



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**  
**DOUTORADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**KLEYMILSON DO NASCIMENTO SOUZA**

**PROJETO DE UMA NOVA TOPOLOGIA DE MOTOR ESFÉRICO E CONTROLE**  
**EM MALHA ABERTA UTILIZANDO INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL**

**FORTALEZA**

**2018**

KLEYMILSON DO NASCIMENTO SOUZA

PROJETO DE UMA NOVA TOPOLOGIA DE MOTOR ESFÉRICO E CONTROLE EM  
MALHA ABERTA UTILIZANDO INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de doutor em Engenharia Elétrica. Área de Concentração: Sistemas de Energia Elétrica

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Silva Thé Pontes

FORTALEZA

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária  
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

S238p Souza, Kleymilson do Nascimento.  
Projeto de uma nova topologia de motor esférico e controle em malha aberta utilizando inteligência artificial / Kleymilson do Nascimento Souza. – 2018.  
117 f. : il. color.

Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2018.  
Orientação: Prof. Dr. Ricardo Silva Thé Pontes.

1. Controle de posicionamento. 2. Reconhecimento de padrões. 3. Coordenadas esféricas. 4. Redes neurais artificiais. 5. Motor esférico. I. Título.

CDD 621.3

---

KLEYMILSON DO NASCIMENTO SOUZA

PROJETO DE UMA NOVA TOPOLOGIA DE MOTOR ESFÉRICO E CONTROLE EM  
MALHA ABERTA UTILIZANDO INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de doutor em Engenharia Elétrica. Área de Concentração: Sistemas de Energia Elétrica

Aprovada em: 30 de novembro de 2018

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Ricardo Silva Thé Pontes (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Guilherme de Alencar Barreto  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Arthur Plínio de Souza Braga  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Fernando Luiz Marcelo Antunes  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Cláudio Marques de Sá Medeiros  
Instituto Federal de Educação (IFCE)

---

Prof. Dr. Otacílio da Mota Almeida  
Universidade Federal do Piauí - UFPI

Dedico esta Tese de Doutorado ao meu orientador: Prof. Dr. Ricardo Silva Thé Pontes. Minha família: Edmilson Teixeira, Neuma Fontenele, Keyla Souza. Minha esposa: Maria de Jesus Gomes de Sousa. Meus Filhos: Julie Celeste Gomes Souza e José Kleyson Gomes Souza.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, a Deus, por tudo que tem proporcionado ao longo de minha trajetória; Agradeço toda minha família, pelo tempo distante e que outrora poderia estar mais presente;

Aos professores Dr. Ricardo Silva Thé Pontes e Dr. Guilherme de Alencar Barreto pela orientação e paciência a mim dedicada;

Ao professor. Dr. Tobias Rafael Fernandes Neto, pela atenção, apoio e disponibilidade sempre que necessitava;

Aos colegas de Laboratório Victor Aguiar, Rafael, Eduardo, Ednardo, Felipe, Renan, Rodrigo, Roney, Márcio pelo companheirismo e conhecimento compartilhado durante toda a minha pesquisa.

Aos professores pelo grande conhecimento transmitido: Fernando Antunes, Arthur Braga, Bismark Torrico, Laurinda Reis, Kleber Lima, José Carlos Teles, Ricardo Thé, Fabrico Nogueira, Paulo Praça, Ruth Leão, Raimundo Furtado, Sérgio Daher, Arlindo Siqueira, André Auto.

Os meus agradecimentos se estendem, também, a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram com a realização desta tese de doutorado.

"Lembre-se: seu foco determina a sua realidade"

(Qui-Gon Jinn)

## RESUMO

É proposto nesta tese um novo conceito de um atuador esférico, com múltiplos graus de liberdade *Multiple Degrees of Freedom* (M-DOF), como também é apresentado com detalhes o projeto de um protótipo desenvolvido para validação do novo conceito. Após uma profunda revisão no estado da arte sobre motores esféricos, percebe-se que os principais desafios para a utilização deste motor são: 1) o sistema de controle de posição do rotor; 2) o sistema de monitoramento para determinação, com precisão, da localização do rotor; e 3) o elevado número de bobinas presentes nos protótipos apresentados na literatura. Diferentemente de todos os modelos de motor esférico encontrados, este projeto é inovador por apresentar um conceito minimalista na quantidade e na disposição das bobinas do estator, uma vez que, pelo conceito aqui apresentado, empregam-se apenas três bobinas, o que facilita sua construção e seu sistema de controle. As bobinas do estator estão localizadas no hemisfério inferior do motor. O rotor é composto por um ímã permanente de neodímio-ferro-boro, o qual está preso a um sistema de eixos que possibilita o movimento típico de um giroscópio, podendo alcançar qualquer posição sobre o hemisfério superior. Com vistas a se identificar corretamente o posicionamento do rotor, foi adaptada uma haste ao seu redor, que, através de reconhecimento de padrões de imagens, define sua posição. As correntes nas bobinas são controladas, individualmente, por um circuito que utiliza um micro controlador ARM Cortex-M3 e um *drive* de corrente com o circuito integrado LMD18200. De acordo com as correntes que são aplicadas nas bobinas, um campo magnético resultante faz o eixo do rotor mover-se para uma determinada posição na área de atuação. Para a localização da haste móvel, foi usado um sistema de monitoramento por câmera, que captura a imagem da haste na superfície do motor esférico. Com um algoritmo de reconhecimento de padrões foi possível se identificar e se calcular a posição para onde aponta o eixo do rotor em coordenadas esféricas, gerando um banco de dados que relaciona as correntes nas bobinas e a posição do rotor. Com uma série de dados (correntes x posição) coletados, foram utilizados algoritmos baseados em inteligência artificial, que foram treinados e aprenderam, com os exemplos, quais conjuntos de correntes deviam ser aplicados nas bobinas do estator para se posicionar o rotor em uma coordenada desejada, ou se determinar uma sequência de correntes para que o rotor seguisse uma determinada trajetória na superfície esférica.

**Palavras-chave:** Controle de posicionamento. Reconhecimento de padrões. Coordenadas esféricas. Redes neurais artificiais. Motor esférico.



## ABSTRACT

A new concept of a spherical actuator with multiple degrees of freedom (M-DOF) is proposed in this thesis. It is also presented, with details, the design of a prototype developed for the validation of the new concept. After a thorough review of the state of the art on spherical motors, it can be seen that the main challenges for the use of this motor are: 1) the position control system of the rotor; 2) the monitoring system for precise determination of the rotor location; and 3) the great number of coils present in the prototypes exhibited in the literature. Unlike all the spherical motor models found, this design is innovative because it presents a minimalist concept in the quantity and in the arrangement of stator coils, taking into account that it proposes only three coils, which facilitates its construction and its control system. The stator coils are located in the lower hemisphere of the motor. The rotor is composed of a permanent magnet of iron-boron-neodymium, which is attached to a system of axes that allows the typical movement of a gyroscope and can reach any position on the upper hemisphere. In order to correctly identify the positioning of the rotor, a rod was adapted to it, which, by means of image recognition, defines its position. The coil currents are individually controlled by a circuit that uses an ARM Cortex-M3 micro controller and a current drive with the LMD18200 integrated circuit. According to the currents that are applied to the coils, a resulting magnetic field causes the rotor shaft to move to a certain position in the actuation area. For the location of the movable rod, it was used a camera monitoring system, which captures the image of the rod on the surface of the spherical motor. With a pattern recognition algorithm, it was possible to identify and calculate the position to which the rotor axis points in spherical coordinates, generating a database that relates the currents in the coils and a rotor position. With a series of data (currents x position) collected, artificial intelligence based algorithms were used and trained, that learned, from the examples, which sets of currents must be applied to the stator coils in order to position the rotor in a desired coordinate, or determine a sequence of currents for the rotor follows a certain trajectory on the spherical surface.

**Keywords:** Positioning control. Pattern recognition. Spherical coordinates. Artificial neural networks. Spherical motor.

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 – Gráfico do número de publicações nas últimas décadas com termos <i>Spherical Motor e Spherical Actuators</i> . . . . . | 23 |
| Figura 2 – Rotor e direção do estator na maquina esférica. . . . .  | 24 |
| Figura 3 – Montagem experimental com o estator removido de sua posição. . . . .   | 24 |
| Figura 4 – Novo <i>layout</i> do estator com dois blocos. . . . .   | 25 |
| Figura 5 – Sistema de orienteção da esfera (Haussermann). . . . .   | 26 |
| Figura 6 – Sensor de velocidade e orientação de uma rótula esférica. . . . .  | 26 |
| Figura 7 – Conversor eletromecânico apresentado na patente de Jean Claude e Albert Foggia. . . . .                                | 27 |
| Figura 8 – Modelo da articulação esférica para pulso robótico. . . . .  | 28 |
| Figura 9 – Esquema do manipulador esférico. . . . .   | 28 |
| Figura 10 – Motor Esférico com sistema giroscópico e alimentação DC. . . . .  | 30 |
| Figura 11 – Estruturas base do motor esférico. . . . .  | 31 |
| Figura 12 – Protótipo e vista explodida do motor esférico (RV). . . . .   | 31 |
| Figura 13 – Motor Esférico Apontador - MEA, proposto por Bederson. . . . .  | 32 |
| Figura 14 – Câmera em miniatura utilizada no Motor Esférico Apontador - MEA . . . . .   | 32 |
| Figura 15 – Protótipo com bobinas interna (a 90°) e ímã permanente externo. . . . .   | 33 |
| Figura 16 – Princípio do motor esférico ultrassônico. . . . .   | 34 |
| Figura 17 – Esquemático do Atuador Esférico. . . . .  | 34 |
| Figura 18 – Motor 3-DOF, com encoder. . . . .   | 35 |
| Figura 19 – Motor 3-DOF, com múltiplas bobinas. . . . .   | 36 |
| Figura 20 – Motor 3-DOF, com múltiplos ímãs no rotor e múltiplas bobinas no estator. . . . .                                      | 37 |
| Figura 21 – Motor Esférico de quatro fios. . . . .  | 37 |
| Figura 22 – Motor esférico de múltiplos polos. . . . .  | 38 |
| Figura 23 – Motor Esférico de múltiplos Polos. . . . .  | 38 |
| Figura 24 – Motor esférico com superfície de identificação. . . . .   | 39 |
| Figura 25 – Motor esférico com acionamento por bobinas envolventes. . . . .   | 40 |
| Figura 26 – Motor Esférico de ímã permanente e múltiplas bobinas. . . . .   | 41 |
| Figura 27 – Motor Esférico de ímã permanente e múltiplas bobinas. . . . .   | 41 |
| Figura 28 – Estator com estrutura acrílica e múltiplas bobinas. . . . .   | 42 |
| Figura 29 – Campo magnético devido um elemento de corrente <i>Idl</i> . . . . .   | 44 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 30 – Bobina composta de N espiras. . . . .   | 45 |
| Figura 31 – Espira circular de raio $R_S$ . . . . .   | 46 |
| Figura 32 – Bobina compacta composta de N espiras. . . . .  | 46 |
| Figura 33 – Estator do motor esférico. . . . .  | 53 |
| Figura 34 – Vista superior do motor esférico. . . . .   | 54 |
| Figura 35 – Sistemas de coordenadas cartesianas e esféricas. . . . .  | 54 |
| Figura 36 – Bobina sem o núcleo de ferrite. . . . .   | 57 |
| Figura 37 – Detalhe da bobina com núcleo de ferrite. . . . .  | 58 |
| Figura 38 – Temperatura da bobina (operando a 1,2 A) aos 25min, 45min e 60min. . . . .  | 59 |
| Figura 39 – Bobinadeira manual. . . . .   | 59 |
| Figura 40 – Densidade de fluxo magnético na face da bobina sem núcleo e com núcleo. . . . .   | 60 |
| Figura 41 – Rotor com haste, fixo ao estator. . . . .   | 60 |
| Figura 42 – Rotor com sistema giroscópio. . . . .   | 61 |
| Figura 43 – Primeiro modelo do motor esférico testado. . . . .  | 62 |
| Figura 44 – Motor esférico proposto. . . . .  | 62 |
| Figura 45 – Distância da lente ao plano de leitura. . . . .   | 68 |
| Figura 46 – Reflexão da superfície de leitura. . . . .  | 68 |
| Figura 47 – Suporte da superfície de leitura. . . . .   | 69 |
| Figura 48 – Base da placa de montagem da lente e sensor óptico. . . . .   | 69 |
| Figura 49 – Esquemático para sensor PAN3101. . . . .  | 70 |
| Figura 50 – Superfície esférica no rotor. . . . .   | 70 |
| Figura 51 – Base com posição do sensor óptico . . . . .   | 70 |
| Figura 52 – Esquemático simplificado da bancada. . . . .  | 72 |
| Figura 53 – Esquemático real da bancada. . . . .  | 72 |
| Figura 54 – Motor esférico com câmera posicionada no topo. . . . .  | 73 |
| Figura 55 – Área de coleta da câmera. . . . .   | 74 |
| Figura 56 – Mapa de pontos coletados para treinamento da rede neural. . . . .   | 74 |
| Figura 57 – Transformação dos dados utilizados (A) sem especialista e (B) com especialista. . . . .   | 75 |
| Figura 58 – A topologia escolhida da rede MLP. . . . .  | 76 |
| Figura 59 – (A) Melhores resultados da MLP, (B) Usando dados com transformação do<br>especialista, (C) Usando dados sem uso do conhecimento <i>a priori</i> . . . . . | 83 |
| Figura 60 – Fluxograma de coleta, treinamento e funcionamento do motor. . . . .   | 86 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 61 – Curva controlada pela RNA. (A) MLP: 10-8 neurônios por camada e usando 700 dados no treinamento. (B) ELM: 10 neurônios por camada e usando 700 dados no treinamento. (C) MLP: 25-20 neurônios por camada e usando 2800 dados no treinamento. (D) ELM: 25 neurônios na camada oculta e 2800 dados no treinamento. . . . . | 87  |
| Figura 62 – Espira no plano horizontal x,y. . . . .  | 100 |
| Figura 63 – Bobina compacta composta de n espiras e uma camada. . . . .  | 102 |
| Figura 64 – Densidade de fluxo B e polarização magnética J versus força do campo magnético H, para ímãs permanentes de baixa coercividade (aços) . . . . .   | 105 |
| Figura 65 – Dados da bobina com núcleo de ferrite. . . . .   | 107 |

## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1 – Resultado de treinamento da MLP. . . . . | 82 |
| Tabela 2 – Resultado de treinamento da ELM. . . . . | 84 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|          |  |
|----------|--|
| CIF      | <i>Center Innovation Fund</i>                        |
| CNC      | Comando Numérico Computadorizado                     |
| DEE      | Departamento de Engenharia Elétrica                  |
| DLEP     | Dimensões Limitantes Específicas de Projeto          |
| DSP      | <i>Digital Signal Processor</i>                      |
| ELM      | Extreme Learning Machine                             |
| LAMOTRIZ | Laboratório de Sistemas Motrizes                     |
| M-DOF    | <i>Multiple Degrees of Freedom</i>                   |
| MEA      | Motor Esférico Apontador                             |
| MLP      | Multi Layer Perceptron                               |
| NASA     | <i>National Aeronautics and Space Administration</i> |
| PLA      | Ácido Polilático                                     |
| UFC      | Universidade Federal do Ceará                        |

## LISTA DE SÍMBOLOS

|                   |  |
|-------------------|--|
| $d$               | Distância em metros                        |
| $E$               | Campo elétrico                             |
| $I$               | Corrente elétrica                          |
| $P$               | Potência                                   |
| $V$               | Tensão                                     |
| $\mathbf{J}$      | Densidade de Corrente Elétrica ( $A/m^2$ ) |
| $\mathbf{E}$      | Intensidade do Campo Elétrico ( $V/m$ )    |
| $\mathbf{D}$      | Densidade de Fluxo Elétrico ( $C/m^2$ )    |
| $\mathbf{H}$      | Intensidade do Campo Magnético ( $A/m$ )   |
| $\mathbf{B}$      | Densidade de Fluxo Magnético ( $T$ )       |
| $\sigma$          | Condutividade elétrica                     |
| $x, y, z$         | Coordenadas cartesianas                    |
| $\theta, \phi, r$ | Coordenadas esféricas                      |
| $\rho$            | Resistividade elétrica                     |
| $r, \phi, z$      | Coordenadas cilíndricas                    |

## SUMÁRIO

|          |   |    |
|----------|---|----|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO</b> . . . . .   | 17 |
| 1.1      | Motivação . . . . .   | 18 |
| 1.2      | Objetivos . . . . .   | 18 |
| 1.3      | Organização do trabalho . . . . .   | 19 |
| <b>2</b> | <b>MOTORES ESFÉRICOS</b> . . . . .  | 21 |
| 2.1      | Conceito do Motor Esférico . . . . .  | 21 |
| 2.2      | Histórico de Protótipos Desenvolvidos . . . . .   | 23 |
| 2.3      | Conclusão . . . . .   | 42 |
| <b>3</b> | <b>MODELAGEM DO CAMPO MAGNÉTICO</b> . . . . .   | 43 |
| 3.1      | Intensidade de Campo Magnético . . . . .  | 43 |
| 3.2      | Modelagem do Campo Magnético Resultante devido a N bobinas distribuídas no espaço . . . . . | 47 |
| 3.3      | Conclusão . . . . .   | 51 |
| <b>4</b> | <b>PROTÓTIPO DO ATUADOR ESFÉRICO - DESIGN</b> . . . . .                                     | 52 |
| 4.1      | Atuador Esférico Proposto . . . . .   | 52 |
| 4.1.1    | <i>Design do Estator</i> . . . . .  | 53 |
| 4.1.2    | <i>Projeto das Bobinas</i> . . . . .  | 57 |
| 4.1.3    | <i>Projeto do Rotor</i> . . . . .   | 60 |
| 4.1.4    | <i>Modelo Final do Motor Esférico</i> . . . . .   | 61 |
| 4.1.5    | <i>Conclusão</i> . . . . .  | 63 |
| <b>5</b> | <b>SISTEMA PARA COLETA DE DADOS E TREINAMENTO DE APRENDIZAGEM PROPOSTOS</b> . . . . .       | 64 |
| 5.1      | Sistema de Localização do Atuador . . . . .   | 64 |
| 5.1.1    | <i>Localização pela resultante do vetor campo magnético</i> . . . . .                       | 65 |
| 5.1.2    | <i>Localização por Sensor Óptico</i> . . . . .  | 67 |
| 5.1.3    | <i>Localização por Sensor Hall</i> . . . . .  | 71 |
| 5.2      | Coleta de Dados do Rotor Esférico para Treinamento . . . . .                                | 71 |
| 5.3      | Tratamento dos Dados Coletados . . . . .  | 74 |
| 5.4      | Topologia da Rede Neural . . . . .  | 75 |
| 5.4.1    | <i>MLP - Multi Layer Perceptron</i> . . . . .   | 75 |



|       |   |     |
|-------|---|-----|
| 5.4.2 | <i>ELM - Extreme Learning Machine</i> . . . . .   | 77  |
| 5.4.3 | <i>Conclusão</i> . . . . .  | 78  |
| 6     | <b>RESULTADOS DO TREINAMENTO DAS REDES E DO SISTEMA DE CONTROLE PROPOSTO</b> . . . . .                  | 80  |
| 6.0.1 | <i>Aproximação por Redes Neurais Artificiais</i> . . . . .  | 80  |
| 7     | <b>CONCLUSÃO</b> . . . . .  | 88  |
| 7.1   | <b>Propostas para Futuras Pesquisas</b> . . . . .   | 89  |
| 7.2   | <b>Publicações Geradas na Pesquisa</b> . . . . .  | 89  |
|       | <b>REFERÊNCIAS</b> . . . . .  | 90  |
|       | <b>APÊNDICES</b> . . . . .  | 100 |
|       | <b>APÊNDICE A – Campo Magnético</b> . . . . .   | 100 |
| A.1   | <b>Campo Magnético de uma Espira</b> . . . . .  | 100 |
| A.2   | <b>Campo Magnético de uma Bobina</b> . . . . .  | 102 |
| A.3   | <b>Ímãs Permanentes - Neodímio</b> . . . . .  | 104 |
| A.4   | <b>Detalhes do Estator</b> . . . . .  | 106 |
| A.5   | <b>Detalhes da Bobina</b> . . . . .   | 107 |
| A.6   | <b>Escolha do fio para bobina (menor energia dissipada)</b> . . . . .                                   | 108 |
| A.7   | <b>Amostra dos Dados Treinamento (Correntes col:1,2,3 x Posição col:4,5)</b> . . . . .                  | 109 |
|       | <b>ANEXOS</b> . . . . .   | 110 |
|       | <b>ANEXO A – Dados de Fabricantes</b> . . . . .   | 110 |
| A.1   | <b>Tabela de Fios - NBR</b> . . . . .   | 110 |
| A.2   | <b>Tabela de Fios Esmaltados AWG (American Wire Gauge)</b> . . . . .                                    | 111 |
| A.3   | <b>Detalhes do Rotor Esférico - Gyro</b> . . . . .  | 112 |
|       | <b>ANEXO B – Característica dos Componentes</b> . . . . .   | 113 |
| B.1   | <b>Núcleo de Ferrite - Thornton</b> . . . . .   | 113 |
| B.2   | <b>Curva (B x H) e (<math>\mu_i</math> x <math>^{\circ}C</math>) do Núcleo de Ferrite IP6</b> . . . . . | 114 |
| B.3   | <b>Dimensões do Núcleo Disponíveis</b> . . . . .  | 115 |
| B.4   | <b>Especificações do Sensor do Mouse - PAN3101</b> . . . . .  | 116 |
| B.5   | <b>Especificações do Driver de Corrente - LMD18200</b> . . . . .  | 117 |

# 1 INTRODUÇÃO

A intensa transformação do que chamamos de sociedade da inovação tem buscado novas alternativas de materiais, serviços, formas de produção e economias compartilhadas, tendo-se tornado cada vez mais conectada. Com o avanço da tecnologia e do desenvolvimento de novas formas de produção (produção flexível e impressão 3D), com forte participação robótica nos processo produtivo, tem-se buscado desenvolver novos acionamentos para serviços cada vez mais especializados e com maior precisão. Desta forma, os acionamentos tradicionais com motores, engrenagens, transmissões e mecanismos complexos estão em constante questionamento, podendo esta demanda ser atendida, em certos casos, por um motor que faça movimentos semelhantes às rótulas humanas. A resposta, para isso, são os atuadores com movimentos esféricos (motor esférico), que estão em constantes atualizações, gerando novas propostas, ao longo dos anos, buscando resolver os problemas de um sistema de posicionamento, e possibilitando deslocamentos mais precisos e rápidos (KIM *et al.*, 2015), (CHU *et al.*, 2015). Para realizar movimentos, tanto rotativos quanto lineares, geralmente é utilizado um conjunto servomotor (motores de passo + engrenagens mecânicas). Esses movimentos são discretizados e têm apenas um grau de liberdade, ou seja, os movimentos rotativos admitem apenas os sentidos horário e anti-horário, e os lineares admitem sentido de avanço e recuo. Mecanismos de múltiplos graus de liberdade (*M-DOF, Multiple Degrees of Freedom*) estão sendo requisitados, face às novas tendências de construção de máquinas, equipamentos e sistemas robóticos que possam executar seus movimentos de forma direta, com melhor precisão de posicionamento, e com ou sem o mínimo de sistemas mecânicos necessários para sua transformação de rotativo para linear. É desejável também que sejam de construção simples, robustos e com menor atrito (KUMAGAI; HOLLIS, 2013). Normalmente, movimentos com múltiplos graus de liberdade são implementados com um motor para cada grau. Isto resulta num complicado sistema de transmissão, o que pode provocar erros de posicionamento devido às deformações, desgastes e folgas nos mecanismos. Uma máquina com este tipo de acionador torna-se complexa, massiva e com elevado número de motores, bobinas e com um sofisticado sistema de acionamento e controle (NAGASAWA *et al.*, 2000), (LEE *et al.*, 2005), (SON; LEE, 2014).

## 1.1 Motivação

Vários modelos de atuadores esféricos foram propostos, ao longo das últimas décadas, com o propósito de criar uma máquina elétrica que possuísse múltiplos graus de liberdade (M-DOF) em um único bloco (WILLIAMS *et al.*, 1959), (CHEN *et al.*, 2012), (KIM *et al.*, 2013) (KIM *et al.*, 2014). Esta busca continua até hoje, sendo alvo de muita pesquisa e desenvolvimento, tanto em várias universidades do mundo, como no setor industrial. A ideia é criar um motor M-DOF funcional, que tenha um posicionamento rápido e preciso.

Diversas aplicações do motor esférico, como a articulação (rótula) de um braço robótico, sistema de câmera com movimentação semelhante ao globo ocular humano (visão robótica) ou mesmo um sistema para posicionar a ferramenta de corte de uma máquina de usinagem, têm sido buscadas. Uma das vantagens deste movimento esférico direto é o fato de utilizar menos mecanismos, reduzindo assim o peso e os desgastes mecânicos.

As soluções apresentadas, na literatura, para os motores esféricos, utilizam complexas montagens com dezenas de bobinas, que dificultam em especial o processo de fabricação, requerem sistemas de controle sofisticados e com bastante dificuldade em sua modelagem eletromagnética. Portanto, um novo conceito de motor esférico, de construção simples e com seu sistema de posicionamento apresentado, é proposto nesta tese. Assim como em um motor de indução convencional, para o modelo proposto faz-se uso das equações básicas da teoria eletromagnética e propõe-se um modelo matemático baseado no cálculo do campo magnético resultante da excitação simultânea de um conjunto de bobinas.

O vetor resultante do campo magnético define a posição do rotor em coordenadas esféricas  $(\theta, \phi, r)$ , sendo considerado um caso ideal (sem atrito ou influência externa ao campo do estator). O modelo real deve possuir uma modelagem matemática mais complexa, que leva em consideração as inércias, atritos, não linearidade dos campos eletromagnéticos, efeitos de saturação magnética, aquecimentos das bobinas com variação das resistências elétricas, entre outros fatores, que dificultam bastante o cálculo analítico do conjugado, interferindo no exato posicionamento do rotor.

## 1.2 Objetivos

Desenvolver um novo conceito de motor esférico, composto por três bobinas no estator, sendo totalmente diferente de todos os outros propostos até agora, conforme a revisão

bibliográfica realizada.

É também objetivo da tese, projetar e construir um protótipo para comprovar o conceito, bem como apresentar um sistema de posicionamento, utilizando redes neurais artificiais, em que os dados de treinamento são coletados no próprio protótipo desenvolvido. Para tal coleta, foram testados dois sistemas de aquisição, um baseado em imagem (câmera com reconhecimento de padrões), e outro com sensor óptico (leitura da superfície), que não apresentou boa precisão. O sistema por imagem possibilitou localizar o atuador em qualquer ponto do hemisfério superior. Este trabalho pôde fornecer dados suficientes para uma futura reprodução do atuador.

### 1.3 Organização do trabalho

No Capítulo 2, é apresentado o conceito de motor esférico, os modelos que já foram desenvolvidos e os que estão em estudo atualmente. Neste capítulo, os modelos de motores serão apresentados para o leitor perceber o atual estado de desenvolvimento desta máquina. Um breve histórico de aplicação e evolução também será mostrado, deixando claro que, com o avanço das tecnologias, se criou mais possibilidades de novos modelos.

No Capítulo 3 descreve a teoria envolvida no cálculo do campo eletromagnético resultante devido às correntes nas bobinas do estator, fornecendo a base para se compreender a interação dos campos com a excitação de três ou N bobinas dispostas em uma superfície esférica.

O Capítulo 4 apresenta o novo conceito do motor esférico. Ali, são mostradas as características de projeto do rotor e do estator, bem como detalhes de fabricação e as principais considerações de projeto. São discutidas as limitações existentes no modelo, bem como são descritas as melhores soluções de como se reproduzir o modelo físico do atuador. Também são descritas as ferramentas e os *softwares* utilizados.

No Capítulo 5, é apresentada a modelagem de posicionamento do atuador no hemisfério superior. É descrita a bancada e o sistema de controle de posicionamento utilizado, baseado em inteligência artificial, e seu comportamento nos diversos ensaios realizados, mostrando-se a importância da utilização de conhecimento *a priori* do sistema no treinamento da rede neural artificial.

No Capítulo 6 apresenta os resultados finais obtidos, mostrando os dados de saída de treinamento do algoritmo de controle que utiliza inteligência computacional baseada em RNA (Rede Neural Artificial) e ELM (*Extreme Learning Machine*).

O Capítulo 7 apresenta as conclusões do autor sobre o trabalho realizado, as publica-

ções geradas pela pesquisa e uma sequência de atividades para desenvolvimentos futuros.

## 2 MOTORES ESFÉRICOS

Este capítulo apresenta um breve histórico do desenvolvimento do Atuador Esférico, além de seus diversos modelos desenvolvidos ao longo dos anos e os que ainda estão em desenvolvimento. Aborda também a evolução destes tipos de atuadores, chegando ao estado da arte deste desenvolvimento (YAN *et al.*, 2011a).

A pesquisa bibliográfica realizada nesta tese mostra que os estudos sobre atuadores esféricos têm tido grandes avanços com o intuito de chegar a um modelo que satisfaça requisitos como precisão, rapidez de resposta, facilidade de controle, eficiência e funcionalidade de um motor que desenvolva movimentos sobre uma superfície esférica (KIM *et al.*, 2015).

Após extensa pesquisa nas referências que tratam sobre o motor esférico, percebe-se que há muita evolução nos modelos e que estes são fortemente influenciados pelo aparecimento de novas tecnologias, quer sejam no processo de fabricação (máquinas operatrizes Comando Numérico Computadorizado (CNC) ou impressão 3D), nas simulações numéricas (*softwares*), no surgimento de avanços no *hardware* de controle, ou ainda nos novos materiais como ímãs permanentes de alta densidade magnética, novas ligas metálicas magnéticas e materiais isolantes (YAN *et al.*, 2014), (ROSSINI *et al.*, 2015a), (GORDON *et al.*, 2001), (ROSSINI *et al.*, 2015b), (ROSSINI *et al.*, 2010).

Percebe-se que as aplicações são propostas e que os modelos estão sendo continuamente aperfeiçoados. Nota-se também que cada novo atuador proposto, apresenta características diferentes no quesito forma construtiva e/ou técnica de controle. Entretanto, um ponto em comum a todos é que buscam descrever com precisão posições sobre uma superfície esférica.

### 2.1 Conceito do Motor Esférico

A história do desenvolvimento humano baseia-se em uma busca contínua por novas tecnologias e equipamentos. Dentre as diversas máquinas primárias, uma das mais importantes foram os motores elétricos. A partir dessa descoberta, abriu-se a possibilidade de acionar máquinas e equipamentos de forma simples, segura e com a possibilidade de controle. Uma ampla variedade de motores elétricos está disponível para o uso, desde os mais tradicionais rotativos, passando pelos lineares como o motor de indução linear (MIL). Uma variação desta máquina é o motor esférico que, como o próprio nome indica, possui uma forma esférica, ou seja, o eixo da parte móvel pode mover-se ao longo de uma superfície esférica, com o eixo de

movimentação no centro do próprio rotor esférico (WILLIAMS *et al.*, 1959), (YAN *et al.*, 2008), (ONER *et al.*, 2009), (CHEN *et al.*, 2012), (QIAN *et al.*, 2013), (SOUZA *et al.*, 2015).

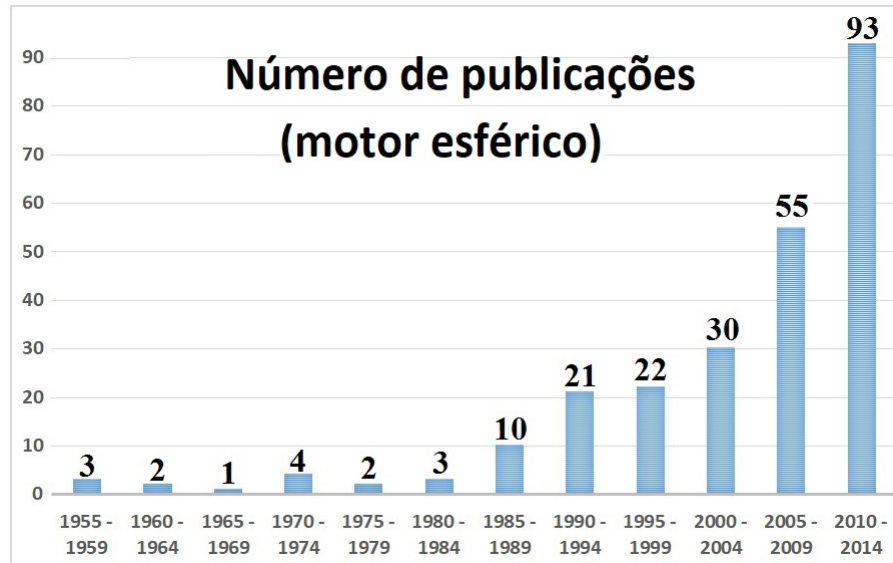
O maior desafio dos pesquisadores em motores esféricos é apresentar um *layout* otimizado, com um número mínimo de bobinas, uma maior superfície de atuação, um sistema de controle eficiente e uma solução para localizar o posicionamento do rotor, podendo este ser utilizada no fechamento da malha de controle ou para coleta de dados para treinamento de um algoritmo. Embora muitas universidades do mundo, e até setores de inovação da *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), como o *Center Innovation Fund* (CIF), tenham financiado projetos envolvendo motores esféricos 3-DOF, a realidade é que, ainda hoje, não há disponível um equipamento comercial deste tipo (HAEUSSERMANN, 1959), (KEYS *et al.*, 2015), (MARSHALL, 2015).

Com um modelo funcional, as possíveis aplicações são bem diversificadas como no setor de medicina ortopédica, em próteses humanas ou exoesqueletos, garantindo uma nova perspectiva na mobilidade de deficientes e melhorando sua qualidade de vida. Para a robótica, no setor fabril, as linhas de montagens teriam menores custos com uso de motor mais simples. Este sistema revela-se mais confiável, pois substitui funções que exigem três atuadores de 1-DOF, além de ser mais leve e possibilitar a redução da taxa de falhas.

O engenheiro Steven Peeples, do Departamento de Sistemas Espaciais da NASA *Marshall Space Flight Center* (MSFC), propôs-se a desenvolver um atuador esférico de três graus de liberdade, o qual substituiria a função de mecanismo que usa três atuadores de um grau de liberdade. Esse tipo de atuador buscaria diminuir o volume e o peso, além de reduzir a taxa de falhas em geral, e adicionar mais flexibilidade para missões da NASA (PEEPLES, 2014), (MARSHALL, 2015). O número de trabalhos publicados envolvendo os termos *Spherical Motor* e *Spherical Actuator* vem crescendo a cada ano. A Figura 1, apresenta o crescente número de trabalhos publicados (em grupos de 5 anos) ao longo das últimas décadas. Segundo a tendência, tem-se uma previsão de mais de 160 publicações entre os anos de (2015 e 2019) (SOUZA *et al.*, 2015).

A seguir, é apresentado o levantamento evolutivo dos modelos de motores/atuadores esféricos, os quais estão organizados por ordem cronológica das publicações.

Figura 1 – Gráfico do número de publicações nas últimas décadas com termos *Spherical Motor* e *Spherical Actuators*.



Fonte: o autor, (SOUZA *et al.*, 2015).

## 2.2 Histórico de Protótipos Desenvolvidos

Antes de se usar o termo motor esférico, já existiam tentativas de se fabricar um equipamento com este tipo de movimento. Em meados de 1893, o inventor Nicola Tesla, apresentava, na *World's Columbia Exposition*, uma superfície coberta de veludo sobre a qual fazia uma esfera de cobre girar livremente (CHENEY, 1989). Esse pode ser considerado o primeiro caso na tentativa de construir um dispositivo com movimentos esféricos, excitado por campos magnéticos.

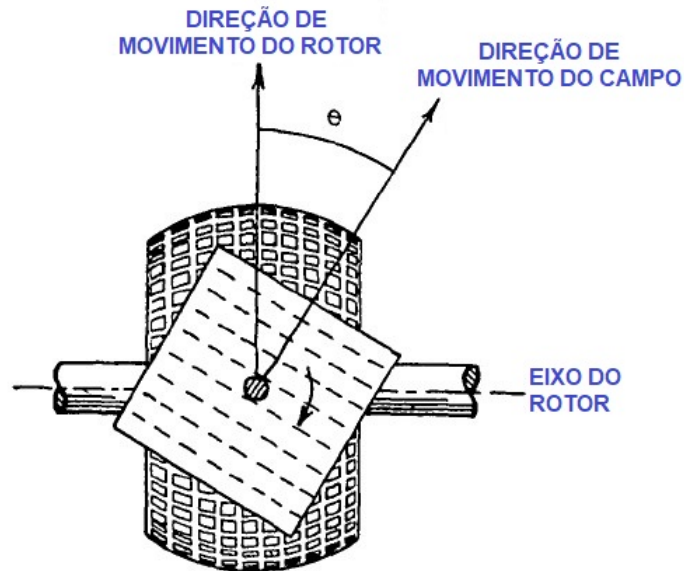
Após o ano de 1893, o próximo artigo encontrado que trata sobre um motor no formato esférico é o trabalho do Prof. F. C. Williams, o qual consta de três publicações (1954, 1956 e 1959), as quais buscavam mostrar a fabricação de um rotor diferente, com formato esférico/barril. Ele observou nesta época que o estudo de perdas era notável e diferente dos motores tradicionais, que já eram estudados desde o século XVII (SENS, 2001). Neste motor esférico, o estator tinha formato de concha Figuras 2 e 3, o que possibilitava movimento do rotor (WILLIAMS; LAITHWAITE, 1954), (WILLIAMS *et al.*, 1956) e (WILLIAMS *et al.*, 1959).

Após o ano de 1893, o primeiro artigo encontrado que trata sobre um motor no formato esférico é relativo ao trabalho do Prof. F. C. Williams (University of Manchester), em três publicações (1954, 1956 e 1959), as quais buscavam mostrar a fabricação de um rotor diferente, com formato esférico/barril. Ele observou, nessa época, que o estudo das perdas era bastante importante e bem diferente dos motores tradicionais, que já eram investigados desde o



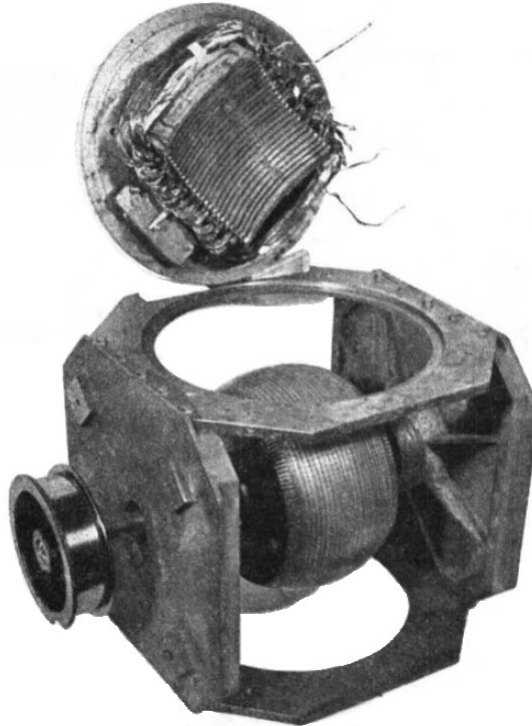
século XVII (SENS, 2001). Nesse motor esférico, o estator tinha formato de concha Figuras 2 e 3, o que possibilitava movimento do rotor (WILLIAMS; LAITHWAITE, 1954), (WILLIAMS *et al.*, 1956) e (WILLIAMS *et al.*, 1959).

Figura 2 – Rotor e direção do estator na máquina esférica.



Fonte: (WILLIAMS *et al.*, 1956).

Figura 3 – Montagem experimental com o estator removido de sua posição.



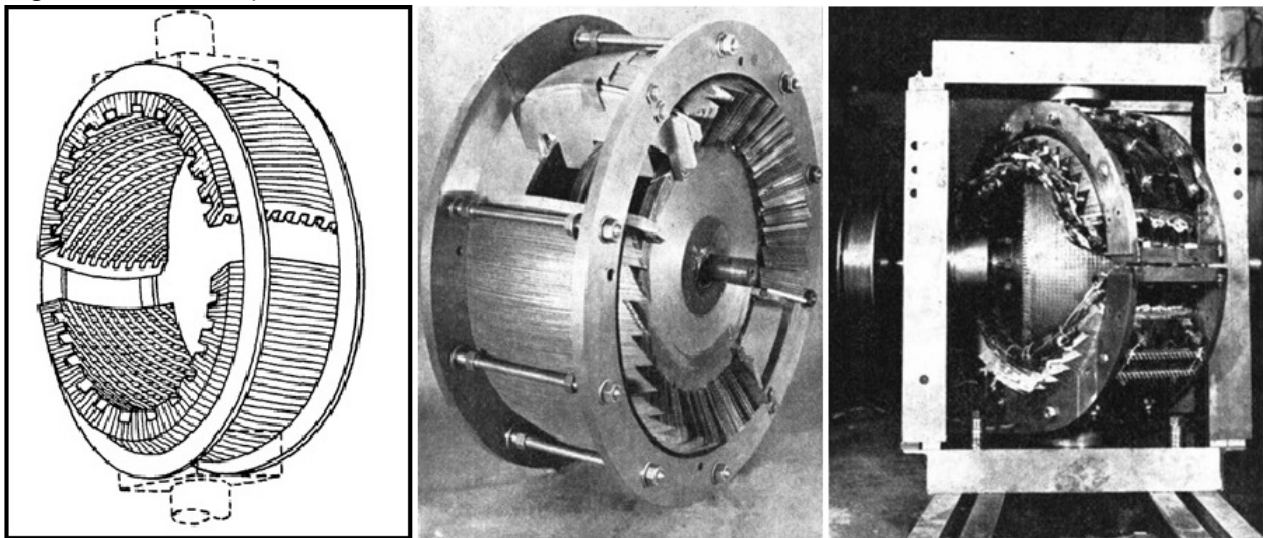
Fonte: (WILLIAMS *et al.*, 1956).

Buscando aperfeiçoar, o Prof. F. C. Williams em 1959 publica o terceiro artigo

relacionado ao motor esférico o qual aborda um novo *design*, este agora possui um novo *layout* do estator, onde possui apenas dois blocos conforme Figura 4 ao invés de quatro anteriormente apresentado. Este modelo mais elaborado, consta de um projeto melhorado e otimizado com resultados de ensaios e processo fabril (WILLIAMS *et al.*, 1959).

Em 1959, o Prof. F. C. Williams publicou o terceiro artigo relacionado a motores esféricos, o qual aborda o *design* de um motor aperfeiçoado, que possui um novo *layout* do estator, com apenas dois blocos, conforme a Figura 4, ao invés de quatro como no modelo anteriormente apresentado. Este modelo, mais elaborado, é resultado de um projeto melhorado e otimizado por resultados de ensaios e processo fabril (WILLIAMS *et al.*, 1959).

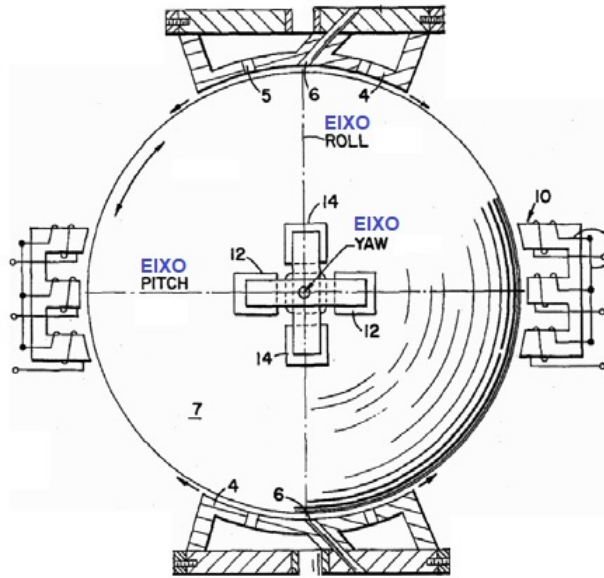
Figura 4 – Novo *layout* do estator com dois blocos.



Fonte: (WILLIAMS *et al.*, 1959).

Também em 1959, Walter Haeusserman (ALCORN, 2011), um dos membros fundadores da *Marshall Space Flight Center*, da NASA, realizou estudos nos quais pesquisou sistemas de orientação e controle de foguetes, realizando trabalhos que mostraram sistemas esféricos (3-DOF) sendo utilizados como uma rótula esférica e para controle de posicionamento de veículos espaciais, conforme a Figura 5 (HAEUSSERMANN, 1959). Esse sistema pôde ser utilizado como método de controle de posicionamento da rótula esférica. Era esse modelo um caso especial de fabricação, pois estava apoiado em mancais de ar suportado magneticamente, garantindo um baixo atrito, conforme mostrado na Figura 6. O seu objetivo era medir a velocidade do corpo esférico magnético girante.

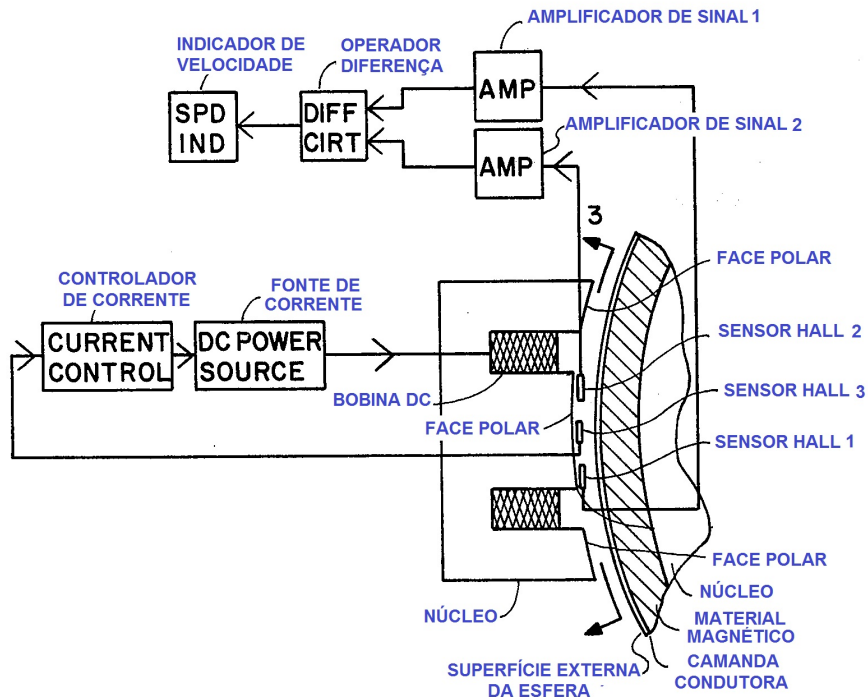
Figura 5 – Sistema de orientação da esfera (Haussermann).



Fonte: (HAEUSSERMANN, 1959).

O sensor de velocidade, que possuía um corpo condutor esférico utilizando um núcleo magnético em forma de *E*, gerou uma patente em 1978 (HAEUSSERMANN, 1978). O princípio de funcionamento do motor era simples, baseando-se no fato de que a diferença de tensão registrada pelos dispositivos de efeito *hall* indicava a velocidade do corpo. Esse invento foi utilizado para corrigir movimentos de veículos espaciais da NASA.

Figura 6 – Sensor de velocidade e orientação de uma rótula esférica.



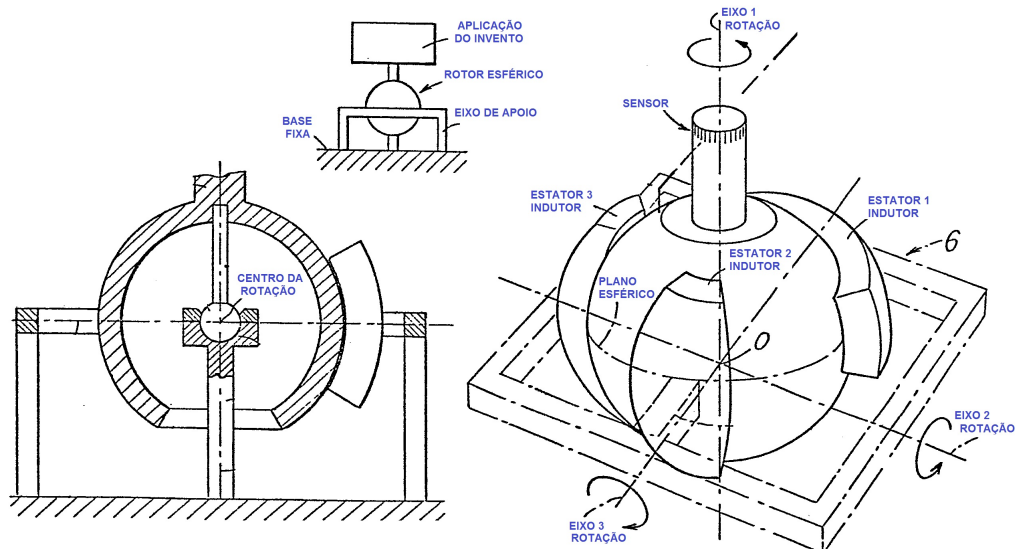
Fonte: (HAEUSSERMANN, 1978).

Em 1964, R. P. Halverson, (University of Minnesota), realizou estudos de torque em uma casca esférica condutora imersa em um campo magnético uniforme para calcular o torque em termos de vetor potencial magnético (HALVERSON; COHEN, 1964). Foi um estudo similar ao de Walter Haussermann, com a diferença que as componentes das correntes induzidas no campo constante ao longo do eixo de rotação faziam com que o eixo girasse.

Duas décadas mais tarde, surgiram as patentes (SABONNADIÈRE; FOGGIA, 1984) e (SABONNADIÈRE; FOGGIA, 1986) do invento de uma máquina esférica com uma parte móvel (3-DOF) em relação à estrutura fixa e com acoplamento síncrono com alimentação independente - uma espécie de motor linear com estrutura curva. Naquela época, os detentores das patentes já sugeriam aplicações em robótica, estrutura de radar e manipuladores industriais. O esquemático do equipamento é mostrado na Figura 7. Ele consiste, basicamente, de três estatores curvos que fazem, cada um, o rotor girar em um eixo.

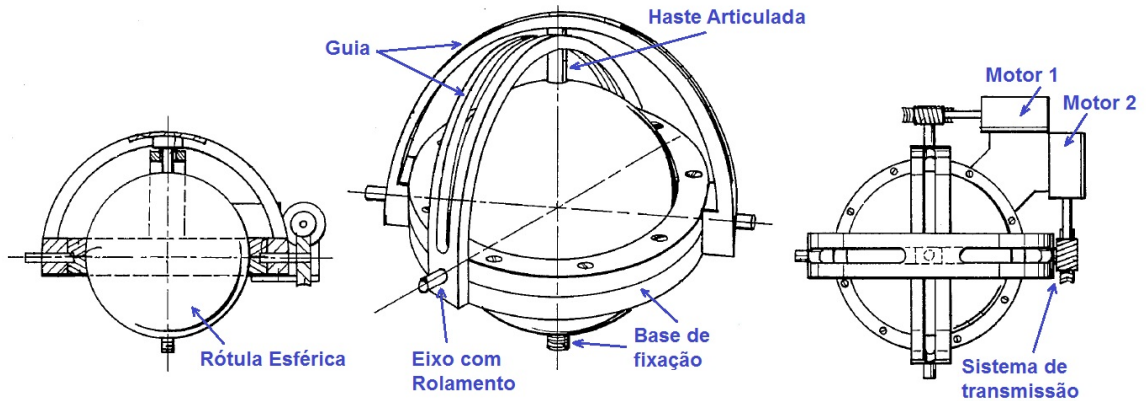
Um sistema teórico (3-DOF) é requerido na patente de Dien and Luce, (Rensselaer Polytechnic Institute ) em 1986 Figura 8. O invento é, basicamente, um sistema mecânico acionado por dois motores, e contribuiu para a corrida do desenvolvimento do motor esférico (DIEN; LUCE, 1986), (SOUZA *et al.*, 2015), (FERNANDES; BRANCO, 2016), (KASASHIMA *et al.*, 2016).

Figura 7 – Conversor eletromecânico apresentado na patente de Jean Claude e Albert Foggia.



Fonte: (SABONNADIÈRE; FOGGIA, 1984).

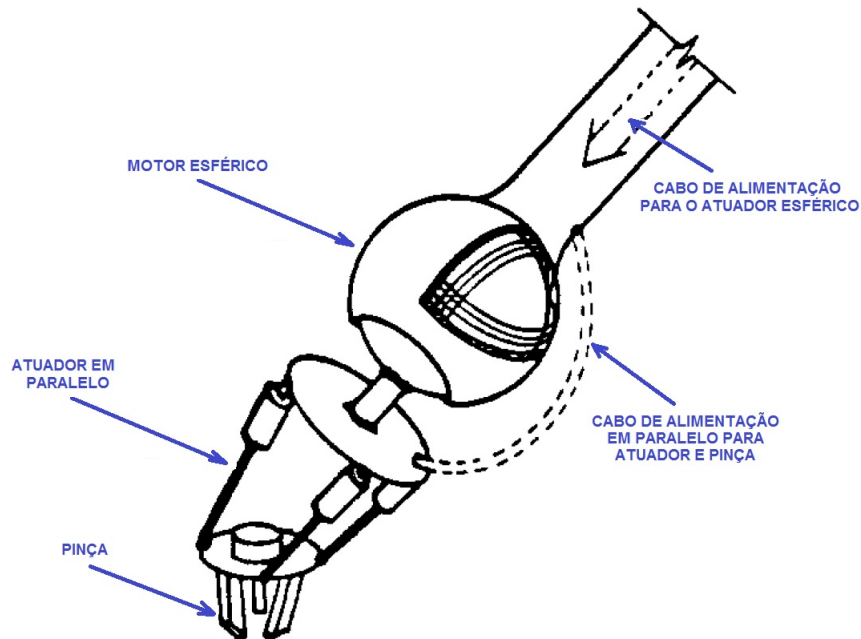
Figura 8 – Modelo da articulação esférica para pulso robótico.



Fonte: (DIEN; LUCE, 1986).

Com a estimativa do torque e do posicionamento devido aos campos magnéticos e sensores, surgiu um trabalho, publicado por George J. Vachtsevanos e Kent Davey (DAVEY; VACHTSEVANOS, 1986), que sugeria uma aplicação em ambientes militares e robôs manipuladores, citando o nome do manipulador como atuador de pulso esférico. O trabalho abordou o problema de controle da velocidade, da posição e do torque na esfera, e empregou, pela primeira vez, o termo motor esférico Figura 9.

Figura 9 – Esquema do manipulador esférico.



Fonte: (DAVEY; VACHTSEVANOS, 1986).

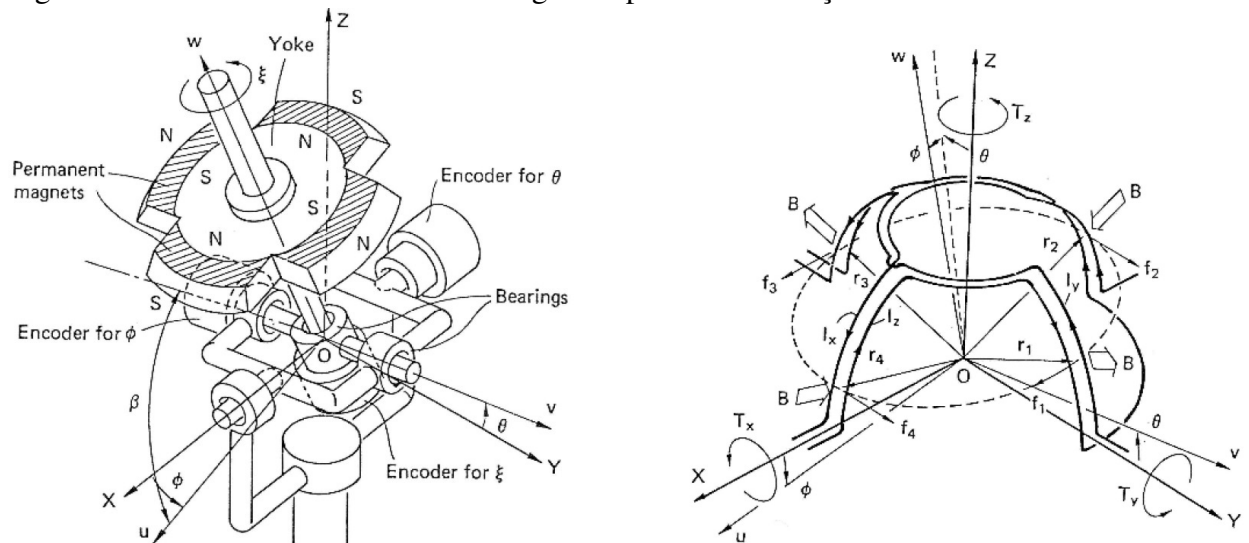
Em 1987 George e Davey, (Georgia Institute of Technology, Atlanta), publicaram

outros dois trabalhos com detalhes teóricos do sistema de controle, posicionamento e estudo de torque do modelo apresentado e requereram uma patente no ano seguinte (VACHTSEVANOS; DAVEY, 1988).

Deve-se notar, no projeto de motor esférico, que o seu desempenho dependerá da sua aplicação. Dentre os itens a serem considerados no projeto destacam-se a precisão e a velocidade dos movimentos requeridas, além da redução de peso, complexidade de montagem e confiabilidade (VACHTSEVANOS *et al.*, 1987), (DAVEY *et al.*, 1987).. Motivados pelo desafio de construir o motor esférico e pelas necessidades industriais deste tipo de equipamento, muitos pesquisadores ficaram interessados em criar um modelo que fosse funcional, surgindo, assim, muitos trabalhos nesta área (LEE *et al.*, 1988), (KANEKO *et al.*, 1989), (LEE; KWAN, 1991), (WEEK *et al.*, 2000), (GARNER *et al.*, 2001), (YAN *et al.*, 2008). Em anos bem mais recentes, têm surgido ainda diversos modelos, como se pode encontrar na literatura (BHATIA *et al.*, 2015), (SOUZA *et al.*, 2015), (CHU *et al.*, 2015), (KEYS *et al.*, 2015), (FERNANDES; BRANCO, 2016). Alguns destes últimos estão baseados em ideias antigas, mas tiraram proveito de novos materiais e melhores técnicas de fabricação, dada a disponibilidade de novas ferramentas e máquinas mais modernas.

O pesquisador, Kok-Meng Lee, (Georgia Institute of Technology), propôs um motor de passo esférico, (LEE *et al.*, 1988), mostrando o conceito de viabilidade e ajudando a melhorar futuros projetos. K. Kaneko, (Applied Electronics Laboratories - Tokyo), propôs, em 1989, um novo motor esférico (3-DOF) de alimentação DC. Ele apresentou esse motor com um sistema giroscópio, esperando produzir um mecanismo mais leve, de menores dimensões. O rotor por ele proposto é formado por um disco com quatro ímãs permanentes conforme a Figura 10. A ideia era gerar torque de rotação em cada eixo, podendo assim, posicioná-lo em qualquer ponto do hemisfério. Com isso, foi possível encontrar uma matriz de torque, determinando as forças atuantes pela Lei de *Fleming*, e posicioná-lo utilizando os ângulos de Euler ( $\theta$ ,  $\phi$ ,  $r$ ) (KANEKO *et al.*, 1989). .

Figura 10 – Motor Esférico com sistema giroscópico e alimentação DC.

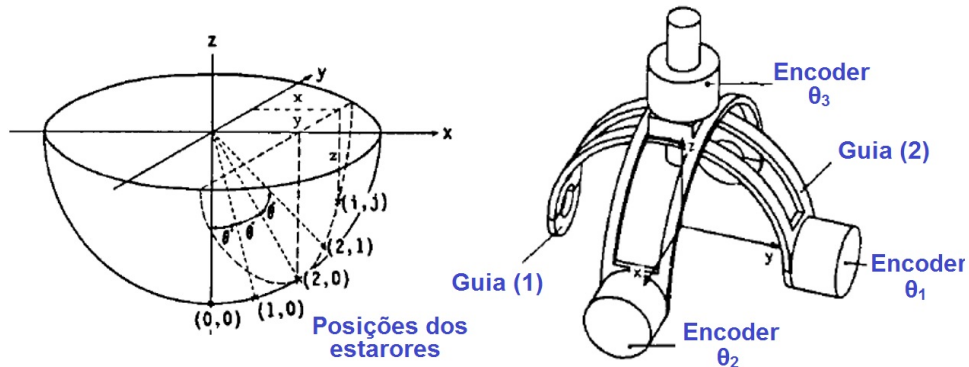


Fonte: (KANEKO *et al.*, 1989).

Na busca de desenvolver um novo atuador esférico, Kok-Meng Lee, projeta este modelo usando o princípio de **relutância variável** (RV) e mostra que um atuador funcional pode ser construído com um número máximo de vinte bobinas de forma que fiquem uniformemente espaçadas no estator. Por este sistema possuir muitas bobinas, exige um sofisticado sistema de controle. O movimento rotacional é baseado no sistema cardan. Seu sistema de posicionamento é feito utilizando encoder, Figura 11, (LEE; KWAN, 1991). Este modelo acaba se tornando um **motor de passo esférico**, ideia que veio a ser patenteada (LEE, 1994).

Na busca de desenvolver um novo atuador esférico, Kok-Meng Lee projetou esse modelo usando o princípio de relutância variável (RV) e mostrou que um atuador funcional pode ser construído com um número máximo de vinte bobinas, de modo que fiquem uniformemente espaçadas no estator. Por esse possuir muitas bobinas, ele exige um sofisticado mecanismo de controle. O movimento rotacional é baseado no sistema giroscópico. Seu posicionamento é obtido utilizando *encoder* Figura 11, (LEE; KWAN, 1991). Esse modelo acabou se tornando um motor de passo esférico, ideia que veio a ser patenteada (LEE, 1994).

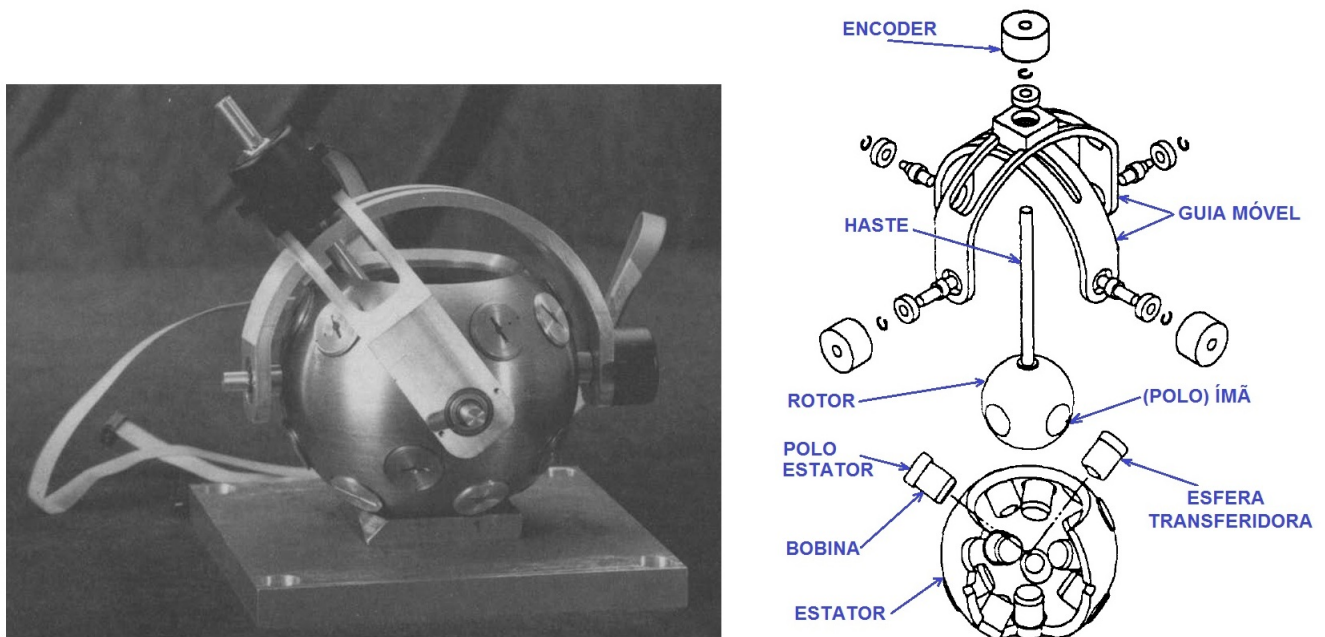
Figura 11 – Estruturas base do motor esférico.



Fonte: (LEE; KWAN, 1991).

Assim, Kok-Meng Lee, três anos após a proposta do motor esférico de relutância variável, descreveu a cinemática que rege este atuador e montou o protótipo conforme ilustra a Figura 12, (LEE *et al.*, 1994).

Figura 12 – Protótipo e vista explodida do motor esférico (RV).



Fonte: (LEE *et al.*, 1994).

Outro projeto interessante de um Motor Esférico Apontador (MEA), é proposto por Benjamim B. Bederson, (Bellcore, Morristown). Este motor possui dois graus de liberdade rotacionais  $\theta$  e  $\phi$  Figura 13, consiste de três enrolamentos, com a resultante dos campos magnéticos gerados de forma ortogonal, e é configurado de tal forma que movimenta uma pequena câmera montada em um sistema giroscópico Figura 14. O princípio de seu funcionamento é alinhar o



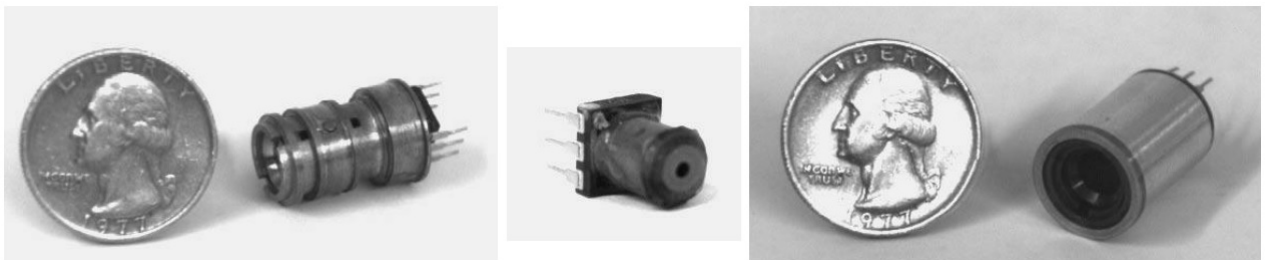
campo magnético gerado pelas bobinas com os dos ímãs permanentes conforme está mostrado na Figura 15. Esta força vem do princípio eletromagnético de que, ao se conduzir corrente pelo fio da bobina, gera-se um campo magnético proporcional ao valor da corrente que passa pela bobina, induzindo um torque no ímã, buscando alinhar os campos magnéticos do ímã e aquele gerado pela corrente na bobina. O ímã permanente pode estar na parte externa ou interna ao motor (BEDERSON *et al.*, 1992). O sistema proposto é executado em malha aberta, podendo inclinar uma carga de até 15 gramas. Sua aplicação como braço robótico e sistema de visão robótica é citado pelo autor (BEDERSON, 1992), (BEDERSON *et al.*, 1994), (BEDERSON *et al.*, 1995).

Figura 13 – Motor Esférico Apontador - MEA, proposto por Bederson.



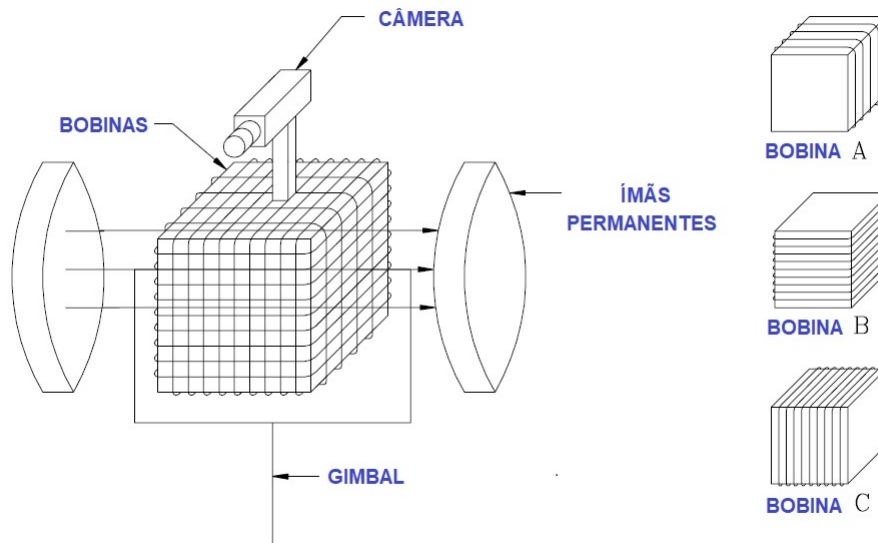
Fonte: (BEDERSON *et al.*, 1992).

Figura 14 – Câmera em miniatura utilizada no Motor Esférico Apontador - MEA



Fonte: (BEDERSON *et al.*, 1992).

Figura 15 – Protótipo com bobinas interna (a 90°) e ímã permanente externo.

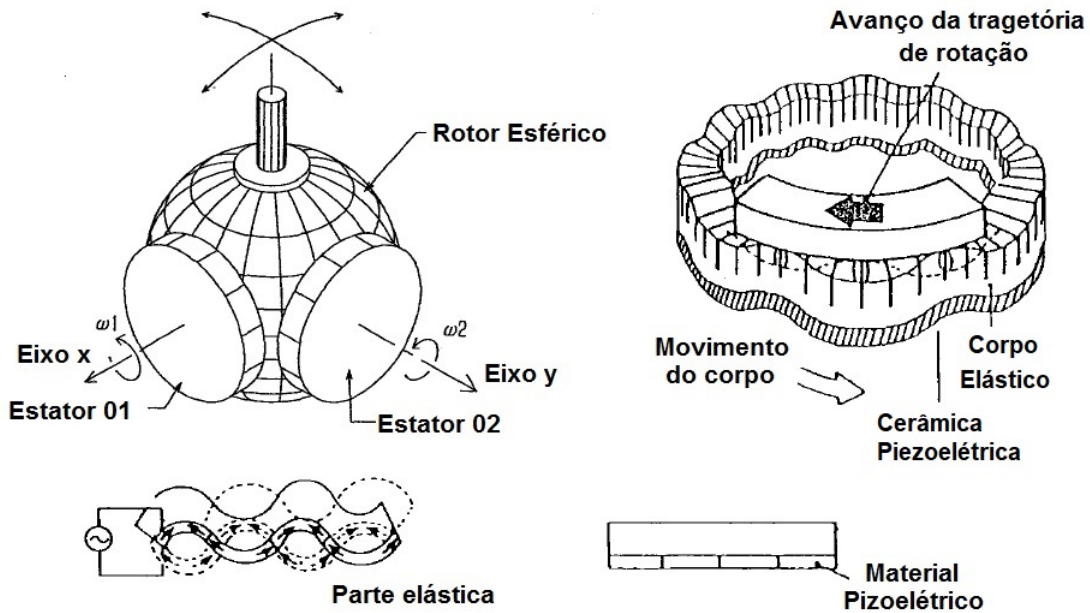


Fonte: (BEDERSON *et al.*, 1995).

Em 1995, Martins Neto (Universidade Federal de Uberlândia), (NETO *et al.*, 1995), propôs um motor esférico e citou os principais problemas enfrentados, como perdas por atrito das partes móveis, grande inércia e construção mecânica difícil de implementar. Nesse artigo, Martins Neto apresenta sua proposta de motor esférico e seu princípio de funcionamento, mostrando o equacionamento de torque e indutância do sistema proposto. Ele demonstra que é possível, com o controle de corrente nas bobinas, controlar o campo magnético resultante, podendo posicionar uma esfera magnética que funciona como rotor.

Outro tipo de motor esférico é o atuado por ultrassom, que é um tipo de motor o qual gera movimentos 3-DOF em uma esfera, usando vibrações causadas por elementos piezoelétricos (PZT) colocados na superfície esférica, como é mostrado na Figura 16. Um dos precursores desta forma de atuador é Toyama Shigek e seus colaboradores S. Hatae e M. Nonaka (Tokyo Univ., Japan). Eles descrevem seu princípio de funcionamento, que consiste em se aplicar uma tensão elétrica nos materiais piezoelétricos, provocando-se mudança nas suas dimensões (contração e expansão), e movimentando a esfera de contato (rotor) (TOYAMA *et al.*, 1991), (SHIGEKI *et al.*, 1996), (FUKAYA *et al.*, 2000), (PURWANTO; TOYAMA, 2001), (HU *et al.*, 2001), (UENO *et al.*, 2009).

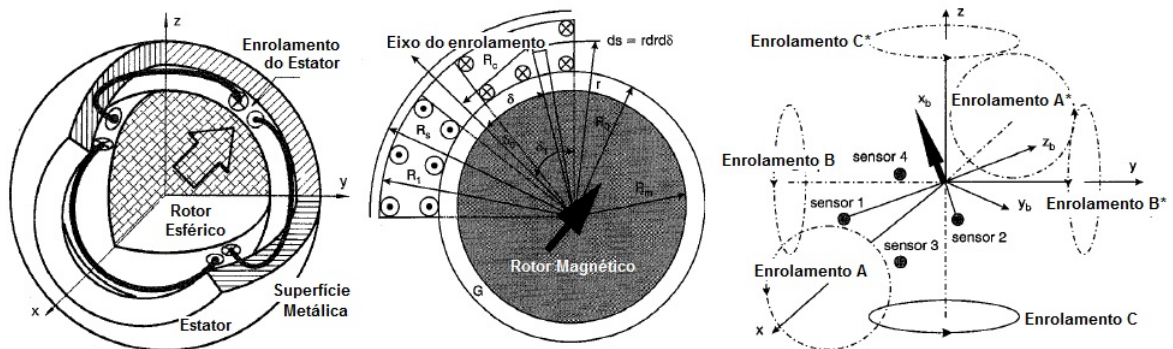
Figura 16 – Princípio do motor esférico ultrassônico.



Fonte: (TOYAMA *et al.*, 1991), (MASHIMO *et al.*, 2007).

Nos anos de 1997 e 1998, Jiabin Wang, (University of Sheffield) publicou diversos trabalhos explorando o atuador esférico e descreveu as possibilidades de *design* e controle sugeridos na época, seguindo a tendência, de 1995, do uso de várias bobinas no estator (WANG *et al.*, 1997d), (WANG *et al.*, 1997a), (WANG *et al.*, 1997b), (WANG *et al.*, 1997c), (WANG *et al.*, 1998), (WANG *et al.*, 1998a) e (WANG *et al.*, 1998b). Pode-se observar, neste tipo de motor, que o enrolamento é na própria superfície esférica do estator, e que, na teoria, pode ser funcional, mas na prática requer uma usinagem difícil e um processo de bobinamento complicado Figura 17. Além disso, não considera problemas como aquecimento e atrito da parte móvel. Em 2001 o modelo foi construído e aplicado um controle com uso de sensores do tipo *Hall*.

Figura 17 – Esquemático do Atuador Esférico.



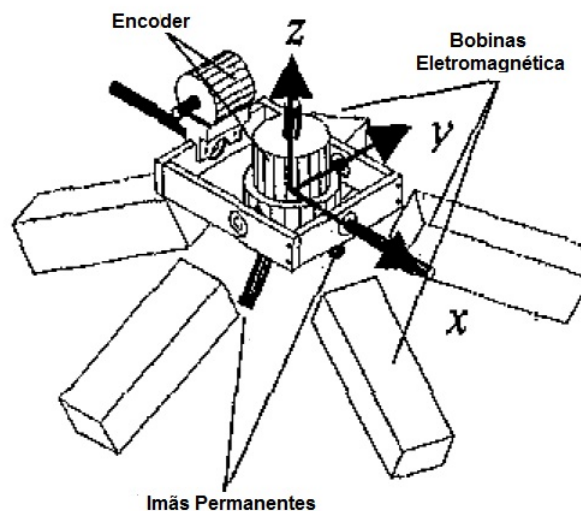
Fonte: (WANG *et al.*, 1998a).

A partir de 1999, o caminho das pesquisas continuaram os modelos de múltiplas bobinas. É importante observar que cada modelo tem suas características, umas extremamente difíceis de serem reproduzidas, outras de difícil aplicação, em virtude do tamanho, do peso, do atrito, do aquecimento ou do sensor para a resposta da posição do atuador.

Descrevem-se, a seguir os tipos de motor esférico, que foram evoluindo a partir do ano de 1999. As referências mostram outros trabalhos que seguiram a mesma lógica construtiva do modelo.

O modelo de motor esférico da Figura 18, de 3-DOF, com estator de múltiplos polos e composto de ímãs permanentes no rotor, que utiliza encoder para medir o movimento do rotor, foi proposto por Chang II Yang (Yonsei Univ., Seoul), (YANG; BAEK, 1999). Este é um dos poucos trabalhos que utiliza encoder para determinar a posição, o que não se mostrou eficiente por atrapalhar o sistema de movimento e necessitar de fios ligados ao conjunto móvel.

Figura 18 – Motor 3-DOF, com encoder.



Fonte: (YANG; BAEK, 1999).

Em seguida, veio o trabalho de Gregory S. Chirikjian (Johns Hopkins Univ., Baltimore), (CHIRIKJIAN; STEIN, 1999), para cujo equipamento o princípio de funcionamento remete a um motor de passo, composto de 16 bobinas eletromagnéticas distribuídas na superfície esférica, com ímãs fixos no rotor Figura 19. Esse modelo é de difícil construção e controle.

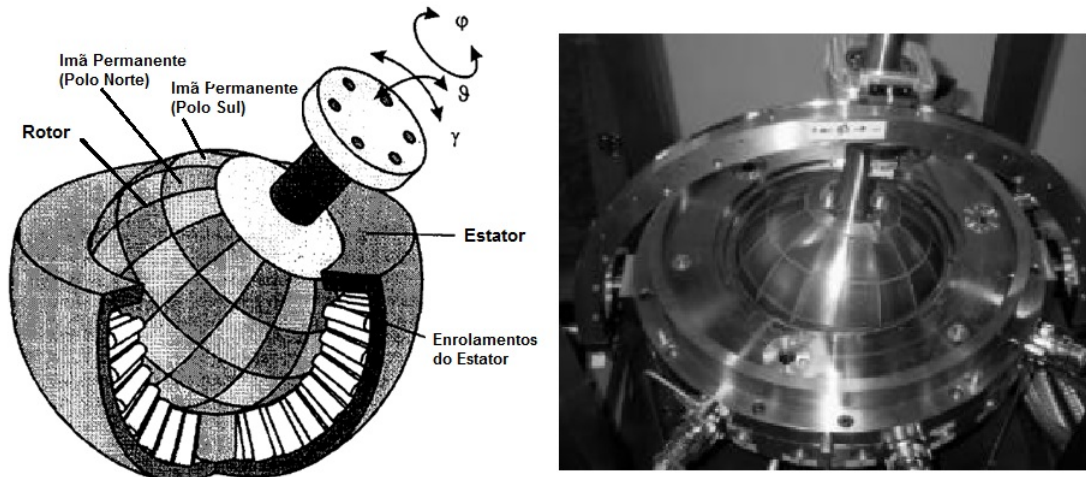
Figura 19 – Motor 3-DOF, com múltiplas bobinas.



Fonte: (CHIRIKJIAN; STEIN, 1999).

Seguindo a ideia de múltiplas bobinas e ímãs fixos no estator, surgiu o modelo de M. Weck em parceria com T. Reinart, G. Henneberge e R. W. De Doncker, (Department of Electrical Machines, Aachen, Germany; Institute for Power Electronics and Electrical Drives, Aachen) (WEEK *et al.*, 2000), que é um motor esférico composto por um estator com 96 bobinas Figura 20, de difícil fabricação (WEEK *et al.*, 2000). Esse modelo foi precursor de outros (TSUKANO *et al.*, 2013), (CHU *et al.*, 2013) e (NISHIURA *et al.*, 2015).

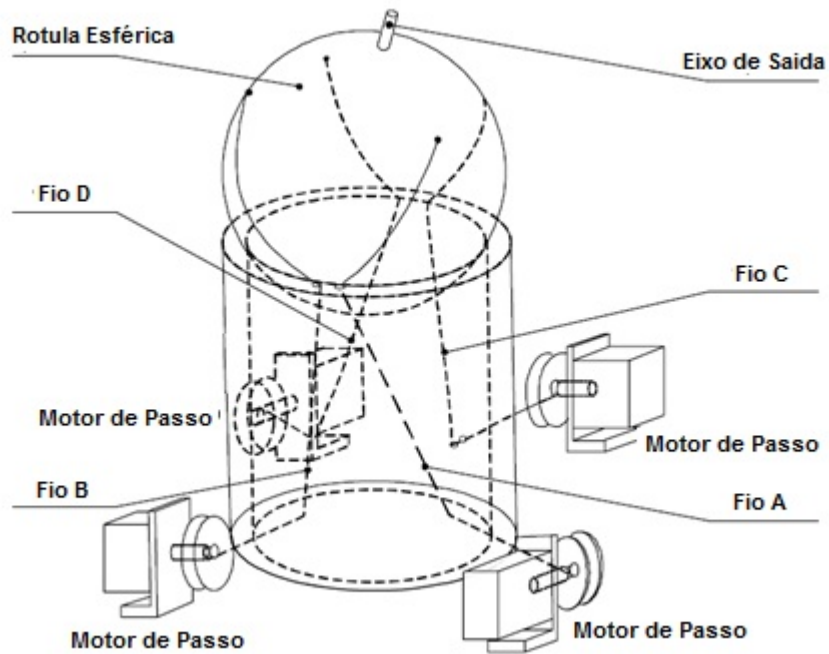
Figura 20 – Motor 3-DOF, com múltiplos ímãs no rotor e múltiplas bobinas no estator.



Fonte: (WEEK *et al.*, 2000).

Com Hirokazu Nagasawa e Satoshi Honda (Tokyo Metropolitan Institute of Technology) (NAGASAWA *et al.*, 2000), surgiu então a ideia do motor esférico manipulado por quatro fios Figura 21, em que cada fio é ligado a um motor de passo. O movimento é controlado por um algoritmo simples para cada motor (NAGASAWA *et al.*, 2000).

Figura 21 – Motor Esférico de quatro fios.

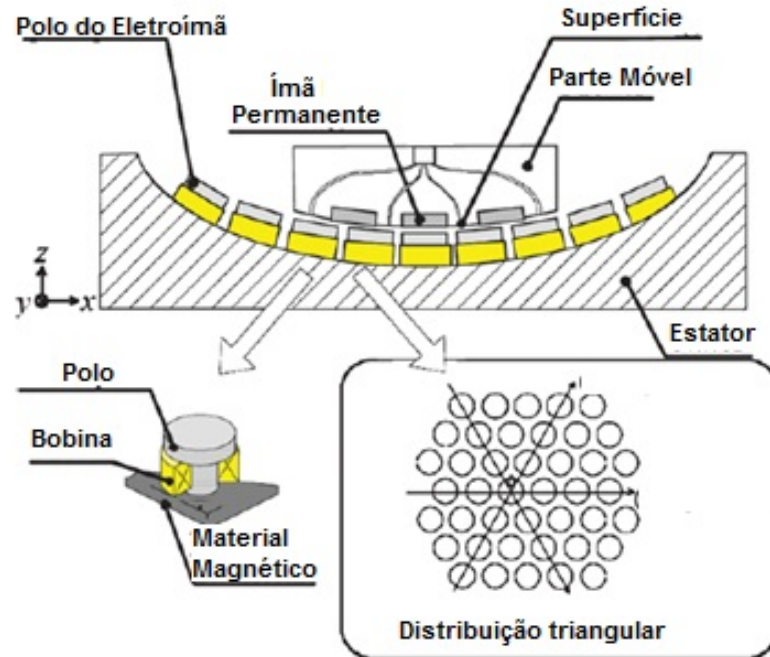


Fonte: (NAGASAWA *et al.*, 2000).

Nos trabalhos subsequentes, os motores esféricos são compostos de várias bobinas e polos distribuídos na superfície esférica, ainda funcionando como um motor de passo e rotor

de múltiplos polos, conforme a Figura 22 e a Figura 23, sendo um modelo de difícil fabricação (EBIHARA *et al.*, 2001),(YANO *et al.*, 2007), (IKESHITA *et al.*, 2010), (YAN *et al.*, 2012) e (JINJUN *et al.*, 2013).

Figura 22 – Motor esférico de múltiplos polos.



Fonte: (EBIHARA *et al.*, 2001).

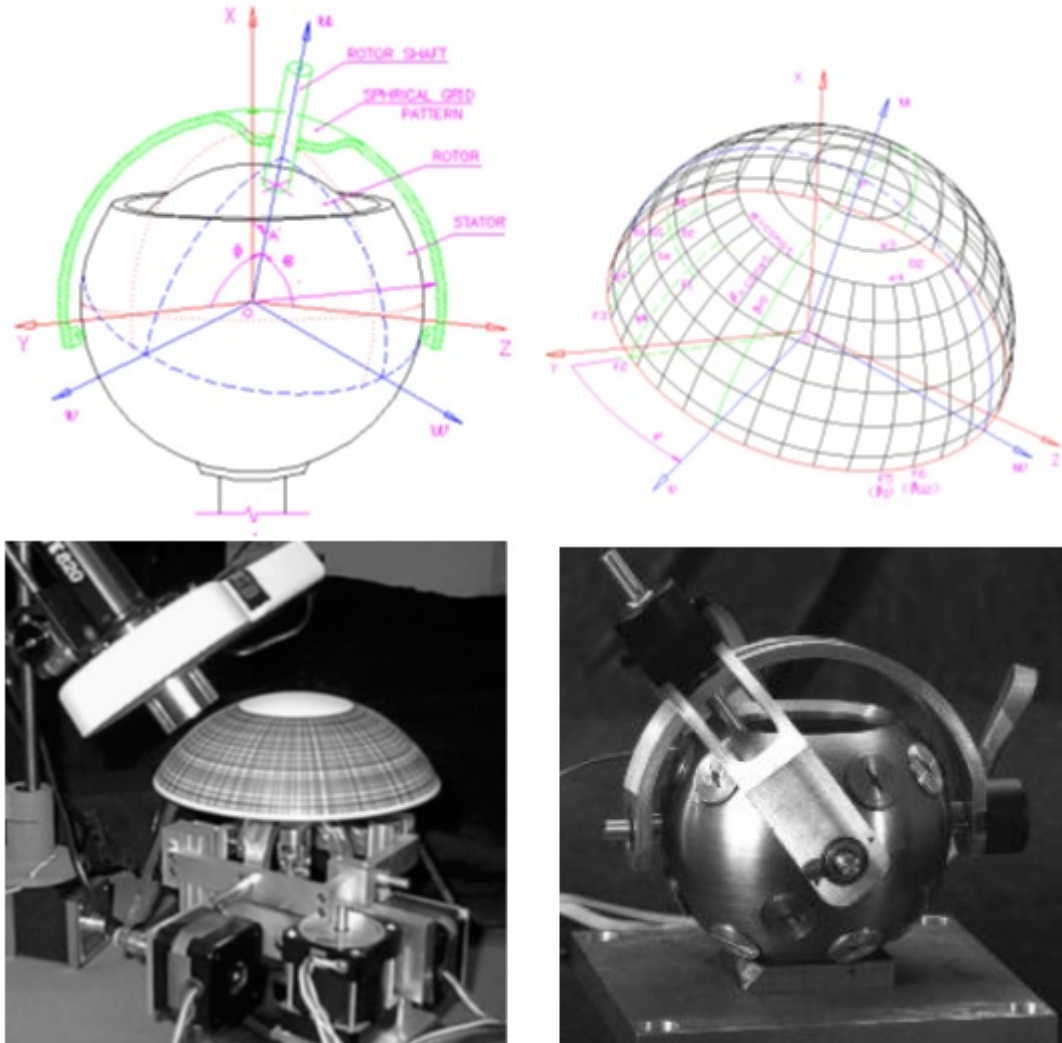
Figura 23 – Motor Esférico de múltiplos Polos.



Fonte: (IKESHITA *et al.*, 2010).

Surgiram, em 2001 e nos anos posteriores, modelos seguindo a ideia de 1994, cujo objetivo era melhorar o processo de localização do rotor. Apareceu, assim, a ideia de se criar uma superfície para identificar o movimento Figura 24. Esses modelos, eram acionados por motor de passo localizado em seus eixos (GARNER *et al.*, 2001), (LI, 2009), (ZHENG, 2012), (QIAN *et al.*, 2014).

Figura 24 – Motor esférico com superfície de identificação.



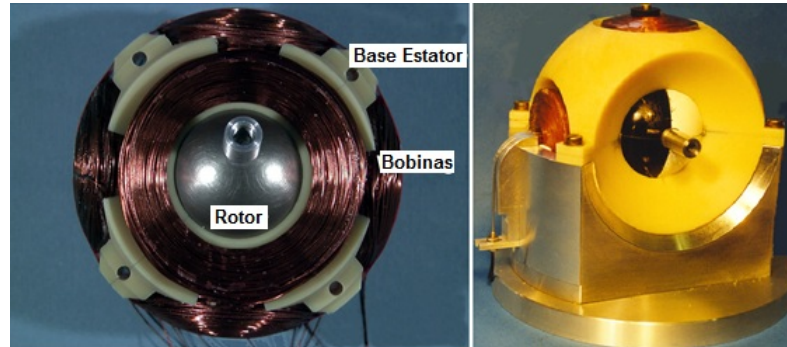
Fonte: (GARNER *et al.*, 2001).

Agora, um tipo de motor que foi além do projeto teórico e foi fabricado segundo um modelo proposto em 1998, pelo mesmo autor (J. Wang) é mostrado na Figura 25. Mas ainda com processo complicado de fabricação (WANG *et al.*, 2001). Seguindo esse princípio de funcionamento, destacam-se os trabalhos de Weiya Wang (University of Sheffield) (WANG *et al.*, 2003), B. Ackermann (Philips Research Laboratories), João F. P. Fernandes (Universidade de Lisboa) (FERNANDES; BRANCO, 2016) e B. Van Nihuijs (Eindhoven University of



Technology) (NINHUIJS *et al.*, 2014), (ACKERMANN *et al.*, 2004), (IKESHITA *et al.*, 2010), (LI *et al.*, 2010) e (LI; WANG, 2011).

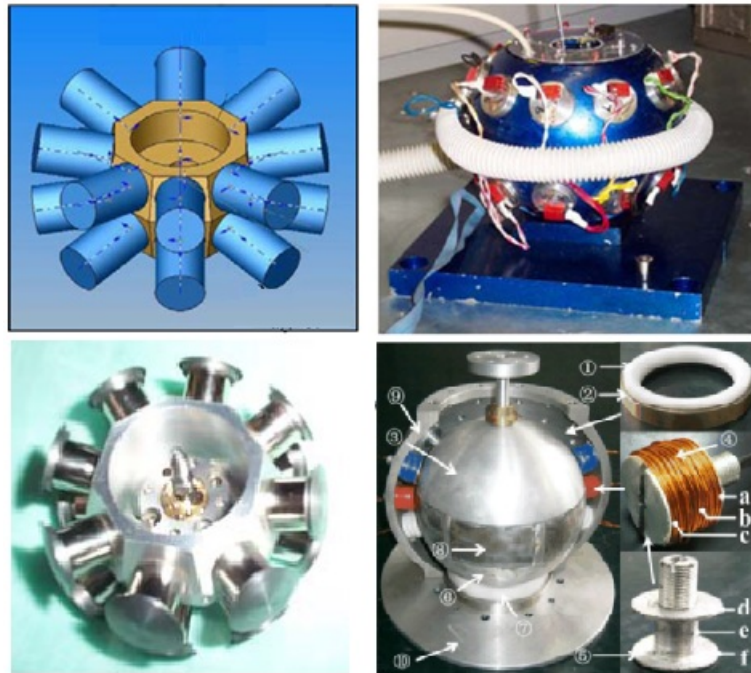
Figura 25 – Motor esférico com acionamento por bobinas envolventes.



Fonte: (WANG *et al.*, 2001).

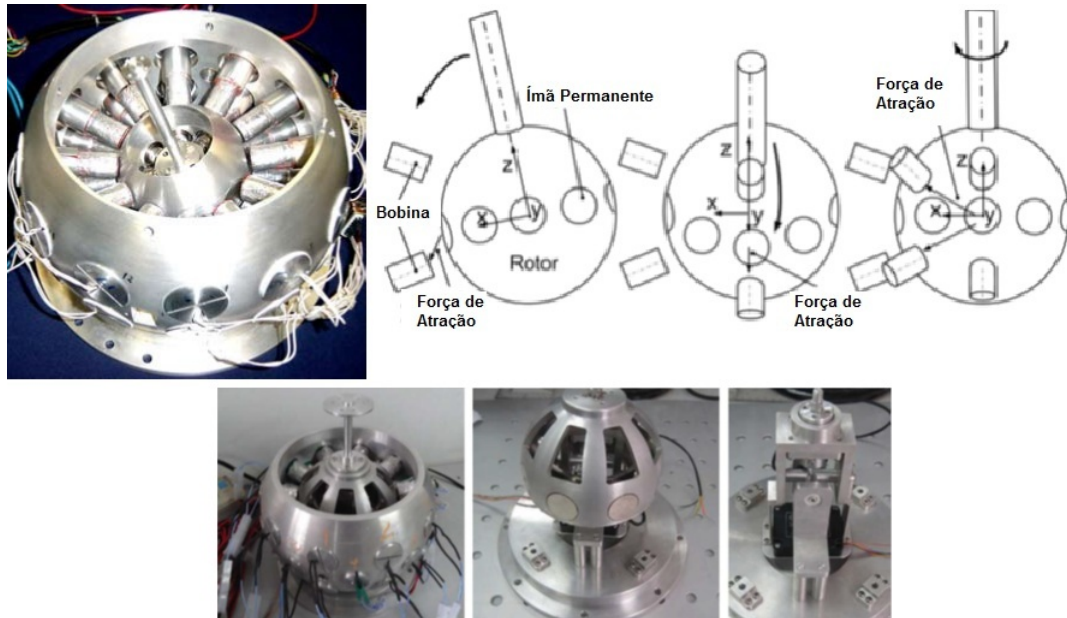
Dois dos tipos mais famosos modelos são os de Kok-Meng Lee (Georgia Inst. of Technol., Atlanta) (LEE *et al.*, 2004) e o de Liang Yan (Nanyang Technological University, Singapore) (YAN *et al.*, 2005), que realizaram diversos trabalhos baseados nesses modelos. Eles são compostos de múltiplas bobinas ao longo da circunferência do estator Figuras 26 e 27. Esse modelo tem sido estudado por outros autores ao longo dos anos (LEE *et al.*, 2005), (LEE *et al.*, 2005), (QIAN *et al.*, 2009), (XIA *et al.*, 2009), (LIM; CHEN, 2007), (LEE *et al.*, 2009), (LI *et al.*, 2011), (SON; LEE, 2011), (LEE *et al.*, 2012), (PARK *et al.*, 2013), (LEE *et al.*, 2013), (ZHANG *et al.*, 2014), (YAN *et al.*, 2014), (BAI; LEE, 2013), (BAI; LEE, 2014), (YAN *et al.*, 2015), (LI; SHEN, 2015), (YAN *et al.*, 2005), (YAN *et al.*, 2006), (YAN *et al.*, 2008), (SON; LEE, 2010), (LIM *et al.*, 2011), (MENG *et al.*, 2012), (YAN *et al.*, 2011b), (CHEN *et al.*, 2012), (ZHANG *et al.*, 2013), (WEN *et al.*, 2014), (ZHANG *et al.*, 2016) e (YAN *et al.*, 2015).

Figura 26 – Motor Esférico de ímã permanente e múltiplas bobinas.



Fonte: (LEE *et al.*, 2004).

Figura 27 – Motor Esférico de ímã permanente e múltiplas bobinas.

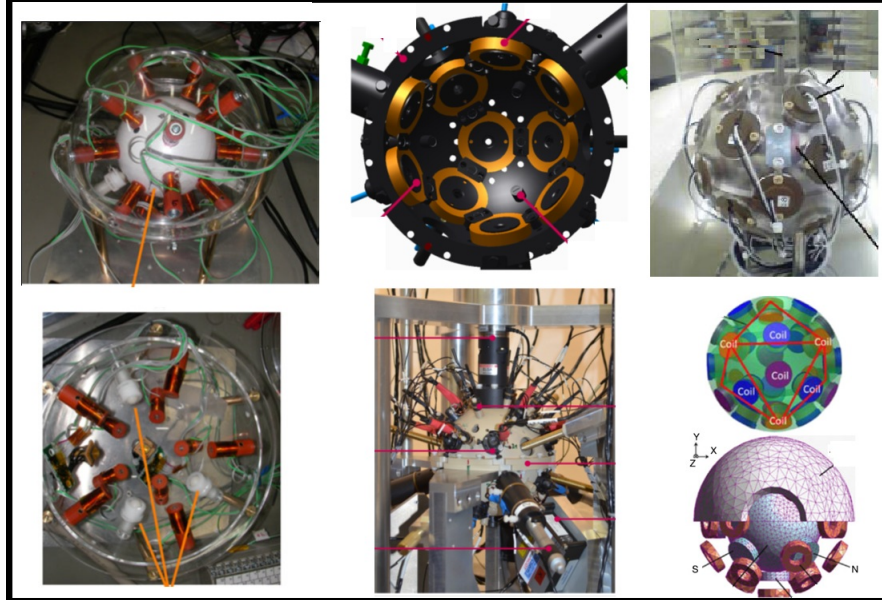


Fonte: (YAN *et al.*, 2005).

Atualmente, os modelos têm seguido os mesmos princípios dos anteriores, com distribuição de bobinas ao longo da superfície esférica Figura 28, como se pode perceber nos trabalhos de (UM; YANO, 2009), (ROSSINI *et al.*, 2010), (SHAN *et al.*, 2012), (GOFUKU *et al.*, 2012), (WAWRZASZEK *et al.*, 2013), (ROSSINI *et al.*, 2013), (STRUMIK *et al.*, 2014),

(BHATIA *et al.*, 2015), (ROSSINI *et al.*, 2015b), (GOFUKU *et al.*, 2016) e (KASASHIMA *et al.*, 2016).

Figura 28 – Estator com estrutura acrílica e múltiplas bobinas.



Fonte: (UM; YANO, 2009), (ROSSINI *et al.*, 2010).

### 2.3 Conclusão

Esta seção descreveu um breve histórico envolvendo os tipos de motor esférico. Observou-se que os modelos estão evoluindo de acordo com as tecnologias disponíveis. Apesar de todo o esforço para se criar um motor esférico, não existe um modelo comercial, ou que esteja em uso industrial, até o momento, evidenciando que o desafio hoje é de se desenvolver um modelo simples e funcional com um sistema de controle de posição eficiente.

### 3 MODELAGEM DO CAMPO MAGNÉTICO

Neste capítulo, é abordado o fundamento teórico (cálculo/modelagem) do campo magnético envolvido no motor/atuador esférico. Inicialmente, é apresentada a teoria relacionada ao assunto, seguida do dimensionamento das bobinas e do cálculo do campo magnético resultante no estator. A proposta é desenvolver o protótipo com três bobinas concentradas e simetricamente distribuídas. Em seguida, é detalhado o campo resultante gerado pelo rotor, buscando-se mostrar a relação entre as correntes  $i_1$ ,  $i_2$  e  $i_3$  nas respectivas bobinas. O equacionamento a seguir está de acordo com a modelagem eletromagnética clássica (e tempo estático) e foi utilizado no estudo teórico dos campos magnético do motor esférico.

#### 3.1 Intensidade de Campo Magnético

Em 1820, Oersted percebe que um campo magnetostático é gerado quando cargas estão em movimento. Este fenômeno é o pilar para o desenvolvimento do atuador esférico. O estudo de magnetostática é fundamentado pela lei de Biot-Savart e a lei circuital de Ampère.

A lei de Biot-Savart determina que, em qualquer ponto  $P$ , o valor absoluto da intensidade de campo magnético, produzido pelo elemento diferencial é proporcional ao produto entre a intensidade de corrente, o comprimento diferencial e o ângulo formado pelo filamento e a reta que conecta o filamento ao ponto  $P$ , conforme equação (3.1.).

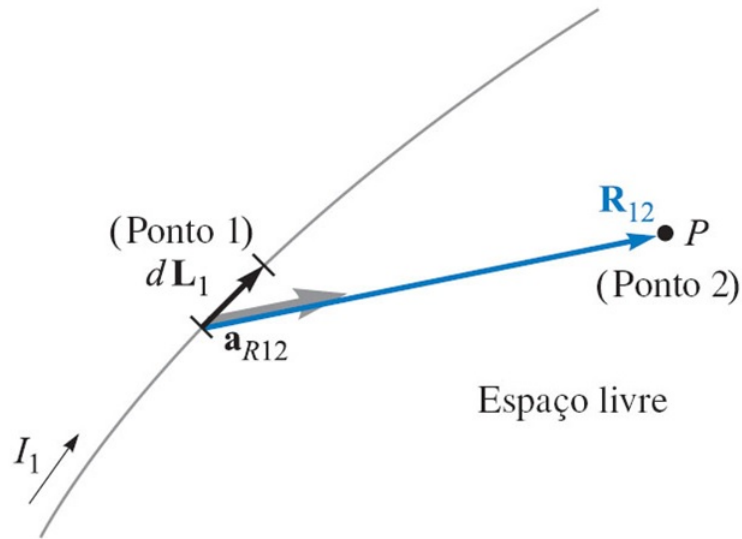
$$dH \propto \frac{Id\ell \sin \alpha}{R^2} \quad (3.1)$$

Para determinar a intensidade de campo magnético  $dH$  em um ponto  $P$  do espaço, pode-se usar a *lei de Biot-Savart*. A Figura 29 representa um ponto  $P$  que possui um determinado campo magnético  $dH$  devido a um elemento de corrente  $Id\ell$ .

Para se determinar a intensidade de campo magnético  $dH$  em um ponto  $P$  do espaço, pode-se usar a lei de Biot-Savart. A Figura 29 representa um ponto  $P$ , que possui um determinado campo magnético  $dH$  devido a um elemento de corrente  $Id\ell$ . Posicionando-se o elemento de corrente no ponto 1 vide Figura 29, pode-se descrever a lei de Biot-Savart, utilizando-se notação vetorial conforme equação (3.2), para se determinar o campo magnético no ponto 02.

$$d\mathbf{H} = \frac{I_1 d\mathbf{L}_1 \times \mathbf{a}_{R12}}{4\pi R_{12}^2} = \frac{I_1 d\mathbf{L}_1 \times \mathbf{R}}{4\pi R^3} \quad (3.2)$$

Figura 29 – Campo magnético devido um elemento de corrente  $I d\ell$ .



Fonte: (JR; BUCK, 2013).

Como não é possível se separar o elemento diferencial de corrente para utilizá-lo experimentalmente, será usada a relação na qual a densidade de carga não é função do tempo, que é a aplicação de corrente contínua. Usando-se a equação da continuidade ou aplicando-se o teorema da divergência, chega-se ao valor zero para a corrente total que circula em um circuito fechado, conforme as equações (3.3 e 3.4). Assim, a forma integral da lei de Biot-Savart, equação (3.5), será utilizada.

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = 0 \quad (3.3)$$

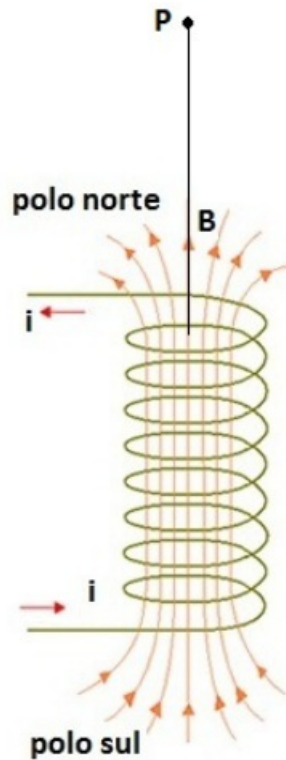
$$\oint_s \mathbf{J} \cdot d\mathbf{S} = 0 \quad (3.4)$$

$$\mathbf{H} = \oint \frac{I d\mathbf{L} \times \mathbf{a}_R}{4\pi R^2} \quad (3.5)$$

A equação (3.5) será a equação base para se determinar o campo magnético gerado pelas bobinas no centro do estator, o qual é concêntrico ao rotor. O interesse deste trabalho é de se determinar o campo magnético no centro da esfera, local este para onde as bobinas estão apontando e cuja resultante do campo será o fator para determinar o momento de dipolo magnético no rotor.

O modelo do estator proposto possui apenas 3 três bobinas, simetricamente espaçadas, conforme será descrito no capítulo 4. Para se calcular o campo magnético no ponto P, gerado por um solenoide de raio  $R_S$  que é percorrido por uma corrente  $i$ , conforme Figura 30, utiliza-se a lei de Biot-Savart.

Figura 30 – Bobina composta de N espiras.



Fonte: o autor.

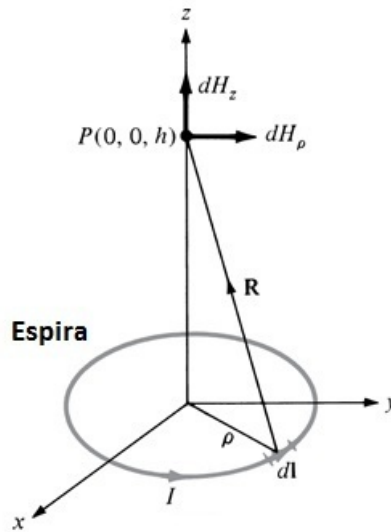
Para este modelo de bobina, será calculado o campo sobre o eixo central, para uma espira, conforme o ponto P, na Figura 31.

Reformulando-se a equação (3.5), obtém-se a equação (3.6) para o campo magnético no ponto P, devido a uma espira localizada a uma distância  $h$ , situada sobre o eixo da mesma, que é normal ao plano Apêndice A.1. Quanto ao sentido do campo  $\mathbf{H}$ , esse é obtido pela regra da mão direita para uma corrente  $\mathbf{i}$  que circula na bobina (SADIKU, 2004).

$$\mathbf{H} = \frac{I\rho^2\mathbf{a}_z}{2[\rho^2 + h^2]^{(3/2)}} \quad (3.6)$$

Onde:  $\rho$  = Raio da espira;  $R$  = Distância entre o elemento diferencial da bobina ( $d\mathbf{l}$ ) e o ponto que se deseja descobrir o campo magnético;  $h$  = distância normal e concêntrica ao plano da espira e o ponto P;

Figura 31 – Espira circular de raio  $R_S$ .



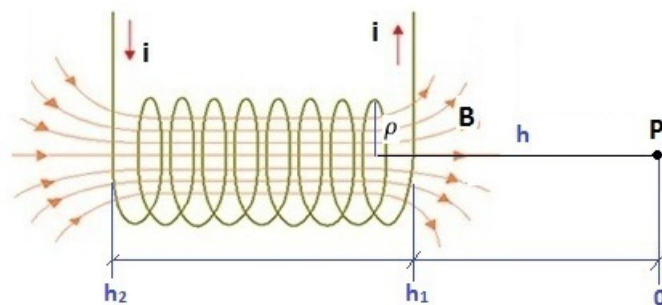
Fonte: (JR; BUCK, 2013)

Devido a  $n$  espiras (e apenas uma camada) tem-se a equação (3.7) ou equação (3.8) para a intensidade de campo magnético conforme Apêndice A.2, as quais mostram o campo magnético resultante no ponto P indicado na Figura 32.

$$\mathbf{H} = \int_{h_1}^{h_2} \frac{I' \rho^2}{2[\rho^2 + h^2]^{(3/2)}} dh \mathbf{a}_i \quad (3.7)$$

$$\mathbf{H} = \frac{f_k I}{2\ell_h} \cdot \left[ \frac{h_2}{(\rho^2 + h_2^2)^{1/2}} - \frac{h_1}{(\rho^2 + h_1^2)^{1/2}} \right] \mathbf{a}_i \quad (3.8)$$

Figura 32 – Bobina compacta composta de N espiras.



Fonte: o autor.

Caso a bobina projetada tenha várias camadas, o campo deve ser calculado considerando-se o raio interno e o externo da bobina, usando-se a equação (3.9) ou a equação (3.10), conforme

o Apêndice A.2.

$$\mathbf{H} = \int_{\rho_1}^{\rho_2} \int_{h_1}^{h_2} \frac{I' \rho^2}{2[\rho^2 + h^2]^{3/2}} dh d\rho \mathbf{a}_i \quad (3.9)$$

$$\mathbf{H} = \frac{f_k I}{2\ell_h \ell_\rho} \cdot \left( \left[ h_2 \cdot \sinh^{-1} \frac{\rho_2}{h_2} \right] - \left[ h_2 \cdot \sinh^{-1} \frac{\rho_1}{h_2} \right] - \left[ h_1 \cdot \sinh^{-1} \frac{\rho_2}{h_1} \right] + \left[ h_1 \cdot \sinh^{-1} \frac{\rho_1}{h_1} \right] \right) \mathbf{a}_i \quad (3.10)$$

### 3.2 Modelagem do Campo Magnético Resultante devido a N bobinas distribuídas no espaço

As k bobinas necessárias para compor o estator de um motor esférico clássico, em um instante de tempo (t), geram um campo magnético resultante passando no centro do estator. Este vetor resultante do campo magnético, em função do rotor ter ímãs permanentes, direciona-o, fazendo o mesmo se orientar para um ponto no hemisfério de atuação.

O campo magnético, devido a uma bobina em um ponto P, é dado pela equação (3.10), sendo  $\mathbf{a}_i$  o vetor unitário que direciona cada bobina. Ou seja, cada bobina tem uma resultante direcionada pelo vetor  $\mathbf{a}_i = \mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \dots, \mathbf{a}_n$ , que possui uma corrente  $I_i$  atrelada a si, isto é,  $I_i = I_1, I_2, \dots, I_n$ . Desse modo, a intensidade do campo magnético resultante é dada por um vetor que é a soma vetorial dos campos que passam pelo centro do estator concêntrico com o rotor esférico equação (3.11).

$$\mathbf{H} = \sum_{i=1}^k \mathbf{H}_i \quad (3.11)$$

Ou seja:

$$\mathbf{H} = \frac{f_k}{2\ell_h \ell_\rho} \cdot \left( h_2 \cdot \sinh^{-1} \frac{\rho_2}{h_2} - h_2 \cdot \sinh^{-1} \frac{\rho_1}{h_2} - h_1 \cdot \sinh^{-1} \frac{\rho_2}{h_1} + h_1 \cdot \sinh^{-1} \frac{\rho_1}{h_1} \right) \cdot \sum_{i=1}^k I_i \mathbf{a}_i \quad (3.12)$$

Considerando os valores de projeto (conhecidos) como uma constante C, equação (3.13), chegamos à equação (3.14):

$$C = \frac{f_k}{2\ell_h \ell_\rho} \cdot \left( h_2 \cdot \sinh^{-1} \frac{\rho_2}{h_2} - h_2 \cdot \sinh^{-1} \frac{\rho_1}{h_2} - h_1 \cdot \sinh^{-1} \frac{\rho_2}{h_1} + h_1 \cdot \sinh^{-1} \frac{\rho_1}{h_1} \right) \quad (3.13)$$



Então, a intensidade do campo magnético  $\mathbf{H}_R$  para k bobinas, conforme a equação (3.14), é:

$$\mathbf{H}_R = C \sum_{i=1}^k I_i \mathbf{a}_i \quad (3.14)$$

Para o sistema esférico tratado, as k bobinas se encontram a uma mesma distância ( $h_1$ ) do centro do rotor esférico, que corresponde ao raio do rotor. Sendo assim, o sistema para localização do rotor será dado por uma função de duas variáveis  $\theta$  e  $\phi$ , em que ( $\theta = \theta_i, \phi = \phi_i$ ).

A combinação linear das resultantes dos campos magnéticos gera uma direção, tendo como ponderação as correntes de cada bobina, que depende de fatores construtivos. De maneira geral, para um sistema de coordenadas cartesianas em função de  $\theta$  e  $\phi$ , o campo magnético resultante é representado pela equação (3.16):

$$\mathbf{H}_R = C \sum_{i=1}^k [(I_i \sin \theta_i \cos \phi_i) \mathbf{a}_x + (I_i \sin \theta_i \sin \phi_i) \mathbf{a}_y + (I_i \cos \theta_i) \mathbf{a}_z] \quad (3.15)$$

$$\mathbf{H}_R = C \cdot \left[ \left( \sum_{i=1}^k I_i \sin \theta_i \cos \phi_i \right) \mathbf{a}_x + \left( \sum_{i=1}^k I_i \sin \theta_i \sin \phi_i \right) \mathbf{a}_y + \left( \sum_{i=1}^k I_i \cos \theta_i \right) \mathbf{a}_z \right] \quad (3.16)$$

E sua transformação inversa dada em coordenadas esféricas,

$$\theta = \arccos \frac{z}{\sqrt{(x^2 + y^2 + z^2)}} \quad (0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ)$$

Ou seja:

$$\theta_H = \arccos \left( \frac{\mathbf{H}_z}{\sqrt{\mathbf{H}_x^2 + \mathbf{H}_y^2 + \mathbf{H}_z^2}} \right) = \arctg \left( \frac{\sqrt{\mathbf{H}_x^2 + \mathbf{H}_y^2}}{\mathbf{H}_z} \right)$$

$$\theta_H = \arctg \left( \frac{\sqrt{(\sum_{i=1}^k I_i \sin \theta_i \cos \phi_i)^2 + (\sum_{i=1}^k I_i \sin \theta_i \sin \phi_i)^2}}{\sum_{i=1}^k I_i \cos \theta_i} \right) \quad (3.17)$$

Considerando também que:

$$\phi = \arctg \frac{y}{x}$$

Ou seja:

$$\phi_H = \arctg \frac{\mathbf{H}_y}{\mathbf{H}_x}$$

$$\phi_H = \arctg \left( \frac{\sum_{i=1}^k I_i \sin \theta_i \sin \phi_i}{\sum_{i=1}^k I_i \sin \theta_i \cos \phi_i} \right) \quad (3.18)$$

O módulo do vetor campo magnético no centro do rotor é dado por equação (3.19).

$$|\mathbf{H}| = \sqrt{H_x^2 + H_y^2 + H_z^2} = \sqrt{|\mathbf{H}_x|^2 + |\mathbf{H}_y|^2 + |\mathbf{H}_z|^2} \quad (3.19)$$

$$|\mathbf{H}| = \sqrt{\left( C \sum_{i=1}^k I_i \sin \theta_i \cos \phi_i \mathbf{a}_x \right)^2 + \left( C \sum_{i=1}^k I_i \sin \theta_i \sin \phi_i \mathbf{a}_y \right)^2 + \left( C \sum_{i=1}^k I_i \cos \theta_i \mathbf{a}_z \right)^2}$$

$$|\mathbf{H}| = C \sqrt{\left( \sum_{i=1}^k I_i \sin \theta_i \cos \phi_i \right)^2 + \left( \sum_{i=1}^k I_i \sin \theta_i \sin \phi_i \right)^2 + \left( \sum_{i=1}^k I_i \cos \theta_i \right)^2}$$

Considere-se agora um vetor campo magnético resultante  $\mathbf{H}_R$ , partindo do centro de uma esfera e apontando para o hemisfério superior da esfera de raio  $r$ . O vetor resultante é gerado por  $k$  vetores campo magnético, situados no hemisfério inferior da esfera. A intensidade  $\mathbf{H}_i$  de cada bobina possui correntes distintas para gerar o vetor campo resultante  $\mathbf{H}_R$ . Uma forma de encontrar essas correntes é fixar uma intensidade de campo resultante e as posições das  $k$  bobinas, resolvendo-se, assim, o sistema linear.

Pela equação (3.16), verifica-se que:

$$\mathbf{H}_R = H_x \mathbf{a}_x + H_y \mathbf{a}_y + H_z \mathbf{a}_z$$

$$\mathbf{H}_R = \begin{pmatrix} \mathbf{a}_x & \mathbf{a}_y & \mathbf{a}_z \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} H_x \\ H_y \\ H_z \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{H}_R = \begin{pmatrix} \mathbf{a}_x & \mathbf{a}_y & \mathbf{a}_z \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} CI_1 \text{sen}\theta_1 \cos\phi_1 & CI_2 \text{sen}\theta_2 \cos\phi_2 & \dots & CI_n \text{sen}\theta_n \cos\theta_n \\ CI_1 \text{sen}\theta_1 \text{sen}\phi_1 & CI_2 \text{sen}\theta_2 \text{sen}\phi_2 & \dots & CI_n \text{sen}\theta_n \text{sen}\phi_n \\ CI_1 \cos\theta_1 & CI_2 \cos\theta_2 & \dots & CI_n \cos\theta_n \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{H}_R = C \begin{pmatrix} \mathbf{a}_x & \mathbf{a}_y & \mathbf{a}_z \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \text{sen}\theta_1 \cos\phi_1 & \text{sen}\theta_2 \cos\phi_2 & \dots & \text{sen}\theta_n \cos\theta_n \\ \text{sen}\theta_1 \text{sen}\phi_1 & \text{sen}\theta_2 \text{sen}\phi_2 & \dots & \text{sen}\theta_n \text{sen}\phi_n \\ \cos\theta_1 & \cos\theta_2 & \dots & \cos\theta_n \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \end{pmatrix}$$

$$C' \begin{pmatrix} \mathbf{H}_{Rx} \\ \mathbf{H}_{Ry} \\ \mathbf{H}_{Rz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{sen}\theta_1 \cos\phi_1 & \text{sen}\theta_2 \cos\phi_2 & \dots & \text{sen}\theta_n \cos\theta_n \\ \text{sen}\theta_1 \text{sen}\phi_1 & \text{sen}\theta_2 \text{sen}\phi_2 & \dots & \text{sen}\theta_n \text{sen}\phi_n \\ \cos\theta_1 & \cos\theta_2 & \dots & \cos\theta_n \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \end{pmatrix}$$

Assim:

$$\begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \end{pmatrix} = C' \begin{pmatrix} \mathbf{H}_{Rx} \\ \mathbf{H}_{Ry} \\ \mathbf{H}_{Rz} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \text{sen}\theta_1 \cos\phi_1 & \text{sen}\theta_2 \cos\phi_2 & \dots & \text{sen}\theta_n \cos\theta_n \\ \text{sen}\theta_1 \text{sen}\phi_1 & \text{sen}\theta_2 \text{sen}\phi_2 & \dots & \text{sen}\theta_n \text{sen}\phi_n \\ \cos\theta_1 & \cos\theta_2 & \dots & \cos\theta_n \end{pmatrix}^{-1} \quad (3.20)$$

Sendo:

$$D_n = \begin{pmatrix} \text{sen}\theta_1 \cos\phi_1 & \text{sen}\theta_2 \cos\phi_2 & \dots & \text{sen}\theta_n \cos\theta_n \\ \text{sen}\theta_1 \text{sen}\phi_1 & \text{sen}\theta_2 \text{sen}\phi_2 & \dots & \text{sen}\theta_n \text{sen}\phi_n \\ \cos\theta_1 & \cos\theta_2 & \dots & \cos\theta_n \end{pmatrix}$$

Esta matriz  $D_n$  é a matriz de posição de cada bobina.

Se  $D_n$  possuir inversa então  $\Rightarrow (\det D_n^{-1}) \neq 0$ , mostrando que é possível encontrar as correntes que depende unicamente das posições das bobinas, e conseqüentemente, encontrar as

correntes desejadas equação (3.21).

$$\begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_k \end{pmatrix} = C' \begin{pmatrix} \mathbf{H}_x \\ \mathbf{H}_y \\ \mathbf{H}_z \end{pmatrix} \cdot D_k^{-1}. \quad (3.21)$$

### 3.3 Conclusão

Observou-se, neste capítulo, que a posição do rotor está vinculada à quantidade de bobinas e às suas posições, além da corrente nela aplicada, sendo possível se demonstrar a relação da corrente com o campo resultante, uma vez que as bobinas estão fixas no estator do motor.

## 4 PROTÓTIPO DO ATUADOR ESFÉRICO - *DESIGN*

Neste capítulo é apresentado um novo modelo do motor/atuador esférico, diferente de todos os apresentados na revisão bibliográfica. É uma proposta nova, desenvolvida nesta tese de doutorado, que usa um número mínimo de três bobinas, facilitando o processo de controle e construção, o que possibilita futuras reproduções. O motor proposto foi fabricado e utilizado para análise de resultados experimentais e comprovações práticas que serão tratadas no Capítulo 5.

### 4.1 Atuador Esférico Proposto

O motor esférico proposto é um modelo inovador e pôde ser fabricado em tamanho compacto, podendo ser utilizado em sistemas robóticos, tais como olho móvel, sistema de pulso, e de ombro, assim como sistemas de monitoramento (câmeras). Este motor, além de ser um novo modelo, possibilita reprodução, diferentemente dos modelos existentes. Suas partes fixas (estator, carretel) podem ser desenhadas e impressas utilizando-se uma impressora 3D. O trabalho apresenta todo o dimensionamento do projeto, qual seja, da bobina, do estator, do rotor e do sistema para fechar a malha de controle, além de possibilitar um controle de posicionamento mais adequado.

Este modelo proposto consiste de um estator com apenas três bobinas, no qual as correntes em cada bobina são controladas independentemente. Possui um rotor esférico de ímã permanente com dois polos, podendo posicionar-se em qualquer ponto sobre o hemisfério de atuação. A ideia fundamental do modelo é que o eixo do rotor se alinhe com a resultante do campo magnético gerado pelas três bobinas. Quando as bobinas forem alimentadas com correntes distintas, surgirá um torque no rotor de forma que o sistema de energia potencial seja minimizado. Como isso, pode-se controlar a posição da haste do estator, posicionando-o em um ponto distinto do hemisfério.

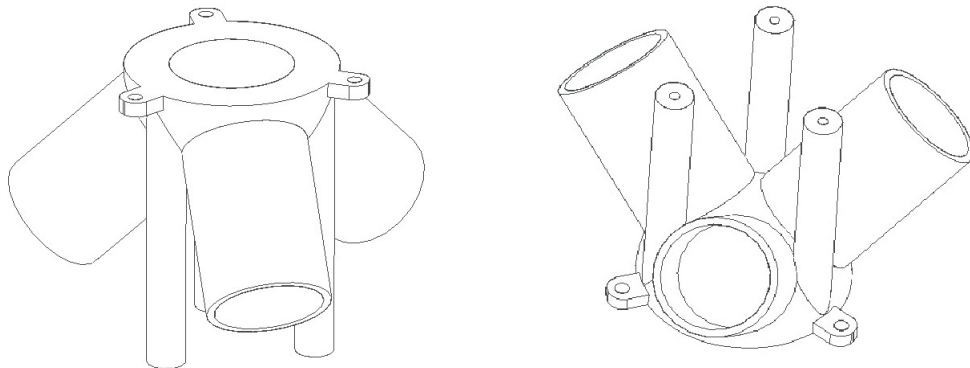
É considerado aqui um sistema com estruturas sem partes metálicas e, para sua construção, o uso de uma impressora 3D foi fundamental, devido à precisão de simetria do estator. As dimensões do protótipo foram adequadas à possibilidade de fabricação no Laboratório de Sistemas Motrizes (LAMOTRIZ), do Departamento de Engenharia Elétrica (DEE) da Universidade Federal do Ceará (UFC). As bobinas foram dimensionadas para maximizar o campo gerado a partir do intervalo de corrente possível para o fio utilizado (vide Apêndice A.6),

permitindo-se o máximo de torque no rotor.

#### 4.1.1 Design do Estator

O estator desenvolvido é constituído de três bobinas dispostas de forma simétrica ao longo do hemisfério inferior, conforme Figura 33 e detalhes no Anexo (A.4). As três bobinas estão dispostas em um hemisfério formando ângulos de  $75,522^\circ$  entre si. Este estator foi desenhado para que fosse compacto, gerando o maior campo magnético no centro do rotor e com o mínimo de três bobinas. Tendo como base um sistema de coordenada cartesiano, as posições das bobinas estão em são: Bobina 01 em  $(\theta = 135^\circ e \phi = 180^\circ)$ ; Bobina 02 em  $(\theta = 135^\circ e \phi = 60^\circ)$ ; Bobina 03 em  $(\theta = 135^\circ e \phi = -60^\circ)$ ; Vista A vista superior do sistema de posição e a vista lateral de uma bobina encontram-se na Figura 34 e no (Apêndice A.4) em relação ao sistema cartesiano.

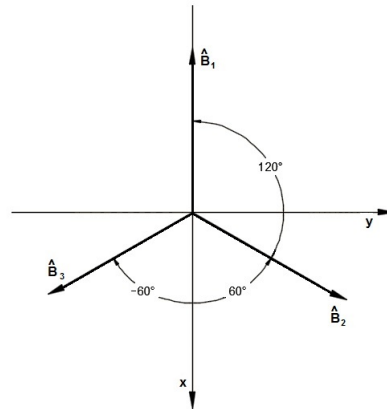
Figura 33 – Estator do motor esférico.



Fonte: o autor.

Observando-se as bobinas por cima, percebe-se que estão dispostas de forma simétrica e estão defasadas de  $120^\circ$  uma das outras Figura 34. Observa-se, também, que se encontram a  $90^\circ$  em relação a um eixo perpendicular do sistema cartesiano.

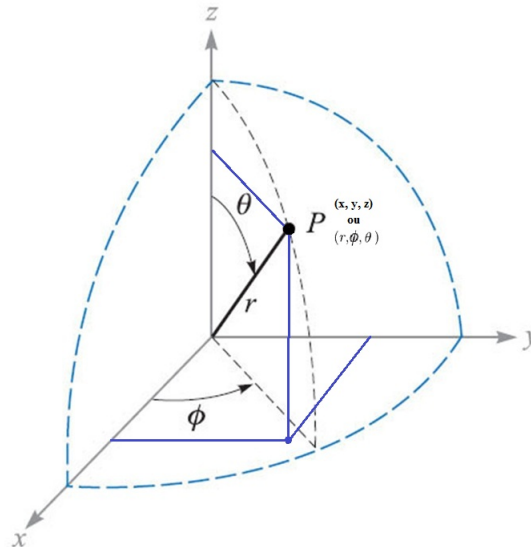
Figura 34 – Vista superior do motor esférico.



Fonte: o autor.

Considerando-se um braço móvel do rotor, de comprimento ( $r$ ), ele pode apontar para qualquer local da superfície esférica, podendo sua localização ser representada em coordenadas cartesianas ( $x, y, z$ ) ou esféricas ( $r, \theta, \phi$ ), conforme mostrado na Figura 35.

Figura 35 – Sistemas de coordenadas cartesianas e esféricas.



Fonte: o autor.

As equações (4.1 a 4.6 representam a forma clássica para mudança do sistema de coordenadas retangulares para esféricas e vice-versa (JR; BUCK, 2013).

$$x = r \sin \theta \cos \phi \quad (4.1)$$

$$y = r \sin \theta \sin \phi \quad (4.2)$$

$$z = r \cos \theta \quad (4.3)$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (r \geq 0^\circ) \quad (4.4)$$

$$\theta = \arccos \left( \frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} \right) \quad (0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ) \quad (4.5)$$

$$\phi = \arctan \frac{y}{x} \quad (4.6)$$

Abaixo, seguem as equações (4.8, 4.9 e 4.10), que representam a posição do vetor unitário de cada bobina, para as quais  $\theta = 135^\circ = 90^\circ + 45^\circ$ ,  $\sin 135^\circ = \cos 45^\circ$  e  $\cos 135^\circ = -\sin 45^\circ$

Assim, partindo-se da equação (4.7), obtêm-se os vetores unitários  $\hat{B}_1$ ,  $\hat{B}_2$ ,  $\hat{B}_3$  respectivamente através das equações (4.8, 4.9 e 4.10).

$$\hat{B} = r \sin \theta \cos \phi + r \sin \theta \sin \phi + r \cos \theta \quad (4.7)$$

$\hat{B}_1$  é obtido usando-se 4.8:

$$\hat{B}_1 = r \sin \theta \cos \phi \hat{x} + r \sin \theta \sin \phi \hat{y} + r \cos \theta \hat{z}$$

$$\hat{B}_1 = 1 \cdot \sin 135 \cdot \cos 180 \hat{x} + 1 \cdot \sin 135 \cdot \sin 180 \hat{y} + 1 \cdot \cos 135 \hat{z}$$

$$\hat{B}_1 = 1 \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot (-1) \hat{x} + 1 \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot (0) \hat{y} + 1 \cdot \left(-\frac{\sqrt{2}}{2}\right) \hat{z}$$

$$\hat{B}_1 = -\frac{\sqrt{2}}{2} \hat{x} - \frac{\sqrt{2}}{2} \hat{z} \quad (4.8)$$

$\hat{B}_2$  é obtido usando-se 4.9:



$$\hat{B}_2 = r \sin \theta \cos \phi \hat{x} + r \sin \theta \sin \phi \hat{y} + r \cos \theta \hat{z}$$

$$\hat{B}_2 = 1 \cdot \sin 135 \cdot \cos 60 \hat{x} + 1 \cdot \sin 135 \cdot \sin 60 \hat{y} + 1 \cdot \cos 135 \hat{z}$$

$$\hat{B}_2 = 1 \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \left(\frac{1}{2}\right) \hat{x} + 1 \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \hat{y} + 1 \cdot \left(-\frac{\sqrt{2}}{2}\right) \hat{z}$$

$$\hat{B}_2 = \frac{\sqrt{2}}{4} \hat{x} + \frac{\sqrt{6}}{4} \hat{y} - \frac{\sqrt{2}}{2} \hat{z} \quad (4.9)$$

$\hat{B}_3$  é obtido usando-se 4.10:

$$\hat{B}_3 = r \sin \theta \cos \phi \hat{x} + r \sin \theta \sin \phi \hat{y} + r \cos \theta \hat{z}$$

$$\hat{B}_3 = 1 \cdot \sin 135 \cdot \cos(-60) \hat{x} + 1 \cdot \sin 135 \cdot \sin(-60) \hat{y} + 1 \cdot \cos 135 \hat{z}$$

$$\hat{B}_3 = 1 \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \left(\frac{1}{2}\right) \hat{x} + 1 \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \left(-\frac{\sqrt{3}}{2}\right) \hat{y} + 1 \cdot \left(-\frac{\sqrt{2}}{2}\right) \hat{z}$$

$$\hat{B}_3 = \frac{\sqrt{2}}{4} \hat{x} - \frac{\sqrt{6}}{4} \hat{y} - \frac{\sqrt{2}}{2} \hat{z} \quad (4.10)$$

O ângulo formado entre as bobinas é dado pela equação (4.11), que mostra que os eixos axiais das bobinas não formam ângulos retos entre si.

$$\cos \alpha_{12} = \hat{B}_1 \cdot \hat{B}_2$$

$$\alpha_{12} = \arccos \left[ \left(-\frac{\sqrt{2}}{2}\right) \cdot \left(\frac{\sqrt{2}}{4}\right) + (0) \cdot \left(-\frac{\sqrt{6}}{4}\right) + \left(-\frac{\sqrt{2}}{2}\right) \cdot \left(-\frac{\sqrt{2}}{2}\right) \right]$$

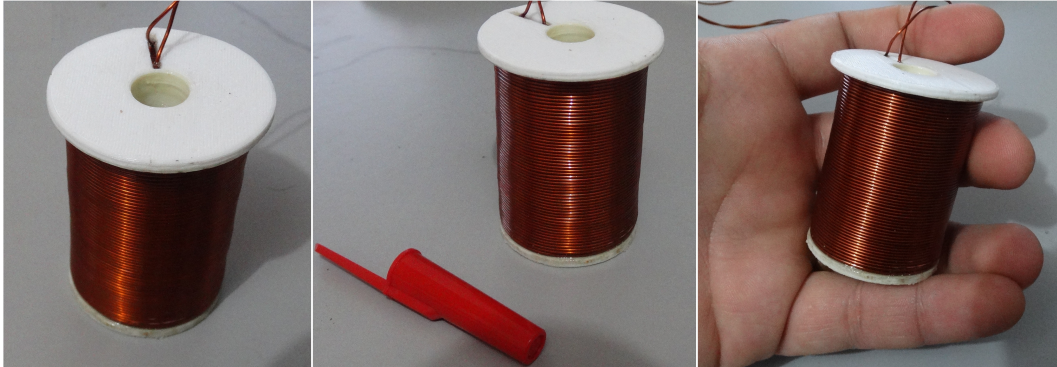
$$\alpha_{12} = \arccos \left( -\frac{2}{8} + \frac{2}{4} \right) \Rightarrow \arccos \left( \frac{1}{4} \right)$$

$$\alpha_{12} = \arccos \left( \frac{1}{4} \right) \Rightarrow \alpha_{12} = 75,522^\circ \quad (4.11)$$

#### 4.1.2 Projeto das Bobinas

A bobina projetada foi dimensionada para o estator do motor esférico de forma a otimizar o campo magnético gerado Figura 36.

Figura 36 – Bobina sem o núcleo de ferrite.



Fonte: o autor.

Como a bobina é composta de várias espiras, ela segue a lei de Faraday e a tensão em seus terminais é dada pela equação (4.12), em que  $N$  é o número dessas espiras.

$$v = -N \cdot \frac{d\phi}{dt} = -\frac{dN\phi}{dt} \quad (4.12)$$

A indutância da bobina depende diretamente da corrente que passa por ela, do número de espiras, do fluxo magnético e do núcleo que é colocado no interior da bobina e é obtida pela equação (4.13), (JR; BUCK, 2013).

$$L \cdot i = N\dot{\phi} \quad (4.13)$$

Substituindo-se o resultado da equação (4.13) na equação (4.12):

$$v = -L \cdot \frac{di(t)}{dt} = L \frac{di(t)}{dt} \quad (4.14)$$

O sinal negativo da equação (4.14) pode ser desconsiderado, pois depende do sentido de enrolamento da bobina. Se for usada corrente contínua, a bobina se comporta como um curto circuito ( $v=0$ ). Além disso, a corrente na bobina não pode variar abruptamente, pois, se isso fosse possível, não haveria derivada neste ponto.

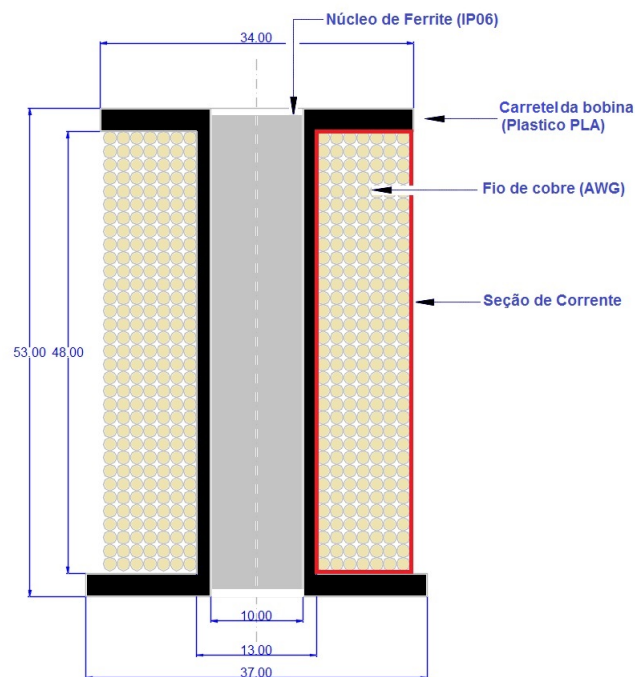
Considerando o comprimento da bobina ( $\ell$ ) muito maior que seu diâmetro ( $d$ ), ou seja ( $\ell \gg d$ ), a indutância da bobina é dada pela equação (4.15).

$$L = \frac{\mu_0 \cdot N^2 \cdot A}{\ell - 0,45d} \quad (4.15)$$

Como já dito anteriormente, o atuador esférico possui três bobinas situadas de forma simétrica em um hemisfério do estator, que geram campos magnéticos suficientes para mover o rotor para uma posição específica. As bobinas são compostas de várias espiras de fio de cobre, espaçadas uniformemente. O campo magnético gerado é semelhante ao de um ímã, compondo os polos (norte-sul ou sul-norte), que depende do sentido da corrente. As bobinas foram projetadas para se adequarem às Dimensões Limitantes Específicas de Projeto (DLEP) e para que possam gerar o máximo de campo magnético.

Como exemplo do DLEP, pode-se citar o diâmetro interno da bobina (13 mm), que é limitado pelo núcleo de ferrite (Ferrite-NBC-10/50-IP6), diâmetro do fio e possibilidades de tamanhos de impressão 3D, conforme Figura 37 e detalhes no Anexo (A.5). Outro DLEP é o diâmetro externo da bobina, pois a superfície que as bobinas podem ocupar corresponde a um hemisfério do estator.

Figura 37 – Detalhe da bobina com núcleo de ferrite.

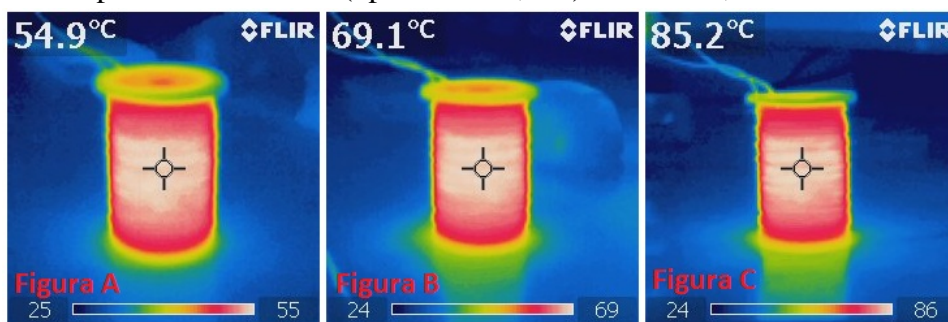


Fonte: o autor.

Diante do exposto, a melhor escolha do fio é o AWG 21, por proporcionar uma maior densidade de corrente ( $(N \cdot I)/A$  ( $I$  = corrente máxima,  $N$  = número de espiras e  $A$  = seção de corrente) e porque necessita dissipar uma menor potência, fazendo com que o sistema não se aqueça demasiadamente, conforme mostra a tabela do Anexo (A.6). O material da estrutura do motor (rotor-estator) é o termo-plástico Ácido Polilático (PLA), usado pelas impressoras 3D, o qual possui temperatura de transição vítrea de  $70^{\circ}\text{C}$ .

Ensaio para determinar a temperatura máxima na bobina foram realizados, mostrando que ela atinge as temperaturas indicadas na Figura 38 e que se estabiliza aos  $85^{\circ}\text{C}$ , uma hora após ser mantida com corrente de 1,2 A. Como a bobina não irá operar com a corrente máxima continuamente, essa temperatura se mostra adequada, ficando seu valor máximo de operação em  $50^{\circ}\text{C}$ .

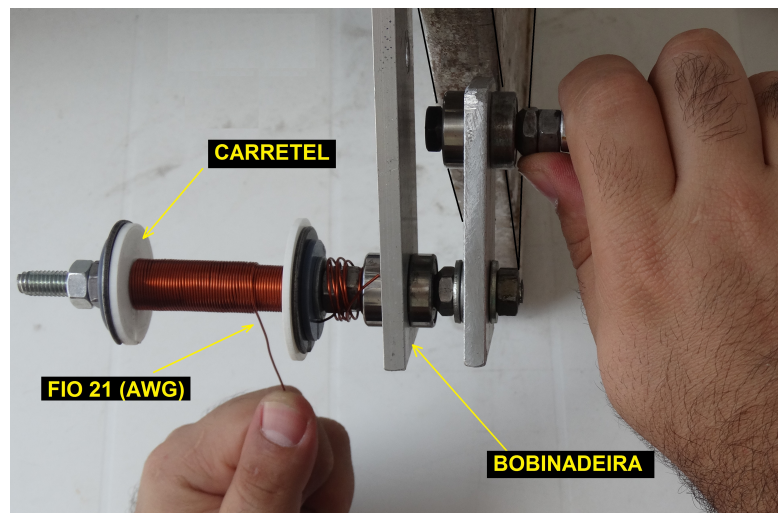
Figura 38 – Temperatura da bobina (operando a 1,2 A) aos 25min, 45min e 60min.



Fonte: o autor.

As bobinas foram confeccionadas manualmente Figura 39, de acordo com as especificações do fio de cobre e DLEP do projeto.

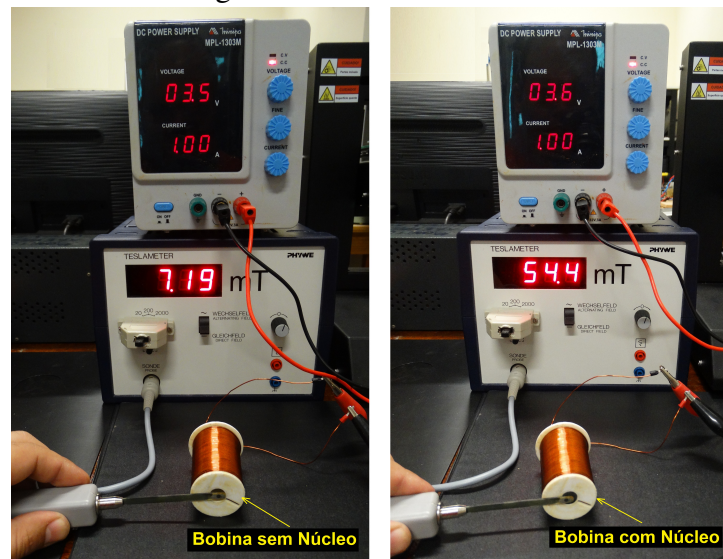
Figura 39 – Bobinadeira manual.



Fonte: o autor.

Outro ensaio realizado foi para determinar o campo magnético gerado na face das bobinas. Esse campo magnético medido difere do teórico devido ao espraçamento e ao fator de compactação das espiras. Ao se aplicar uma corrente de 1A na bobina (sem núcleo e com núcleo) foi possível se medir o valor da densidade de fluxo magnético de 7,19 mT e 54,4 mT, respectivamente, conforme a Figura 40.

Figura 40 – Densidade de fluxo magnético na face da bobina sem núcleo e com núcleo.

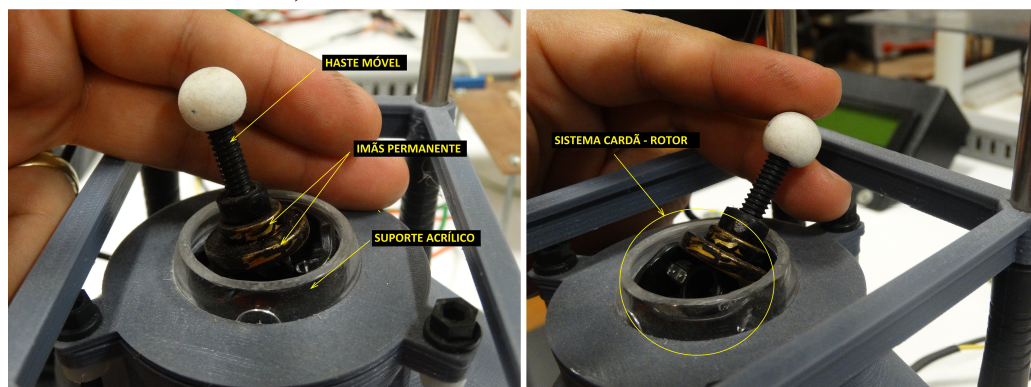


Fonte: o autor.

#### 4.1.3 Projeto do Rotor

O rotor considerado é formado por um ímã permanente do tipo (neodímio), o qual está preso a um sistema giroscópico, podendo se posicionar (apontar) para qualquer parte do hemisfério superior, conforme a Figura 41.

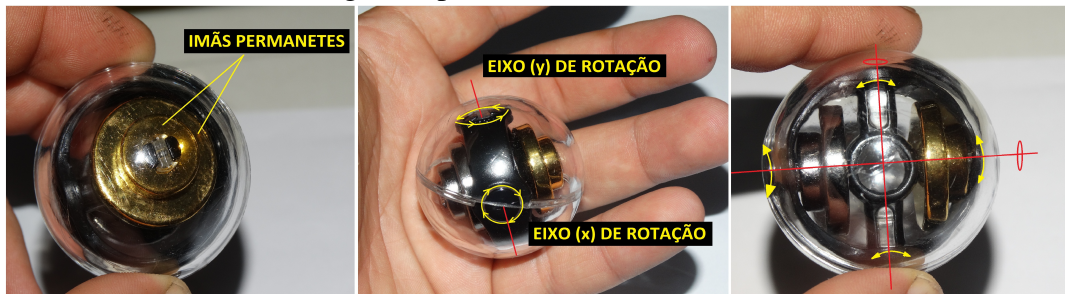
Figura 41 – Rotor com haste, fixo ao estator.



Fonte: o autor.

A estrutura móvel do rotor é apresentada na Figura 42, e consta de 4 ímãs do tipo neodímio-ferro-boro ( $Nd_2Fe_{14}B$  com grade  $N52$ ), o suporte do giroscópio possibilita movimentos em torno do centro da esfera. O rotor possui baixo atrito, com diâmetro da esfera de 32 mm, que pode ser comparado às dimensões do globo ocular humano. Esta estrutura do rotor pode ser adaptada às diversas aplicações. Como exemplo, pode-se retirar o suporte esférico superior e colocar uma haste em seu lugar, possibilitando um braço móvel que se oriente para qualquer ponto do hemisfério de atuação. Pode-se verificar detalhes de montagem do *nanodots gyro* no Anexo ( A.3), (NANODOTS..., 2014).

Figura 42 – Rotor com sistema giroscópico.



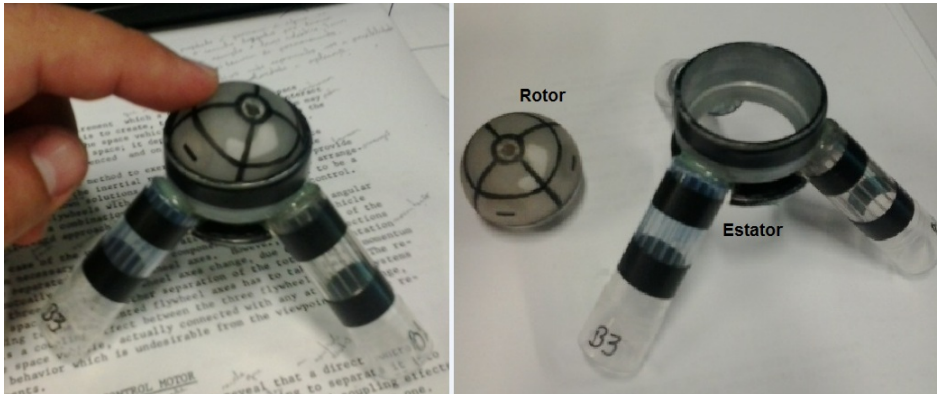
Fonte: o autor.

#### 4.1.4 Modelo Final do Motor Esférico

Uma das dificuldades do motor esférico é o correto monitoramento da posição do eixo do motor sobre o hemisfério de atuação. Existem várias técnicas de monitoramento, como por exemplo, com o uso de sensor *hall*, *encoder*, óptico e por reconhecimento de padrões. Para esta tese foi escolhido monitoramento por sistema de câmera para localizar a posição do atuador, escolha esta que será justificada no próximo capítulo. Com a localização dos pontos, pôde-se gerar um conjunto de dados para treinar um algoritmo que controle a corrente dependendo da posição ou trajetória desejada. No caso em estudo, o algoritmo é baseado em redes neurais artificiais.

O primeiro modelo testado está representado na Figura 43, o qual utiliza apenas materiais simples e a teoria básica do princípio de variação do campo magnético, buscando movimentar o rotor esférico.

Figura 43 – Primeiro modelo do motor esférico testado.



Fonte: o autor.

Após testes dimensionais que possibilitassem a viabilidade de fabricação, chegou-se a um protótipo final que possui os detalhes de simetria do estator, bobina, rotor e sensor de posição, conforme representado na Figura 44. O estator do motor foi desenhado com o *software* Solid Edge e exportado para o formato \*.stl. Foi, então, fabricado utilizando-se uma impressora 3D (Cliever CL-1).

Figura 44 – Motor esférico proposto.



Fonte: o autor.

#### **4.1.5 Conclusão**

O estudo descrito neste capítulo buscou descrever detalhes para reprodução do estator e rotor da máquina, sempre visando um dimensionamento de simetria e possibilitando a fabricação do motor esférico. Existem diversas possibilidades para dimensionais de projeto que podem ser modificadas, entretanto, estas deixariam o projeto com uma maior dificuldade de repetibilidade, impossibilitando sua fabricação.



## **5 SISTEMA PARA COLETA DE DADOS E TREINAMENTO DE APRENDIZAGEM PROPOSTOS**

O estudo dos atuadores esféricos é baseado na teoria clássica do eletromagnetismo. Existe uma dificuldade em analisar a dinâmica dos campos, durante o movimento, deste tipo de motor, por ele possuir múltiplos graus de liberdade e um núcleo magnético que muda de posição durante seu funcionamento, compondo um sistema não linear. Essa dificuldade também está relacionada a uma série de incertezas que envolvem o sistema de localização, controle de posicionamento e processo de fabricação. Com isso, o potencial de utilização de um atuador esférico permanece ainda não comercial. Além disso, a maioria dos modelos propostos envolve montagens difíceis de serem reproduzidas para possibilitar estudo e ensaio por outros pesquisadores. O principal objetivo deste capítulo é explorar e avaliar as possibilidades de controle de posicionamento do motor esférico proposto. Um sistema de posicionamento em malha aberta é apresentado posicionando-se o eixo do rotor no hemisfério de atuação em posições pré-estabelecidas. Para isso, são apresentadas algumas possibilidades para o sistema de localização do motor esférico e, no final, é proposto aquele que se considerou o melhor sistema de controle de posicionamento.

### **5.1 Sistema de Localização do Atuador**

É necessário compreender o comportamento matemático considerado para localizar o posicionamento da haste do atuador que depende das correntes aplicadas nas bobinas. Para tanto, é necessário se saber como estão localizados e orientados os campos magnéticos gerados pelas bobinas que compõem o estator, o que permite o cálculo da intensidade do vetor campo magnético resultante.

Como visto no item 4.1.1, o estator do projeto possui bobinas que possibilitam criar campos magnéticos direcionados. Cada bobina do atuador está estrategicamente posicionada como tratado no referido item. Sendo fixos o número e a posição das bobinas, torna-se simples mostrar qual é a intensidade de corrente necessária, em cada bobina, para direcionar o vetor campo magnético a uma determinada posição do hemisfério de atuação. Uma corrente de excitação mínima é exigida nas bobinas para que o rotor possa vencer o atrito e a resistência mecânica do próprio sistema. Quanto maiores forem as correntes aplicadas nas bobinas (de pesos proporcionais), maior será o torque resultante na haste do rotor.

### 5.1.1 Localização pela resultante do vetor campo magnético

Para o cálculo da localização do rotor é considerado que o campo magnético resultante das bobinas não sofre interferência do meio no qual elas estão inseridas (estator e rotor). Para o caso particular proposto, de um motor esférico composto de três bobinas, é possível o rotor (ou “calcular a localização”) utilizando-se a equação (5.1), para as correntes  $(i_1, i_2, i_3)$ . O caso escolhido é o do menor número de bobinas possíveis para direcionar o campo magnético para um ponto qualquer no hemisfério. Com apenas uma bobina, é possível gerar campos na direção linear passando pela origem. Com duas bobinas não colineares, é possível gerar campos resultantes apenas no plano. Enquanto que com três bobinas não colineares, é possível se orientar o campo em qualquer ponto da superfície esférica, apenas excitando individualmente cada bobina com a intensidade de corrente adequada.

Da equação (5.1), pode-se fornecer o caso particular quando o sistema é formado por três bobinas, conforme equação (5.4).

$$\begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{pmatrix} = C' \cdot \begin{pmatrix} \sin \theta_1 \cos \phi_1 & \sin \theta_2 \cos \phi_2 & \sin \theta_3 \cos \theta_3 \\ \sin \theta_1 \sin \phi_1 & \sin \theta_2 \sin \phi_2 & \sin \theta_3 \sin \phi_3 \\ \cos \theta_1 & \cos \theta_2 & \cos \theta_3 \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} \mathbf{H}_x \\ \mathbf{H}_y \\ \mathbf{H}_z \end{pmatrix} \quad (5.1)$$

Ressalte-se que, para a matriz de transformação  $D_3$  existir, o determinante deve ser diferente de zero para que seja inversível. E, por se tratar de uma matriz quadrada e apontar para a superfície esférica, ela deve existir.

$$\begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{pmatrix} = C' \cdot |\mathbf{H}_R| \cdot D_3^{-1} \cdot \begin{pmatrix} \mathbf{h}_{a_x} \\ \mathbf{h}_{a_y} \\ \mathbf{h}_{a_z} \end{pmatrix}$$

onde:  $\mathbf{h}_{a_i}$  é o vetor unitário resultante em cada direção cartesiana.

Sendo  $|\mathbf{H}_R|$  um número real não negativo conforme equação (3.19). Então, quaisquer combinações de correntes (de intensidades proporcionais, que satisfaça a equação (5.1) é solução para o sistema. Então, fazendo faz-se  $\gamma = C' \mathbf{H}_R$ , onde  $\gamma$  é um número real que representa a intensidade do vetor campo magnético, não influenciando que não influencia na posição em que o vetor resultante aponta, desde que vença o atrito próprio do sistema.

Pode-se reescrever a equação (5.1) da seguinte forma:

$$\begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{pmatrix} = \gamma \cdot D_3^{-1} \cdot \begin{pmatrix} \mathbf{ha}_x \\ \mathbf{ha}_y \\ \mathbf{ha}_z \end{pmatrix} \quad (5.2)$$

De modo geral, pode-se fazer  $\gamma = 1$ . Caso seja necessário mais torque, basta incrementar as correntes, de forma linear, em cada bobina, até o limite de  $\pm 1.2$  Ampère, por limitação de projeto das bobinas.

Sendo as posições das bobinas conhecidas em relação ao centro do sistema:

Bobina 01: ( $\theta = 135^\circ$  e  $\phi = 180^\circ$ );

Bobina 02: ( $\theta = 135^\circ$  e  $\phi = 60^\circ$ );

Bobina 03: ( $\theta = 135^\circ$  e  $\phi = -60^\circ$ );

Então a matriz  $D_3$ , de posição das bobinas, é uma matriz conhecida:

$$D_3 = \begin{pmatrix} \sin 135 \cos 180 & \sin 135 \cos 60 & \sin 135 \cos(-60) \\ \sin 135 \sin 180 & \sin 135 \sin 60 & \sin 135 \sin(-60) \\ \cos 135 & \cos 135 & \cos 135 \end{pmatrix} \quad (5.3)$$

$$D_3 = \begin{pmatrix} -\frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{4} & \frac{\sqrt{2}}{4} \\ 0 & -\frac{\sqrt{6}}{4} & \frac{\sqrt{2}}{4} \\ -\frac{\sqrt{2}}{2} & -\frac{\sqrt{2}}{2} & -\frac{\sqrt{2}}{2} \end{pmatrix} \Rightarrow D = \begin{pmatrix} -0.71 & 0.35 & 0.35 \\ 0.00 & 0.61 & -0.61 \\ -0.71 & -0.71 & -0.71 \end{pmatrix}$$

Assim,

$$D_3^{-1} = \begin{pmatrix} -0.94 & 0.00 & -0.47 \\ 0.47 & 0.82 & -0.47 \\ 0.47 & -0.82 & -0.47 \end{pmatrix}$$

E sendo  $\mathbf{ha}_x$ ,  $\mathbf{ha}_y$  e  $\mathbf{ha}_z$  o vetor unitário do campo resultante e dado por:

$$\mathbf{ha}_x = \sin \theta_d \cdot \cos \phi_d$$

$$\mathbf{ha}_y = \sin \theta_d \cdot \sin \phi_d$$

$$\mathbf{ha}_z = \cos \theta_d$$

Os parâmetros  $\theta_d$  e  $\phi_d$  são os ângulos fornecido pelo usuário, uma vez definido a posição então encontra-se as correntes  $I_1$ ,  $I_2$  e  $I_3$  necessária para direcioná-la, pelas equações (5.5, 5.6 e 5.7).

Os parâmetros  $\theta_d$  e  $\phi_d$  são os ângulos desejados do rotor do atuador esférico, fornecidos pelo usuário. Uma vez definida a posição, encontram-se as correntes  $I_1$ ,  $I_2$  e  $I_3$  necessárias para direcionar o rotor, através das equações (5.5, 5.6 e 5.7).

$$\begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.94 & 0.00 & -0.47 \\ 0.47 & 0.82 & -0.47 \\ 0.47 & -0.82 & -0.47 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \sin \theta_d \cos \phi_d \\ \sin \theta_d \sin \phi_d \\ \cos \theta_d \end{pmatrix} \quad (5.4)$$

Em que:

$$I_1 = -0.94(\sin \theta_d \cos \phi_d) - 0.47 \cos \theta_d \quad (5.5)$$

$$I_2 = 0.47(\sin \theta_d \cos \phi_d) + \sin \theta_d \sin \phi_d - 0.47 \cos \theta_d \quad (5.6)$$

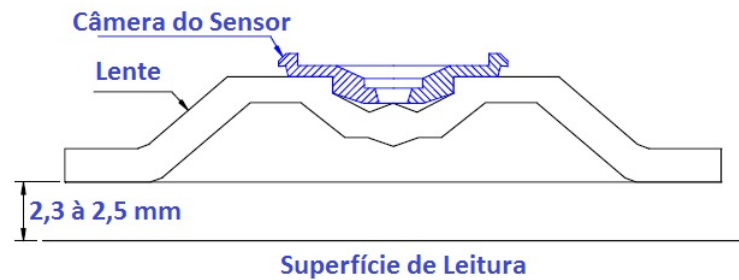
$$I_3 = 0.47(\sin \theta_d \cos \phi_d) - \sin \theta_d \sin \phi_d - 0.47 \cos \theta_d \quad (5.7)$$

### 5.1.2 *Localização por Sensor Óptico*

Um desafio no controle de posicionamento do atuador esférico é conhecer a localização do rotor durante sua operação. São diversos os métodos de localização de posicionamento propostos. Uma das opções é utilizar a odometria (informação incremental do movimento ao longo do tempo). Este tipo de sensor usa o fluxo óptico para incrementar ou decrementar a leitura de posição ao longo de seu deslocamento. O uso deste sensor óptico para determinar a posição do rotor do atuador esférico é uma opção interessante a ser avaliada. Este tipo de sensor é o mesmo usado em mouse de computador o qual compara em tempos determinados a imagem de uma superfície e determina se houve deslocamento no plano x,y (PRINTART, 2005).

Na utilização desse tipo de sensor, detalhes de calibração devem ser considerados, tais como distância da superfície de leitura. Problema como desfoque provoca erros de leitura e influencia na localização do posicionamento do rotor. A distância da lente ao plano de leitura deve estar entre 2,3 e 2,5 mm, conforme a Figura 45.

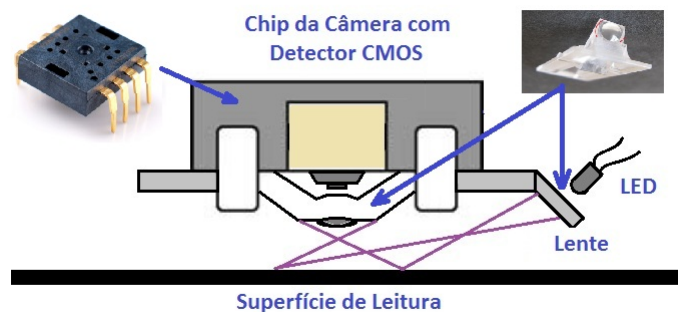
Figura 45 – Distância da lente ao plano de leitura.



Fonte: (PRINTART, 2005).

Pelo fato do rotor possuir folgas ocasionando variações de altura fora do intervalo de leitura do sensor óptico, não se obteve o êxito desejado na aplicação da odometria. Além desta limitação, o sensor utilizado não funciona em superfícies transparentes e reflexivas, ou seja, a superfície de leitura deve ser opaca. com estas considerações de Levando-se em consideração estes fatores na montagem, ele apresenta baixo erro. O funcionamento do sensor está representado na Figura 46, que mostra um LED iluminando o plano e fazendo refletir a estrutura microscópica da superfície. O sensor captura a imagem e compara-a com a próxima. Essas imagens são processadas a uma razão de 1500 a 2500 quadros por segundos.

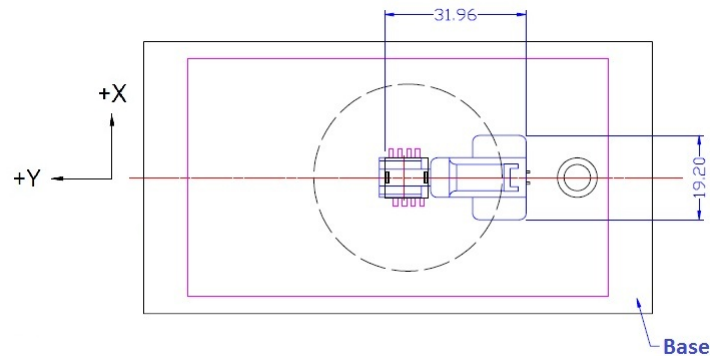
Figura 46 – Reflexão da superfície de leitura.



Fonte: o autor.

O sensor determina o deslocamento no plano x,y Figura 47, entretanto, não é capaz de detectar rotações em torno de seu eixo, o que não é problema para o rotor do motor desenvolvido, pois ele não realiza rotação no eixo, devido ao uso de um sistema cardan.

Figura 47 – Suporte da superfície de leitura.



Fonte: (PRINTART, 2005).

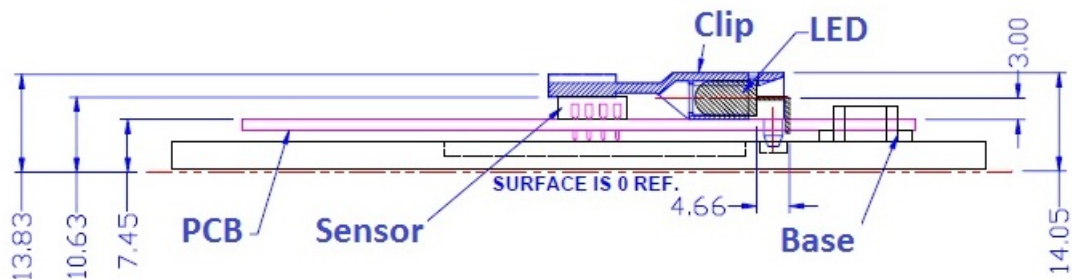
Basicamente, o sensor fotografa a superfície lida, e transforma a imagem em uma matriz, a qual é comparada com uma matriz da imagem anterior, funcionando como um reconhecimento de imagem. Quando a janela de leitura do sensor é movida, uma nova imagem é capturada em CI que possuem, internamente, um processador dedicado, que calcula e informa o deslocamento em uma superfície.

O sensor utilizado é o PAN3101, que é um sensor de mouse óptico, de baixo custo, do tipo *Digital Signal Processor* (DSP), o qual realiza os cálculos e serve de mecanismo para determinar deslocamento (PRINTART, 2005). As características principais do sensor são listadas e detalhadas no Anexo (B.4).

A montagem do sistema com sensor é simples, sendo necessárias lentes específicas da câmera, sistema de iluminação (LED) conforme Figura 48 e um *hardware* conforme Figura 49.

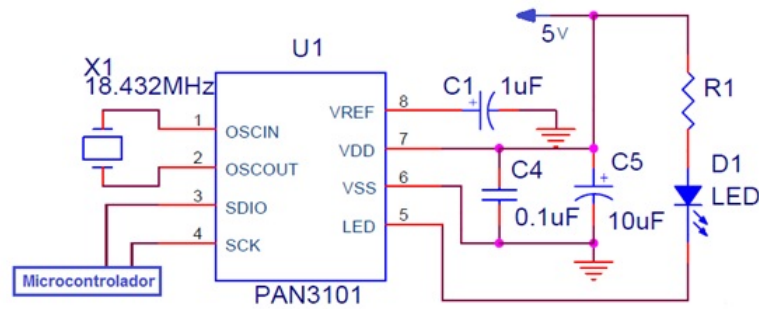
A montagem do sistema com sensor é simples, sendo necessárias lentes específicas da câmera, sistema de iluminação de LED, conforme a Figura 48, e um *hardware*, conforme a Figura 49.

Figura 48 – Base da placa de montagem da lente e sensor óptico.



Fonte: (PRINTART, 2005).

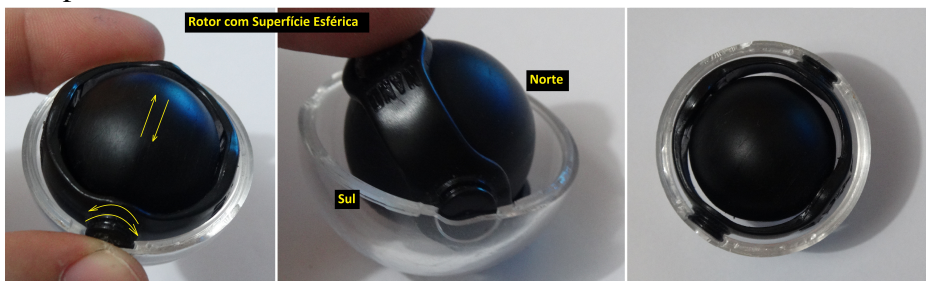
Figura 49 – Esquemático para sensor PAN3101.



Fonte: (PRINTART, 2005).

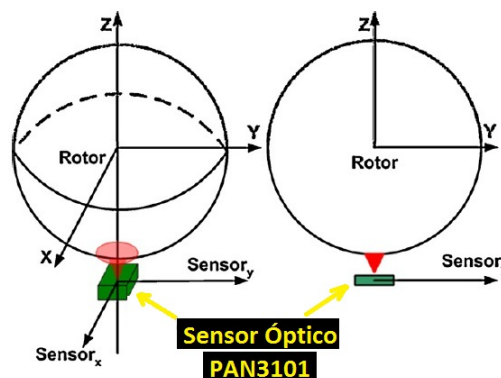
O protótipo montado para verificar a eficácia do sensor para leitura de deslocamento em uma superfície mostrou-se eficiente, desde que a superfície seja sem irregularidades, o sensor esteja a uma distância fixa dela e não haja picos de velocidade no movimento. O rotor projetado para realizar o teste com o sensor óptico consiste de um sistema giroscópico com uma superfície esférica cobrindo todo o rotor Figura 50. O sensor não se mostrou eficiente devido a irregularidades presentes na superfície esférica e folgas durante o movimento. O objetivo era se ler a superfície na base do rotor Figura 51 e, assim, se determinar seu deslocamento.

Figura 50 – Superfície esférica no rotor.



Fonte: o autor.

Figura 51 – Base com posição do sensor óptico



Fonte: o autor.

### 5.1.3 *Localização por Sensor Hall*

O sistema com sensor Hall testado não apresentou os resultados conforme esperado. Os valores lidos e coletados pelos três sensores deveriam sofrer influência apenas do rotor (ímã móvel). Não era esperado que as correntes aplicadas nas bobinas influenciasses nos sensores. Por existirem várias combinações de correntes nas bobinas, para posicionar o rotor nas mesmas coordenadas, então se descartou o uso do sensor Hall, apesar de vários trabalhos usarem este tipo de sistema para localizar a posição do rotor (SOKOLOV *et al.*, 1999), (SOKOLOV *et al.*, 2001), (WANG *et al.*, 2003), (SON; LEE, 2011), (CHEN *et al.*, 2012), (TSUKANO *et al.*, 2013), (YAN *et al.*, 2014), (YAN *et al.*, 2015), (GUO *et al.*, 2015), (YAN *et al.*, 2015), (??), (FERNANDES; BRANCO, 2016).

## 5.2 **Coleta de Dados do Rotor Esférico para Treinamento**

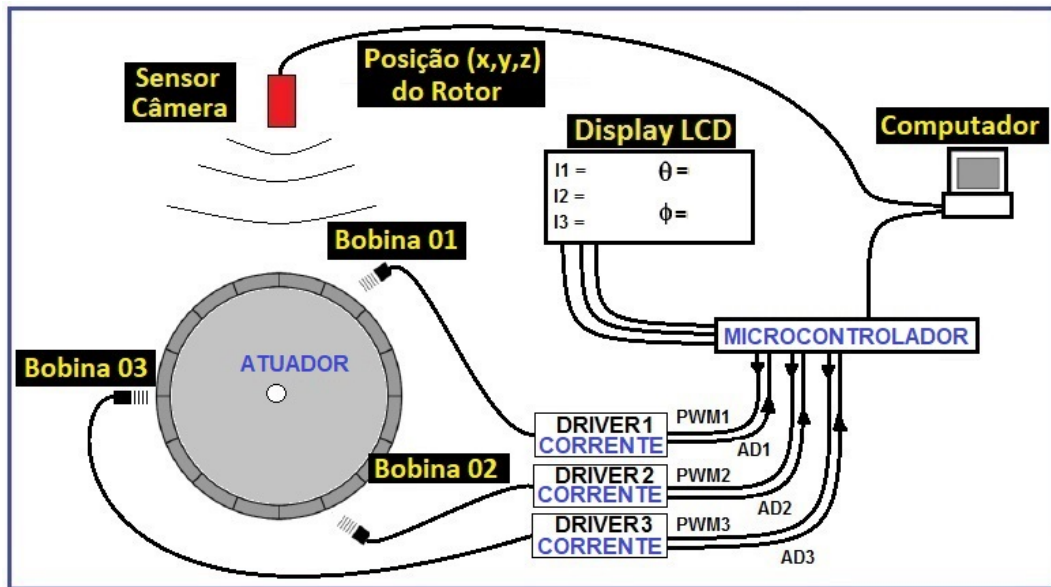
O protótipo testado utiliza um sistema de reconhecimento por imagem, pacote que compõe o *software* MATLAB. Uma câmera é usada para capturar a imagem da superfície do rotor, identificar um círculo branco (inserido como identificador) e determinar o centro de um círculo colocado na haste do rotor. A posição pode ser utilizada pelo *software* de controle para fechar a malha ou gerar dados para treinamento de um algoritmo de controle das correntes, que depende da posição desejada do atuador.

Todos os algoritmos do MATLAB e do Microcontrolador, além do arquivo 3D (\*.stl) da estrutura do estator e das bobinas, podem ser solicitados ao autor desta tese, para que os interessados possam montar seu próprio protótipo.

A bancada montada para ensaio conta com um *software* que recebe a posição ou uma sequência de posições desejadas do atuador, inserida pelo usuário. A escolha das correntes será definida por meio de um algoritmo baseado em redes neurais artificiais, que define o conjunto de correntes injetadas nas bobinas B1, B2 e B3, por meio de um PWM enviado para o drive de corrente LMD18200 Anexo (B.5). As correntes aplicadas podem ser verificadas em um display LCD, disponível na bancada. As Figuras 52 e 53 mostram o desenho esquemático da bancada.

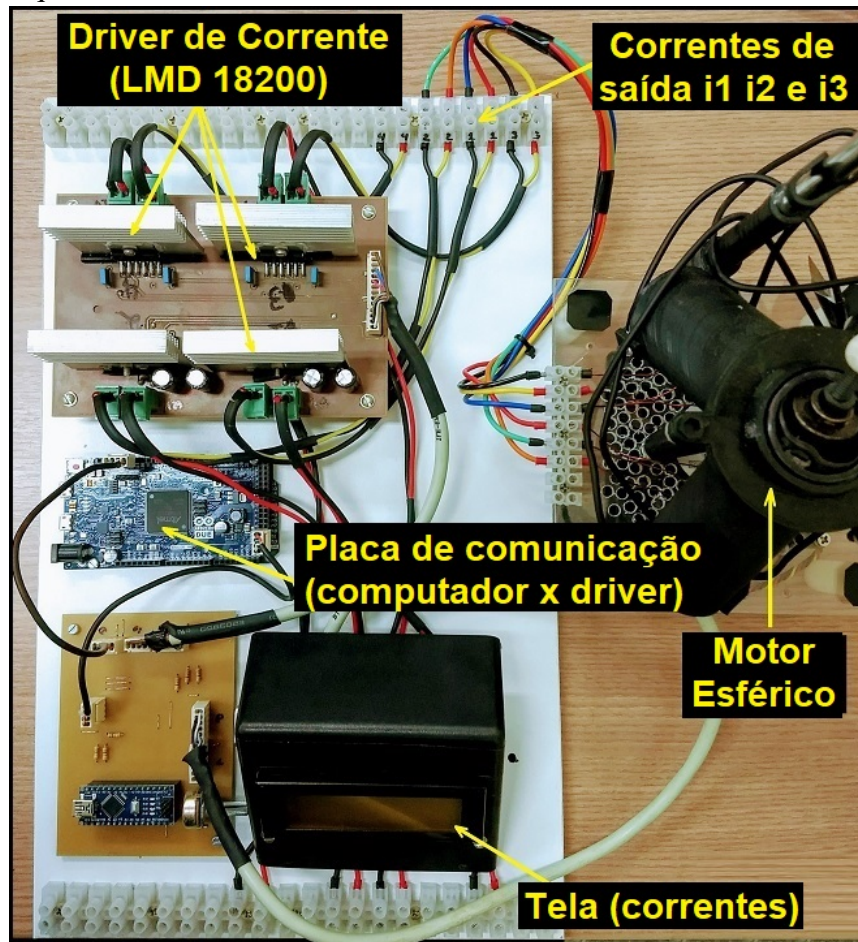


Figura 52 – Esquemático simplificado da bancada.



Fonte: o autor.

Figura 53 – Esquemático real da bancada.



Fonte: o autor.

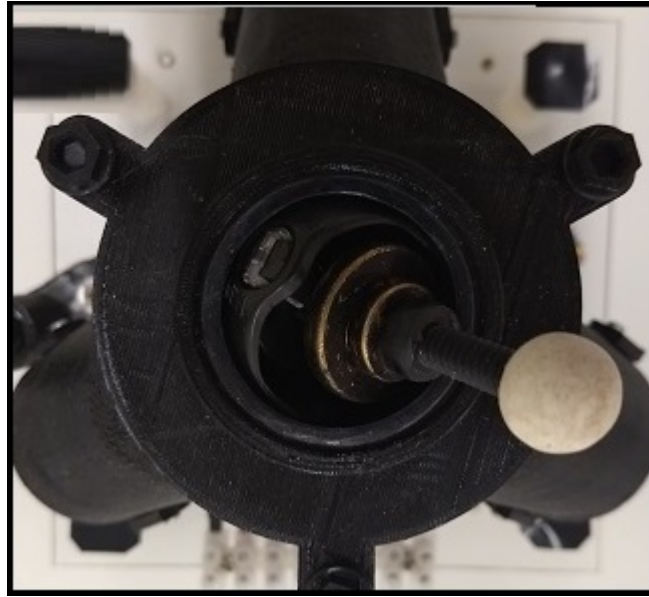
Outro desafio no teste deste protótipo era saber a posição do rotor durante seu funcionamento. São diversas as propostas de localização da posição do rotor para cada área de atuação, conforme descrito na seção anterior (WANG *et al.*, 2001; LEE; ZHOU, 2004; WANG *et al.*, 2010; TZOU; FUKUDA, 2012; BAI; LEE, 2013; XIN *et al.*, 2013; WANG *et al.*, 2014; KASASHIMA *et al.*, 2014). A forma utilizada que obteve os melhores resultados de coleta de dados (entrada x saída) foi com uso de uma câmera Figura 54, que, junto a um algoritmo de reconhecimento de imagem, permitiu mapear a superfície do hemisfério de atuação do rotor, relacionando posição deste e correntes aplicadas. Como o rotor contém uma haste de raio fixo, foi possível calcular sua posição  $(\theta, \phi)$ , ao longo do tempo, lendo uma superfície de atuação Figura 55. Ao todo foram coletados 4000 dados (as coletas foram realizadas três vezes e calculada a média dos pontos) que relacionam entrada e saída, ou seja, as três correntes nas bobinas com um ponto na superfície do hemisfério. O mapa de distribuição dos dados é composto por pontos Figura 56 e, para cada posição do atuador, um conjunto de três correntes está aplicado nas bobinas do estator.

Figura 54 – Motor esférico com câmera posicionada no topo.



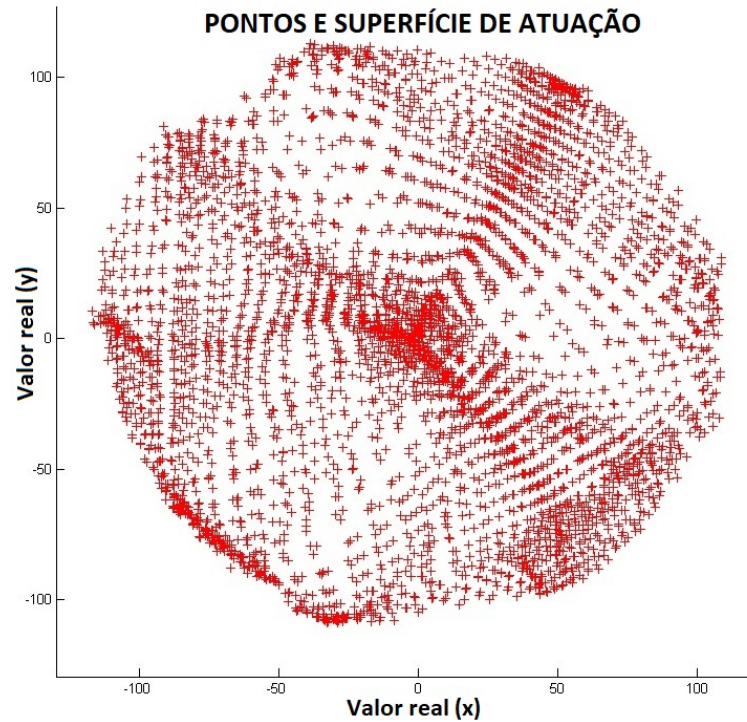
Fonte: o autor.

Figura 55 – Área de coleta da câmera.



Fonte: o autor.

Figura 56 – Mapa de pontos coletados para treinamento da rede neural.



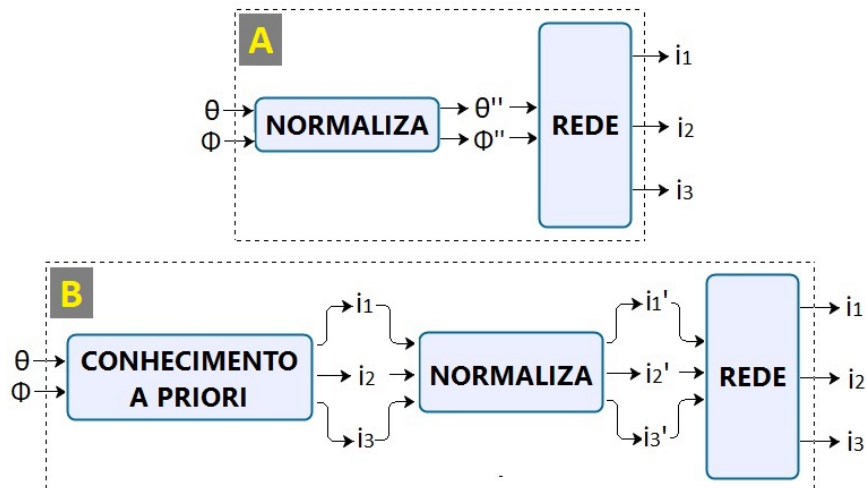
Fonte: o autor.

### 5.3 Tratamento dos Dados Coletados

Após coleta dos dados de entrada e saída, os algoritmos foram submetidos ao treinamento com dois tipos de dados. O primeiro método consiste em apenas normalizar os

dados e é chamado sem especialista Figura 57A. No segundo tratamento, o conjunto de dados de entrada passa por uma transformação de conhecimento *a priori* e é chamado de especialista Figura 57B. O conhecimento *a priori* resume-se nos equacionamentos do campo magnético, que indicam a posição do rotor, desconsiderada a não linearidade do sistema e é dado pelas equações (5.5, 5.6 e 5.7).

Figura 57 – Transformação dos dados utilizados (A) sem especialista e (B) com especialista.



Fonte: o autor.

## 5.4 Topologia da Rede Neural

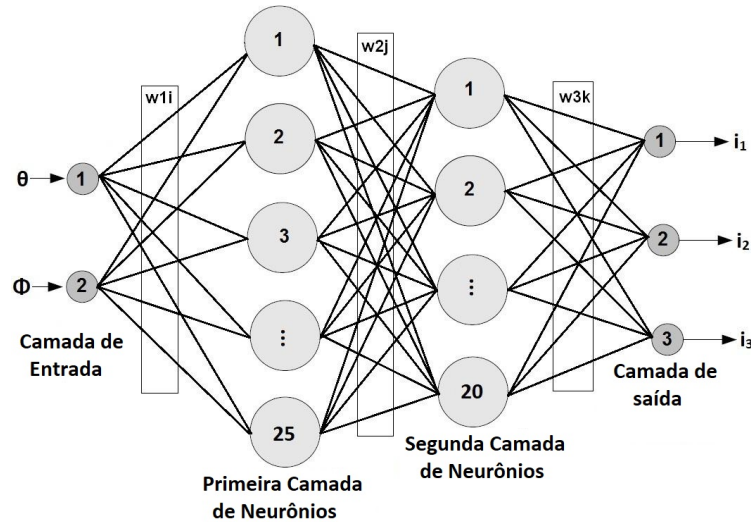
Para aprendizado dos dados coletados, dois algoritmos, baseados em inteligência computacional, são propostos, o Multi Layer Perceptron (MLP) e o Extreme Learning Machine (ELM). Cada algoritmo é treinado e validado para uso no controle de posição do motor esférico.

### 5.4.1 MLP - Multi Layer Perceptron

Uma vez concluída a fase de aquisição de dados, o próximo passo é treinar o modelo de rede neural. Para tanto, optou-se por utilizar uma rede MLP, devido às suas propriedades de aproximação universal. As entradas da rede MLP são as coordenadas esféricas  $\theta_d$  e  $\phi_d$ , enquanto as saídas são as três correntes das bobinas Figura 58 (HAYKIN, 2007).

Após diversos ensaios com os dados, a topologia adotada foi de duas camadas ocultas. MLP com 25 neurônios na primeira camada oculta e 20 neurônios na segunda, ou apenas MLP (2, 25, 20, 3). Esta topologia de rede foi treinada com o algoritmo Backpropagation do erro. Por padrão, foram usados 70% dos dados para treinamento, enquanto os 30% restantes foram

Figura 58 – A topologia escolhida da rede MLP.



Fonte: o autor.

usados para testes. A função de custo para treinamento e testar o MLP foi o erro quadrático médio (MSE), definido conforme a equação (5.8).

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \varepsilon(t) = \frac{1}{2N} \sum_{t=1}^N \sum_{k=1}^n e_k^2(t) \quad (5.8)$$

Em que,  $e_k(t) = d_k(t) - y_k(t)$  é o erro do k-ésimo neurônio de saída na iteração t, regra de aprendizagem que foi utilizada para fins de atualização de peso. Para essa regra, baseada em descida de gradiente, a taxa de aprendizado foi definida como 0.001. Os neurônios ocultos e de saída utilizaram a tangente hiperbólica como função de ativação (HAYKIN, 2007).

O procedimento de teste e treinamento foi repetido 100 vezes independentes, de modo que todas as métricas de avaliação descritas são resultados médios. Os passos estão descritos no Algoritmo 1.

Uma vez que a rede neural é treinada e validada (resultados numéricos são mostrados na próxima seção), a câmera é então removida e o motor está pronto para ser operado sob o comando da rede neural.

O procedimento de projeto de redes neurais, recém-descrito, tem sido usado com sucesso no campo da robótica inteligente, para a construção de sistemas de controle visio motores adaptáveis (ver, por exemplo, (BARRETO *et al.*, 2003)). Como será mostrado e discutido na próxima seção, esta abordagem foi capaz de modelar com precisão os fenômenos não lineares inerentes ao projeto do motor esférico proposto, o que não era possível usando-se a abordagem linear na equação (5.4). O conjunto de dados e os projetos para impressão 3D (em formato de

---

**Algoritmo 1:** Treinamento MLP com duas camadas ocultas.
 

---

PASSO 1: Definir as entradas ( $\theta$ ,  $\phi$ ) e as saídas ( $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$ ), número de camadas ocultas ( $N_C = 2$ ), número de neurônios em cada camada oculta  $N_{C1} = 25$  e ( $N_{C2} = 20$ ), taxa de aprendizagem = 0.001.

PASSO 2: Separar aleatoriamente 70% dos dados para treinamento e 30% para testes. E inicialize aleatoriamente todos os pesos e bias.

PASSO 3: Treine a rede MLP(2,25,20,3) por 5000 épocas usando o algoritmo backpropagation padrão (i.e. aprendizado gradiente de descida sem momento).

PASSO 4: Uma vez terminada a fase de treinamento, estime as saídas (correntes:  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$ ) usando os dados de entrada de teste.

PASSO 5: Calcule os resíduos correspondentes (i.e. previsão do erro) e, portanto, o valor MSE para os dados de teste, conforme definido na equação (5.8).

PASSO 6: Repita as etapas de 3 a 5 para 100 execuções (i.e. ciclo de teste de treinamento).

PASSO 7: Calcule as estatísticas dos valores MSE (média, mediana, desvio padrão, mínimo, máximo) para as 100 rodadas independentes.

PASSO 8: Armazene os pesos e o bias treinadas para uso posterior pelo motor esférico.

---

arquivo STL) do estator e do rotor da bobina estão disponíveis para os leitores interessados, sob solicitação.

#### 5.4.2 ELM - Extreme Learning Machine

A rede ELM (máquina de aprendizado extremo), é um tipo de algoritmo que possui apenas uma camada oculta. O objetivo de seu treinamento consiste em gerar uma matriz aleatória  $\mathbf{W}$  e então obter uma matriz de peso  $\beta$  que baseado na saída desejada  $\mathbf{Y}$  um sistema linear é resolvido para aproximar os pesos  $\beta$  de forma direta. Desta forma o algoritmo ELM é extremamente rápido quando comparado com a MLP (backpropagation).

A rede ELM (máquina de aprendizado extremo) é um tipo de algoritmo que possui apenas uma camada oculta. O objetivo de seu treinamento é gerar uma matriz aleatória  $\mathbf{W}$  e, então, obter uma matriz de peso  $\beta$  em que, baseado na saída desejada  $\mathbf{Y}$ , um sistema linear é resolvido para aproximar os pesos  $\beta$  de forma direta. Desta maneira, o algoritmo ELM é extremamente rápido, quando comparado com a MLP (Backpropagation), para o qual as matrizes

são conforme a equação (5.9).

$$\mathbf{X} = [x_1, \dots, x_m, 1] \quad \mathbf{W} = \begin{bmatrix} w_{11} & \cdots & w_{1d} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{m1} & \cdots & w_{md} \\ b_1 & \cdots & b_d \end{bmatrix} \quad \boldsymbol{\beta} = \begin{bmatrix} \beta_{11} & \cdots & \beta_{1s} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \beta_{d1} & \cdots & \beta_{ds} \end{bmatrix} \quad \mathbf{Y} = [y_1, \dots, y_s] \quad (5.9)$$

A ELM envolve o cálculo das ativações e saídas de todos os neurônios da camada escondida e de todos os neurônios da camada de saída, desde que os pesos tenham sido inicializados com valores aleatórios.

A matriz  $\mathbf{W}$  é gerada de maneira aleatória e não é mais atualizada. Deve-se, portanto, durante o treinamento da ELM, apenas atualizar a matriz de pesos  $\boldsymbol{\beta}$ , baseando-se na matriz de saída  $\mathbf{Y}$  e na matriz de pesos aleatórios  $\mathbf{W}$ , por meio da resolução de um sistema linear. Basicamente, deve-se determinar a matriz  $\mathbf{W}$  usando-se a equação (5.10).

Onde:  $f(\cdot)$  = função de transferência (que pode ser do tipo sigmoid) e  $N$  = o número de amostras.

$$\mathbf{H}^i = [x_1^i, \dots, x_m^i, 1] \quad \begin{bmatrix} w_{11} & \cdots & w_{1d} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{m1} & \cdots & w_{md} \\ b_1 & \cdots & b_d \end{bmatrix} \Rightarrow \mathbf{H} = \begin{bmatrix} f(H^1) \\ f(H^2) \\ \vdots \\ f(H^N) \end{bmatrix}_{N \times d} \quad (5.10)$$

A matriz  $\mathbf{H}$  armazena o resultado de todos os neurônios da camada oculta da multiplicação entre  $\mathbf{X}$  e  $\mathbf{W}$ . Após a determinação da matriz  $\mathbf{H}$ , para se obterem os pesos da matriz  $\boldsymbol{\beta}$ , deve ser solucionado o seguinte sistema linear da equação (5.11).

$$\mathbf{H}\boldsymbol{\beta} = \mathbf{Y} \rightarrow \boldsymbol{\beta} = \mathbf{H}^\dagger \mathbf{Y} \quad (5.11)$$

### 5.4.3 Conclusão

Neste capítulo, foram investigados sistemas que pudessem serem utilizados para localização do rotor do motor esférico. Foram realizados cálculos teóricos (campo resultante), ensaio com sensor óptico, com sensor *Hall* e com uso de câmera (coleta de imagens). O sistema

de imagens foi o que produziu melhores resultados práticos (por reconhecimento de padrões). Com um conjunto de dados, com 4000 pontos, foram treinados e validados dois algoritmos baseados em inteligência computacional. Os resultados do treinamento e uso dos algoritmos são descritos nas próximas seções.



## 6 RESULTADOS DO TREINAMENTO DAS REDES E DO SISTEMA DE CONTROLE PROPOSTO

Com o objetivo de controlar o movimento do motor para determinadas posições, diversas técnicas podem ser utilizadas. Em malha fechada, como visto anteriormente, há diversos problemas para se encontrar um sistema que funcione de forma eficiente. A proposta usada consiste de um sistema de câmera que captura a imagem da superfície do motor, utilizando algoritmo para reconhecimento de padrões com vistas a se calcular a posição do rotor, identificado por um círculo branco. Essa foi a mais eficiente proposta encontrada. Desta forma, é possível serem aplicadas diversas técnicas de controle com malha fechada ou serem coletados os pontos de treinamento de um algoritmo.

Outra possibilidade é se utilizar um sistema de malha aberta com uma equação geral que o rege, o que permite o cálculo da posição do rotor ao se determinarem as correntes que são aplicadas nas bobinas do estator. No entanto, por ser este um sistema não linear, devido às interferências construtivas como atrito e influência do campo magnético do rotor, que dependem da posição, não foi possível solucioná-lo de forma analítica, considerando-se todas as variáveis no equacionamento.

Um sistema de malha aberta pode ser utilizado, se for coletado (posição x correntes) e, assim, se encontrar uma função que aproxime os pontos de treinamento e que faça uma extrapolação para dados não treinados.

### 6.0.1 Aproximação por Redes Neurais Artificiais

A proposta do trabalho foi se construir o motor esférico de três bobinas e se fazer o controle de posicionamento do rotor, descrevendo a superfície de um hemisfério. Para isso, com o conjunto de dados coletados (posição x correntes), foi possível estudar o desempenho de duas topologias de redes neurais, MLP e ELM (com e sem o uso do especialista - transformação dos dados). Para tanto, a simulação de cada rede foi repetida 100 vezes e apresentada a média do erro de treinamento e da validação. Na simulação, 70% dos dados foram utilizados para treinamento e os 30% restantes para validação. Os dados de treinamento foram testados e usados com e sem o uso da transformação dos dados de entrada (especialista).

A topologia *Multi Layer Perceptron* (MLP) testada com retro-propagação do erro é composta de duas camadas escondidas, com variações no número de neurônios nas camadas escondidas e o número de dados utilizados no treinamento e validação. As três configurações de

camadas aplicadas na rede foram respectivamente (5x4, 10x8 e 25x20). A variação do número de dados (treinamento x validação), foi dividida em quatro grupos respectivamente: 700x300, 1400x600, 2100x1200 e 2800x1200. As curvas na Figura 59A, mostram que o algoritmo treinado com uso de especialista converge em um número menor de épocas, mostrando ser válida sua utilização. Na Figura 59B (com especialista) e Figura 59C (sem especialista), as linha mais cheias representam o resultado para um maior número de dados utilizado no treinamento. Quanto maior o número de dados, mais rápido acontece a convergência. Os dados totais de resultados do erro médio quadrático e o desvio padrão de cada caso testado pode ser verificado na Tabela 01. A função de ativação utilizada na MLP foi a tangente hiperbólica, a qual foi testada com critério de parada sendo o número de épocas definida em 5000, com taxa de aprendizado de 0,001 devido a testes realizados. Os resultados completos estão descritos na Tabela 1.

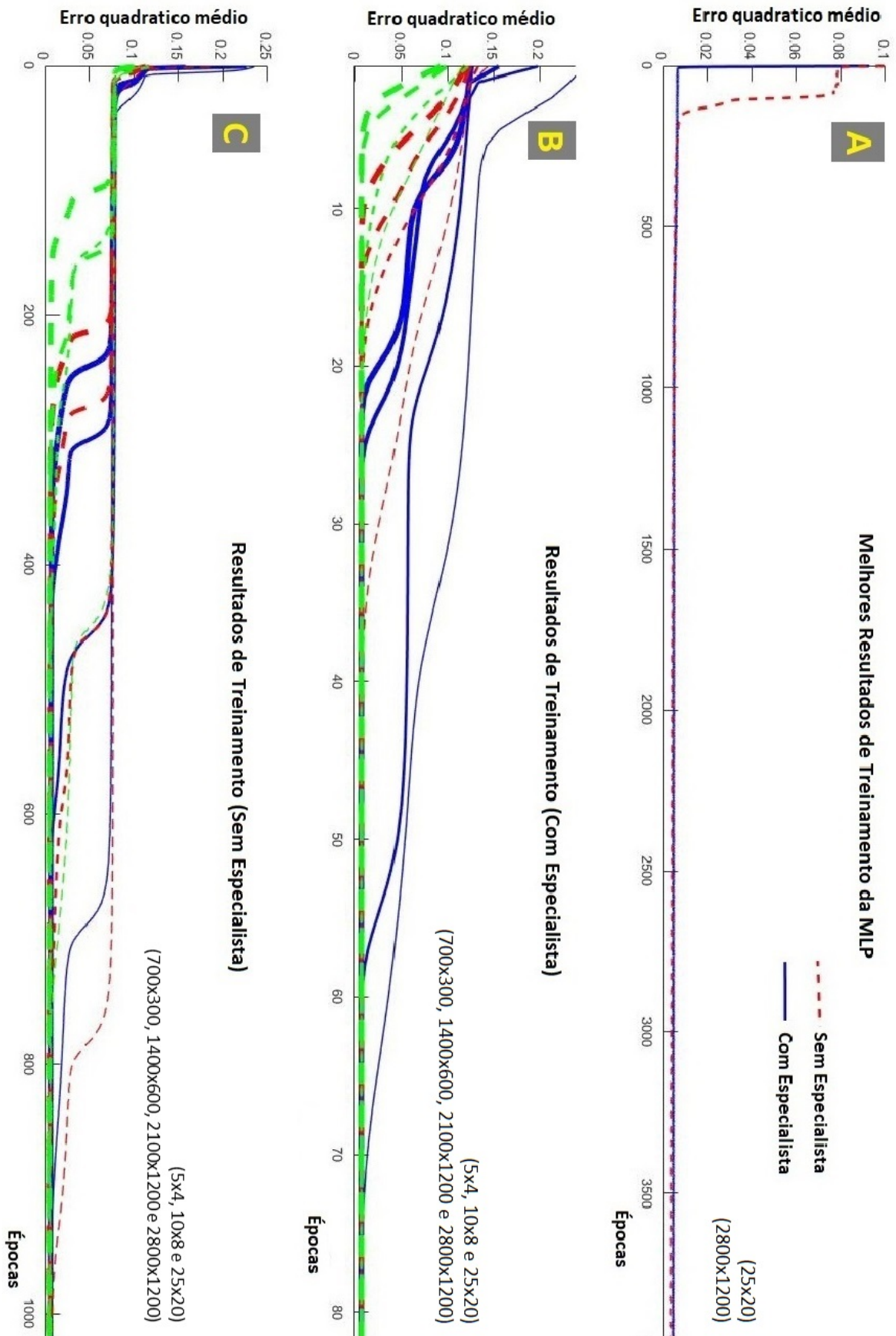
A topologia MLP, testada com retropropagação do erro é composta de duas camadas escondidas, com variações no número de neurônios nas camadas escondidas e no número de dados utilizados no treinamento e validação. As três configurações de camadas aplicadas na rede foram 5x4, 10x8 e 25x20. A variação do número de dados (treinamento x validação) foi dividida em quatro grupos: 700x300, 1400x600, 2100x1200 e 2800x1200. As curvas na Figura 59A mostram que o algoritmo treinado com uso de especialista converge em um número menor de épocas, mostrando ser válida sua utilização. Na Figura 59B (com especialista) e na Figura 59C (sem especialista), as linha mais cheias representam o resultado para um maior número de dados utilizados no treinamento. Quanto maior é o número de dados, mais rapidamente acontece a convergência. Os dados totais de resultados do erro médio quadrático e o desvio padrão de cada caso testado podem ser verificados na (Tabela 1). A função de ativação utilizada na MLP foi a tangente hiperbólica, a qual foi testada com critério de parada, sendo o número de épocas definido em 5000, com taxa de aprendizado de 0,001, devido a testes realizados. Os resultados completos estão descritos na (Tabela 1).

Tabela 1 – Resultado de treinamento da MLP.

| MLP (média de 100 testes) |           |                           |                  |                  |                  |                  |
|---------------------------|-----------|---------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| MLP                       |           |                           | TREINAMENTO      |                  |                  |                  |
| Número de Dados           |           | Neurônios<br>Camada 1 e 2 | SEM ESPECIALISTA |                  | COM ESPECIALISTA |                  |
| Treinamento               | Validação |                           | MLP<br>(MSE)     | Desvio<br>Padrão | MLP<br>(MSE)     | Desvio<br>Padrão |
| 700                       | 300       | 5 e 4                     | 0.0214           | 0.3563           | 0.0194           | 0.3403           |
| 700                       | 300       | 10 e 8                    | 0.0191           | 0.3361           | 0.0193           | 0.3387           |
| 700                       | 300       | 25 e 20                   | 0.0181           | 0.3274           | 0.0195           | 0.3405           |
| 1400                      | 600       | 5 e 4                     | 0.0194           | 0.3386           | 0.0190           | 0.3364           |
| 1400                      | 600       | 10 e 8                    | 0.0154           | 0.3014           | 0.0188           | 0.3340           |
| 1400                      | 600       | 25 e 20                   | 0.0181           | 0.3274           | 0.0195           | 0.3405           |
| 2100                      | 900       | 5 e 4                     | 0.0177           | 0.3229           | 0.0187           | 0.3335           |
| 2100                      | 900       | 10 e 8                    | 0.0143           | 0.2901           | 0.0180           | 0.3261           |
| 2100                      | 900       | 25 e 20                   | 0.0135           | 0.2806           | 0.0175           | 0.3200           |
| 2800                      | 1200      | 5 e 4                     | 0.0167           | 0.3137           | 0.0181           | 0.3285           |
| 2800                      | 1200      | 10 e 8                    | 0.0140           | 0.2873           | 0.0166           | 0.3138           |
| 2800                      | 1200      | 25 e 20                   | 0.0129           | 0.2731           | 0.0153           | 0.2970           |
| MLP                       |           |                           | VALIDAÇÃO        |                  |                  |                  |
| Número de Dados           |           | Neurônios<br>Camada 1 e 2 | SEM ESPECIALISTA |                  | COM ESPECIALISTA |                  |
| Treinamento               | Validação |                           | MLP<br>(MSE)     | Desvio<br>Padrão | MLP<br>(MSE)     | Desvio<br>Padrão |
| 700                       | 300       | 5 e 4                     | 0.0219           | 0.3597           | 0.0198           | 0.3430           |
| 700                       | 300       | 10 e 8                    | 0.0198           | 0.3419           | 0.0199           | 0.3439           |
| 700                       | 300       | 25 e 20                   | 0.0187           | 0.3322           | 0.0199           | 0.3433           |
| 1400                      | 600       | 5 e 4                     | 0.0199           | 0.3423           | 0.0193           | 0.3391           |
| 1400                      | 600       | 10 e 8                    | 0.0156           | 0.3033           | 0.0190           | 0.3358           |
| 1400                      | 600       | 25 e 20                   | 0.0187           | 0.3322           | 0.0199           | 0.3433           |
| 2100                      | 900       | 5 e 4                     | 0.0178           | 0.3238           | 0.0188           | 0.3342           |
| 2100                      | 900       | 10 e 8                    | 0.0145           | 0.2919           | 0.0181           | 0.3277           |
| 2100                      | 900       | 25 e 20                   | 0.0137           | 0.2830           | 0.0177           | 0.3221           |
| 2800                      | 1200      | 5 e 4                     | 0.0169           | 0.3150           | 0.0183           | 0.3299           |
| 2800                      | 1200      | 10 e 8                    | 0.0142           | 0.2886           | 0.0168           | 0.3153           |
| 2800                      | 1200      | 25 e 20                   | 0.0130           | 0.2742           | 0.0154           | 0.2981           |

Fonte: o autor.

Figura 59 – (A) Melhores resultados da MLP, (B) Usando dados com transformação do especialista, (C) Usando dados sem uso do conhecimento *a priori*.



A segunda RNA testada foi a ELM, que mostra resultados bastante eficientes, com a vantagem de ser extremamente mais rápida e possuir uma única camada escondida. O número de neurônios aplicado nas três configurações de camadas aplicadas na rede foram 5, 10 e 25. A variação dos dados (treinamento x validação) foi dividida em quatro grupos: 700x300, 1400x600, 2100x1200 e 2800x1200. Como nesta topologia não há épocas durante o treinamento, pode-se observar o erro médio quadrático e o desvio padrão dos resultados, e comparar com o desempenho da ELM com o da MLP. Foi observado que o melhor resultado se obtém utilizando o maior número de neurônios e o maior número de dados. Para a ELM, foi utilizada a função tangente hiperbólica. Como este tipo de rede dispensa interações, depende apenas dos valores aleatórios iniciais da matriz de peso. As médias dos resultados de repetição de 100 ensaios para todas as configurações estão descritos na (Tabela 2).

Tabela 2 – Resultado de treinamento da ELM.

| ELM (média de 100 testes) |           |                       |                  |                  |                  |                  |
|---------------------------|-----------|-----------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| ELM                       |           |                       | TREINAMENTO      |                  |                  |                  |
| Número de Dados           |           | Neurônios<br>Camada 1 | SEM ESPECIALISTA |                  | COM ESPECIALISTA |                  |
| Treinamento               | Validação |                       | ELM<br>(MSE)     | Desvio<br>Padrão | ELM<br>(MSE)     | Desvio<br>Padrão |
| 700                       | 300       | 5                     | 0.1805           | 1.0237           | 0.0260           | 0.3917           |
| 700                       | 300       | 10                    | 0.0459           | 0.5181           | 0.0189           | 0.3355           |
| 700                       | 300       | 25                    | 0.0122           | 0.2692           | 0.0093           | 0.2350           |
| 1400                      | 600       | 5                     | 0.1809           | 1.0247           | 0.0261           | 0.3919           |
| 1400                      | 600       | 10                    | 0.0461           | 0.5189           | 0.0188           | 0.3354           |
| 1400                      | 600       | 25                    | 0.0125           | 0.2730           | 0.0093           | 0.2357           |
| 2100                      | 900       | 5                     | 0.1826           | 1.0301           | 0.0261           | 0.3926           |
| 2100                      | 900       | 10                    | 0.0476           | 0.5267           | 0.0189           | 0.3358           |
| 2100                      | 900       | 25                    | 0.0126           | 0.2734           | 0.0095           | 0.2378           |
| 2800                      | 1200      | 5                     | 0.1851           | 1.0369           | 0.0261           | 0.3923           |
| 2800                      | 1200      | 10                    | 0.0480           | 0.5288           | 0.0188           | 0.3353           |
| 2800                      | 1200      | 25                    | 0.0127           | 0.2750           | 0.0094           | 0.2372           |
| ELM                       |           |                       | VALIDAÇÃO        |                  |                  |                  |
| Número de Dados           |           | Neurônios<br>Camada 1 | SEM ESPECIALISTA |                  | COM ESPECIALISTA |                  |
| Treinamento               | Validação |                       | ELM<br>(MSE)     | Desvio<br>Padrão | ELM<br>(MSE)     | Desvio<br>Padrão |
| 700                       | 300       | 5                     | 0.1869           | 1.0401           | 0.0280           | 0.4041           |
| 700                       | 300       | 10                    | 0.0517           | 0.5484           | 0.0206           | 0.3480           |
| 700                       | 300       | 25                    | 0.0149           | 0.2976           | 0.0109           | 0.2531           |
| 1400                      | 600       | 5                     | 0.1845           | 1.0346           | 0.0267           | 0.3971           |
| 1400                      | 600       | 10                    | 0.0515           | 0.5467           | 0.0192           | 0.3391           |
| 1400                      | 600       | 25                    | 0.0131           | 0.2789           | 0.0102           | 0.2464           |
| 2100                      | 900       | 5                     | 0.1878           | 1.0441           | 0.0261           | 0.3927           |
| 2100                      | 900       | 10                    | 0.0486           | 0.5313           | 0.0190           | 0.3372           |
| 2100                      | 900       | 25                    | 0.0132           | 0.2808           | 0.0096           | 0.2388           |
| 2800                      | 1200      | 5                     | 0.1789           | 1.0200           | 0.0267           | 0.3971           |
| 2800                      | 1200      | 10                    | 0.0469           | 0.5231           | 0.0195           | 0.3416           |
| 2800                      | 1200      | 25                    | 0.0127           | 0.2743           | 0.0098           | 0.2411           |

Fonte: o autor.

A tarefa consiste em definir uma trajetória circular dentro do hemisfério de ação da haste do motor e avaliar a precisão de rastreamento do sistema de controle de posição baseado em RNA. Um fluxograma descreve a sequência de passos seguidos pelo algoritmo de controle baseado em RNA, durante a tarefa de rastreamento da trajetória conforme mostrado na Figura 60A-C.

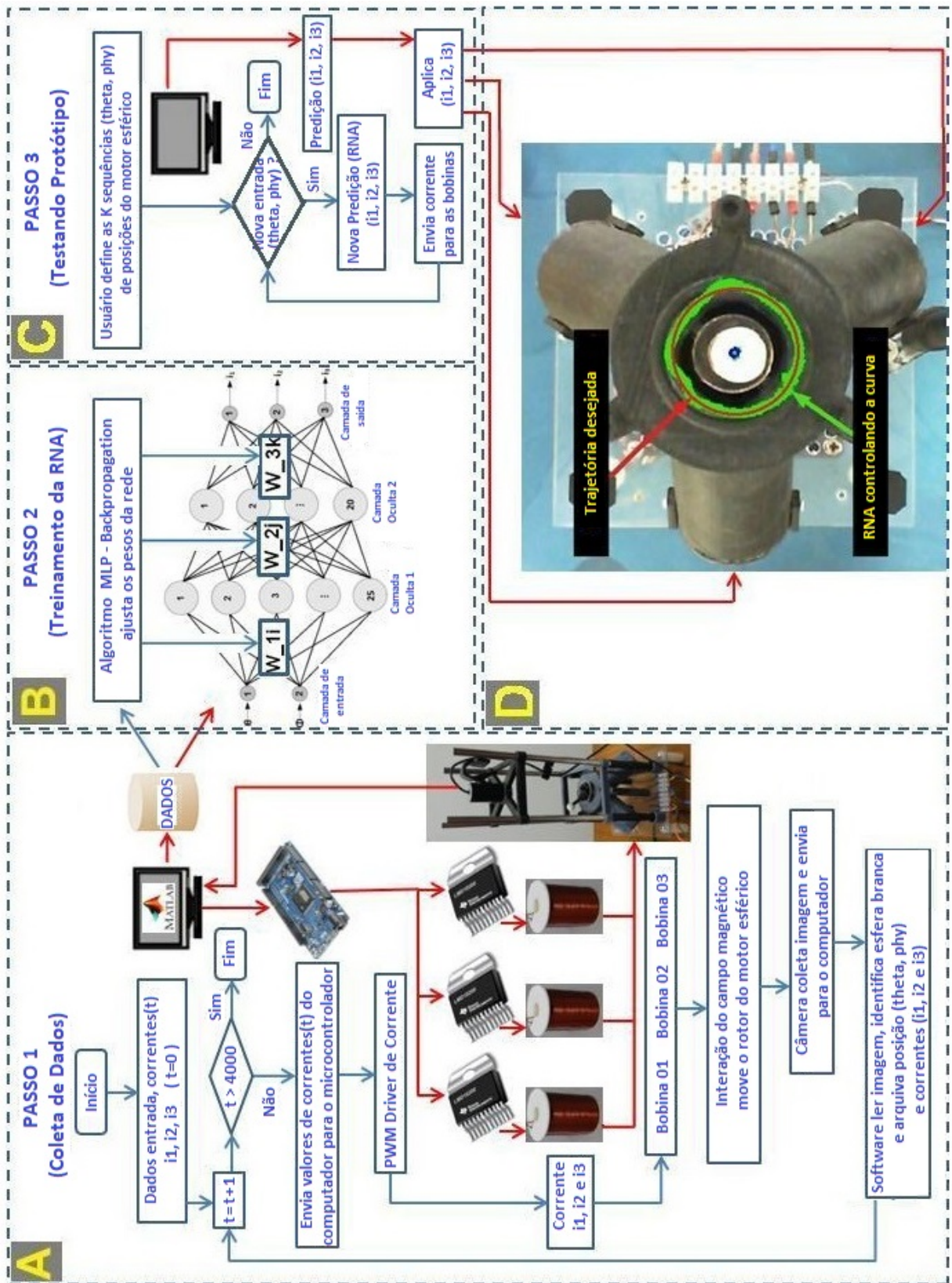
Para uma sequência de posições desejadas  $(\theta_d, \phi_d)$  de uma determinada trajetória, o algoritmo de controle estima, através da rede neural, os valores adequados das correntes  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$ , e aplica estes valores às bobinas, visando direcionar a haste do rotor para a posição esférica desejada. Este processo é repetido para cada ponto da trajetória.

A sequência desejada de pontos compreendendo uma trajetória circular foi construída para os ângulos  $\theta = 25$  graus e  $(0 < \phi = < 360)$  graus, em incrementos de 5 graus. Uma execução típica do algoritmo de controle de posição para todos os pontos da trajetória resultou na trajetória mostrada na Figura 60D. Como se pode ver, a haste do rotor, comandada pela rede neural, conseguiu seguir com sucesso a trajetória desejada (linha contínua).

Quatro algoritmos após treinamento foram submetidos ao ensaio prático. O primeiro foi a MLP com 10 neurônios na primeira camada, 8 neurônios na segunda camada e treinada com 700 dados, produziu a curva da Figura 61A. O segundo, novamente com a MLP treinada, agora com 25 neurônios na primeira camada, 20 neurônios na segunda camada e treinada com 2800 dados, resultou na curva da Figura 61C. O terceiro foi a ELM com 10 neurônios na camada única e usando 700 dados no treinamento, resultou na curva da Figura 61B. E, por fim, o quarto foi a ELM com 25 neurônios na camada única e usando 2800 dados no treinamento, produziu a curva da Figura 61D.

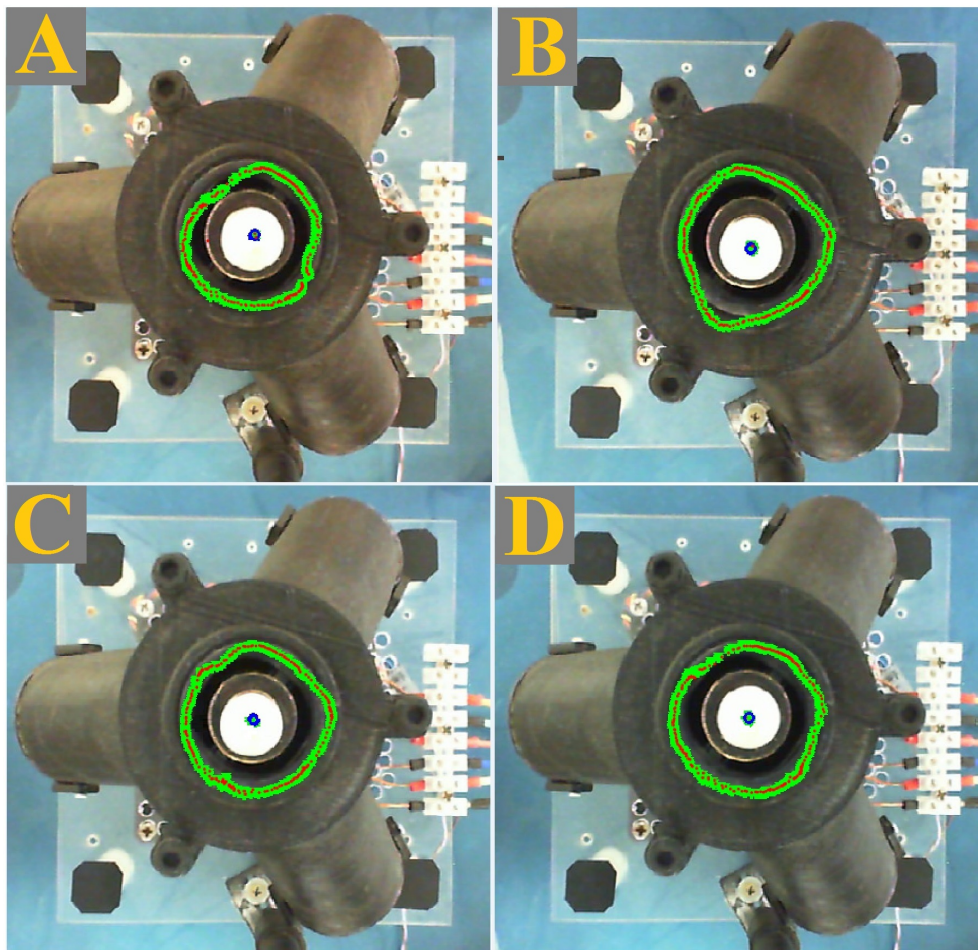
O teste consistiu em se informar uma sequência de posições e o algoritmo indicar as correntes adequadas que foram aplicadas no motor. A trajetória foi registrada ao longo do teste com uso do algoritmo de reconhecimento de imagem que identificava um círculo branco no eixo do rotor, marcando o centro e, desta forma, deixando a trajetória descrita.

Figura 60 – Fluxograma de coleta, treinamento e funcionamento do motor.



Fonte: o autor.

Figura 61 – Curva controlada pela RNA. (A) MLP: 10-8 neurônios por camada e usando 700 dados no treinamento. (B) ELM: 10 neurônios por camada e usando 700 dados no treinamento. (C) MLP: 25-20 neurônios por camada e usando 2800 dados no treinamento. (D) ELM: 25 neurônios na camada oculta e 2800 dados no treinamento.



Fonte: o autor.



## 7 CONCLUSÃO

Esta tese apresenta um novo conceito de motor esférico, bem como todo o projeto e os passos para a confecção de um protótipo real para comprovar este novo conceito. O protótipo é um motor esférico de apenas 3 bobinas e com ímãs permanentes no rotor (3-DOF). Este novo conceito é plenamente inovador, por sua característica de minimizar o número de bobinas do estator, além de estabelecer um controle em malha aberta, utilizando algoritmos de inteligência computacional. Um dos maiores desafios desta tese foi desenvolver o controle de posição do rotor, um problema comumente considerado de extrema complexidade no projeto de motores esféricos. Para fazer o controle de posição do motor decidiu-se então seguir uma abordagem baseada em dados, reunindo pares de entrada-saída para treinar dois poderosos modelos de redes neurais não lineares (MLP e ELM). A aquisição de dados foi possível, graças a uma engenhosa montagem, com a ajuda de um sistema de câmeras e um software de reconhecimento de imagens, que possibilitaram controlar o motor em malha aberta, após o treinamento das RNA's. As equações de modelagem física, por desconsiderarem os efeitos de gravidade e fricção, não poderiam produzir resultados suficientemente precisos, entretanto foram bastante úteis na transformação dos dados (chamada aqui de conhecimento a priori ou conhecimento do especialista). Os modelos de redes neurais foram treinados para receber como entrada as coordenadas esféricas desejadas do rotor - os chamados *setpoints* - e estimar as correntes necessárias, nas 3 bobinas, para atingir essas coordenadas. Essa abordagem foi testada, e validada com sucesso, com várias simulações computacionais e também por meio de uma tarefa de rastreamento de trajetória no protótipo real do motor esférico desenvolvido. Com isso, foi possível se comparar o desempenho dessas duas redes mostrando-se que a ELM ganha em capacidade de aprendizado e no quesito tempo de treinamento. Uma preocupação constante neste desenvolvimento do novo conceito foi a reprodutibilidade do protótipo, para que a comunidade de pesquisa em motores esféricos possa continuar o desenvolvimento do conceito até que vire um produto comercial. Para isto, são fornecidos todos os detalhes de montagem e modelagem do motor. Todo o protótipo foi concebido e construído dentro do LAMOTRIZ do DEE UFC com o uso de uma impressora 3D. Os resultados encontrados demonstram, claramente, que o novo conceito de um motor esférico é funcional e que pode ser controlado com uso de técnicas de inteligência computacional, como as Redes Neurais.

## **7.1 Propostas para Futuras Pesquisas**

Como a proposta desta tese é a de apresentar um novo conceito de motor esférico, é claro que alguns desenvolvimentos serão deixados como propostas futuras, para outros pesquisadores.

1. Fechar a malha de posição, encontrando um sistema de sensor que possa ser incorporado ao motor e não dificulte ou interfira na sua operação (área de atuação);
2. Utilizar outras ferramentas e materiais para fabricação do estator, como alumínio ou ferro, proporcionando-lhe mais resistência mecânica;
3. Analisar e apresentar um processo para a dissipação do calor das bobinas;
4. Fazer um estudo com o Método dos Elementos Finitos, para simular melhor os campos eletromagnéticos resultantes e testar outras posições das bobinas no estator;
5. Modelar e ensaiar o conjugado eletromagnético do motor esférico;
6. Analisar as interferências de inércia do rotor, atrito das partes moveis e vibração.

## **7.2 Publicações Geradas na Pesquisa**

1. Souza, Kleymilson N., et al. "A new topology of a spherical actuator." 2015 IEEE 13th Brazilian Power Electronics Conference and 1st Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC). IEEE, 2015.
2. Souza, Kleymilson, et al. "Design and Control of a Three-Coil Permanent Magnet Spherical Motor." Energies 11.8, 2018.

## REFERÊNCIAS

- ACKERMANN, B.; STEINBUSCH, H.; VOLLMER, T.; WANG, J.; JEWELL, G.; HOWE, D. A spherical permanent magnet actuator for a high-fidelity force-feedback joystick. **Mechatronics**, Elsevier, v. 14, n. 3, p. 327–339, 2004.
- ALCORN, J. B. The contributions of walter häussermann to rocket development. **62nd International Astronautical Congress**, 2011.
- BAI, K.; LEE, K.-M. Magnetic field model for direct field-feedback control of a permanent magnet spherical motor. In: IEEE. **Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), 2013 IEEE/ASME International Conference on**. [S.l.], 2013. p. 768–773.
- BAI, K.; LEE, K.-M. Direct field-feedback control of a ball-joint-like permanent-magnet spherical motor. **IEEE/ASME Transactions on Mechatronics**, IEEE, v. 19, n. 3, p. 975–986, 2014.
- BARRETO, G. A.; ARAÚJO, A. F. R.; RITTER, H. Self-organizing feature maps for modeling and control of robotic manipulators. **Journal of Intelligent and Robotic Systems**, v. 36, n. 4, p. 407–450, 2003.
- BEDERSON, B. B. **A miniature space-variant active vision system: Cortex-I**. Tese (Doutorado) — New York University, 1992.
- BEDERSON, B. B.; WALLACE, R. S.; SCHWARTZ, E. A miniaturized space-variant active vision system: Cortex-i. **Machine Vision and applications**, Springer, v. 8, n. 2, p. 101–109, 1995.
- BEDERSON, B. B.; WALLACE, R. S.; SCHWARTZ, E. L. A miniaturized active vision system. In: IEEE. **Pattern Recognition, 1992. Vol. IV. Conference D: Architectures for Vision and Pattern Recognition, Proceedings., 11th IAPR International Conference on**. [S.l.], 1992. p. 58–61.
- BEDERSON, B. B.; WALLACE, R. S.; SCHWARTZ, E. L. A miniature pan-tilt actuator: The spherical pointing motor. **Robotics and Automation, IEEE Transactions on**, IEEE, v. 10, n. 3, p. 298–308, 1994.
- BHATIA, A.; KUMAGAI, M.; HOLLIS, R. Six-stator spherical induction motor for balancing mobile robots. In: IEEE. **Robotics and Automation (ICRA), 2015 IEEE International Conference on**. [S.l.], 2015. p. 226–231.
- CHEN, W.; ZHANG, L.; YAN, L.; LIU, J. Design and control of a three degree-of-freedom permanent magnet spherical actuator. **Sensors and Actuators A: Physical**, Elsevier, v. 180, p. 75–86, 2012.
- CHENEY, M. **Tesla: Man Out of Time**. [S.l.]: Dorset Pr, 1989.
- CHIRIKJIAN, G. S.; STEIN, D. Kinematic design and commutation of a spherical stepper motor. **Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on**, IEEE, v. 4, n. 4, p. 342–353, 1999.
- CHU, J.; NIGUCHI, N.; HIRATA, K. Feedback control of outer rotor spherical actuator using adaptive neuro-fuzzy inference system. In: IEEE. **Sensing Technology (ICST), 2013 Seventh International Conference on**. [S.l.], 2013. p. 401–405.

CHU, J.; NIGUCHI, N.; HIRATA, K. Design and analysis of a new spherical actuator. In: IEEE. **Magnetics Conference (INTERMAG), 2015 IEEE**. [S.l.], 2015. p. 1–1.

DAVEY, K.; VACHTSEVANOS, G. On the control of a novel spherical robotic actuator. In: **1986 25th IEEE Conference on Decision and Control**. [S.l.: s.n.], 1986. p. 415–416.

DAVEY, K.; VACHTSEVANOS, G.; POWERS, R. The analysis of fields and torques in spherical induction motors. **Magnetics, IEEE Transactions on**, IEEE, v. 23, n. 1, p. 273–282, 1987.

DIEN, R.; LUCE, E. **Spherical robotic wrist joint**. Google Patents, 1986. US Patent 4,628,765. Disponível em: <<https://www.google.ch/patents/US4628765>>.

EBIHARA, D.; KATSUYAMA, N.; KAJIOKA, M. An approach to basic design of the pm-type spherical motor. In: IEEE. **Robotics and Automation, 2001. Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on**. [S.l.], 2001. v. 2, p. 1792–1797.

FERNANDES, J.; BRANCO, P. The shell-like spherical induction motor for low-speed traction: Electromagnetic design, analysis and experimental tests. IEEE, 2016.

FITZGERALD, A.; KINGSLEY, J. C., UMANS, SD **Máquinas elétricas**. [S.l.]: Porto Alegre: Bookman, 2006.

FUKAYA, N.; TOYAMA, S.; ASFOUR, T.; DILLMANN, R. Design of the tuat/karlsruhe humanoid hand. In: IEEE. **Intelligent Robots and Systems, 2000.(IROS 2000). Proceedings. 2000 IEEE/RSJ International Conference on**. [S.l.], 2000. v. 3, p. 1754–1759.

GARNER, H.; KLEMENT, M.; LEE, K.-M. Design and analysis of an absolute non-contact orientation sensor for wrist motion control. In: IEEE. **Advanced Intelligent Mechatronics, 2001. Proceedings. 2001 IEEE/ASME International Conference on**. [S.l.], 2001. v. 1, p. 69–74.

GOFUKU, A.; SASAKI, R.; YANO, T.; WADA, Y.; SHIBATA, M. Development of a spherical stepping motor rotating around six axes. **International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics**, IOS Press, v. 39, n. 1-4, p. 905–911, 2012.

GOFUKU, A.; YAMAMOTO, Y.; YANO, T.; KASASHIMA, N. Driving technique of electromagnets to rotate spherical motors based on torque map. In: IEEE. **2016 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM)**. [S.l.], 2016. p. 861–865.

GORDON, G. B.; KNEE, D. L.; BADYAL, R.; HARTLOVE, J. T. **Proximity detector for a seeing eye mouse**. [S.l.]: Google Patents, 2001. US Patent 6,281,882.

GUO, J.; BAK, C.; SON, H. Design of a sensing system for a spherical motor based on hall effect sensors and neural networks. In: IEEE. **Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), 2015 IEEE International Conference on**. [S.l.], 2015. p. 1410–1414.

HAEUSSERMANN, W. The spherical control motor for three axis attitude control of space vehicles. **NASA TM X-50071**, 1959.

HAEUSSERMANN, W. **Velocity measurement system**. Google Patents, 1978. US Patent 4,093,917. Disponível em: <<http://www.google.ch/patents/US4093917>>.

- HALVERSON, R.; COHEN, H. Torque on a spinning hollow sphere in a uniform magnetic field. **IEEE Transactions on Aerospace and Navigational Electronics**, v. 2, n. ANE-11, p. 118–122, 1964.
- HAYKIN, S. **Redes neurais: princípios e prática**. [S.l.]: Bookman Editora, 2007.
- HU, M.; DU, H.; LING, S.-F.; TEO, J.-K. A piezoelectric spherical motor with two degree-of-freedom. **Sensors and Actuators A: Physical**, Elsevier, v. 94, n. 1, p. 113–116, 2001.
- IKESHITA, S.; GOFUKU, A.; KAMEGAWA, T.; NAGAI, T. Development of a spherical motor driven by electro-magnets. **Journal of mechanical science and technology**, Springer, v. 24, n. 1, p. 43–46, 2010.
- JINJUN, G.; KIM, D.-H.; SON, H. Effects of magnetic pole design on orientation torque for a spherical motor. **IEEE/ASME Transactions on Mechatronics**, IEEE, v. 18, n. 4, p. 1420–1425, 2013.
- JR, W. H. H.; BUCK, J. A. **Eletromagnetismo**. [S.l.]: McGraw Hill Brasil, 2013.
- KANEKO, K.; YAMADA, I.; ITAO, K. A spherical dc servo motor with three degrees of freedom. **Journal of dynamic systems, measurement, and control**, American Society of Mechanical Engineers, v. 111, n. 3, p. 398–402, 1989.
- KASASHIMA, N.; ASHIDA, K.; YANO, T.; GOFUKU, A. Posture monitoring method of a multi-degree-of-freedom spherical motor by using image processing. 2014.
- KASASHIMA, N.; ASHIDA, K.; YANO, T.; GOFUKU, A.; SHIBATA, M. Torque control method of an electromagnetic spherical motor using torque map. IEEE, 2016.
- KEYS, A.; TINKER, M.; SIVAK, A. George c. marshall space flight center research and technology report 2014 "spherically actuated motor". NASA/TM, p. 120–121, 2015.
- KIM, D.-K.; YOON, H.; KANG, W.-Y.; KIM, Y.-B.; CHOI, H.-T. Development of a spherical reaction wheel actuator using electromagnetic induction. **Aerospace Science and Technology**, Elsevier, v. 39, p. 86–94, 2014.
- KIM, H.; KIM, H.; AHN, D.; GWEON, D. Design of a new type of spherical voice coil actuator. **Sensors and Actuators A: Physical**, Elsevier, v. 203, p. 181–188, 2013.
- KIM, H. Y.; KIM, H.; GWEON, D.-G.; JEONG, J. Development of a novel spherical actuator with two degrees of freedom. **Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on**, IEEE, v. 20, n. 2, p. 532–540, 2015.
- KUMAGAI, M.; HOLLIS, R. L. Development and control of a three dof spherical induction motor. In: IEEE. **Robotics and Automation (ICRA), 2013 IEEE International Conference on**. [S.l.], 2013. p. 1528–1533.
- LEE, H.-J.; PARK, H.-J.; RYU, G.; OH, S.-Y.; LEE, J. Performance improvement of operating three-degree-of-freedom spherical permanent-magnet motor. **IEEE Transactions on magnetics**, IEEE, v. 48, n. 11, p. 4654–4657, 2012.
- LEE, H.-J.; PARK, H.-J.; WON, S.-H.; RYU, G.-H.; LEE, J. Improvements of performance of multi-dof spherical motor by double air-gap feature. **Journal of Electrical Engineering and Technology**, The Korean Institute of Electrical Engineers, v. 8, n. 1, p. 90–96, 2013.

LEE, K. **Orientation sensing system and method for a spherical body**. Google Patents, 1994. US Patent 5,319,577. Disponível em: <<https://www.google.com/patents/US5319577>>.

LEE, K.-M.; BAI, K.; LIM, J. Dipole models for forward/inverse torque computation of a spherical motor. **IEEE/ASME Transactions on Mechatronics**, IEEE, v. 14, n. 1, p. 46–54, 2009.

LEE, K.-M.; KWAN, C.-K. Design concept development of a spherical stepper for robotic applications. **Robotics and Automation, IEEE Transactions on**, IEEE, v. 7, n. 1, p. 175–181, 1991.

LEE, K.-M.; LONI, J.; SON, H. Design method for prototyping a cost-effective vr spherical motor. In: IEEE. **Robotics, Automation and Mechatronics, 2004 IEEE Conference on**. [S.l.], 2004. v. 1, p. 542–547.

LEE, K.-M.; PEI, J.; ROTH, R. Kinematic analysis of a three-degrees-of-freedom spherical wrist actuator. **Mechatronics**, Elsevier, v. 4, n. 6, p. 581–605, 1994.

LEE, K.-M.; SON, H.; JONI, J. *et al.* Concept development and design of a spherical wheel motor (swm). In: IEEE; 1999. **IEEE International Conference on Robotics and Automation**. [S.l.], 2005. v. 4, p. 3652.

LEE, K.-M.; VACHTSEVANOS, G.; KWAN, C. Development of a spherical stepper wrist motor. **Journal of Intelligent and Robotic Systems**, Springer, v. 1, n. 3, p. 225–242, 1988.

LEE, K.-M.; ZHOU, D. A real-time optical sensor for simultaneous measurement of three-dof motions. **IEEE/ASME Transactions on Mechatronics**, IEEE, v. 9, n. 3, p. 499–507, 2004.

LI, B.; LI, G.-D.; LI, H.-F. Magnetic field analysis of 3-dof permanent magnetic spherical motor using magnetic equivalent circuit method. **IEEE Transactions on Magnetics**, IEEE, v. 47, n. 8, p. 2127–2133, 2011.

LI, H.; SHEN, Y. Thermal analysis of the permanent-magnet spherical motor. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, IEEE, v. 30, n. 3, p. 991–998, 2015.

LI, Z. Robust control of pm spherical stepper motor based on neural networks. **Industrial Electronics, IEEE Transactions on**, IEEE, v. 56, n. 8, p. 2945–2954, 2009.

LI, Z.; WANG, Y. Finite element analysis and structural optimization of a permanent magnet spherical actuator. **Elektronika ir Elektrotechnika**, v. 114, n. 8, p. 67–72, 2011.

LI, Z.; WANG, Y.; ZHAO, Z. Computation and analysis of a novel spherical actuator based on 3d finite element simulation. **Journal of Information & Computational Science**, v. 7, n. 12, p. 2410–2419, 2010.

LIM, C. K.; CHEN, I. M. A novel 3-dof sensing methodology for spherical actuator. In: IEEE. **Advanced intelligent mechatronics, 2007 IEEE/ASME international conference on**. [S.l.], 2007. p. 1–6.

LIM, C. K.; CHEN, I.-M.; YAN, L.; LUO, Z. A novel approach for positional sensing of a spherical geometry. **Sensors and Actuators A: Physical**, Elsevier, v. 168, n. 2, p. 328–334, 2011.

MARSHALL. **Innovation Award - pg.05**. 2015. Disponível em: <<http://www.nasa.gov/sites/default/files/files/star150204a.pdf>>.

MASHIMO, T.; AWAGA, K.; TOYAMA, S. Development of a spherical ultrasonic motor with an attitude sensing system using optical fibers. In: IEEE. **Robotics and Automation, 2007 IEEE International Conference on**. [S.l.], 2007. p. 4466–4471.

MENG, Y.; CHEN, W.; WANG, H.; LIU, J.; WU, X. Closed-loop control of spherical actuator based on voltage model. In: IEEE. **Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2012 7th IEEE Conference on**. [S.l.], 2012. p. 319–323.

NAGASAWA, H.; HONDA, S. *et al.* Development of a spherical motor manipulated by four wires. In: **Proceedings of American Society for Precision Engineering**. [S.l.: s.n.], 2000. v. 22, p. 219–221.

NANODOTS GYRO Nano Magnetics Ltd. 2014. <<http://nanodots.com/gyro.html>>. Accessed: 2015-01-30.

NETO, L. M.; MENDES, R.; ANDRADE, D. Spherical motor-a three-dimensional position servo. In: IET. **Electrical Machines and Drives, 1995. Seventh International Conference on (Conf. Publ. No. 412)**. [S.l.], 1995. p. 227–231.

NINHUIJS, B. van; JANSEN, J.; GYSEN, B.; LOMONOVA, E. Multi-degree-of-freedom spherical permanent-magnet gravity compensator for mobile arm support systems. **Industry Applications, IEEE Transactions on, IEEE**, v. 50, n. 6, p. 3628–3636, 2014.

NISHIURA, Y.; HIRATA, K.; OYA, K. Optimization of stator pole arrangement for 3-dof spherical actuator using genetic algorithm. In: IEEE. **Magnetics Conference (INTERMAG), 2015 IEEE**. [S.l.], 2015. p. 1–1.

ONER, Y.; CETIN, E.; OZTURK, H. K.; YILANCI, A. Design of a new three-degree of freedom spherical motor for photovoltaic-tracking systems. **Renewable Energy**, Elsevier, v. 34, n. 12, p. 2751–2756, 2009.

PARK, H.-J.; LEE, H.-J.; CHO, S.-Y.; AHN, H.-W.; LEE, K.-D.; PARK, C.-Y.; WON, S.-H.; LEE, J. A performance study on a permanent magnet spherical motor. **IEEE Transactions on Magnetics**, IEEE, v. 49, n. 5, p. 2307–2310, 2013.

PEEPLER, S. **Spherically Actuated Motor (SAM)**. 2014. Disponível em: <[http://nasapeople.nasa.gov/awards/narratives/02-%20Spherically%20Actuated%20Motor%20\(MSFC\)%20LFFS.pdf](http://nasapeople.nasa.gov/awards/narratives/02-%20Spherically%20Actuated%20Motor%20(MSFC)%20LFFS.pdf)>.

PRINTART. **PAN3101 Low Cost Optical Mouse Sensor**. [S.l.]: Datasheet, 2005.

PURWANTO, E.; TOYAMA, S. Development of an ultrasonic motor as a fine-orienting stage. **Robotics and Automation, IEEE Transactions on, IEEE**, v. 17, n. 4, p. 464–471, 2001.

QIAN, Z.; WANG, Q.; GUO, X.; LI, G.; MA, S. Research of orientation detection method for spherical motor and effect on pd control system based on machine vision. In: IEEE. **Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2014 17th International Conference on**. [S.l.], 2014. p. 2186–2191.

- QIAN, Z.; WANG, Q.; JU, L.; WANG, A.; LIU, J. Torque modeling and control algorithm of a permanent magnetic spherical motor. In: IEEE. **Electrical Machines and Systems, 2009. ICEMS 2009. International Conference on.** [S.l.], 2009. p. 1–6.
- QIAN, Z.; WANG, Q.; LI, G.; GUO, X.; HU, C.; YAN, H. Design and analysis of permanent magnetic spherical motor with cylindrical poles. In: IEEE. **Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2013 International Conference on.** [S.l.], 2013. p. 644–649.
- ROSSINI, L.; ONILLON, E.; BOLETIS, A.; MINGARD, S.; WAWRZASZEK, R.; SERIN, J.; ORTEGA, C. Development and closed-loop experimental results of a reaction sphere elegant breadboard. 2015b.
- ROSSINI, L.; ONILLON, E.; CHETELAT, O.; ALLEGRANZA, C. Electromagnetic force simulations on a reaction sphere for satellite attitude control. In: CONSOL. [S.l.], 2010.
- ROSSINI, L.; ONILLON, E.; CHETELAT, O.; PERRIARD, Y. Hybrid fem-analytical force and torque models of a reaction sphere actuator. In: IEEE. **Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), 2013 IEEE International.** [S.l.], 2013. p. 694–700.
- ROSSINI, L.; ONILLON, E.; CHÉTELAT, O.; PERRIARD, Y. Closed-loop magnetic bearing and angular velocity control of a reaction sphere actuator. **Mechatronics**, Elsevier, v. 30, p. 214–224, 2015a.
- SABONNADIÈRE, J.; FOGGIA, A. **Convertisseur électromécanique à plusieurs degrés de liberté.** Google Patents, 1984. EP Patent App. EP19,830,402,345. Disponível em: <<http://www.google.com.au/patents/EP0113267A1?cl=fr>>.
- SABONNADIÈRE, J.; FOGGIA, A. **Convertisseur électromécanique à plusieurs degrés de liberté.** Google Patents, 1986. EP Patent 0,113,267. Disponível em: <<http://www.google.com.na/patents/EP0113267B1?cl=un>>.
- SADIKU, M. N. **Elementos de Eletromagnetismo. Terceira edição, 2004.** [S.l.]: Bookman, 2004.
- SENS, E. M. Avanços tecnológicos nos motores elétricos. 2001.
- SHACKELFORD, J. F. **Ciência dos materiais.** [S.l.]: Pearson Prentice Hall, 2008.
- SHAN, W.; GOFUKU, A.; SHIBATA, M.; YANO, T.; KAMEGAWA, T. A stirrer driven by a spherical stepping motor. **PRZEGLAD ELEKTROTECHNICZNY (Electrical Review)**, v. 88, n. 7, p. 48–51, 2012.
- SHIGEKI, T.; GUOQIANG, Z.; OSAMU, M. Development of new generation spherical ultrasonic motor. In: IEEE. **Robotics and Automation, 1996. Proceedings., 1996 IEEE International Conference on.** [S.l.], 1996. v. 3, p. 2871–2876.
- SOKOLOV, S.; TRIFONOV, O.; YAROSHEVSKY, V. Control system for spherical direct drive actuators with hall sensors [mobile robots]. In: IEEE. **Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems, 1999. MFI'99. Proceedings. 1999 IEEE/SICE/RSJ International Conference on.** [S.l.], 1999. p. 183–188.
- SOKOLOV, S. M.; TRIFONOV, O. V.; YAROSHEVSKY, V. Research of spherical direct drive actuators control systems. In: IEEE. **Robotics and Automation, 2001. Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on.** [S.l.], 2001. v. 2, p. 1780–1785.



- SON, H.; LEE, K.-M. Open-loop controller design and dynamic characteristics of a spherical wheel motor. **IEEE Transactions on industrial electronics**, IEEE, v. 57, n. 10, p. 3475–3482, 2010.
- SON, H.; LEE, K.-M. Two-dof magnetic orientation sensor using distributed multipole models for spherical wheel motor. **Mechatronics**, Elsevier, v. 21, n. 1, p. 156–165, 2011.
- SON, H.; LEE, K.-M. Control system design and input shape for orientation of spherical wheel motor. **Control Engineering Practice**, Elsevier, v. 24, p. 120–128, 2014.
- SOUZA, K. N.; RICARDO, S. T.; FERNANDES, T. R.; AGUIAR, V. P.; SILVA, F. B. A new topology of a spherical actuator. In: IEEE. **2015 IEEE 13th Brazilian Power Electronics Conference and 1st Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC)**. [S.l.], 2015. p. 1–4.
- STRUMIK, M.; WAWRZASZEK, R.; BANASZKIEWICZ, M.; SEWERYN, K.; SIDZ, M.; ONILLON, E.; ROSSINI, L. Analytical model of eddy currents in a reaction sphere actuator. **IEEE Transactions on Magnetics**, IEEE, v. 50, n. 6, p. 1–7, 2014.
- TOYAMA, S.; HATAE, S.; NONAKA, M. Development of multi-degree of freedom spherical ultrasonic motor. In: IEEE. **Advanced Robotics, 1991.'Robots in Unstructured Environments', 91 ICAR., Fifth International Conference on**. [S.l.], 1991. p. 55–60.
- TSUKANO, M.; SAKAIDANI, Y.; HIRATA, K.; NIGUCHI, N.; MAEDA, S.; ZAINI, A. Analysis of 2-degree of freedom outer rotor spherical actuator employing 3-d finite element method. **IEEE Transactions on Magnetics**, IEEE, v. 49, n. 5, p. 2233–2236, 2013.
- TZOU, H. S.; FUKUDA, T. **Precision Sensors, actuators and systems**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2012. v. 17.
- UENO, T.; SAITO, C.; IMAIZUMI, N.; HIGUCHI, T. Miniature spherical motor using iron–gallium alloy (galfenol). **Sensors and Actuators A: Physical**, Elsevier, v. 154, n. 1, p. 92–96, 2009.
- UM, Y.; YANO, T. Characteristic of torque on spherical stepping motor based on hexahedron-octahedron structure. In: IEEE. **Mechatronics and Automation, 2009. ICMA 2009. International Conference on**. [S.l.], 2009. p. 170–175.
- VACHTSEVANOS, G. J.; DAVEY, K.; LEE, K.-M. Development of a novel intelligent robotic manipulator. **Control Systems Magazine, IEEE**, IEEE, v. 7, n. 3, p. 9–15, 1987.
- VACHTSEVANOS, G. J.; DAVEY, K. R. **Spherical motor particularly adapted for robotics**. [S.l.]: Google Patents, 1988. US Patent 4,739,241.
- WANG, J.; JEWELL, G. W.; HOWE, D. Analysis of a spherical permanent magnet actuator. **Journal of applied physics**, AIP Publishing, v. 81, n. 8, p. 4266–4268, 1997.
- WANG, J.; JEWELL, G. W.; HOWE, D. Development of a novel spherical permanent magnet actuator. In: IET. **New Topologies for Permanent Magnet Machines (Digest No: 1997/090), IEE Colloquium on**. [S.l.], 1997. p. 8–1.
- WANG, J.; JEWELL, G. W.; HOWE, D. Modelling of a novel spherical permanent magnet actuator. In: IEEE. **Robotics and Automation, 1997. Proceedings., 1997 IEEE International Conference on**. [S.l.], 1997. v. 2, p. 1190–1195.

WANG, J.; JEWELL, G. W.; HOWE, D. A novel spherical actuator: design and control. **Magnetics, IEEE Transactions on**, IEEE, v. 33, n. 5, p. 4209–4211, 1997.

WANG, J.; JEWELL, G. W.; HOWE, D. Analysis, design and control of a novel spherical permanent-magnet actuator. In: IET. **Electric Power Applications, IEE Proceedings-**. [S.l.], 1998. v. 145, n. 1, p. 61–71.

WANG, J.; JEWELL, G. W.; HOWE, D. Spherical actuators with multiple degrees-of-freedom. In: IET. **Limited Motion Electrical Actuation Systems (Digest No. 1998/494), IEE Colloquium on**. [S.l.], 1998. p. 8–1.

WANG, J.; MITCHELL, K.; JEWELL, G. W.; HOWE, D. Multi-degree-of-freedom spherical permanent magnet motors. In: IEEE. **Robotics and Automation, 2001. Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on**. [S.l.], 2001. v. 2, p. 1798–1805.

WANG, J.; WANG, W.; JEWELL, G. W.; HOWE, D. A novel spherical permanent magnet actuator with three degrees-of-freedom. **Magnetics, IEEE Transactions on**, IEEE, v. 34, n. 4, p. 2078–2080, 1998.

WANG, Q.; QIAN, Z.; LI, G. Vision based orientation detection method and control of a spherical motor. In: IEEE. **Circuits and Systems (MWSCAS), 2010 53rd IEEE International Midwest Symposium on**. [S.l.], 2010. p. 1145–1148.

WANG, W.; WANG, J.; JEWELL, G.; HOWE, D. Design and control of a novel spherical permanent magnet actuator with three degrees of freedom. **Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on**, IEEE, v. 8, n. 4, p. 457–468, 2003.

WANG, Y.; WANG, Q.; QIAN, Z.; WEN, Y.; MA, S. Rotor orientation detection method of spherical motor based on single 2-dof optical sensor. In: IEEE. **Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2014 17th International Conference on**. [S.l.], 2014. p. 2182–2185.

WAWRZASZEK, R.; STRUMIK, M.; SEWERYN, K.; SIDZ, M.; BANASZKIEWICZ, M.; ROSSINI, L.; ONILLON, E. Electromagnetic compatibility problems of elsa—novel component for spacecraft attitude control system based on concept of spherical actuator. In: IEEE. **Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR), 2013 18th International Conference on**. [S.l.], 2013. p. 572–577.

WEEK, E.; REINARTZ, T.; HENNEBERGER, G.; DONCKER, R. D. Design of a spherical motor with three degrees of freedom. **CIRP Annals-Manufacturing Technology**, Elsevier, v. 49, n. 1, p. 289–294, 2000.

WEN, Y.; WANG, Q.; LI, G.; GUO, X. Adaptive fuzzy tracking control based on backstepping for permanent magnet spherical motor. In: IEEE. **Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2014 17th International Conference on**. [S.l.], 2014. p. 2176–2181.

WILLIAMS, F.; LAITHWAITE, E. A brushless variable-speed induction motor. **Proceedings of the IEE-Part A: Power Engineering**, IET, v. 102, n. 2, p. 203–210, 1954.

WILLIAMS, F.; LAITHWAITE, E.; EASTHAM, J. Development and design of spherical induction motors. **Proceedings of the IEE-Part A: Power Engineering**, IET, v. 106, n. 30, p. 471–484, 1959.

WILLIAMS, F.; LAITHWAITE, E.; PIGGOTT, L. Brushless variable-speed induction motors. **Proceedings of the IEE-Part A: Power Engineering**, IET, v. 104, n. 14, p. 102–118, 1956.

XIA, C.; SONG, P.; LI, H.; LI, B.; SHI, T. Research on torque calculation method of permanent-magnet spherical motor based on the finite-element method. **IEEE Transactions on Magnetics**, IEEE, v. 45, n. 4, p. 2015–2022, 2009.

XIN, J.; XIA, C.; LI, H.; SHI, T. A novel orientation measurement using optical sensor for spherical motor. **Science China Technological Sciences**, Springer, v. 56, n. 6, p. 1330–1339, 2013.

YAN, L.; CHEN, I.; LIM, C. K.; YANG, G.; LIN, W.; LEE, K.-M. *et al.* Design and analysis of a permanent magnet spherical actuator. **Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on**, IEEE, v. 13, n. 2, p. 239–248, 2008.

YAN, L.; CHEN, I.-M.; LIM, C. K.; YANG, G.; LIN, W.; LEE, K.-M. Torque modeling of a spherical actuator based on lorentz force law. In: IEEE. **Robotics and Automation, 2005. ICRA 2005. Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on**. [S.l.], 2005. p. 3646–3651.

YAN, L.; CHEN, I.-M.; LIM, C. K.; YANG, G.; LEE, K.-M. **Design, modeling and experiments of 3-DOF electromagnetic spherical actuators**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2011. v. 4.

YAN, L.; CHEN, I.-M.; LIM, C. K.; YANG, G.; LIN, W.; LEE, K.-M. Hybrid torque modeling of spherical actuators with cylindrical-shaped magnet poles. **Mechatronics**, Elsevier, v. 21, n. 1, p. 85–91, 2011.

YAN, L.; CHEN, I.-M.; YANG, G.; LEE, K.-M. Analytical and experimental investigation on the magnetic field and torque of a permanent magnet spherical actuator. **IEEE/ASME Transactions on Mechatronics**, IEEE, v. 11, n. 4, p. 409–419, 2006.

YAN, L.; LIU, D.; JIAO, Z.; CHEN, C.-Y.; CHEN, I.-M. Modeling of magnetic field and design optimization for permanent-magnet spherical actuator in three dimensional space. In: IEEE. **Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2015 IEEE 10th Conference on**. [S.l.], 2015. p. 1904–1909.

YAN, L.; MENG, H.; YAO, N.; JIAO, Z. Magnetic field analysis of electromagnetic spherical actuators with multiple radial poles. In: IEEE. **Industrial Informatics (INDIN), 2012 10th IEEE International Conference on**. [S.l.], 2012. p. 675–677.

YAN, L.; WU, Z.; JIAO, Z.; CHEN, C.-Y.; CHEN, I.-M. Equivalent energized coil model for magnetic field of permanent-magnet spherical actuators. **Sensors and Actuators A: Physical**, Elsevier, v. 229, p. 68–76, 2015.

YAN, L.; ZHU, B.; JIAO, Z.; CHEN, C.-Y.; CHEN, I.-M. An orientation measurement method based on hall-effect sensors for permanent magnet spherical actuators with 3d magnet array. **Scientific reports**, Nature Publishing Group, v. 4, p. 6756, 2014.

YAN, L.; ZHU, B.; JIAO, Z.; CHEN, C.-Y.; CHEN, M. Augmented pd control method for permanent magnet spherical actuators with 3d magnet array. In: IEEE. **Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2015 IEEE 10th Conference on**. [S.l.], 2015. p. 1676–1681.

YANG, C. I.; BAEK, Y. S. Design and control of the 3 degrees of freedom actuator by controlling the electromagnetic force. **IEEE Transactions on Magnetics**, IEEE, v. 35, n. 5, p. 3607–3609, 1999.

YANO, T.; KUBOTA, Y.; SHIKAYAMA, T.; SUZUKI, T. Basic characteristics of a multi-pole spherical synchronous motor. In: IEEE. **Micro-NanoMechatronics and Human Science, 2007. MHS'07. International Symposium on**. [S.l.], 2007. p. 383–388.

ZHANG, L.; CHEN, W.; LIU, J.; WU, X. Analysis and decoupling control of a permanent magnet spherical actuator. **Review of Scientific Instruments**, AIP Publishing, v. 84, n. 12, p. 125001, 2013.

ZHANG, L.; CHEN, W.; LIU, J.; WU, X.; CHEN, I.-M. Accuracy enhancement of the spherical actuator with a two-level geometric calibration method. **Chinese Journal of Aeronautics**, Elsevier, v. 27, n. 2, p. 328–337, 2014.

ZHANG, L.; CHEN, W.; LIU, J.; WEN, C. A robust adaptive iterative learning control for trajectory tracking of permanent-magnet spherical actuator. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, IEEE, v. 63, n. 1, p. 291–301, 2016.

ZHENG, L. Neural network based multisensor fusion in a novel permanent magnet multi-dof actuator orientation detection system. **International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems**, v. 5, n. 4, p. 911–926, 2012.

## APÊNDICE A – CAMPO MAGNÉTICO

Uma carga em movimento contínuo gera um Campo Magnético,  $\mathbf{H}$ , fixo no espaço. Fios, espiras ou bobinas nas quais passa uma corrente contínua (CC) gera no espaço este Campo Magnético, que possui direção e sentido no espaço. Nas subsecções seguintes é mostrado o cálculo deste Campo Magnético.

### A.1 Campo Magnético de uma Espira

Uma espira é um fio que possui uma única volta, formada por um fio pelo qual pode passar uma corrente especificada pelo usuário. Quando esta corrente (contínua) passa por ela, gera um campo magnético no espaço à sua volta. Como exemplo, será demonstrado o cálculo do Campo Magnético que dista  $h$  do plano da espira e está concêntrico à espira.

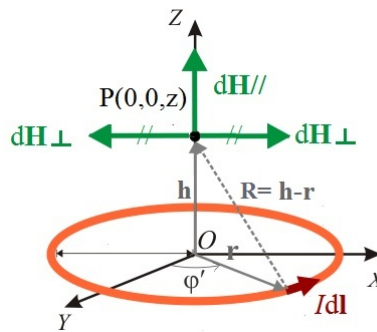


Figura 62 – Espira no plano horizontal x,y.

Decompondo-se o Campo Magnético  $d\mathbf{H}$  em duas componentes, uma é paralela ao eixo central da espira  $d\mathbf{H} \parallel$  e outra é perpendicular ao eixo  $d\mathbf{H} \perp$ . Levando-se em conta a simetria, a soma das componentes perpendiculares produzidas por todos os elementos  $I d\mathbf{l}$  da espira é zero. Assim, só são consideradas as componentes paralelas, conforme a equação (A.1).

$$\mathbf{H} = \int d\mathbf{H}_{paralelo} = \int d\mathbf{H}_z = \int d\mathbf{H} \mathbf{a}_z \quad (\text{A.1})$$

Verifica-se pela Figura 62, que o elemento  $d\mathbf{l}$  da espira está a uma distância  $R$  do ponto  $P$ , onde se deseja encontrar o Campo Magnético, que é dado pela contribuição dos Campos Elementares gerados pelos elementos de corrente  $I d\mathbf{l}$ , Lei de Biot-Savart equação (A.2).

$$d\mathbf{H} = \frac{I_1 d\mathbf{L}_1 \times \mathbf{a}_{R12}}{4\pi R_{12}^2} = \frac{I_1 d\mathbf{L}_1 \times \mathbf{R}}{4\pi R^3} \quad (\text{A.2})$$

Na qual,  $d\mathbf{l} = \rho d\phi \mathbf{a}_\phi$ ,  $\mathbf{R} = (0, 0, h) - (x, y, 0) = -\rho \mathbf{a}_\rho + h \mathbf{a}_z$

$$d\mathbf{l} \times \mathbf{R} = \begin{vmatrix} \mathbf{a}_\rho & \mathbf{a}_\phi & \mathbf{a}_z \\ 0 & \rho d\phi & 0 \\ -\rho & 0 & h \end{vmatrix} = \rho h d\phi \mathbf{a}_\rho + \rho^2 d\phi \mathbf{a}_z \quad (\text{A.3})$$

$$d\mathbf{H} = \frac{I}{4\pi[\rho^2 + h^2]^{3/2}} (\rho h d\phi \mathbf{a}_\rho + \rho^2 d\phi \mathbf{a}_z) \quad (\text{A.4})$$

$$d\mathbf{H} = dH_{rho} \mathbf{a}_{rho} + dH_z \mathbf{a}_z \quad (\text{A.5})$$

Conforme citado acima, na equação (A.1), temos:  $dH_\rho \mathbf{a}_\rho = 0 \Rightarrow \mathbf{H}_\rho = 0$

Então,

$$\mathbf{H} = \int dH \mathbf{a}_z = \int_0^{2\pi} \frac{I \rho^2 d\phi}{4\pi[\rho^2 + h^2]^{3/2}} \mathbf{a}_z = \frac{I \rho^2 2\pi}{4\pi[\rho^2 + h^2]^{3/2}} \mathbf{a}_z \quad (\text{A.6})$$

Assim, para P pertencente ao eixo central da espira de distância h do plano, resulta que o Campo Magnético segue a equação (A.7) .

$$\mathbf{H} = \frac{I \rho^2}{2[\rho^2 + h^2]^{3/2}} \mathbf{a}_z \quad (\text{A.7})$$

Para h=0, da equação (A.7), chega-se a

$$\mathbf{H} = \frac{I}{2\rho} \quad (\text{A.8})$$

Enquanto que para  $h \gg \rho$ , da equação (A.7), chega-se a

$$\mathbf{H} = \frac{I \rho^2}{2h^3} \quad (\text{A.9})$$

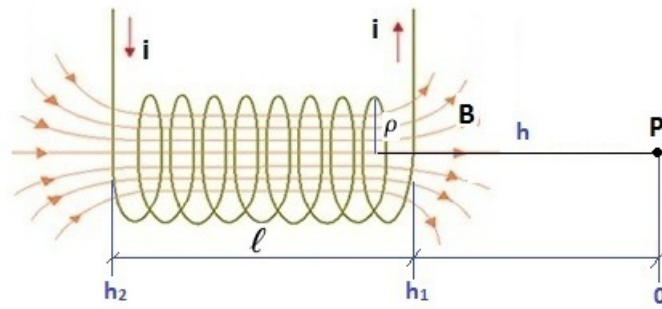


Figura 63 – Bobina compacta composta de n espiras e uma camada.

## A.2 Campo Magnético de uma Bobina

Para o caso em que existam várias espiras formando uma bobina de uma única camada, para um ponto P distante de  $h_1$  da primeira espira e de  $h_2$  da última, conforme a Figura 63. O comprimento da bobina é  $\ell = h_2 - h_1$ .

Para calcular a Intensidade de Campo Magnético de uma bobina Figura 63 de uma única camada no ponto P, podemos usar a equação (A.7), de modo que a corrente considerada deve ser um elemento de corrente linear  $I' = I/d_\phi$  para poder ser realizada a integração, de modo que:

$$\mathbf{H}_z = \int_{h_1}^{h_2} \frac{I' \rho^2}{2[\rho^2 + h^2]^{3/2}} dh \quad (\text{A.10})$$

Sendo,

$f_k$  = fator de empacotamento das espiras ( $f_k < 1$ ).

$d_\phi$  = diâmetro do fio da bobina.

$I$  = corrente na seção do fio.

$I'$  = densidade de corrente linear [A/m].

Então,

$$\mathbf{H}_z = \frac{f_k I}{d_\phi} \cdot \frac{\rho^2}{2} \cdot \int_{h_1}^{h_2} \frac{1}{[\rho^2 + h^2]^{3/2}} dh \quad (\text{A.11})$$

$$\mathbf{H}_z = \frac{f_k I}{d_\phi} \cdot \frac{\rho^2}{2} \cdot \left[ \frac{1}{\rho^2 [\rho^2 + h^2]^{1/2}} \right]_{h=h_1}^{h=h_2} \quad (\text{A.12})$$

$$\mathbf{H}_z = \frac{f_k I}{2d_\phi} \cdot \left[ \frac{h_2}{(\rho^2 + h_2^2)^{1/2}} - \frac{h_1}{(\rho^2 + h_1^2)^{1/2}} \right] \quad (\text{A.13})$$

Assim sendo, para se calcular a Intensidade de Campo Magnético de uma bobina de várias camadas em um ponto P, pode-se usar a equação (A.7), considerando-se, neste caso, um elemento de corrente volumétrica  $I'' = I/(\pi r_c^2)$ .

$$\mathbf{H}_z = \int_{\rho_1}^{\rho_2} \int_{h_1}^{h_2} \frac{I'' \rho^2}{2[\rho^2 + h^2]^{3/2}} dh d\rho \quad (\text{A.14})$$

Em que,

$\rho_2$  = raio externo da bobina.

$\rho_1$  = raio interno da bobina.

$r_c = d_\phi/2$  = raio do fio utilizado na bobina.

$I''$  = densidade de corrente superficial  $[A/m^2]$ .

$f_k$  = fator de empacotamento das espiras ( $f_k < 1$ ).

Então:

$$\mathbf{H}_z = \frac{f_k I}{2\pi r_c^2} \cdot \left[ \int_{\rho_1}^{\rho_2} \frac{h_2}{(\rho^2 + h_2^2)^{1/2}} d\rho - \int_{\rho_1}^{\rho_2} \frac{h_1}{(\rho^2 + h_1^2)^{1/2}} d\rho \right] \quad (\text{A.15})$$

$$\mathbf{H}_z = \frac{f_k I}{2\pi r_c^2} \cdot \left( \left[ h_2 \cdot \sinh^{-1} \frac{\rho}{h_2} \right]_{\rho_1}^{\rho_2} - \left[ h_1 \cdot \sinh^{-1} \frac{\rho}{h_1} \right]_{\rho_1}^{\rho_2} \right) \quad (\text{A.16})$$

$$\mathbf{H}_z = \frac{f_k I}{2\pi r_c^2} \cdot \left( \left[ h_2 \cdot \sinh^{-1} \frac{\rho_2}{h_2} \right] - \left[ h_2 \cdot \sinh^{-1} \frac{\rho_1}{h_2} \right] - \left[ h_1 \cdot \sinh^{-1} \frac{\rho_2}{h_1} \right] + \left[ h_1 \cdot \sinh^{-1} \frac{\rho_1}{h_1} \right] \right) \quad (\text{A.17})$$

Fica, então, a equação (A.17), como a equação que define a intensidade do Campo Magnético da Bobina no ponto P distante de  $h_1$  da face da bobina conforme especificado na Figura 63.



### A.3 Ímãs Permanentes - Neodímio

O uso de ímã permanente é indispensável para o desenvolvimento do projeto (*spherical motor*). Isso por ele produzir o seu próprio campo magnético constante, com seus polos norte e sul (SHACKELFORD, 2008).

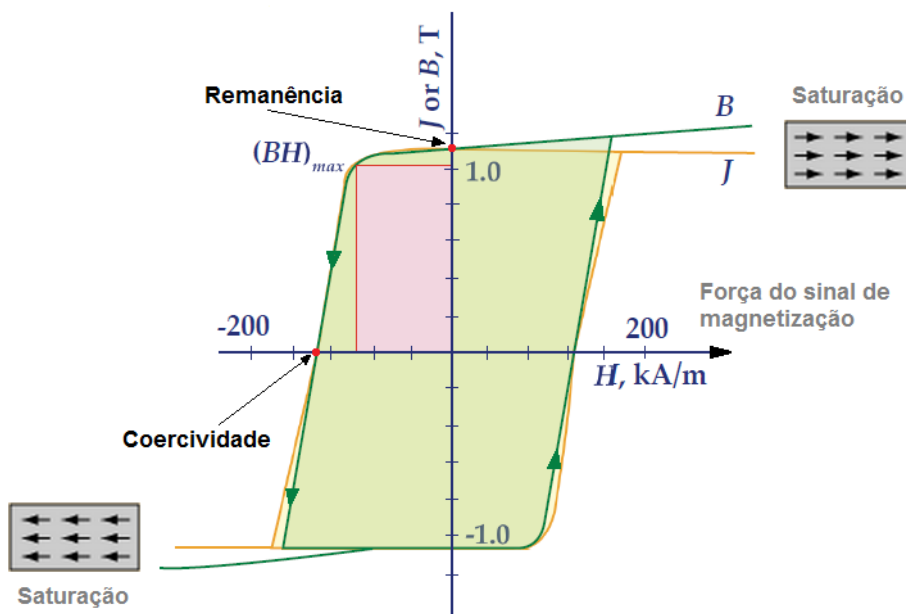
O fluxo magnético ( $\emptyset$ ) é representado por um conjunto de linhas de força, sendo a unidade de fluxo magnético no sistema internacional de unidades de medidas (SI) o Weber (Wb). A força magnética em um ímã não é homogênea. Tem maior concentração nas extremidades do ímã e mais fraca no centro do seu corpo. Os ímãs artificiais podem ser magnetos permanentes ou temporários dependendo de sua capacidade de se manter magnetizado. Um material ferromagnético quando desmagnetizado (perde o magnetismo), ele retém uma pequena parcela conhecida como remanência. Este residual pode ir a zero quando aplicando um campo inverso, a intensidade de campo necessário para desmagnetizar o ímã é chamado coercividade. Quando um campo magnético alternado é aplicado em um material ferromagnético sua magnetização irá alterar na faixa do ciclo de histerese, conforme Figura 64 (FITZGERALD; KINGSLEY, 2006).

O fluxo magnético ( $\phi$ ) é representado por um conjunto de linhas de força, sendo a unidade de fluxo magnético no sistema internacional de unidades de medidas (SI) o Weber (Wb). A força magnética em um ímã não é homogênea. Tem maior concentração nas extremidades do ímã e é mais fraca no centro do seu corpo. Os ímãs artificiais podem ser magnetos permanentes ou temporários, dependendo de sua capacidade de se manterem magnetizados. Um material ferromagnético quando desmagnetizado (perde o magnetismo) retém uma pequena parcela de magnetismo conhecida como remanência. Este residual pode ir a zero quando aplicado um campo inverso, a intensidade de campo necessário para desmagnetizar o ímã cuja intensidade é chamadaa coercividade. Quando um campo magnético alternado é aplicado em um material ferromagnético, sua magnetização irá alterar na faixa do ciclo de histerese, conforme a Figura 64 (FITZGERALD; KINGSLEY, 2006).

Para um ímã permanente ser considerado de boa qualidade, deve produzir um campo magnético de intensidade elevada, com massa reduzida, e deve ser estável contra as influências que possam desmagnetizá-lo. Isso depende de sua composição e método envolvidos no seu processo de fabricação.

Durante o século XX, houve um crescimento de 200 vezes na melhoria de ímãs permanentes. O produto energético dos aços magnéticos em 1900 d.C. era aproximadamente de  $2 \text{ kJ}/\text{m}^3$ , enquanto que os ímãs comerciais atualmente excedem os  $400 \text{ kJ}/\text{m}^3$ . A coercividade

Figura 64 – Densidade de fluxo  $B$  e polarização magnética  $J$  versus força do campo magnético  $H$ , para ímãs permanentes de baixa coercividade (aços)

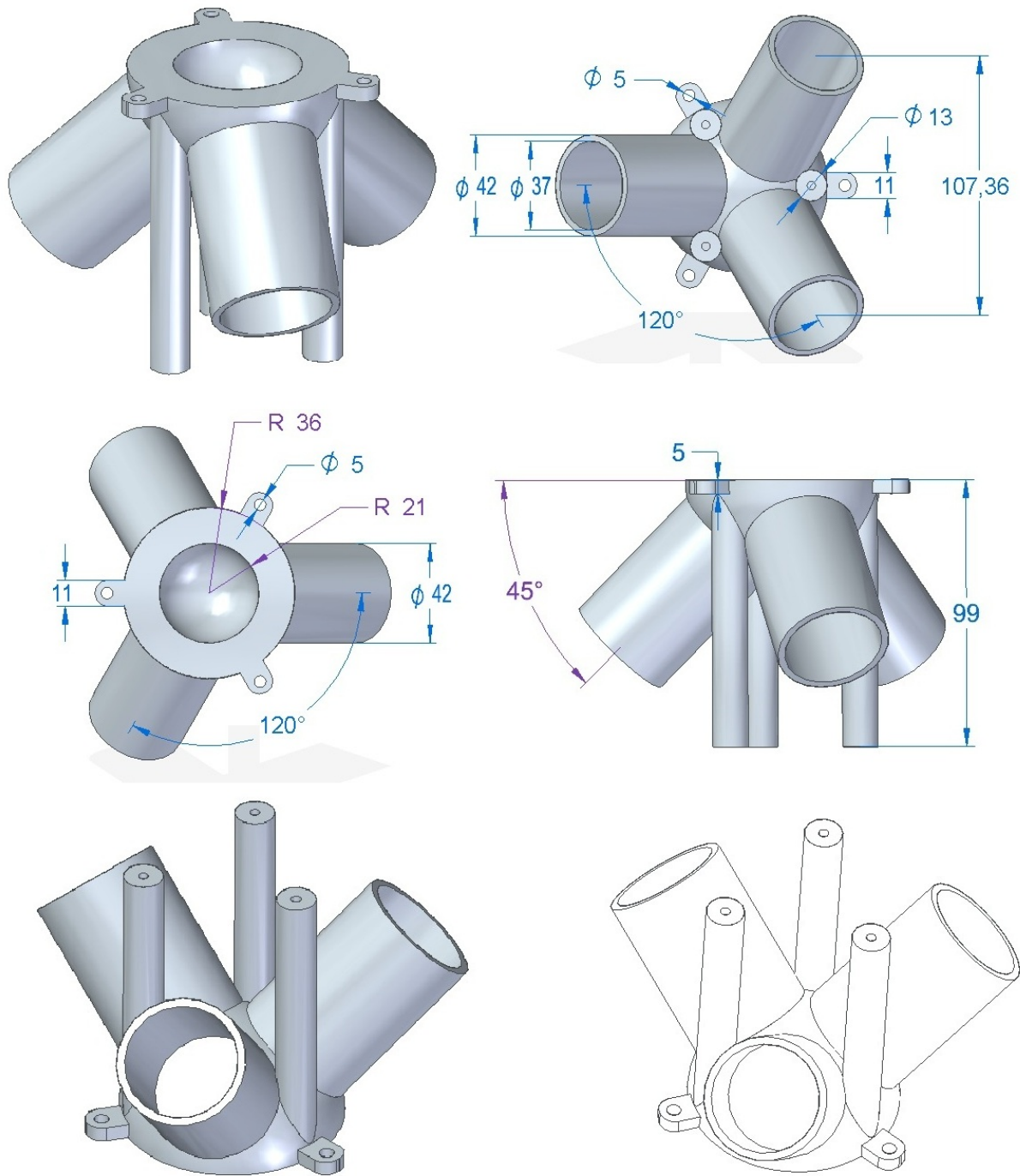


Fonte: (FITZGERALD; KINGSLEY, 2006)

elevada proporciona aos materiais uma maior resistência a se tornarem desmagnetizados, o que é uma característica essencial de um ímã permanente (SHACKELFORD, 2008).

Um tipo de ímã que é considerado forte e fácil de se encontrar no mercado, hoje, é o dos "ímãs de Neodímio" ou "ímãs de terra raras", que têm uma composição de Ferro, Níquel e Boro ( $Nd_2Fe_{14}B$ ). São ímãs "poderosos", mas mecânica e termicamente frágeis. Suas propriedades magnéticas se desfazem quando submetidos a altas temperaturas ( $120^{\circ}C$ ). O neodímio (Nd) é um elemento químico metálico, trivalente, pertencente ao grupo dos lantanídeos (terras raras) e localiza-se no grupo 3 e período 6 da tabela periódica. Possui as seguintes características: símbolo químico (Nd), número atômico (60), massa atômica (144,2 u), ponto de fusão ( $1010,2^{\circ}C$ ).

## A.4 Detalhes do Estator



## A.5 Detalhes da Bobina

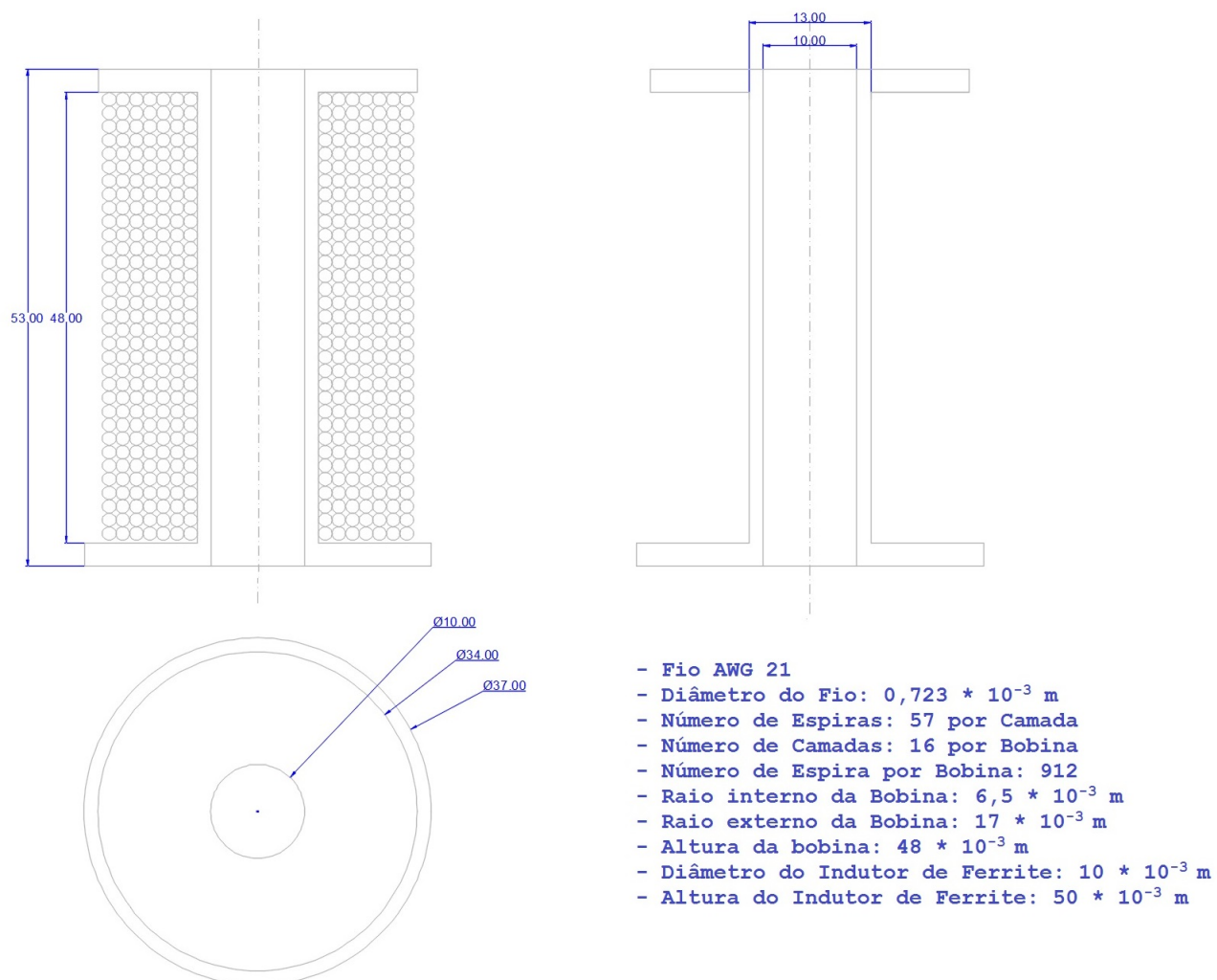


Figura 65 – Dados da bobina com núcleo de ferrite.

### A.6 Escolha do fio para bobina (menor energia dissipada)

| Fio (AWG) | Corrente Nominal | 83,3% da Corrente | Diâmetro do Fio (m) | Número de seções (espiras) | Corrente total Seção Face da Bobina | Densidade de corrente na Face da Bobina | Comprimento do fio (Bobina) | Resistência $\Omega / m$ | Resistência da Bobina $\Omega$ | Potência Dissipada |
|-----------|------------------|-------------------|---------------------|----------------------------|-------------------------------------|---|-----------------------------|--------------------------|--------------------------------|--------------------|
| 12        | 9,5              | 7,885             | 0,0020530           | 119,58                     | 1135,99                             | 2,87                                    | 8,83                        | 0,00513                  | 0,05                           | 2,82               |
| 13        | 7,5              | 6,225             | 0,0018280           | 150,83                     | 1131,20                             | 2,86                                    | 11,13                       | 0,00649                  | 0,07                           | 2,80               |
| 14        | 6                | 4,980             | 0,0016280           | 190,16                     | 1140,97                             | 2,88                                    | 14,04                       | 0,00817                  | 0,11                           | 2,84               |
| 15        | 4,8              | 3,984             | 0,0014500           | 239,71                     | 1150,63                             | 2,91                                    | 17,70                       | 0,01030                  | 0,18                           | 2,89               |
| 16        | 3,7              | 3,071             | 0,0012910           | 302,40                     | 1118,87                             | 2,83                                    | 22,32                       | 0,01290                  | 0,29                           | 2,72               |
| 17        | 3,2              | 2,656             | 0,0011500           | 381,10                     | 1219,51                             | 3,08                                    | 28,13                       | 0,01634                  | 0,46                           | 3,24               |
| 18        | 2,5              | 2,075             | 0,0010240           | 480,65                     | 1201,63                             | 3,04                                    | 35,48                       | 0,02073                  | 0,74                           | 3,17               |
| 19        | 2                | 1,660             | 0,0009113           | 606,89                     | 1213,77                             | 3,07                                    | 44,80                       | 0,02615                  | 1,17                           | 3,23               |
| 20        | 1,6              | 1,328             | 0,0008118           | 764,77                     | 1223,64                             | 3,09                                    | 56,46                       | 0,03269                  | 1,85                           | 3,25               |
| 21        | 1,2              | 0,996             | 0,0007230           | 964,17                     | 1157,00                             | 2,92                                    | 71,18                       | 0,04146                  | 2,95                           | 2,93               |
| 22        | 0,92             | 0,764             | 0,0006438           | 1215,99                    | 1118,71                             | 2,83                                    | 89,77                       | 0,05150                  | 4,62                           | 2,70               |
| 23        | 0,73             | 0,606             | 0,0005733           | 1533,44                    | 1119,41                             | 2,83                                    | 113,21                      | 0,05640                  | 6,38                           | 2,34               |
| 24        | 0,58             | 0,481             | 0,0005106           | 1933,16                    | 1121,24                             | 2,83                                    | 142,72                      | 0,08500                  | 12,13                          | 2,81               |
| 25        | 0,46             | 0,382             | 0,0004547           | 2437,70                    | 1121,34                             | 2,83                                    | 179,96                      | 0,10620                  | 19,11                          | 2,79               |
| 26        | 0,37             | 0,307             | 0,0004049           | 3074,22                    | 1137,46                             | 2,87                                    | 226,96                      | 0,13070                  | 29,66                          | 2,80               |
| 27        | 0,29             | 0,241             | 0,0003606           | 3875,96                    | 1124,03                             | 2,84                                    | 286,14                      | 0,17000                  | 48,64                          | 2,82               |
| 28        | 0,23             | 0,191             | 0,0003211           | 4888,21                    | 1124,29                             | 2,84                                    | 360,87                      | 0,21250                  | 76,69                          | 2,79               |
| 29        | 0,18             | 0,149             | 0,0002859           | 6165,98                    | 1109,88                             | 2,80                                    | 455,21                      | 0,26560                  | 120,90                         | 2,70               |
| 30        | 0,15             | 0,125             | 0,0002546           | 7775,24                    | 1166,29                             | 2,95                                    | 574,01                      | 0,33330                  | 191,32                         | 2,97               |
| 31        | 0,11             | 0,091             | 0,0002268           | 9798,16                    | 1077,80                             | 2,72                                    | 723,35                      | 0,42500                  | 307,42                         | 2,56               |
| 32        | 0,09             | 0,075             | 0,0002019           | 12363,97                   | 1112,76                             | 2,81                                    | 912,77                      | 0,53120                  | 484,87                         | 2,71               |
| 33        | 0,072            | 0,060             | 0,0001798           | 15590,18                   | 1122,49                             | 2,84                                    | 1150,95                     | 0,66930                  | 770,33                         | 2,75               |
| 34        | 0,057            | 0,047             | 0,0001601           | 19662,91                   | 1120,79                             | 2,83                                    | 1451,62                     | 0,84580                  | 1227,78                        | 2,75               |
| 35        | 0,045            | 0,037             | 0,0001426           | 24785,15                   | 1115,33                             | 2,82                                    | 1829,77                     | 1,06900                  | 1956,02                        | 2,73               |

## A.7 Amostra dos Dados Treinamento (Correntes col:1,2,3 x Posição col:4,5)

```

DADOS0T = [% PONTOS REAIS PARA TREINAMENTO
-80.0000 -80.0000 -80.0000 0.3294 90.0000;
-80.0000 -40.0000 -40.0000 17.0634 357.6982;
-80.0000 -28.0000 -28.0000 27.0209 358.5135;
-80.0000 -32.0000 -80.0000 17.8567 59.5889;
-80.0000 -16.0000 -64.0000 25.2974 47.7263;
-64.0000 -48.0000 -80.0000 9.9813 84.2894;
-48.0000 -20.0000 -80.0000 24.8137 90.0000;
-48.0000 32.0000 -64.0000 42.6631 75.2564;
-32.0000 -48.0000 -80.0000 18.5825 142.1665;
-16.0000 -32.0000 -48.0000 22.1668 152.7997;
-28.0000 -80.0000 -80.0000 17.7953 180.0000;
-32.0000 -80.0000 -48.0000 20.4396 222.4501;
-20.0000 -80.0000 -32.0000 27.5741 228.6827;
-64.0000 -80.0000 -32.0000 16.5837 283.9873;
-64.0000 -80.0000 -20.0000 19.9991 288.6253;
-80.0000 -80.0000 -32.0000 15.8250 297.6320;
-80.0000 -64.0000 -20.0000 20.5956 309.5958;
-75.0000 -30.0000 -38.0000 21.3349 5.4403;
-85.0000 -25.0000 -35.0000 26.5118 7.3996;
-77.0000 -12.0000 -67.0000 26.7928 52.2532;
-75.0000 -22.0000 -74.0000 22.3117 57.9946;
-40.0000 7.0000 -69.0000 34.7085 88.2643;
-46.0000 16.0000 -68.0000 36.0723 80.4457;
-66.0000 16.0000 -68.0000 35.8492 58.6504;
-66.0000 26.0000 -58.0000 37.5625 51.5090;
-66.0000 26.0000 -38.0000 40.9728 31.7391;
-45.0000 -16.0000 -38.0000 22.4703 43.7811;
-23.0000 -29.0000 -53.0000 24.0280 125.0268;
-19.0000 -15.0000 -56.0000 33.3291 115.8652;
-43.0000 2.0000 -88.0000 34.2995 91.2187;
-50.0000 -8.0000 -69.0000 28.7049 78.9591;
-39.0000 -17.0000 -49.0000 22.9198 81.5111;
-31.0000 -10.0000 -41.0000 25.8349 81.6561;
5.0000 -90.0000 -75.0000 26.3037 189.1821;
-6.0000 -77.0000 -34.0000 34.5566 225.7919;
-18.0000 -74.0000 -17.0000 31.3904 238.0470;
-62.0000 -79.0000 -4.0000 26.1499 290.6217;
-78.0000 -67.0000 -4.0000 26.9031 304.8713;
-82.0000 -22.0000 -17.0000 34.8262 355.2651;
-81.0000 -4.0000 -23.0000 39.9969 10.3048;
-79.0000 -8.0000 -22.0000 38.1780 9.6375;
-34.0000 -12.0000 -69.0000 31.0682 101.3853;
-35.0000 -8.0000 -71.0000 32.9001 100.1670;
-73.0000 -20.0000 -65.0000 22.4408 52.9575;
-83.0000 -20.0000 -45.0000 25.9289 24.8804;
-83.0000 -10.0000 -35.0000 34.8217 16.9755;
-53.0000 -10.0000 -35.0000 28.5902 28.7203;
-65.0000 -22.0000 -25.0000 28.8966 357.9035;
-65.0000 -48.0000 -38.0000 11.0538 338.3581;
-65.0000 -38.0000 -48.0000 11.6653 14.8265];

```

## ANEXO A – DADOS DE FABRICANTES

## A.1 Tabela de Fios - NBR

## CATÁLOGO DE FIOS METALCORTE/EBERLE

| NOMENCLATURA      | CLASSE TÉRMICA | APLICAÇÕES  |
|-------------------|----------------|---|
| EBM 180 Metalterm | H (180°)       | Utilizado, em geral, para enrolamentos de motores e transformadores de todos os tipos, que sejam exigidas altas condições de temperatura. |

NBR 6727/NBR 5428/NBR 6776  
Inc. (UL)(E 155802)

 - Aprovado pelo Underwriters Laboratories

## TABELA DE DIMENSÕES

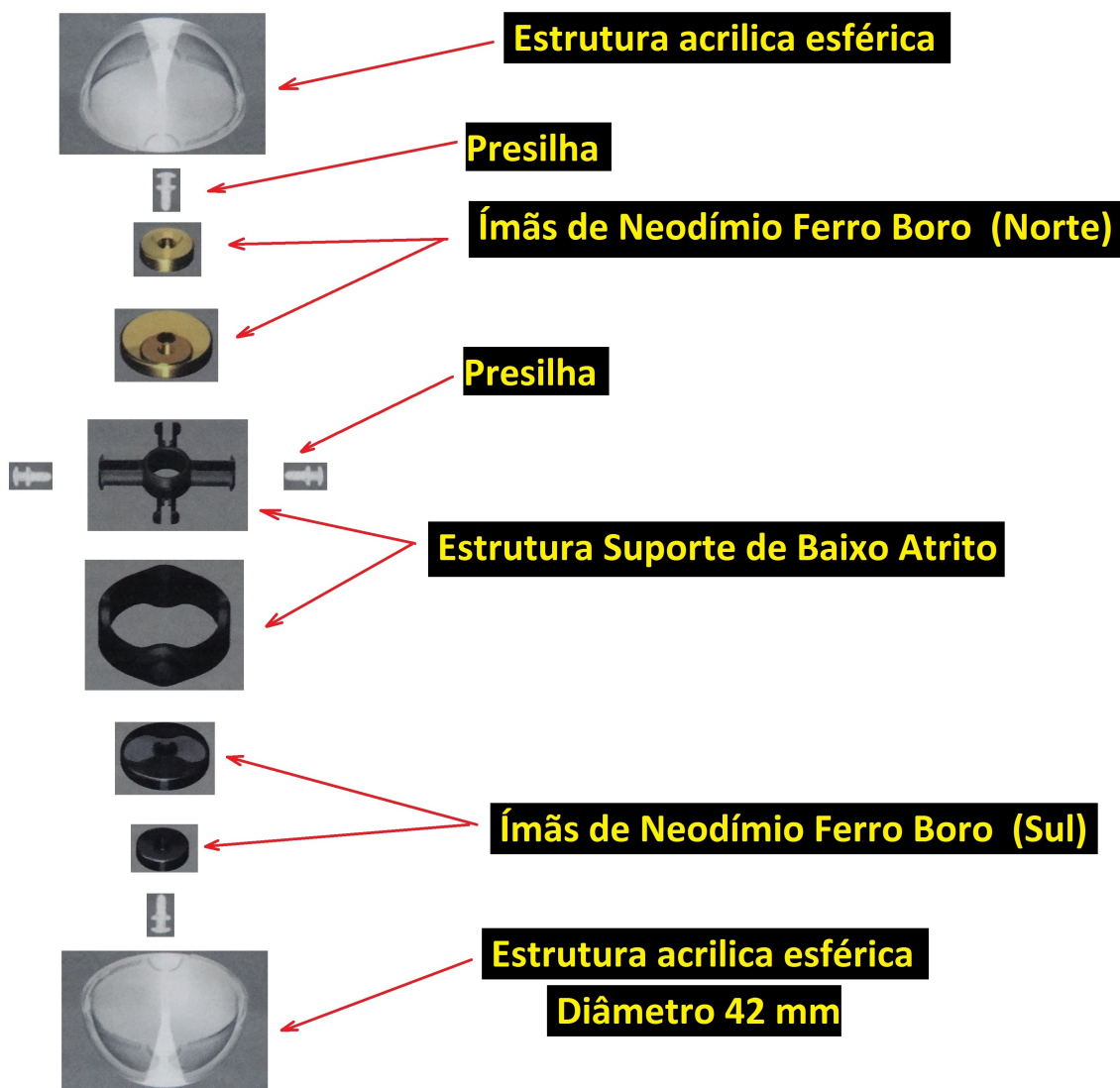
| Bitola<br>AWC | FIO DE COBRE NU |       |       |                 |   |                            | FIO DE COBRE ESMALTADO |  |                                     |                                    |
|---------------|-----------------|-------|-------|-----------------|---|----------------------------|------------------------|--|-------------------------------------|------------------------------------|
|               | Diâmetro(mm)    |       |       | Secção<br>(mm²) | Resistência<br>Elétrica<br>( $\Omega$ /m) | Intensidade de<br>Corrente |                        | GRAU 2 OU CAPA REFORÇADA                 |                                     |                                    |
|               | nominal         | min.  | max.  |                 |   | Prático<br>(A)             | Segurança<br>(A)       | Acréscimo<br>do isolante<br>(mm)<br>min. | Diâmetro<br>externo<br>(mm)<br>max. | Rigidez<br>elétrica<br>(V)<br>min. |
| 1             | 7,350           | 7,280 | 7,420 | 42,4            | -   | 86,4                       | 55,7                   | -  | -                                   | -                                  |
| 2             | 6,540           | 6,470 | 6,610 | 33,6            | -   | 83,7                       | 44,1                   | -  | -                                   | -                                  |
| 3             | 5,830           | 5,770 | 5,890 | 26,7            | -   | 52,6                       | 35                     | -  | -                                   | -                                  |
| 4             | 5,189           | 5,137 | 5,241 | 21,147          | -   | 41,7                       | 27,7                   | 94                                       | 5,329                               | 3700                               |
| 5             | 4,620           | 4,574 | 4,666 | 16,764          | -   | 33,1                       | 22                     | 91                                       | 4,755                               | 3600                               |
| 6             | 4,115           | 4,074 | 4,156 | 13,229          | -   | 26,3                       | 17,5                   | 89                                       | 4,244                               | 3500                               |
| 7             | 3,665           | 3,628 | 3,702 | 10,550          | -   | 20,8                       | 13,8                   | 86                                       | 3,787                               | 3400                               |
| 8             | 3,264           | 3,231 | 3,297 | 8,367           | -   | 16,5                       | 11                     | 84                                       | 3,383                               | 3300                               |
| 9             | 2,906           | 2,877 | 2,935 | 6,633           | -   | 13,1                       | 8,7                    | 81                                       | 3,020                               | 3200                               |
| 10            | 2,588           | 2,562 | 2,614 | 5,280           | -   | 10,4                       | 6,9                    | 79                                       | 2,695                               | 6200                               |
| 11            | 2,304           | 2,281 | 2,327 | 4,169           | -   | 8,2                        | 5,5                    | 76                                       | 2,408                               | 6000                               |
| 12            | 2,052           | 2,031 | 2,073 | 3,307           | -   | 6,5                        | 4,4                    | 74                                       | 2,151                               | 5800                               |
| 13            | 1,829           | 1,811 | 1,847 | 2,627           | -   | 5,2                        | 3,5                    | 71                                       | 1,923                               | 5600                               |
| 14            | 1,628           | 1,612 | 1,644 | 2,082           | -   | 4,1                        | 2,7                    | 81                                       | 1,732                               | 6325                               |
| 15            | 1,450           | 1,435 | 1,465 | 1,651           | -   | 3,3                        | 2,2                    | 76                                       | 1,547                               | 6175                               |
| 16            | 1,290           | 1,277 | 1,303 | 1,307           | -   | 2,6                        | 1,7                    | 74                                       | 1,384                               | 6000                               |
| 17            | 1,151           | 1,139 | 1,163 | 1,040           | -   | 2                          | 1,3                    | 71                                       | 1,240                               | 5850                               |
| 18            | 1,024           | 1,014 | 1,034 | 0,8235          | -   | 1,6                        | 1,1                    | 66                                       | 1,110                               | 5700                               |
| 19            | 0,912           | 0,903 | 0,921 | 0,6533          | 0,026                                     | 1,3                        | 0,86                   | 64                                       | 0,995                               | 5550                               |
| 20            | 0,813           | 0,805 | 0,821 | 0,5191          | 0,033                                     | 1                          | 0,68                   | 58                                       | 0,892                               | 5400                               |
| 21            | 0,724           | 0,717 | 0,731 | 0,411           | 0,042                                     | 0,81                       | 0,54                   | 56                                       | 0,798                               | 5250                               |
| 22            | 0,643           | 0,637 | 0,649 | 0,3247          | 0,054                                     | 0,64                       | 0,43                   | 53                                       | 0,714                               | 5125                               |
| 23            | 0,574           | 0,568 | 0,580 | 0,2588          | 0,068                                     | 0,51                       | 0,34                   | 51                                       | 0,643                               | 5000                               |
| 24            | 0,511           | 0,506 | 0,516 | 0,2051          | 0,085                                     | 0,41                       | 0,27                   | 48                                       | 0,577                               | 4850                               |
| 25            | 0,455           | 0,450 | 0,460 | 0,1626          | 0,108                                     | 0,32                       | 0,21                   | 46                                       | 0,516                               | 4725                               |
| 26            | 0,404           | 0,400 | 0,408 | 0,1282          | 0,137                                     | 0,25                       | 0,17                   | 43                                       | 0,462                               | 4600                               |
| 27            | 0,361           | 0,357 | 0,365 | 0,1024          | 0,172                                     | 0,20                       | 0,13                   | 41                                       | 0,417                               | 4500                               |
| 28            | 0,32            | 0,317 | 0,323 | 0,0804          | 0,218                                     | 0,16                       | 0,11                   | 41                                       | 0,373                               | 4375                               |
| 29            | 0,287           | 0,284 | 0,290 | 0,0647          | 0,272                                     | 0,18                       | 0,084                  | 38                                       | 0,338                               | 4250                               |
| 30            | 0,254           | 0,251 | 0,257 | 0,050           | 0,348                                     | 0,10                       | 0,067                  | 36                                       | 0,302                               | 4150                               |
| 31            | 0,226           | 0,223 | 0,229 | 0,0401          | 0,441                                     | 0,078                      | 0,053                  | 33                                       | 0,274                               | 3825                               |
| 32            | 0,203           | 0,200 | 0,206 | 0,0324          | 0,548                                     | 0,063                      | 0,042                  | 30                                       | 0,249                               | 3525                               |
| 33            | 0,180           | 0,177 | 0,183 | 0,0254          | 0,700                                     | 0,050                      | 0,033                  | 28                                       | 0,224                               | 3250                               |
| 34            | 0,160           | 0,157 | 0,163 | 0,0201          | 0,890                                     | 0,039                      | 0,026                  | 25                                       | 0,193                               | 2975                               |
| 35            | 0,142           | 0,139 | 0,145 | 0,0158          | 1,136                                     | 0,032                      | 0,021                  | 23                                       | 0,176                               | 2750                               |
| 36            | 0,127           | 0,124 | 0,130 | 0,0127          | 1,427                                     | 0,025                      | 0,017                  | 20                                       | 0,160                               | 2525                               |
| 37            | 0,114           | 0,111 | 0,117 | 0,0102          | 1,781                                     | 0,020                      | 0,013                  | 20                                       | 0,145                               | 2325                               |
| 38            | 0,102           | 0,099 | 0,105 | 0,0082          | 2,239                                     | 0,016                      | 0,010                  | 18                                       | 0,130                               | 2150                               |
| 39            | 0,089           | 0,086 | 0,092 | 0,0062          | 2,968                                     | 0,012                      | 0,008                  | 15                                       | 0,114                               | 1975                               |
| 40            | 0,079           | 0,076 | 0,082 | 0,0049          | 3,800                                     | 0,009                      | 0,006                  | 15                                       | 0,102                               | 1800                               |
| 41            | 0,071           | 0,068 | 0,074 | 0,0040          | 4,747                                     | 0,008                      | 0,005                  | 13                                       | 0,091                               | 1675                               |
| 42            | 0,064           | 0,061 | 0,067 | 0,0032          | 5,973                                     | 0,006                      | 0,004                  | 10                                       | 0,081                               | 1525                               |
| 43            | 0,056           | 0,053 | 0,059 | 0,0025          | 7,560                                     | 0,005                      | 0,003                  | 10                                       | 0,074                               | 1400                               |

## A.2 Tabela de Fios Esmaltados AWG (American Wire Gauge)

| Número AWG (American Wire Gauge)  |        |        |       |       |        |       |
|-----------------------------------|--------|--------|-------|-------|--------|-------|
| Capacidade de corrente em ampères |        |        |       |       |        |       |
| Diâmetro em milímetros            |        |        |       |       |        |       |
| Resistência em ohms por km        |        |        |       |       |        |       |
| Seção em milímetros quadrados     |        |        |       |       |        |       |
| Kg por quilômetro                 |        |        |       |       |        |       |
| Números de espiras por cm         |        |        |       |       |        |       |
| 0000                              | 11,86  | 107,2  | -     | -     | 0,158  | 319   |
| 000                               | 10,40  | 85,3   | -     | -     | 0,197  | 240   |
| 00                                | 9,226  | 67,43  | -     | -     | 0,252  | 190   |
| 0                                 | 8,252  | 53,48  | -     | -     | 0,317  | 150   |
| 1                                 | 7,348  | 42,41  | -     | 375   | 0,40   | 120   |
| 2                                 | 6,544  | 33,63  | -     | 295   | 0,50   | 96    |
| 3                                 | 5,827  | 26,67  | -     | 237   | 0,63   | 78    |
| 4                                 | 5,189  | 21,15  | -     | 188   | 0,80   | 60    |
| 5                                 | 4,621  | 16,77  | -     | 149   | 1,01   | 48    |
| 6                                 | 4,115  | 13,30  | -     | 118   | 1,27   | 38    |
| 7                                 | 3,665  | 10,55  | -     | 94    | 1,70   | 30    |
| 8                                 | 3,264  | 8,36   | -     | 74    | 2,03   | 24    |
| 9                                 | 2,906  | 6,63   | -     | 58,9  | 2,56   | 19    |
| 10                                | 2,588  | 5,26   | -     | 46,8  | 3,23   | 15    |
| 11                                | 2,305  | 4,17   | -     | 32,1  | 4,07   | 12    |
| 12                                | 2,053  | 3,31   | -     | 29,4  | 5,13   | 9,5   |
| 13                                | 1,828  | 2,63   | -     | 23,3  | 6,49   | 7,5   |
| 14                                | 1,628  | 2,08   | 5,6   | 18,5  | 8,17   | 6,0   |
| 15                                | 1,450  | 1,65   | 6,4   | 14,7  | 10,3   | 4,8   |
| 16                                | 1,291  | 1,31   | 7,2   | 11,6  | 12,9   | 3,7   |
| 17                                | 1,150  | 1,04   | 8,4   | 9,26  | 16,34  | 3,2   |
| 18                                | 1,024  | 0,82   | 9,2   | 7,3   | 20,73  | 2,5   |
| 19                                | 0,9113 | 0,65   | 10,2  | 5,79  | 26,15  | 2,0   |
| 20                                | 0,8118 | 0,52   | 11,6  | 4,61  | 32,69  | 1,6   |
| 21                                | 0,7230 | 0,41   | 12,8  | 3,64  | 41,46  | 1,2   |
| 22                                | 0,6438 | 0,33   | 14,4  | 2,89  | 51,5   | 0,92  |
| 23                                | 0,5733 | 0,26   | 16,0  | 2,29  | 64,4   | 0,73  |
| 24                                | 0,5106 | 0,20   | 18,0  | 1,82  | 80,0   | 0,58  |
| 25                                | 0,4547 | 0,16   | 22,0  | 1,44  | 106,2  | 0,46  |
| 26                                | 0,4049 | 0,13   | 22,8  | 1,14  | 130,7  | 0,37  |
| 27                                | 0,3606 | 0,10   | 25,6  | 0,91  | 170,0  | 0,29  |
| 28                                | 0,3211 | 0,08   | 28,4  | 0,72  | 212,5  | 0,23  |
| 29                                | 0,2859 | 0,064  | 32,4  | 0,57  | 265,6  | 0,18  |
| 30                                | 0,2546 | 0,051  | 35,6  | 0,45  | 333,3  | 0,15  |
| 31                                | 0,2268 | 0,040  | 39,8  | 0,36  | 425,0  | 0,11  |
| 32                                | 0,2019 | 0,032  | 44,5  | 0,28  | 531,2  | 0,09  |
| 33                                | 0,1798 | 0,0256 | 50,0  | 0,23  | 669,3  | 0,072 |
| 34                                | 0,1601 | 0,0201 | 56,0  | 0,18  | 845,8  | 0,057 |
| 35                                | 0,1426 | 0,0159 | 62,3  | 0,14  | 1069,0 | 0,045 |
| 36                                | 0,1270 | 0,0127 | 69,0  | 0,10  | 1338,0 | 0,036 |
| 37                                | 0,1131 | 0,0100 | 78,0  | 0,089 | 1700,0 | 0,028 |
| 38                                | 0,1007 | 0,0079 | 82,3  | 0,070 | 2152,0 | 0,022 |
| 39                                | 0,0897 | 0,0063 | 97,5  | 0,056 | 2696,0 | 0,017 |
| 40                                | 0,0799 | 0,0050 | 111,0 | 0,044 | 3400,4 | 0,014 |
| 41                                | 0,0711 | 0,0040 | 126,8 | 0,035 | 4250,0 | 0,011 |
| 42                                | 0,0633 | 0,0032 | 138,9 | 0,28  | 5312,0 | 0,009 |
| 43                                | 0,0564 | 0,0025 | 156,4 | 0,022 | 6800,0 | 0,007 |
| 44                                | 0,0503 | 0,0020 | 169,7 | 0,018 | 8500,0 | 0,005 |



## A.3 Detalhes do Rotor Esférico - Gyro



## ANEXO B – CARACTERÍSTICA DOS COMPONENTES

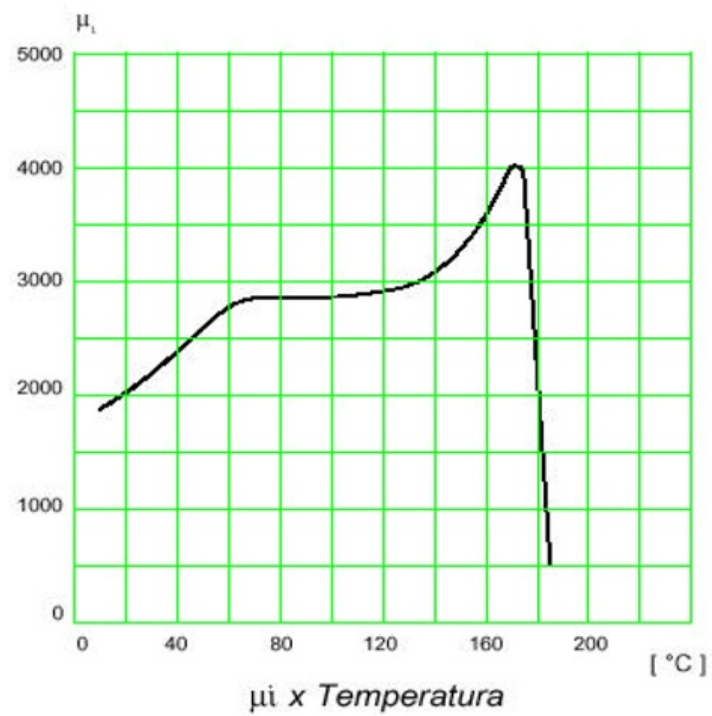
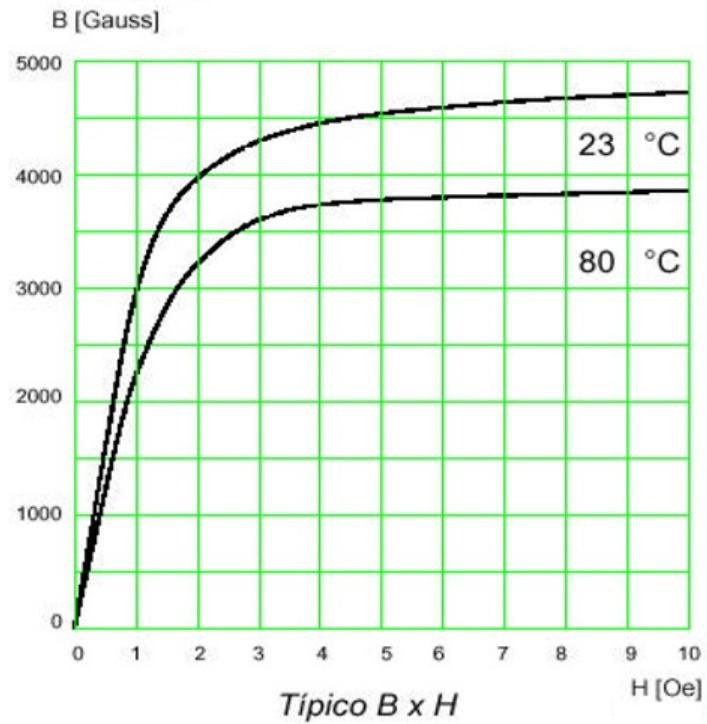
### B.1 Núcleo de Ferrite - Thornton

#### CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS THORNTON

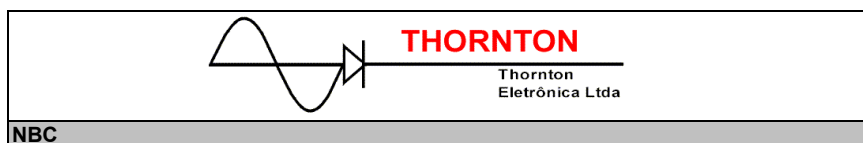
| MATERIAL  | IP6                | IP6I2       | IP6I3       | IP12R              | IP12E              | TH50               |
|---|--------------------|-------------|-------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Permeabilidade Inicial $\mu_i$  | 2000<br>$\pm 25\%$ | 2200<br>25% | 2200<br>25% | 2100<br>$\pm 25\%$ | 2300<br>$\pm 25\%$ | 5000<br>$\pm 25\%$ |
| Fator de dissipação (rel.) $f = 10$ [Khz]   | ---                | $\leq 2,0$  | $\leq 1,0$  | ---                | ---                | ---                |
| $\tan \delta / \mu_i \cdot 10^{-6} f = 100$ [Khz]   | ---                | $\leq 10,0$ | $\leq 5,0$  | ---                | ---                | ---                |
| Temperatura de Curie [ $^{\circ}\text{C}$ ]   | $\geq 165$         | $\geq 140$  | $\geq 160$  | $\geq 210$         | $\geq 210$         | $\geq 130$         |
| Coercividade [A/m]  | 18                 | 18          | 15          | 18                 | 18                 | 10                 |
| Densidade de Fluxo ( $^{\wedge}\text{B}$ ) a 10 Oe, 23 $^{\wedge}\text{C}$ [ $10^{-3}$ T] | ---                | 410         | 400         | ---                | ---                | 390                |
| Densidade de Fluxo ( $^{\wedge}\text{B}$ ) a 15 Oe, 23 $^{\wedge}\text{C}$ [ $10^{-3}$ T] | 480                | ---         | ---         | 510                | 510                | ---                |
| Constante de Histerese ( $\eta_B$ ) [ $10^{-3}$ /T]                                       | $\leq 8,0$         | $\leq 8,0$  | $\leq 1,5$  | ---                | ---                | $\leq 1,3$         |
| Fator de Desacomodação ( $D_F$ ) [ppm]  | 10                 | $\leq 7,0$  | $\leq 5,0$  | ---                | ---                | ---                |
| Densidade ( $\rho$ ) [ $\text{Kg}/\text{m}^3$ ]   | 4800               | 4800        | 4800        | 4800               | 4800               | 4900               |

Os materiais apresentados acima, podem ser fornecidos como opcionais para os núcleos constantes deste catálogo.

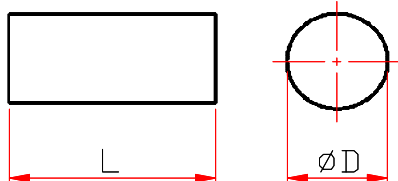
| IP6     |                               |                   |                        |
|---------|-------------------------------|-------------------|------------------------|
| SIMB.   | CONDIÇÕES                     | VALOR             | UNIDADE                |
| $\mu_i$ | 23 $^{\circ}\text{C}$         | 2000 $\pm$<br>25% | ---                    |
| B       | 15 Oe, 23 $^{\circ}\text{C}$  | 4800              | Gauss                  |
| $P_P$   | 2000 Gauss                    | 30,0              | mW/g                   |
|         | 20 Khz, 80 $^{\circ}\text{C}$ |                   |                        |
| $T_C$   | ---                           | > 165             | $^{\circ}\text{C}$     |
| $\rho$  | ---                           | 4800              | $\text{Kg}/\text{m}^3$ |

**B.2 Curva (B x H) e ( $\mu_i$  x  $^{\circ}C$ ) do Núcleo de Ferrite IP6**

### B.3 Dimensões do Núcleo Disponíveis



NBC



Dimensões em mm

| DESCRIÇÃO DE ENCOMENDA | MATERIAL | Ø D  | Tol.   | L    | Tol.   | PESO ~ g |
|------------------------|----------|------|--------|------|--------|----------|
| NBC-1,63/5-TH50        | TH50     | 1,63 | ± 0,05 | 5    | ± 0,20 | 0,048    |
| NBC-1,65/5-TH50        | TH50     | 1,65 | ± 0,05 | 5    | ± 0,20 | 0,049    |
| NBC-1,7/8,4-IP6        | IP6      | 1,70 | - 0,20 | 8,4  | - 0,30 | 0,075    |
| NBC-1,7/8,4-TH50       | TH50     | 1,70 | - 0,20 | 8,4  | - 0,30 | 0,075    |
| NBC-1,78/8,4-TH50      | TH50     | 1,78 | - 0,20 | 8,4  | - 0,30 | 0,075    |
| NBC-4,8/6,5-IP6        | IP6      | 4,8  | ± 0,10 | 6,5  | ± 0,50 | 0,40     |
| NBC-5/12-IP12R         | IP12R    | 5    | ± 0,20 | 12   | ± 0,30 | 1,10     |
| NBC-5/17-IP12R         | IP12R    | 5    | ± 0,20 | 17   | ± 0,30 | 1,56     |
| NBC-5/20-IP12R         | IP12R    | 5    | ± 0,20 | 20   | ± 0,50 | 1,83     |
| NBC-6/10-IP6           | IP6      | 6    | ± 0,20 | 10   | ± 0,50 | 1,40     |
| NBC-6/15-IP6           | IP6      | 6    | ± 0,20 | 15   | ± 0,60 | 1,90     |
| NBC-6/20-IP6           | IP6      | 6    | ± 0,20 | 20   | ± 1,00 | 2,70     |
| NBC-6/21-IP6           | IP6      | 6    | ± 0,20 | 21   | ± 1,00 | 2,83     |
| NBC-6/21-IP12R         | IP12R    | 6    | ± 0,20 | 21   | ± 1,00 | 2,83     |
| NBC-6/25-IP6           | IP6      | 6    | ± 0,20 | 25   | ± 1,00 | 3,40     |
| NBC-6/30-IP6           | IP6      | 6    | ± 0,20 | 30   | ± 1,00 | 4,20     |
| NBC-6/40-IP6           | IP6      | 6    | ± 0,20 | 40   | ± 1,00 | 5,60     |
| NBC-7,5/10-IP6         | IP6      | 7,5  | ± 0,25 | 10   | ± 0,50 | 2,30     |
| NBC-7,5/20-IP6         | IP6      | 7,5  | ± 0,25 | 20   | ± 1,00 | 4,60     |
| NBC-7,5/30-IP6         | IP6      | 7,5  | ± 0,25 | 30   | ± 0,50 | 6,60     |
| NBC-7,5/30-IP12R       | IP12R    | 7,5  | ± 0,25 | 30   | ± 0,50 | 6,60     |
| NBC-7,5/45-IP6         | IP6      | 7,5  | ± 0,25 | 45   | ± 1,00 | 9,90     |
| NBC-7,5/45-IP12R       | IP12R    | 7,5  | ± 0,25 | 45   | ± 1,00 | 9,90     |
| NBC-7,5/50-IP6         | IP6      | 7,5  | ± 0,25 | 50   | ± 1,00 | 10,70    |
| NBC-7,5/50-IP12R       | IP12R    | 7,5  | ± 0,25 | 50   | ± 1,00 | 10,70    |
| NBC-10/10-IP6          | IP6      | 10   | ± 0,50 | 10   | ± 0,50 | 3,80     |
| NBC-10/11-IP6          | IP6      | 10   | ± 0,50 | 11   | ± 0,50 | 4,20     |
| NBC-10/20-IP6          | IP6      | 10   | ± 0,50 | 20   | ± 1,00 | 7,00     |
| NBC-10/30-IP6          | IP6      | 10   | ± 0,50 | 30   | ± 1,00 | 11,00    |
| NBC-10/40-IP6          | IP6      | 10   | ± 0,50 | 40   | ± 1,00 | 14,10    |
| NBC-10/45-IP6          | IP6      | 10   | ± 0,50 | 45   | ± 1,00 | 15,80    |
| NBC-10/50-IP6          | IP6      | 10   | ± 0,50 | 50   | ± 1,00 | 17,46    |
| NBC-10/50-IP12R        | IP12R    | 10   | ± 0,50 | 50   | ± 1,00 | 17,46    |
| NBC-15/13,5-IP6        | IP6      | 15   | ± 0,70 | 13,5 | ± 0,50 | 10,70    |
| NBC-15/20-IP6          | IP6      | 15   | ± 0,60 | 20   | ± 1,00 | 17,00    |
| NBC-15/30-IP6          | IP6      | 15   | ± 0,60 | 30   | ± 1,00 | 25,00    |
| NBC-15/30-IP12R        | IP12R    | 15   | ± 0,60 | 30   | ± 1,00 | 25,00    |
| NBC-15/40-IP6          | IP6      | 15   | ± 0,60 | 40   | ± 1,00 | 33,30    |
| NBC-15/50-IP6          | IP6      | 15   | ± 0,60 | 50   | ± 1,00 | 42,50    |

## B.4 Especificações do Sensor do Mouse - PAN3101

PixArt Imaging Inc.

PAN3101  
Mouse Sensor

CMOS Optical

### Specifications

#### Absolute Maximum Ratings

| Symbol           | Parameter             | Min  | Max | Unit | Notes  |
|------------------|-----------------------|------|-----|------|--|
| T <sub>STG</sub> | Storage temperature   | -40  | 85  |      |  |
| T <sub>A</sub>   | Operating Temperature | -15  | 55  | °C   |  |
|                  | Lead Solder Temp      |      | 260 | °C   | For 10 seconds, 1.6mm below seating plane.     |
| V <sub>DD</sub>  | DC supply voltage     | -0.5 | 5.5 | V    |  |
| ESD              |                       |      | 2   | kV   | All pins, human body model MIL 883 Method 3015 |
| V <sub>IN</sub>  | DC input voltage      | -0.5 | 5.5 | V    | SDIO, SCLK, VDD                                |

#### Recommend Operating Condition

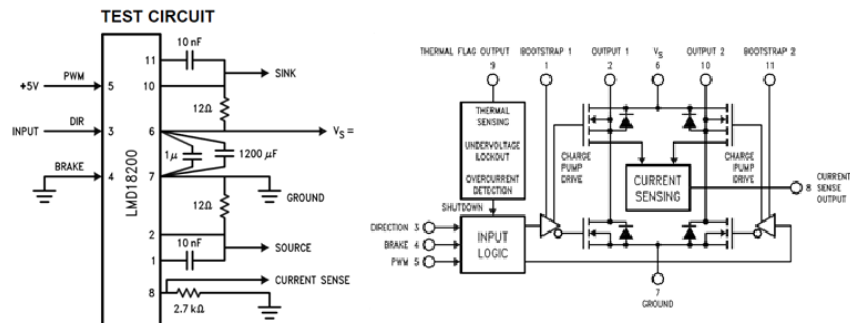
| Symbol           | Parameter                                     | Min. | Typ.   | Max.   | Unit  | Notes                                      |
|------------------|---|------|--------|--------|---|--|
| T <sub>A</sub>   | Operating Temperature                         | 0    |        | 40     | °C  |  |
| V <sub>DD</sub>  | Power supply voltage                          | 4.25 | 5.0    | 5.5    | V   |  |
| V <sub>N</sub>   | Supply noise                                  |      |        | 100    | mV  | Peak to peak within 0-100 MHz              |
| F <sub>CLK</sub> | Clock Frequency                               |      | 18.432 | 24.576 | MHz   | Set by ceramic resonator                   |
| FR               | Frame Rate                                    |      | 3000   | 4000   | Frames/s  | 4000Frames/s @ F <sub>CLK</sub> =24.567MHz |
| SCLK             | Serial Port Clock Frequency                   |      |        | 10     | MHz   |  |
| Z                | Distance from lens reference plane to surface | 2.3  | 2.4    | 2.5    | mm  | Refer to Figure 5.                         |
| S                | Speed   | 0    | 21     | 28     | Inches/sec 28inches/sec @ F <sub>CLK</sub> =24.567MHz |  |
| A                | Acceleration                                  | 0.1  |        | 20     | g   |  |
| R                | Resolution                                    |      |        | 800    | cpi   |  |

PixArt Imaging Inc.

E-mail: [fae\\_service@pixart.com.tw](mailto:fae_service@pixart.com.tw)

V1.0 MAR. 2005

## B.5 Especificações do Driver de Corrente - LMD18200



### Pinout Description

(See [Test Circuit](#))

**Pin 1, BOOTSTRAP 1 Input:** Bootstrap capacitor pin for half H-bridge number 1. The recommended capacitor (10 nF) is connected between pins 1 and 2.

**Pin 2, OUTPUT 1:** Half H-bridge number 1 output.

**Pin 3, DIRECTION Input:** See [Logic Truth Table](#). This input controls the direction of current flow between OUTPUT 1 and OUTPUT 2 (pins 2 and 10) and, therefore, the direction of rotation of a motor load.

**Pin 4, BRAKE Input:** See [Logic Truth Table](#). This input is used to brake a motor by effectively shorting its terminals. When braking is desired, this input is taken to a logic high level and it is also necessary to apply logic high to PWM input, pin 5. The drivers that short the motor are determined by the logic level at the DIRECTION input (Pin 3): with Pin 3 logic high, both current sourcing output transistors are ON; with Pin 3 logic low, both current sinking output transistors are ON. All output transistors can be turned OFF by applying a logic high to Pin 4 and a logic low to PWM input Pin 5; in this case only a small bias current (approximately  $-1.5$  mA) exists at each output pin.

**Pin 5, PWM Input:** See [Logic Truth Table](#). How this input (and DIRECTION input, Pin 3) is used is determined by the format of the PWM Signal.

**Pin 6, V<sub>S</sub> Power Supply**

**Pin 7, GROUND Connection:** This pin is the ground return, and is internally connected to the mounting tab.

**Pin 8, CURRENT SENSE Output:** This pin provides the sourcing current sensing output signal, which is typically  $377 \mu\text{A/A}$ .

**Pin 9, THERMAL FLAG Output:** This pin provides the thermal warning flag output signal. Pin 9 becomes active-low at  $145^\circ\text{C}$  (junction temperature). However the chip will not shut itself down until  $170^\circ\text{C}$  is reached at the junction.

**Pin 10, OUTPUT 2:** Half H-bridge number 2 output.

**Pin 11, BOOTSTRAP 2 Input:** Bootstrap capacitor pin for Half H-bridge number 2. The recommended capacitor (10 nF) is connected between pins 10 and 11.

### USING THE CURRENT SENSE OUTPUT

The CURRENT SENSE output (pin 8) has a sensitivity of  $377 \mu\text{A}$  per ampere of output current. For optimal accuracy and linearity of this signal, the value of voltage generating resistor between pin 8 and ground should be chosen to limit the maximum voltage developed at pin 8 to 5V, or less. The maximum voltage compliance is 12V.

It should be noted that the recirculating currents (free wheeling currents) are ignored by the current sense circuitry. Therefore, only the currents in the upper sourcing outputs are sensed.

### USING THE THERMAL WARNING FLAG

The THERMAL FLAG output (pin 9) is an open collector transistor. This permits a wired OR connection of thermal warning flag outputs from multiple LMD18200's, and allows the user to set the logic high level of the output signal swing to match system requirements. This output typically drives the interrupt input of a system controller. The interrupt service routine would then be designed to take appropriate steps, such as reducing load currents or initiating an orderly system shutdown. The maximum voltage compliance on the flag pin is 12V.