redução dos custos. O Nd é muito mais abundante do que elemento de terras raras samário (Sm). Ímãs de neodímio-ferro-boro (NdFeB), que são atualmente produzidas em quantidades cada vez maiores, têm melhores propriedades magnéticas do que os ímãs de samário-cobalto (SmCo), mas infelizmente não resistem às altas temperaturas. A curva de desmagnetização, especialmente a força coerciva, é fortemente dependente da temperatura. O coeficiente de temperatura de Br é de 0,095 a 0,15%/°C e o coeficiente de temperatura de Hc é de 0,40 para 0,70%/°C. A máxima temperatura de serviço é de 80 a 200°C e temperatura de Curie é 310 °C. O NdFeB, em geral, é suscetível à corrosão.

As últimas séries dos ímãs de NdFeB têm melhor estabilidade térmica e oferecem melhor resistência à corrosão. A resina ou revestimento metálico também são empregados para ajudar a proteção dos ímãs em ambientes agressivos (ALMEIDA, 2010).

## 1.12 MOBILIDADE ELÉTRICA

Como foco principal de aplicação do projeto, segundo Fernandes (2012), a Mobilidade Elétrica (ME) tem vindo a impor-se gradualmente verificando-se que vários fatores têm contribuído para tal, desde o elevado preço dos combustíveis fósseis, às preocupações ambientais, cada vez mais importantes, e ao avanço tecnológico que se tem verificado nos últimos tempos nesta área.

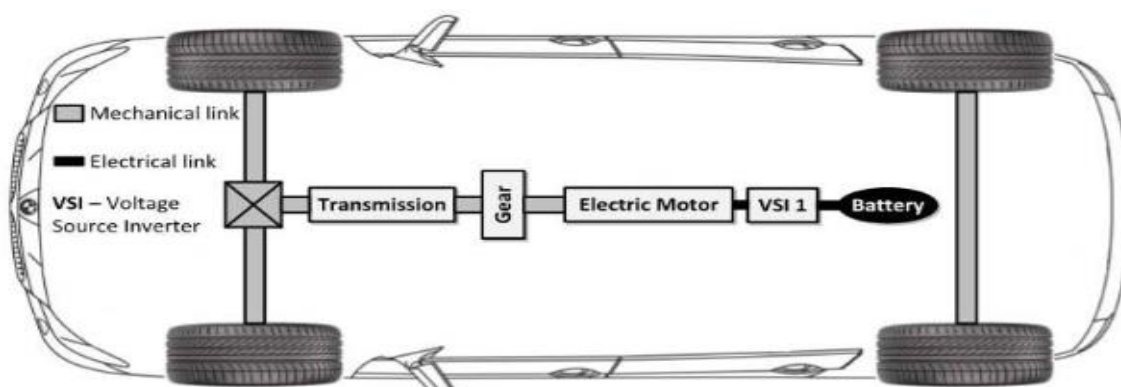
A evolução tecnológica que se tem verificado ao nível das baterias, que já apresentam tempos de carga mais baixos, com maior autonomia, mais potência e principalmente a preços cada vez mais competitivos, o veículo elétrico (VE) é cada vez mais uma solução de mobilidade confiável, viável e a considerar em função das várias vantagens que apresenta, nomeadamente:

- Zero Emissões, pois o VE no seu funcionamento não emite gases poluentes, e não emite ruídos;
- O motor eléctrico apresenta uma maior eficiência, utilizando cerca de 0,1 a 0,23 kWh por quilometro, verificando-se que um veículo a gasolina apresenta um consumo médio de potência de cerca de 0,98 kWh por quilometro;
- Silencioso, principalmente a baixas velocidades, constatando-se que o VE não possui os sistemas responsáveis pela emissão de ruído, como o sistema de escape, peças móveis no motor, não se dá a combustão pelo que a sua deslocação é silenciosa oferecendo uma nova experiência de condução, sem embreagem, nem caixa de velocidades manual. O binário dos motores eléctricos pode ser constante independentemente da rotação o que pode proporcionar performances consideráveis;

Existem quatro tipos de VEs já disponíveis, podendo o utilizador escolher o que mais lhe convier em função das suas necessidades. Os tipos são:

- Veículos Eléctricos a bateria;
- Veículos Eléctricos Híbridos;
- Veículos a Pilha de Combustível;
- Veículos Eléctricos Alimentação Directa.

Figura 10 – Veículo eléctrico à bateria



Fonte: (COSTA, 2014)

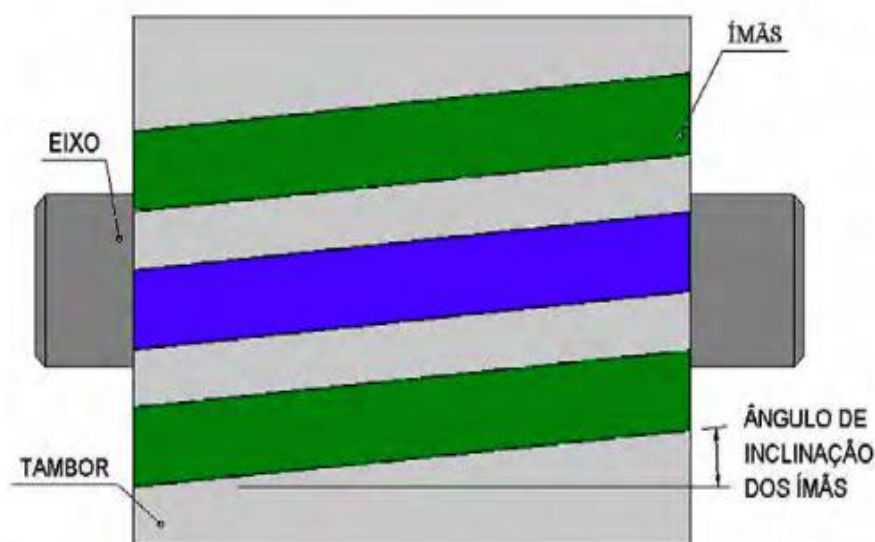
## 2 METODOLOGIA PARA A INSERÇÃO DOS ÍMÃS PERMANENTES

### 2.1 INTRODUÇÃO AO PROJETO

A máquina síncrona com ímãs permanentes no interior do rotor foi projetada a partir de um motor de indução trifásico com rotor gaiola de esquilo. Utiliza-se o mesmo estator, projeta-se o rotor com blocos de ímãs permanentes (Neodímio – NdFeB) inclinados (diminuem a distorção harmônica e o torque de travamento), que tenham aproximadamente 80% da densidade de fluxo magnético por pólo por fase do estator. Tal valor foi adotado, pois segundo Almeida (2010), verificou-se que ímãs muito potentes, com a mesma densidade de fluxo do estator, não permitem que o rotor gire.

O presente capítulo demonstra o passo-a-passo de como se dão os cálculos para escolha correta dos ímãs a ser inseridos no rotor. Algumas das informações são: dimensão dos ímãs, tipo de ímã, número de polos e inclinação dos ímãs.

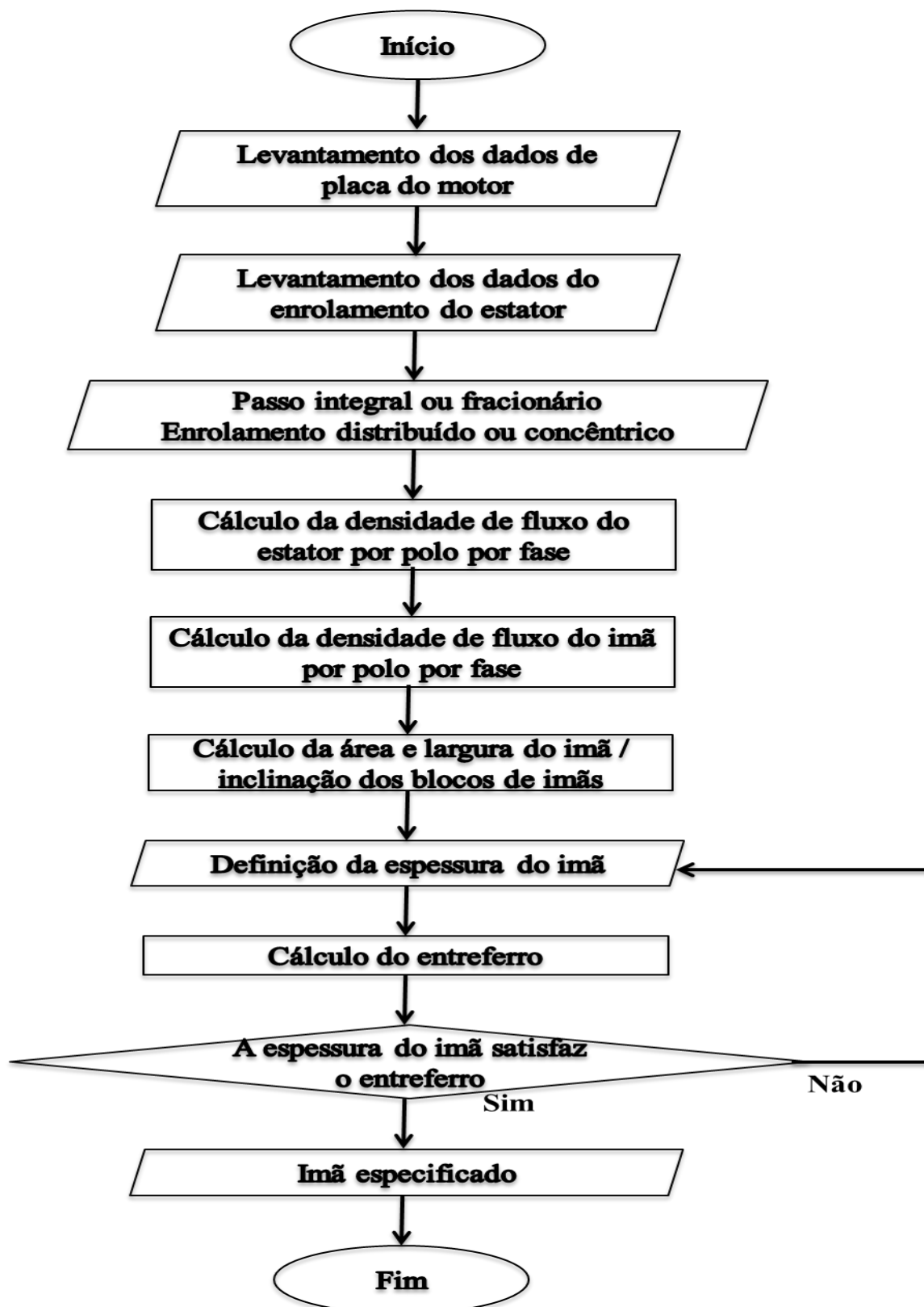
Figura 11 – Rotor com os ímãs inclinados



Fonte: (ALMEIDA, 2010)

O fluxograma mostrando detalhadamente o passo-a-passo dos cálculos para a correta especificação dos ímãs é apresentado na Figura 12 a seguir.

Figura 12 – Fluxograma geral



Fonte: Autor

## 2.2 DESENVOLVIMENTO DOS CÁLCULOS PARA O PROJETO

### 2.2.1 Especificações

O primeiro passo é definir qual motor seria utilizado no projeto. Como a aplicação tem foco na mobilidade elétrica, foram levantadas as mínimas condições necessárias para que o motor atendesse essa aplicação, que são: torque de 100 Nm, além de uma rotação de 2400 rpm (conseguida através de inversor de frequência). Após contatos com a empresa WEG S.A., as especificações do motor selecionado se encontram na Tabela 2 e Tabela 3 abaixo.

Tabela 2 – Especificações técnicas do motor de indução

| Dados de placa do motor | Símbolos       | Valores | Unidade |
|-------------------------|----------------|---------|---------|
| Potência                | P              | 40      | cv      |
| Carcaça                 |                | 200M    |         |
| Rotação                 | n              | 1750    | rpm     |
| Número de polos         | p              | 4       |         |
| Rendimento              | $\eta$         | 0,93    |         |
| Fator de potência       | $\cos \varphi$ | 0,85    |         |
| Tensões                 | V              | 220/380 | V       |
| Corrente nominal        | I              | 99,2/-  | A       |
| Massa                   |                | 195     | kg      |

Fonte: WEG (2016)

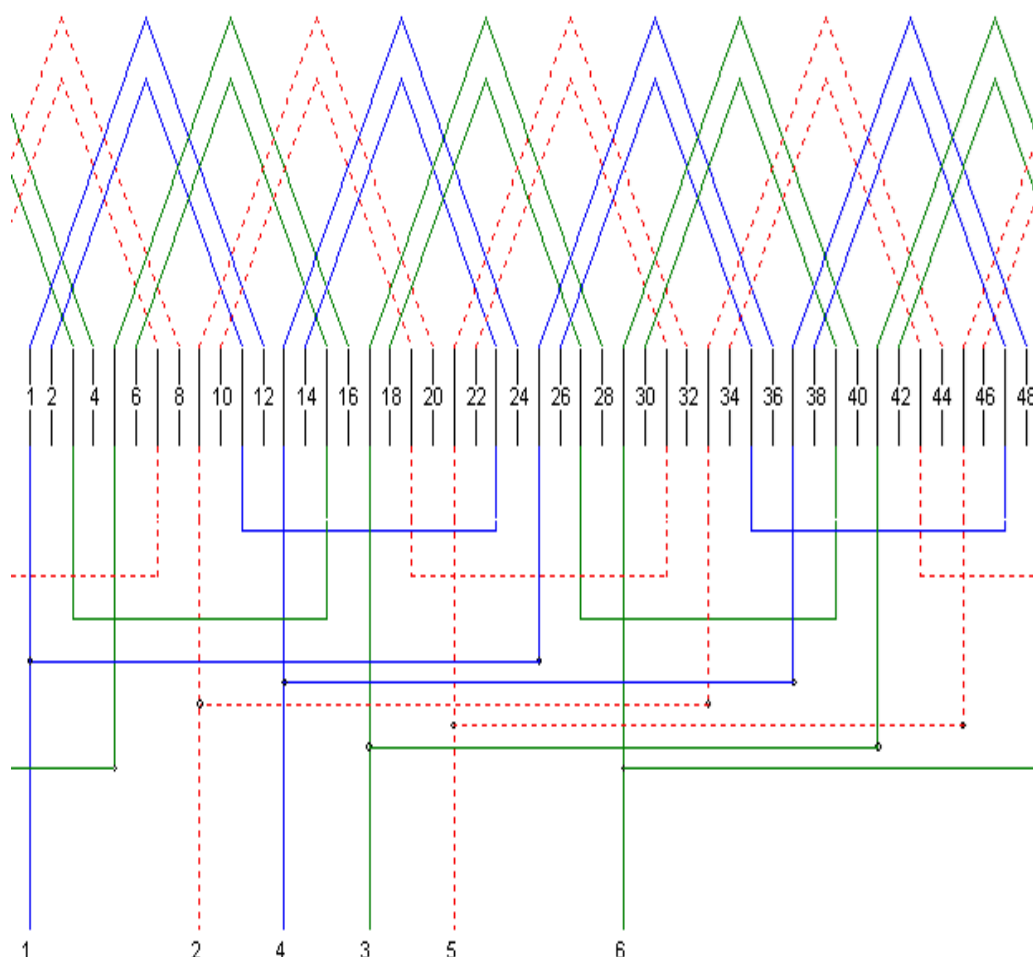
Tabela 3 – Especificações do enrolamento do estator

| Dados construtivos do enrolamento | Símbolos | Valores     | Unidade  |
|-----------------------------------|----------|-------------|----------|
| Número de espiras por fase        | Nf       | 112         |          |
| Número de espiras por grupo       |          | 56          |          |
| Diâmetro do fio                   | n        | 0,85        | mm       |
| Número de ranhuras do estator     | Q        | 48          | ranhuras |
| Diâmetro interno do estator       | Dint est | 206         | mm       |
| Comprimento interno do estator    | Lint est | 200         | mm       |
| Passo médio da bobina             |          | 11          | ranhuras |
| Grupos por fase                   |          | 4           |          |
| Bobinas por grupo                 |          | 2           |          |
| Ligação                           |          | 2x paralela |          |
| Número de fase                    | m        | 3           |          |

Fonte: WEG (2016)

A Figura 13 apresenta a vista planificada do enrolamento do motor especificado. Nela estão contidas algumas informações, tais como: passo polar (10 ou 12 ranhuras) e tipo de enrolamento (distribuído nesse caso).

Figura 13 – Vista planificada do enrolamento do estator



Fonte: WEG (2016)

Segundo Cistelecan e Popescu (2007), os enrolamentos distribuídos reduzem os harmônicos, pois distribuem eficientemente as ranhuras em volta da periferia interna do estator. Segundo Kosow (1996), os enrolamentos concentrados têm inúmeras desvantagens em virtude do uso ineficiente de toda a periferia interna do núcleo do estator e torna-se, então, necessário o uso de ranhuras extremamente profundas onde os enrolamentos estão concentrados, aumentando a dispersão e a reatância do estator.

### 2.2.2 Cálculos da densidade de fluxo do estator

Para que se consiga especificar corretamente as dimensões e os tipos de ímãs que constituirão o rotor, o primeiro passo é encontrar através de cálculos a densidade de fluxo do estator por polo por fase.

Segundo Munõz (1987), as equações (1) e (2) resultam no valor do passo polar e da densidade de fluxo do estator por polo por fase.

$$Y_p = \frac{D_{int\ est} \pi}{p} \quad (1)$$

$$\phi = \left(\frac{2}{\pi}\right) Y_p L_{int\ est} B_s \quad (2)$$

Sendo,

$\Phi$  = densidade de fluxo do estator por polo por fase [linhas]

$Y_p$  = passo polar [cm]

$L_{int\ est}$  = comprimento interno do estator [cm]

$B_s$  = remanência magnética do estator [linhas/cm<sup>2</sup>]

$D_{int\ est}$  = diâmetro interno do estator [cm]

$p$  = número de polos

Segundo Muñoz (1987), a remanência magnética do estator ( $B_s$ ) varia entre 3000 a 6000 linhas por cm<sup>2</sup>. Adotou-se no primeiro momento 4500 linhas por cm<sup>2</sup>, porém após a correção do valor da densidade de fluxo por polo por fase pelas equações (3), (4) e (5), o novo valor da remanência magnética foi de 3425 linhas por cm<sup>2</sup>.

$$\phi = \left( \frac{V f_d 10^8}{4,44 f f_s N_f} \right) \quad (3)$$

$$f_s = \text{sen} \left( \frac{180^\circ}{2} \right) \quad (4)$$

Sendo,

$V$  = tensão [V]

$f_d$  = fator de distribuição

$f_s$  = fator de enrolamento

$f$  = frequência [Hz]

$N_f$  = Número de espiras por fase

Segundo Munõz (1987), na equação (4) do fator de enrolamento, o ângulo de  $180^\circ$  elétricos é utilizado quando o enrolamento é um enrolamento de passo integral, ou seja, o passo da bobina é igual ao passo polar em número de ranhuras (neste caso específico, 12 ranhuras).

Já, para o cálculo do fator de distribuição, utiliza-se a equação (5). Este fator é igual à unidade para um enrolamento “concentrado” e menor que a unidade para um bobinamento “distribuído” (MUÑOZ, 1987). As equações (6), (7) e (8) complementam a equação (5).

$$f_d = \frac{\text{sen}\left(\frac{q\beta}{2}\right)}{q \text{ sen}\left(\frac{\beta}{2}\right)} \quad (5)$$

$$q = \frac{Q}{m p} \quad (6)$$

$$\beta = \frac{180^\circ E}{r_p} \quad (7)$$

$$r_p = \frac{Q}{p} \quad (8)$$

Sendo,

$q$  = número de ranhuras por polo por fase

$\beta$  = passo da ranhura determinado em graus elétricos [ $^\circ E$ ]

$Q$  = número de ranhuras

$m$  = número de fases

$p$  = número de polos

$r_p$  = passo polar em número de ranhuras

A Tabela 4 resume todos os cálculos realizados.

Tabela 4 – Cálculo da densidade de fluxo do estator por polo por fase

| Principais cálculos                                   | Símbolos | Valores | Unidade                |
|-------------------------------------------------------|----------|---------|------------------------|
| Densidade de fluxo do estator por polo por fase       | $\Phi$   | 706376  | linhas                 |
| Passo polar                                           | $Y_p$    | 16,2    | cm                     |
| Remanência magnética do estator                       | $B_e$    | 3425    | linhas/cm <sup>2</sup> |
| Fator de distribuição                                 | $f_d$    | 0,958   |                        |
| Fator de enrolamento ou passo                         | $f_e$    | 1       |                        |
| Número de espiras por fase                            | $N_f$    | 112     |                        |
| Número de espiras totais                              | $N_t$    | 336     |                        |
| Número de espiras por grupo                           | $N_g$    | 28      |                        |
| Tensão aplicada a cada base do bobinamento do estator | $V$      | 220     | V                      |
| Número de ranhuras por polo por fase                  | $q$      | 4       |                        |
| Passo das ranhuras                                    | $\beta$  | 15°E    |                        |
| Passo polar em número de ranhuras                     | $r_p$    | 12      |                        |

Fonte: Autor

### 2.2.3 Determinação das dimensões e dos tipos de ímãs permanentes

A área do ímã é determinada pela equação (9), a qual mostra a relação entre a densidade de fluxo magnético do ímã ( $\phi_m$ ) pela remanência magnética do estator ( $B_e$ ). Utiliza-se blocos de ímãs permanentes (Neodímio – NdFeB) inclinados, que tenham aproximadamente 80% da densidade de fluxo magnético por pólo por fase do estator. Tal valor foi adotado, pois em pesquisas e testes passados, verificou-se que, ímãs muito potentes, com a mesma densidade de fluxo do estator, não permitem que o rotor gire.

$$S = \frac{\phi_m}{B_e} \quad (9)$$

A largura do ímã ( $L_m$ ), equação (10), é o resultado da divisão entre a área (S) anteriormente calculada pelo comprimento total dos ímãs por polo ( $C_m$ ), que é a medida do comprimento do pacote do rotor, nesse caso 200 mm.

$$L_m = \frac{S}{C_m} \quad (10)$$

Segundo Almeida (2010), o projetista optará entre os ímãs permanentes de neodímio ou de ferrita. A ferrita é a opção economicamente mais vantajosa, porém tais ímãs possuem baixos valores de remanência. Os ímãs permanentes de alnico e samário-cobalto não são para este tipo de projeto por apresentarem maiores custos.

A largura do ímã terá de respeitar o passo polar ( $Y_p$ ). Indica-se inicialmente que a largura do ímã não ultrapasse 70% do passo polar em virtude da fixação destes ímãs no rotor. Em tal projeto, a largura do ímã representa 51% do passo polar.

Por fim, calcula-se a espessura do ímã ( $e$ ), que deverá atender aos critérios do entreferro. Tais detalhamentos são apresentados no tópico a seguir.

Como já dito anteriormente, o ímã escolhido foi o neodímio, mais especificamente o neodímio N35, que tem remanência média de 3500 Gauss, na qual atende tal projeto. A ferrita não atenderia, pois suas dimensões ultrapassariam o passo polar, porque a remanência é baixa, em geral até 1500 gauss e obtendo-se um valor de densidade de fluxo bem abaixo da exigência. Os ímãs de neodímio possuem uma cobertura de níquel para proteção contra a corrosão. A letra N significa a máxima temperatura de operação e as dezenas seguintes determinam a remanência; pode-se encontrar as letras M, H, precedidas de SH, UH, EH em temperaturas máximas de trabalho de 80, 100, 120, 150, 180 e 200 °C (ALMEIDA, 2010).

Para atender o comprimento do pacote do rotor de 200 mm, escolhe-se 10 peças com o comprimento de 19 mm cada. A Tabela 5 a seguir resume as especificações citas.

Tabela 5 – Especificações dos ímãs de Neodímio N35

| Definições dos ímãs     | Símbolos | Valores | Unidade |
|-------------------------|----------|---------|---------|
| Comprimento             | Cm       | 19      | mm      |
| Largura                 | Lm       | 82,5    | mm      |
| Espessura               | e        | 4       | mm      |
| Remanência magnética    | Be       | 3500    | gauss   |
| Sentido de magnetização |          | radial  |         |
| Temperatura máxima      | Te       | 80      | °C      |

Fonte: Autor

A remanência magnética também pode ser determinada pela curva de magnetização do ímã. Segundo Almeida (2010), tal curva varia em função da temperatura e a reta de carga é

traçada do ponto de origem até o valor do coeficiente de permeância determinado para o projeto, portanto, a reta de carga varia em função do coeficiente de permeância.

Nos projetos de motores, o valor típico do coeficiente de permeância (PC) é de 10, com variação de 5 a 15 (HENDERSHOT; MILLER, 1994).

#### 2.2.4 Entreferro

Chama-se entreferro, a lacuna entre o estator e o tambor do motor (nos ímãs ou não).

Segundo Hendershot e Miller (1994), o entreferro para micromotores, usados em computadores, está compreendido entre 0,13 a 0,25 mm; motores pequenos, tais como tacogeradores e pequenos servomotores, de 0,38 a 0,51 mm e motores brushless de tamanho próximo ao do projeto possui faixa entre 0,64 a 0,89 mm.

Segundo Hwang *et al* (2002), Hwang, Liu e Teng (2008), Hanselman (2006), Gieras *et al* (1997), o máximo entreferro admissível ( $g$ ) é calculado pela equação (11), além das equações (12), (13), (14) e (15) também necessárias.

$$g = \frac{e}{PC C_\phi} \quad (11)$$

Sendo o fator de fluxo concentrado ( $C_\phi$ ),

$$C_\phi = \frac{A_m}{A_g} \quad (12)$$

Os quais  $A_m$  a área do corte transversal por polo do ímã e  $A_g$  a área do corte transversal por polo do entreferro são calculados por:

$$A_m = L_m e \quad (13)$$

$$A_g = \frac{\alpha D_{int\ est} e \pi}{p} \quad (14)$$

O coeficiente do arco polar ( $\alpha$ ) é definido como:

$$\alpha = \frac{Y_p - e}{Y_p} \quad (15)$$

A Tabela 6 apresenta todos os valores anteriormente calculados para a determinação do máximo entreferro admissível.

Tabela 6 – Cálculos para o entreferro

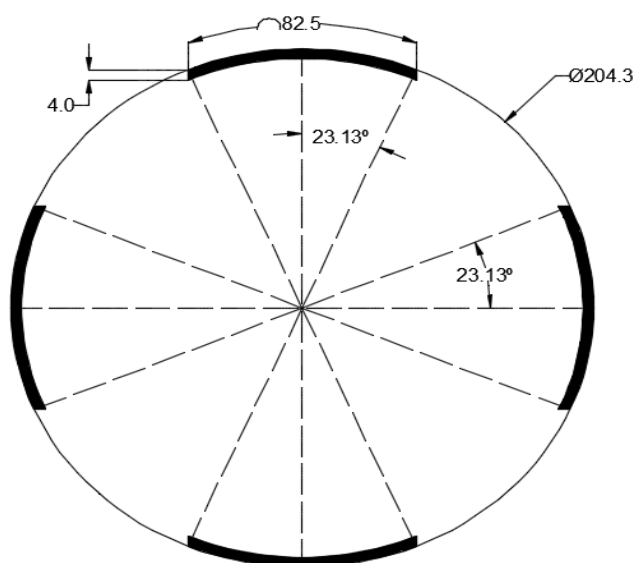
| Dados                                            | Símbolos       | Valores | Unidade         |
|--------------------------------------------------|----------------|---------|-----------------|
| Espessura do ímã                                 | $e$            | 4       | mm              |
| Coefficiente de permeância                       | $PC$           | 10      |                 |
| Diâmetro interno do estator                      | $D_{int\ est}$ | 206     | mm              |
| Número de polos                                  | $p$            | 4       |                 |
| Passo polar                                      | $Y_p$          | 162     | mm              |
| Calculados                                       |                |         |                 |
| Largura do ímã                                   | $L_m$          | 82,5    | mm              |
| Máximo entreferro admissível                     | $g$            | 0,765   | mm              |
| Fator de fluxo concentrado                       | $C_\Phi$       | 0,523   |                 |
| Área do corte transversal por polo do ímã        | $A_m$          | 330     | mm <sup>2</sup> |
| Área do corte transversal por polo do entreferro | $A_g$          | 631     | mm <sup>2</sup> |
| Coefficiente do arco polar                       | $\alpha$       | 0,975   |                 |

Fonte: Autor

### 2.2.5 Ângulo de inclinação

A Figura 14 ilustra os ímãs sobre o rotor, formando 4 polos.

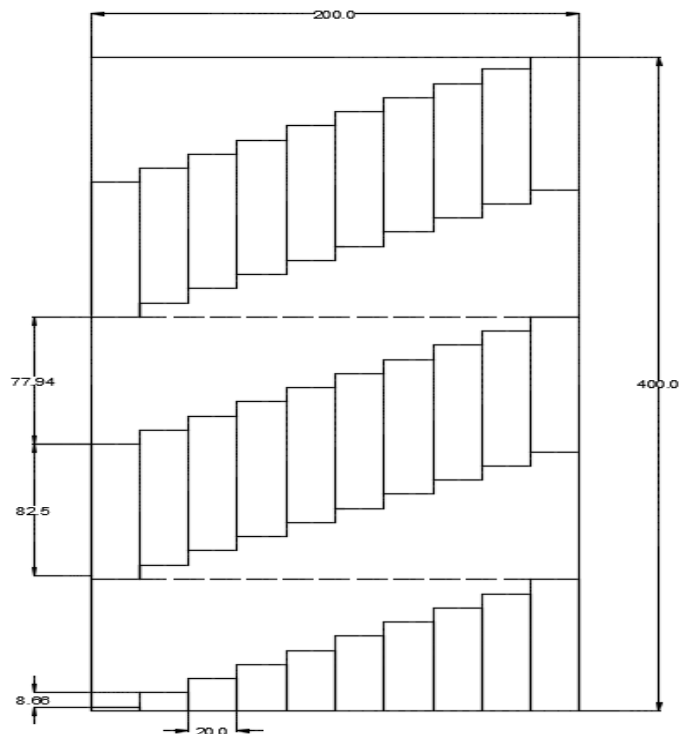
Figura 14 – Distribuição dos 4 polos de ímãs no rotor



Fonte: Autor

A Figura 15 apresenta as barras de ímãs inclinadas sobre o rotor (vista parcial). Segundo Almeida (2010), a inclinação deverá respeitar o critério de que a extremidade do último ímã tem que estar na mesma direção que o início da extremidade oposta do próximo ímã, referente ao outro polo, visto pela interseção entre polos. O ângulo de inclinação, equação (16), no projeto foi uma consequência do critério estabelecido e não uma determinação. Uma nova escolha no ângulo de inclinação, por determinação, obrigaria a uma nova especificação na largura do ímã e logicamente em novos valores de remanência e espessura deste ímã. Por sua vez, isso acarretaria um novo valor para o entreferro.

Figura 15 – Rotor com os ímãs fixados



Fonte: Autor

$$\theta_{inclinação} = \left\{ \frac{\left[ \left[ (D_{int\ est} - 2\ g_{ferro}) \sin \left( \frac{180}{p} \right) \right] - L_m \right]}{C_m} \right\} \quad (16)$$

Sendo,

$\theta_{inclinação}$  = ângulo de inclinação dos blocos de ímãs

$C_m$  = comprimento total dos ímãs ou rotor

$g_{ferro}$  = entreferro entre o estator e as bordas de ferro do rotor

$L_m$  = largura do ímã – faixa indicada:  $0,1 Y_p < L_m < 0,9 Y_p$

$Y_p$  = passo polar

Substituindo-se os valores do projeto,  $D_{int\ est} = 206\text{ mm}$ ,  $g_{ferro} = 1,7\text{ mm}$ ,  $p = 4$ ,  $L_m = 0,1\text{ mm}$  e  $C_m = 200\text{ mm}$ , na equação tem-se um ângulo de inclinação máximo de aproximadamente  $36^\circ$ , considerando ímãs com largura extremamente pequena. No caso desse projeto, escolheu-se  $21,3^\circ$ , ângulo em que se dava a interseção entre os polos.

### 3 RESULTADO COMPARATIVO E APLICATIVO

#### 3.1 SUBSTITUIÇÃO DOS MATERIAIS

Um dos pontos cruciais no projeto de um veículo elétrico é a massa de carga que o mesmo poderá transportar. Com o objetivo de se aumentar tal carga, pode-se utilizar motores elétricos com ímãs permanentes em substituição aos motores de combustão. Assim, não há necessidade de se utilizar tanques de combustível e sim, a utilização de baterias, além de proporcionar uma melhora na performance do mesmo, como no aumento do torque, já citado anteriormente.

Portanto, com a adequação e a diminuição da massa do motor através da substituição dos materiais utilizados, pode-se aumentar a carga a ser transportada, seja ela de pessoas ou não. A Tabela 6 apresenta a comparação entre as massas iniciais das partes selecionadas com as projetadas (em negrito). Por exemplo, há 13,07 kg de fios de cobre no motor, já, após a proposta de troca por alumínio, apenas 3,97 kg. É importante ressaltar que já há hoje projetos de motores de até 15 cv em carcaça de alumínio.

Tabela 7 – Comparação entre massas

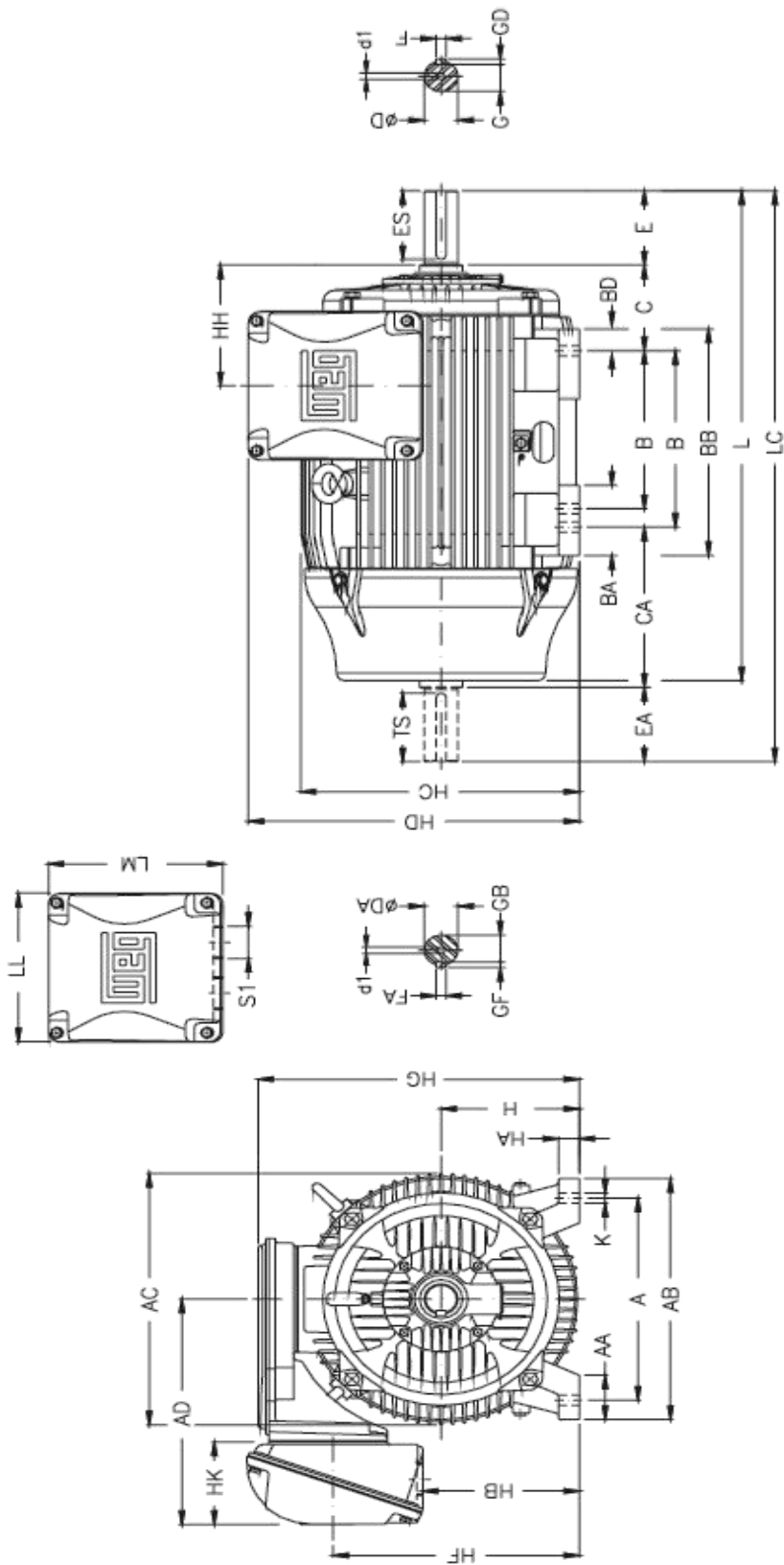
|                                | Ferro fundido | Alumínio         | Cobre           | Aço     | Titânio     |
|--------------------------------|---------------|------------------|-----------------|---------|-------------|
| Densidade (g/cm <sup>3</sup> ) | 7,5           | 2,7              | 8,9             | 7,8     | 4,55        |
| Massa carcaça (kg)             | 39            | <b>14</b>        | -               | -       | -           |
| Massa rotor (kg)               | -             | 4,6/ <b>16,2</b> | -               | 33,52/- | -           |
| Massa fios (kg)                | -             | <b>3,97</b>      | 13,07           | -       | -           |
| Massa eixo (kg)                | -             | -                | -               | 19,18   | <b>11,2</b> |
| Massa total (kg)               |               |                  | 195/ <b>131</b> |         |             |

Fonte: Autor

Assim verificou-se que a proposta de substituir alguns dos materiais utilizados no motor proporcionou uma redução de 195 kg para 131 kg, permitindo uma diminuição de 32,8% da massa total do mesmo.

O desenho do motor aqui utilizado, bem como suas dimensões principais (carcaça, eixo, etc.) encontra-se nas Figuras 16 e 17.

Figura 16 – Desenho motor 40 cv



Fonte: WEG (2016)

Figura 17 – Dimensões do motor utilizado

| Carcaca | A   | AA   | AB  | AC  | AD  | B       | BA | BB    | BD | C   | CA  | Ponta de eixo dianteira |     |    |    |      |    | Ponta de eixo traseira |     |    |    |      |    |
|---------|-----|------|-----|-----|-----|---------|----|-------|----|-----|-----|-------------------------|-----|----|----|------|----|------------------------|-----|----|----|------|----|
|         |     |      |     |     |     |         |    |       |    |     |     | D                       | E   | ES | F  | G    | GD | DA                     | EA  | TS | FA | GB   | GF |
| 63      | 100 | 25,5 | 116 | 125 | 123 | 80      |    | 95    |    | 40  | 78  | 11j6                    | 23  | 14 | 4  | 8,5  | 4  | 9j6                    | 20  | 12 | 3  | 7,2  | 3  |
| 71      | 112 | 28,5 | 132 | 141 | 131 | 90      |    | 113,5 |    | 45  | 88  | 14j6                    | 30  | 18 | 5  | 11   | 5  | 11j6                   | 23  | 14 | 4  | 8,5  | 4  |
| 80      | 125 | 30,5 | 149 | 159 | 140 |         |    | 125,5 |    | 50  | 93  | 19j6                    | 40  | 28 | 6  | 15,5 | 6  | 14j6                   | 30  | 18 |    | 11   |    |
| L80     |     |      |     |     |     | 100     |    |       |    |     | 142 |                         |     |    |    |      |    |                        |     |    |    |      |    |
| 90S     |     |      |     |     |     |         |    | 131   |    |     | 104 |                         |     |    |    |      |    |                        |     |    |    |      |    |
| L90S    | 140 | 36,5 | 164 | 179 | 159 |         |    | 156   |    | 56  | 135 | 24j6                    | 50  | 36 |    | 20   | 7  | 16j6                   | 40  | 28 | 5  | 13   | 5  |
| 90L     |     |      |     |     |     | 125     |    |       |    |     | 104 |                         |     |    |    |      |    |                        |     |    |    |      |    |
| L90L    |     |      |     |     |     |         |    |       |    |     | 135 |                         |     |    |    |      |    |                        |     |    |    |      |    |
| 100L    | 160 | 40   | 188 | 199 | 169 |         |    | 173   |    | 63  | 118 |                         | 60  | 45 | 8  |      |    | 22j6                   | 50  | 36 | 6  | 18,5 | 6  |
| L100L   |     |      |     |     |     | 140     |    |       |    |     | 162 |                         |     |    |    | 24   |    |                        |     |    |    |      |    |
| 112M    | 190 | 40,5 | 220 | 222 | -   |         |    | 177   |    | 70  | 128 | 28j6                    |     |    |    |      |    | 24j6                   |     |    | 8  | 20   | 7  |
| L112M   |     |      |     |     |     |         |    |       |    |     | 158 |                         |     |    |    |      |    |                        |     |    |    |      |    |
| 132S    | 216 | 45   | 248 | 272 | 220 | 178     |    | 187   |    | 89  | 150 | 38k6                    | 80  | 63 | 10 | 33   | 8  | 28j6                   | 60  | 45 |    | 24   |    |
| 132M    |     |      |     |     |     | 178/203 |    | 225   |    |     |     |                         |     |    |    |      |    |                        |     |    |    |      |    |
| 132M/L  |     |      |     |     |     |         |    | 250   |    |     |     |                         |     |    |    |      |    |                        |     |    |    |      |    |
| 160M    | 254 | 64   | 308 | 329 | 266 | 210     | 63 | 254   |    | 108 | 174 | 42k6                    |     |    | 12 | 37   |    | 42k6                   |     |    | 12 | 37   | 8  |
| 160L    |     |      |     |     |     | 254     |    | 298   |    |     |     |                         |     |    |    |      |    |                        |     |    |    |      |    |
| 180M    | 279 | 78   | 350 | 360 | 281 | 241     | 70 | 294   |    | 121 | 200 | 48k6                    | 110 | 80 | 14 | 42,5 | 9  |                        | 110 | 80 |    |      |    |
| 180L    |     |      |     |     |     | 279     |    | 332   |    |     |     |                         |     |    |    |      |    | 48k6                   |     |    | 14 | 42,5 | 9  |
| 200M    | 318 | 82   | 385 | 402 | 319 | 267     | 82 | 370   |    | 133 | 222 | 55m6                    |     |    | 16 | 49   | 10 |                        |     |    |    |      |    |
| 200L    |     |      |     |     |     | 305     |    |       |    |     |     |                         |     |    |    |      |    |                        |     |    |    |      |    |

Fonte: WEG (2016)

### 3.2 APLICATIVO EXCEL

Foi desenvolvido um aplicativo em Excel com o objetivo de facilitar ao projetista os cálculos realizados para a correta dimensão dos ímãs e angulação dos blocos de ímãs.

Como primeira versão, o aplicativo atende aos motores de potência acima de 1 cv. A Figura 18 abaixo apresenta a primeira parte do aplicativo, no qual o projetista deve digitar os dados técnicos do motor, bem como do enrolamento do estator.

Figura 18 – Parâmetros do motor e do enrolamento

| D37 |                                         |            |         |         |   |                                                 |                      |             |          |
|-----|-----------------------------------------|------------|---------|---------|---|-------------------------------------------------|----------------------|-------------|----------|
| A   | B                                       | C          | D       | E       | F | G                                               | H                    | I           | J        |
| 1   |                                         |            |         |         |   |                                                 |                      |             |          |
| 2   | <b>Especificações técnicas do motor</b> |            |         |         |   | <b>Especificações do enrolamento do estator</b> |                      |             |          |
| 3   | Dados de placa do motor de indução      | Símbolos   | Valores | Unidade |   | Dados construtivos do enrolamento               | Símbolos             | Valores     | Unidade  |
| 4   | Potência                                | P          | 40      | cv      |   | Número de espiras por fase                      | Nf                   | 112         |          |
| 5   | Corrente                                |            | 200A    |         |   | Número de espiras por grupo (bobinas)           |                      | 56          |          |
| 6   | Rotação                                 | n          | 1750    | rpm     |   | Diâmetro do fio                                 | n                    | 0,85        | mm       |
| 7   | Número de polos                         | p          | 4       |         |   | Número de ranhuras do estator                   | Q                    | 48          | ranhuras |
| 8   | Rendimento                              | $\eta$     | 0,93    |         |   | Diâmetro interno do estator                     | D <sub>int est</sub> | 20,6        | cm       |
| 9   | Fator de potência                       | cos $\phi$ | 0,85    |         |   | Comprimento interno do estator                  | L <sub>int est</sub> | 20          | cm       |
| 10  | Tensões                                 | V          | 220     | V       |   | Passo da bobina                                 | V                    | 11          | ranhuras |
| 11  | Corrente nominal                        | I          | 99,2A   | A       |   | Grupos por fase                                 | I                    | 4           |          |
| 12  | Frequência                              | f          | 60      | Hz      |   | Bobinas por grupo                               |                      | 2           |          |
| 13  |                                         |            |         |         |   | Ligação                                         |                      | 2x paralela |          |
| 14  |                                         |            |         |         |   | Número de fase                                  | m                    | 3           |          |
| 15  |                                         |            |         |         |   | Passo da bobina                                 |                      | 180         | °        |
| 16  |                                         |            |         |         |   | Diâmetro externo do rotor                       | D <sub>ext rot</sub> | 20,45       | cm       |

Fonte: Autor

A Figura 19 apresenta os parâmetros já calculados pelo aplicativo após a inserção dos valores necessários. As células em vermelho (PC: coeficiente de permeância; e: espessura do imã) são de responsabilidade do projetista inseri-los, já as verdes, o aplicativo calcula automaticamente.

Figura 19 – Cálculos realizados pelo aplicativo

| D35 |            |                                                                                |          |   |                                                                 |        |
|-----|------------|--------------------------------------------------------------------------------|----------|---|-----------------------------------------------------------------|--------|
| A   | B          | C                                                                              | D        | E | F                                                               | G      |
| 17  |            |                                                                                |          |   |                                                                 |        |
| 18  | Equação 1  | $\phi = (2/\pi) * Y_p * L_{int est} * B_e$                                     |          |   | $B_e =$                                                         | 3427,8 |
| 19  | Equação 2  |                                                                                |          |   | $Y_p = (D_{int est} * \pi) / p$                                 | 16,2   |
| 20  | Equação 3  | $\phi = (1 * F_d * 100000000) / (4,44 * F_e * N_f)$                            | 706126,9 |   |                                                                 |        |
| 21  | Equação 4  |                                                                                |          |   | $F_e = \text{sen}(180/2)$                                       | 1,0    |
| 22  | Equação 5  |                                                                                |          |   | $F_d = \text{sen}((q * \beta) / 2) / q * \text{sen}(\beta / 2)$ | 0,958  |
| 23  | Equação 6  |                                                                                |          |   | $q = Q / (m * p)$                                               | 4      |
| 24  | Equação 7  |                                                                                |          |   | $\beta = 180 * E / R_p$                                         | 15     |
| 25  | Equação 8  |                                                                                |          |   | $R_p = Q / p$                                                   | 12     |
| 26  | Equação 9  | $S = \phi m / B_m$                                                             | 164,8    |   |                                                                 |        |
| 27  | Equação 10 | $L_m = S / C_m$                                                                | 8,24     |   |                                                                 |        |
| 28  |            | $L_m$ é menor que 70% $Y_p$ ? Se não, variar remanência ( $B_e$ )              | Sim      |   |                                                                 |        |
| 29  | Equação 11 | $g_{max} = e / (PC * C_\phi)$                                                  | 0,77     |   | $e =$                                                           | 0,4    |
| 30  |            | $g_{max}$ atende ao entreferro? Se não, variar espessura ( $e$ )               | Sim      |   | $PC =$                                                          | 10     |
| 31  | Equação 12 |                                                                                |          |   | $C_\phi = A_m / A_g$                                            | 0,52   |
| 32  | Equação 13 |                                                                                |          |   | $A_m = L_m * e$                                                 | 3,30   |
| 33  | Equação 14 |                                                                                |          |   | $A_g = (\alpha * D_{int est} * e * \pi) / p$                    | 6,31   |
| 34  | Equação 15 |                                                                                |          |   | $\alpha = (Y_p - e) / Y_p$                                      | 0,975  |
| 35  | Equação 16 | $\theta_{inc} = \arctg((D_{int est} - 2 * g * \text{sen}(180/p) - L_m) / C_m)$ | 35,4     |   | $g = D_{int est} - D_{ext rot}$                                 | 0,17   |

Fonte: Autor

Por fim, os dados calculados pelo aplicativo, além daqueles necessários para a construção do protótipo são apresentados nas tabelas seguintes do aplicativo em Excel, como mostra a Figura 20.

Figura 20 – Tabelas resumo com os resultados do aplicativo

| L                                                                            | M               | N              | O              | P | Q                          | R               | S              | T              |
|------------------------------------------------------------------------------|-----------------|----------------|----------------|---|----------------------------|-----------------|----------------|----------------|
| <b>Cálculo da densidade de fluxo do estator por polo e por fase</b>          |                 |                |                |   |                            |                 |                |                |
| <b>Principais cálculos</b>                                                   | <b>Símbolos</b> | <b>Valores</b> | <b>Unidade</b> |   | <b>Definições dos ímãs</b> | <b>Símbolos</b> | <b>Valores</b> | <b>Unidade</b> |
| Densidade de fluxo do estator por polo por fase                              | $\Phi$          | 706126,9       | linhas         |   | Temperatura máxima         | Te              | 80             | °C             |
| Passo polar                                                                  | Yp              | 16,2           | cm             |   | Comprimento                | Cm              | 20,0           | mm             |
| Remanência magnética do estator                                              | Be              | 3427,800688    | linhas/cm²     |   | Largura                    | Lm              | 8,24           | cm             |
| Fator de distribuição                                                        | Fd              | 0,96           |                |   | Espessura                  | e               | 0,4            | cm             |
| Fator de enrolamento ou passo                                                | Fe              | 1,0            |                |   | Remanência magnética       | Be              | 3427,8         | gauss          |
| Número de espiras por fase                                                   | Nf              | 112            |                |   | Sentido de magnetização    |                 | radial         |                |
| número de espiras por polo                                                   | Nlt             | 336            |                |   | Temperatura máxima         | Te              | 80             | °C             |
| número de espiras por ranhura aplicada a cada base do bobinamento do estator | Ng              | 28             |                |   |                            |                 |                |                |
| Número de ranhuras por polo por fase                                         | V               | 220            | V              |   |                            |                 |                |                |
| Passo das ranhuras                                                           | q               | 4              |                |   |                            |                 |                |                |
| Passo polar em número de ranhuras                                            | m               | 15             |                |   |                            |                 |                |                |
|                                                                              | Pp              | 12             |                |   |                            |                 |                |                |

Fonte: Autor

Como proposta de melhoria no aplicativo, cita-se:

- Expandir os cálculos para todos os valores de potência de motores;
- Apresentar possibilidades de tipos de ímãs com as divisões (Cm) já previstas;
- Calcular o exato ângulo de inclinação a ser utilizado pelo projetista, levando em conta o número de polos, para que haja a interseção entre os polos.

#### 4 CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Foi apresentado nesse trabalho o procedimento detalhado do dimensionamento de um motor elétrico com ímãs permanentes inseridos no rotor, transformando-o de um motor de indução em um motor síncrono. O motor escolhido contém 40 cv e 4 polos, pois o mesmo atende ao objetivo de aplicação, que é o de utilização em mobilidade elétrica.

Alguns conceitos necessários aos cálculos são de suma importância, por exemplo o projetista deve saber se o enrolamento é distribuído ou concêntrico, de camada simples ou dupla, para que os cálculos saiam da forma mais correta possível. Além disso, é primordial o contato diretamente com o fabricante, no caso do projeto, a empresa *WEG S.A.*, para se obter todos os parâmetros necessários, como o número de ranhuras do estator e o número de espiras por fase.

Os valores encontrados para os cálculos, como o ângulo de inclinação dos blocos de ímãs, além das dimensões dos ímãs condizem com o esperado, pois eram valores já esperados e possíveis de serem implementados.

Foi possível constatar também, que a substituição de materiais proposta proporcionou uma diminuição na massa total do motor, o que melhora a condição de carga transportada para os veículos elétricos. É necessário, no entanto, avaliar na prática a viabilidade de tal substituição.

Já, o aplicativo realizado em Excel vai proporcionar aos futuros projetos, rapidez e facilidade nos cálculos necessários para tal dimensionamento, pois basta ter os dados em mãos para o aplicativo calcular todos os parâmetros. Para uma segunda versão seria interessante programar tal aplicativo em *Java*, de modo a facilitar ainda mais o contato com os cálculos, além da expansão a todos valores de potência de motores.

Por fim, como sugestão de trabalhos futuros, seria viabilizar a montagem do protótipo para testes comprobatórios de melhoria na performance.

## REFERÊNCIAS

- ANDORINHA, N. **Sistema de Comando de uma Trotineta Elétrica (SiCTE)**. 2012. 126 f. Tese (Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores) – Instituto Politécnico de Setúbal, 2012.
- ALMEIDA, J. L. C. N. **Proposta de uma Metodologia para obtenção de um Gerador Síncrono com Rotor de Ímãs Permanentes Inclinados Axialmente para Microcentrais Elétricas a partir de Motor de Indução**. 2010. 106 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2010.
- COSTA, T. I. **Estratégia de localização dos postos de carregamento para o veículo elétrico – O caso da cidade do Porto**. 2014. 95 f. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia – Universidade do Porto, 2014.
- CISTELECAN, M.V.; POPESCU, M. Study of the Number of Slots/Pole Combinations for Low Speed Permanent Magnet Synchronous Generators. **Electric Machines & Drives Conference, 2007. IEMDC '07. IEEE International** Volume 2, 3-5 May 2007.
- COEY, J.M.D. Permanent magnet applications. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, Volumes 248, 2002.
- DEL TORO, V. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. Editora LTC – Livros Técnicos e Científicos S.A., Rio de Janeiro, 1999.
- DIAS, M. M. *et al.* **Motores Síncronos Trifásicos com Ímãs Permanentes**. Disponível em: <http://www.ufrgs.br/ldtm/publicacoes/05%2004.pdf>. Acesso em: 04 dez. 2016.
- DIRACDELTA. Disponível em <<http://www.diracdelta.co.uk/science/source/a/r/armature/source.html#.WEQjwfkrlIV>>. Acesso em: 04 dez 2016.
- ELEFRAN. Disponível em <<http://www.elefran.com.br/produto/55013/estator-remam-12v-55a-bosch-mercedes-benz>>. Acesso em: 04 dez 2016.
- ELOSEGUI, I. *et al.* Analytical design of synchronous permanente magnet motor/generators. **Industrial Electronics, 2007. ISIE 2007. IEEE International Symposium on** 4-7 June 2007.
- FERNANDES, V. M. T. **Mobilidade Elétrica – Metas e Sustentabilidade**. 2012. 151 f. Tese (Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores) - Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real, 2012.
- FILHO, G. F. **Motor de indução**. Editora Érica Ltda., São Paulo, 2000.
- FITZGERALD, A. E., KUSKO, A., KINGSLEY, C. Jr. **Máquinas Elétricas com Introdução à Eletrônica de Potência**. Editora McGraw-Hill do Brasil Ltda, 6ª edição, Pernambuco, 2006.

GIERAS J. F., WING, M. **Permanent magnet motor technology**. Editora Marcel Dekker, New York, 1997.

HANSELMAN, DUANE C. **Brushless Permanent Magnet Motor Design**. USA, University of Maine Orono. Second edition, 2006. Publicado por The Writers' Collective.

HENDERSHOT, J.R., MILLER, T.J.E.. **Design of brushless permanent-magnet motors**. Hillsboro, OH Oxford Magna Pysics Pub. Clarendon Press, 1994.

HWANG C. C. *et al.* Estimation of parameters of interior permanent magnet synchronous motors. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, Volume 239, Issues 1-3, February 2002.

HWANG C. C., LIU C. T., TENG C. C.. Design and analysis of a novel inset permanent magnet synchronous motor. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, Volume 320, February 2008.

LOCATELLI, E. **Programa de Eficientização Industrial – Módulo Motor Elétrico**. ELETROBRÁS/PROCEL Rio de Janeiro, 2006.

KALOKIRIS G.K. *et al.* Advances in magnetic materials and their impact on electric machine design. **Journal of Materials Processing Technology**, Volume 181, 2007.

KOSOW, IRVING L. **Máquinas Elétricas e Transformadores**. Editora Globo, 12ª edição, São Paulo, 1996.

MUÑOZ, N. T. **Cálculo de enrolamentos de máquinas elétricas e sistemas de alarme**. Editora Biblioteca técnica Freitas Bastos, 4ª edição, Rio de janeiro, 1987.

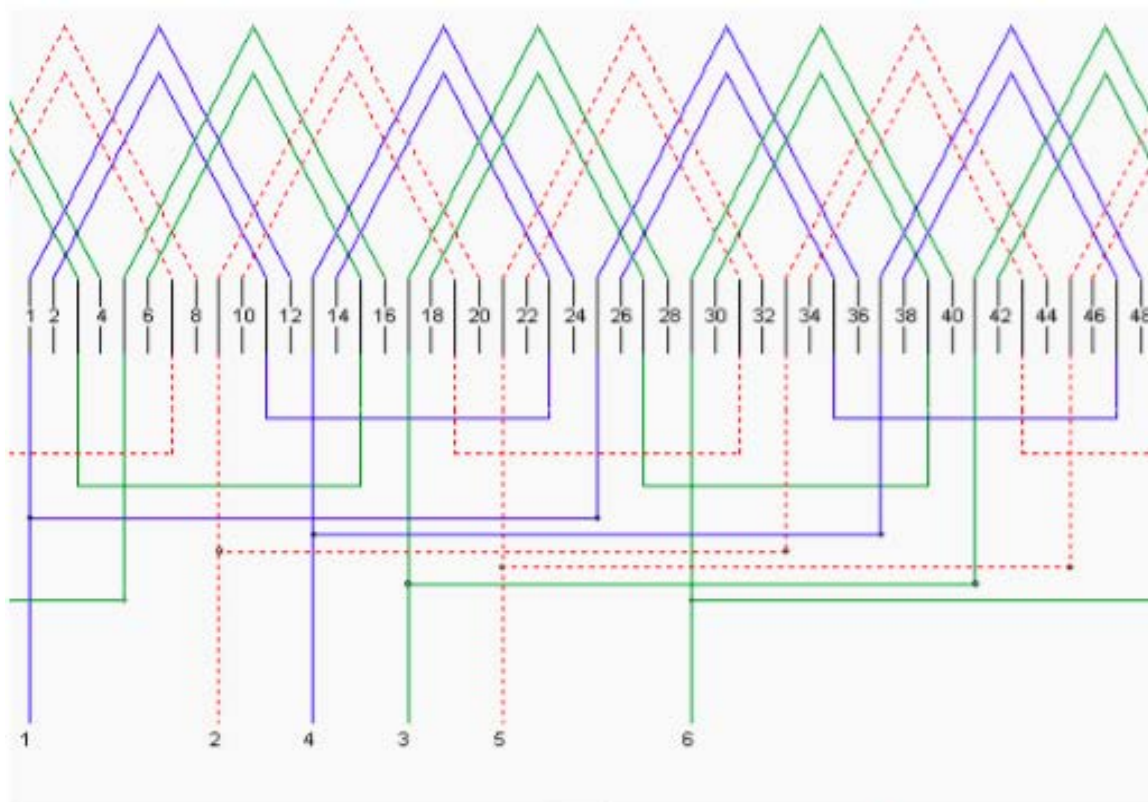
SANTOS, A. H. M. *et al.* **Conservação de energia – Eficiência Energética de Equipamentos e Instalações**. ELETROBRÁS/PROCEL, 3ª edição, Itajubá, 2006.

SOUZA, T. M. **Máquinas Elétricas e Aplicações**. Editora Páginas & Letras, Guaratinguetá, 2012.

## ANEXO A – DADOS FORNECIDOS PELA EMPRESA WEG S.A.

Correspondência eletrônica recebida da empresa WEG S.A. com os dados relativos ao motor utilizado no projeto.

### WEG - DADOS DE BOBINAGEM - Motores Trifásicos



#### Linha do Produto ALTO RENDIMENTO

|            |           |
|------------|-----------|
| Carcaça    | 200M      |
| Potência   | 40.00cv   |
| Frequência | 60 Hz     |
| Polaridade | 4         |
| Tensão     | 220/380 V |

#### Dados de Chapa

|                             |         |
|-----------------------------|---------|
| Pacote                      | 200mm   |
| Nº de Ranhuras do Estator   | 48      |
| Nº de Ranhuras do Rotor     | 40      |
| Diâmetro Interno do Estator | 206mm   |
| Diâmetro Externo do Estator | 315mm   |
| Diâmetro Externo do Rotor   | 204.3mm |

#### Dados de Bobinagem

|                   |            |
|-------------------|------------|
| Passo do motor    | 10:12      |
| Número de Espiras | 14         |
| Grupos \ Fase     | 4          |
| Bobinas \ Grupo   | 2          |
| Camada            | Unica      |
| Ligação           | 2xParalela |
| Números de Fios   | 9          |
| Bitola do Fio     | 0.850mm    |
| Número de Fios    | 1          |
| Bitola do Fio     | 0.800mm    |
| Corrente Nominal  | 99.60A     |
| Corrente à vazio  | 32.00A     |

\* Os valores de corrente se referem a tensão em triângulo.

#### Dados do Esquema

|                   |                  |
|-------------------|------------------|
| Esquema           | 48-004-11/211-ND |
| Número de Cabos   | 6                |
| Ligação dos Cabos | Triangulo        |

**Pesquisa de motor**

Material: 11277980 Data:

Serial number:

[Download relatório](#)

---

**Identificação**

Motor: 11277980  
 Data: 01-12-2016  
 Classe de isolamento: F

**Ferragem**

Entreferro: 0,8  
 Nr. ranhuras estator: 48  
 Pacote: 180  
 Diam. ext. estator: 315.00000  
 Diam. int. estator: 206.00000

**Item**

MOTOR ELETRICO TRIFASICO CORRENTE ALTERNADA ROTOR DE GAJOLA 40 cv 04 200M 220/380 C/ 6 term 60Hz B3D IPW55 WFF2 IE2 ALTO RENDIMENTO

W22

REFRIGERACAO: TFVE TOTAL FECH VENTIL EXTERNA PLANO DE PINTURA: 203A;COR ACABAMENTO: RAL 5009;APLICACAO MOTOR: W22;CHAVETA: CHAVETA

A;DRENO: DRENO BORRACHA AUTOMATICO MATERIAL EXO: ACO CARBONO SAE 1040/45;TIPO E FORMA BALANCEAMENTO: NORMAL 1/2 CHAVETA;SENTIDO DE

ROTACAO: AMBOS;TIPO GRAXA: MOBIL POLYREX EM;MATERIAL INVOLUCRO: FERRO;MATERIAL VENTILADOR: PLASTICO;TIPO ATERRAMENTO: ATERRAMENTO

---

**Bobinagem**

| Descrição | Pólos | Fios                    | Fios                  | Espiras | Passo     | Camada | Ligação  | B/G | G/F | Enchimento de cobre | Lz  | Esquema ligação  | Resistência de ligação | Resistência de fase |
|-----------|-------|-------------------------|-----------------------|---------|-----------|--------|----------|-----|-----|---------------------|-----|------------------|------------------------|---------------------|
| TRIFASICO | 8     | 8 x 0.85 (Cu) 11,769 Kg | 1 x 0.8 (Cu) 1,305 Kg | 7.7:15  | 1:8:10:12 | Mista  | PARALELA | 3   | 4   | 398                 | 695 | 48-004-10/231-ND | 0,0526                 | 0,079               |

[Download diagrama de bobinagem](#)

---

**Capacitores**

| Descrição do capacitor | Tensão capacitor | Tipo de ligação |
|------------------------|------------------|-----------------|
|                        |                  |                 |
|                        |                  |                 |
|                        |                  |                 |

**Espiras invertidas**

| Observação |
|------------|
|            |
|            |
|            |

Acesso

ROTOR INJ 180mm 4P 200

PESO TOTAL

DISCO ROTOR : 33,516kg; PESO ALUMINIO ROTOR : 4,6kg

|                       |           |              |       |
|-----------------------|-----------|--------------|-------|
| EXO TRIF 200M W21/W22 |           |              |       |
|                       |           |              |       |
|                       |           |              |       |
| UMB                   | Texto ... | Peso líquido | Un... |
| UN                    | UN        | 19,180       | KG    |