



# INVESTIGAÇÃO DE PARÂMETROS DE PROJETO DE MOTORES SÍNCRONOS SUPERCONDUTORES UTILIZANDO O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Vagner Santos da Cruz

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientadores: Antônio Carlos Ferreira  
Rubens de Andrade Junior

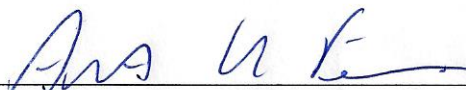
Rio de Janeiro  
Abril de 2013

INVESTIGAÇÃO DE PARÂMETROS DE PROJETO DE MOTORES  
SÍNCRONOS SUPERCONDUTORES UTILIZANDO O MÉTODO DOS  
ELEMENTOS FINITOS

Vagner Santos da Cruz

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO  
ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE  
ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE  
JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A  
OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA  
ELÉTRICA.

Examinada por:



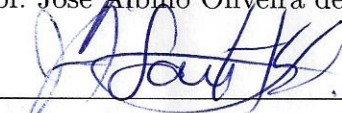
Prof. Antônio Carlos Ferreira, Ph.D.



Prof. Rubens de Andrade Junior, D.Sc.



Prof. José Albino Oliveira de Aguiar, D.Sc.



Prof. José Andrés Santisteban Larrea, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL  
ABRIL DE 2013

Cruz, Vagner Santos da

Investigação de Parâmetros de projeto de Motores Síncronos Supercondutores Utilizando o Método dos Elementos Finitos/Vagner Santos da Cruz. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2013.

XIV, 69 p.: il.; 29,7cm.

Orientadores: Antônio Carlos Ferreira

Rubens de Andrade Junior

Dissertação (mestrado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia Elétrica, 2013.

Referências Bibliográficas: p. 65 – 67.

1. Motor Síncrono Supercondutor. 2. Bobinas Supercondutoras. 3. Método dos Elementos Finitos. I. Ferreira, Antônio Carlos *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Elétrica. III. Título.

*Porque, aquele que pede, recebe;  
e, o que busca, encontra;  
e, ao que bate, abrir-se-lhe-á.  
Mateus 7:8.*

# Agradecimentos

A toda equipe do Laboratório de Aplicações de Supercondutores pelo apoio e contribuições valiosas em todas etapas. Em especial aos meus Orientadores Antônio Carlos Ferreira e Rubens de Andrade Junior pela paciência e disponibilidade. À minha esposa Ângela, companheira em todos os momentos, que sempre me dá força para continuar caminhando. E também aos meus pais, por terem me ensinado a ser uma pessoa de caráter e lutar pelos meus ideais.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

INVESTIGAÇÃO DE PARÂMETROS DE PROJETO DE MOTORES  
SÍNCRONOS SUPERCONDUTORES UTILIZANDO O MÉTODO DOS  
ELEMENTOS FINITOS

Vagner Santos da Cruz

Abril/2013

Orientadores: Antônio Carlos Ferreira  
Rubens de Andrade Junior

Programa: Engenharia Elétrica

Esta dissertação procura analisar o efeito da variação de alguns parâmetros de projeto de motores síncronos supercondutores no seu desempenho. Os estudos são realizados utilizando um pacote comercial baseado no método dos elementos finitos. Inicialmente são apresentados os estudos realizados com uma máquina síncrona rotativa. Em uma segunda etapa, são apresentados os estudos realizados com uma máquina linear, tomando como base uma máquina convencional já existente no Laboratório de Aplicações de Supercondutores da UFRJ (LASUP). A utilização desta segunda máquina se deve à maior facilidade de substituição de seu enrolamento de campo por um enrolamento feito de fitas supercondutoras, o que será feito em uma etapa posterior. Nesta etapa uma maior atenção foi dada à variação da relação torque/volume, para a máquina rotativa, e força/peso, para a máquina linear, sendo apresentadas e comparadas diversas possíveis configurações.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

## INVESTIGATION OF PROJECT PARAMETERS OF SUPERCONDUCTING SYNCHRONOUS MOTORS USING FINITE ELEMENTS METHOD

Vagner Santos da Cruz

April/2013

Advisors: Antônio Carlos Ferreira  
Rubens de Andrade Junior

Department: Electrical Engineering

This dissertation analyzes the performance of superconducting synchronous motors with the variation of some design parameters. The studies are conducted using a commercial package based on the finite element method. Initially studies conducted with a rotating synchronous machine are presented. The second part presents studies performed with a linear machine, based on a conventional machine available at the Laboratory Applications of Superconductors UFRJ (LASUP). The use of this second machine is due to the ease of replacement of its field winding, made of copper, with a winding made of superconducting tapes, which will be done at a later stage. The variation of the torque/volume ratio, for the rotating machine, and force/weight ratio for the linear machine for several possible configurations, are presented and compared.

# Sumário

|                                                                                      |            |
|--------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>Lista de Figuras</b>                                                              | <b>x</b>   |
| <b>Lista de Tabelas</b>                                                              | <b>xiv</b> |
| <b>1 Introdução</b>                                                                  | <b>1</b>   |
| 1.1 Motivação . . . . .                                                              | 1          |
| 1.2 Objetivos . . . . .                                                              | 2          |
| 1.3 Metodologia . . . . .                                                            | 2          |
| 1.4 Apresentação dos capítulos . . . . .                                             | 2          |
| <b>2 Revisão Bibliográfica</b>                                                       | <b>3</b>   |
| 2.1 Supercondutividade . . . . .                                                     | 3          |
| 2.1.1 A Resistência nula . . . . .                                                   | 3          |
| 2.1.2 Campo Crítico e Efeito Meissner . . . . .                                      | 5          |
| 2.1.3 Supercondutores do Tipo I e II . . . . .                                       | 6          |
| 2.1.4 Supercondutores de Alta temperatura Crítica . . . . .                          | 7          |
| 2.2 Máquinas Supercondutoras . . . . .                                               | 9          |
| 2.2.1 Motores Supercondutores Rotativos . . . . .                                    | 10         |
| 2.2.2 Motores Supercondutores Lineares . . . . .                                     | 12         |
| 2.2.3 Geradores supercondutores . . . . .                                            | 12         |
| 2.2.4 Armazenamento de energia . . . . .                                             | 13         |
| <b>3 Estudo das Características Geométricas de Motores Rotativos Supercondutores</b> | <b>15</b>  |
| 3.1 Geometria I . . . . .                                                            | 18         |
| 3.2 Geometria II . . . . .                                                           | 19         |
| 3.3 Geometria III . . . . .                                                          | 20         |
| 3.4 Geometria IV . . . . .                                                           | 22         |
| 3.5 Geometria V . . . . .                                                            | 23         |
| 3.6 Geometria VI . . . . .                                                           | 24         |
| 3.7 Geometria VII . . . . .                                                          | 25         |
| 3.8 Geometria VIII . . . . .                                                         | 26         |

|          |                                                                    |           |
|----------|--------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.9      | Discussões . . . . .                                               | 27        |
| <b>4</b> | <b>Investigação dos Parâmetros de Projeto dos Motores Lineares</b> | <b>29</b> |
| 4.1      | Investigação dos Parâmetros Básicos . . . . .                      | 32        |
| 4.1.1    | Investigação da Influência do Tamanho do Gap . . . . .             | 33        |
| 4.1.2    | Investigação da Influência do Número de Camadas . . . . .          | 38        |
| 4.2      | Motores Lineares com Núcleo de Ar . . . . .                        | 41        |
| 4.2.1    | Cobre na Armadura e Supercondutor no Campo . . . . .               | 42        |
| 4.2.2    | Supercondutores na Armadura e no Campo . . . . .                   | 45        |
| 4.3      | Motores Lineares com Núcleo de Aço . . . . .                       | 49        |
| 4.3.1    | Enrolamentos de Cobre na Armadura e no Campo . . . . .             | 49        |
| 4.3.2    | Enrolamentos Supercondutores na Armadura e no Campo . . . . .      | 51        |
| 4.4      | Motor Linear com Parte do Núcleo de Ar . . . . .                   | 54        |
| 4.5      | Análises e Discussões . . . . .                                    | 59        |
| <b>5</b> | <b>Conclusões e Trabalhos Futuros</b>                              | <b>62</b> |
| 5.1      | Conclusões . . . . .                                               | 62        |
| 5.2      | Trabalhos Futuros . . . . .                                        | 63        |
|          | <b>Referências Bibliográficas</b>                                  | <b>65</b> |
| <b>A</b> | <b>Dados Construtivos da Armadura</b>                              | <b>68</b> |

# Lista de Figuras

|      |                                                                                                                                                      |    |
|------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.1  | Heike Kamerlingh Onnes(1853-1926) - Cientista Holandês que descobriu o fenômeno da supercondutividade . . . . .                                      | 4  |
| 2.2  | Medida da resistência do mercúrio para uma temperatura de 4 K. . .                                                                                   | 5  |
| 2.3  | Demonstração da levitação supercondutora, o bulk supercondutor se tranforma em um imã de polaridade contrária ao campo a que está submetido. . . . . | 6  |
| 2.4  | Curva de temperatura crítica para os principais materiais supercondutores existentes em relação ao ano de descoberta. . . . .                        | 8  |
| 2.5  | Camadas da fita SCS4050 fabricada pela SuperPower . . . . .                                                                                          | 9  |
| 2.6  | Aspecto tridimensional de um motor com núcleos de ar e enrolamentos supercondutores no campo. . . . .                                                | 11 |
| 3.1  | Seção com 1/6 do corte transversal do motor mostrando a malha triangular utilizada nas simulações. . . . .                                           | 17 |
| 3.2  | Fluxo para o motor Geometria I . . . . .                                                                                                             | 18 |
| 3.3  | Torque em função do tempo para o motor Geometria I. . . . .                                                                                          | 18 |
| 3.4  | Curva B x H do aço escolhido para configurações com núcleos ferromagnéticos. . . . .                                                                 | 19 |
| 3.5  | Densidade de fluxo para o motor Geometria II. . . . .                                                                                                | 20 |
| 3.6  | Torque em função do tempo para o motor Geometria II. . . . .                                                                                         | 20 |
| 3.7  | Linhas de densidade de fluxo para o motor Geometria III. . . . .                                                                                     | 21 |
| 3.8  | Torque para o motor Geometria III. . . . .                                                                                                           | 21 |
| 3.9  | Linhas de fluxo para o motor Geometria IV. . . . .                                                                                                   | 22 |
| 3.10 | Torque em função do tempo para o motor Geometria IV. . . . .                                                                                         | 23 |
| 3.11 | Linhas de fluxo para o motor Geometria V. . . . .                                                                                                    | 23 |
| 3.12 | Torque em função do tempo para o motor Geometria V. . . . .                                                                                          | 24 |
| 3.13 | Linhas de fluxo para o motor Geometria VI. . . . .                                                                                                   | 24 |
| 3.14 | Torque em função do tempo para o motor Geometria VI. . . . .                                                                                         | 25 |
| 3.15 | Linhas de fluxo para o motor Geometria VII. . . . .                                                                                                  | 25 |
| 3.16 | Torque em função do tempo para o motor Geometria VII. . . . .                                                                                        | 26 |
| 3.17 | Motor supercondutor Geometria VIII. . . . .                                                                                                          | 27 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.18 Torque em função do tempo para o motor supercondutor Geometria VIII. . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 27 |
| 4.1 Armadura utilizada nas simulações. Os enrolamentos em vermelho apresentam a Fase A, os enrolamentos em verde a Fase B e os enrolamentos em amarelo a Fase C. . . . .                                                                                                                                                                                           | 30 |
| 4.2 Dimensões da bobina supercondutora em formato racetrack. . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 31 |
| 4.3 Densidade de corrente nos enrolamentos de armadura para o motor A. . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 34 |
| 4.4 Correntes nos enrolamentos trifásicos em função do tempo para o motor A. A barra em preto representa o instante de tempo 250 ms. . . . .                                                                                                                                                                                                                       | 34 |
| 4.5 Ângulo de carga entre os campos gerados pela armadura e pelo enrolamento de campo. A diferença de posição entre os campos é igual ao ângulo de carga, que depende somente do passo polar do motor. O vetor $b_s$ é a densidade de fluxo gerada pelos enrolamentos de armadura e o vetor $b_r$ a densidade de fluxo gerada pelos enrolamentos de campo. . . . . | 35 |
| 4.6 Densidade de corrente nos enrolamentos de armadura para o motor B. . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 35 |
| 4.7 Bobina de 20 mm de diâmetro interno e 100 espiras. . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 36 |
| 4.8 Força de tração em função do ângulo de carga variando o gap para o motor A. . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                            | 36 |
| 4.9 Força de tração em função do ângulo de carga variando o gap para o motor B. . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                            | 37 |
| 4.10 Força vertical em função do ângulo de carga variando o gap para o motor A. . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                            | 37 |
| 4.11 Força vertical em função do ângulo de carga variando o gap para o motor B. . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                            | 38 |
| 4.12 Força de tração máxima em função do gap para o motor A e para o motor B. . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                              | 38 |
| 4.13 Força de tração em função do ângulo de carga variando o número de camadas para o motor A. A curva azul(1) apresenta a força para as bobinas de uma camada e a curva em vermelho(2) as de duas camadas. . . . .                                                                                                                                                | 39 |
| 4.14 Força vertical em função do ângulo de carga variando o número de camadas para o motor A. . . . .                                                                                                                                                                                                                                                              | 40 |
| 4.15 Força de tração em função do ângulo de carga variando o número de camadas para o motor B. . . . .                                                                                                                                                                                                                                                             | 40 |
| 4.16 Força vertical em função do ângulo de carga variando o número de camadas para o motor B. . . . .                                                                                                                                                                                                                                                              | 41 |
| 4.17 Densidade de fluxo magnético para primário com núcleo de ar e condutores de cobre a uma altura de 6 mm em relação aos da armadura. . . . .                                                                                                                                                                                                                    | 42 |

|      |                                                                                                                                                                                                              |    |
|------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.18 | Força de tração em função do ângulo de carga variando o número de espiras para primário com núcleo de ar. . . . .                                                                                            | 43 |
| 4.19 | Força vertical em função do ângulo de carga variando o número de espiras primário com núcleo de ar. . . . .                                                                                                  | 44 |
| 4.20 | Força de tração em função do ângulo de carga variando o diâmetro interno para primário com núcleo de ar. . . . .                                                                                             | 44 |
| 4.21 | Densidade de fluxo para armadura com núcleo de ar e supercondutor na armadura. . . . .                                                                                                                       | 45 |
| 4.22 | Linhas de fluxo para motor com os núcleos de ar e enrolamentos supercondutores no primário e no secundário. . . . .                                                                                          | 46 |
| 4.23 | Força em função do ângulo de carga variando o diâmetro interno para primário com núcleo de ar e supercondutor no primário. . . . .                                                                           | 47 |
| 4.24 | Força vertical em função do ângulo de carga variando o diâmetro interno para primário com núcleo de ar e supercondutor no primário. . . . .                                                                  | 47 |
| 4.25 | Força de tração em função do ângulo de carga variando o número de espiras para primário com núcleo de ar e supercondutor no primário. . . . .                                                                | 48 |
| 4.26 | Força vertical em função do ângulo de carga variando o número de espiras para primário com núcleo de ar e supercondutor no primário. . . . .                                                                 | 48 |
| 4.27 | Força máxima em função do número de espiras(a) e em função do diâmetro interno das bobinas(b). . . . .                                                                                                       | 49 |
| 4.28 | Força de tração em função do ângulo de carga variando o diâmetro para armadura e campo com núcleo de aço e enrolamentos de cobre na armadura e no campo. . . . .                                             | 50 |
| 4.29 | Linhas de fluxo para o motor com núcleos de aço e enrolamentos de cobre. . . . .                                                                                                                             | 51 |
| 4.30 | Força de tração em função do ângulo de carga variando as espiras para armadura e campo com núcleo de aço e enrolamentos de cobre na armadura e no campo, utilizando-se bobinas de 20 mm de diâmetro. . . . . | 51 |
| 4.31 | Densidade de fluxo magnético no primário com aço e enrolamentos supercondutores . . . . .                                                                                                                    | 52 |
| 4.32 | Força de tração variando ângulo de carga para motor com enrolamentos supercondutores e núcleo de aço. . . . .                                                                                                | 53 |
| 4.33 | Força vertical variando ângulo de carga para motor com enrolamentos supercondutores e núcleo de aço. . . . .                                                                                                 | 53 |
| 4.34 | Densidade de fluxo para corrente de 70 A no campo e bobina de 60 mm de diâmetro e 100 espiras. . . . .                                                                                                       | 54 |
| 4.35 | Linhas de fluxo magnético ao longo do motor impondo corrente contínua nas fases. . . . .                                                                                                                     | 55 |

|      |                                                                                                                                                                  |    |
|------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.36 | Mapeamento da densidade de fluxo magnético ao longo do motor impondo corrente contínua nas três fases, para um gap de 6 mm acima dos dentes da armadura. . . . . | 55 |
| 4.37 | Mapeamento da densidade de fluxo magnético a 6 mm de altura da armadura em função da distância para vários instantes de tempo. . .                               | 56 |
| 4.38 | Força para bobina de 100 espiras para vários diâmetros internos . . .                                                                                            | 57 |
| 4.39 | Força vertical variando o diâmetro interno das bobinas. . . . .                                                                                                  | 57 |
| 4.40 | Força em função do ângulo de carga variando o número de espiras da bobina . . . . .                                                                              | 58 |
| 4.41 | Força máxima em função do número de espiras(a) e em função do diâmetro interno das bobinas(b). . . . .                                                           | 58 |
| 4.42 | Região do núcleo de armadura que pode ter suas dimensões reduzidas.                                                                                              | 60 |
| 5.1  | Aparência do módulo primário utilizado para medidas de força de propulsão. . . . .                                                                               | 63 |
| 5.2  | Esquema do trilho para movimentação das bobinas e aquisição dos resultados experimentais. . . . .                                                                | 63 |
| 5.3  | Bobina de cobre, de 20 mm de diâmetro e 100 espiras, construída para aquisição de resultados experimentais. . . . .                                              | 64 |
| A.1  | Dados gerais do módulo de Armadura. . . . .                                                                                                                      | 68 |
| A.2  | Medidas dos parâmetros em mm . . . . .                                                                                                                           | 69 |

# Lista de Tabelas

|     |                                                                                                       |    |
|-----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.1 | Principais pesquisas de motores supercondutores na década de 2000. .                                  | 11 |
| 2.2 | Principais pesquisas de geradores supercondutores na década de 2000.                                  | 13 |
| 3.1 | Principais características do motor convencional rotativo. . . . .                                    | 16 |
| 3.2 | Resumo dos casos estudados e seus respectivos torques máximos. . . .                                  | 28 |
| 4.1 | Principais dados construtivos do motor linear com núcleo de ferro e<br>enrolamentos de cobre. . . . . | 31 |
| 4.2 | Consumo de fitas para o motor com núcleo de aço na armadura. . . .                                    | 58 |
| 4.3 | Dados gerais dos materiais dos motores lineares. . . . .                                              | 60 |
| 4.4 | Valores estimados da força de tração em função do peso do motor. . .                                  | 60 |

# Capítulo 1

## Introdução

A principal vantagem do uso de materiais supercondutores é a elevada densidade de corrente de trabalho dos fios e fitas feitos com estes materiais, além disso, não possuem perdas Joule como os condutores convencionais de cobre. As fitas supercondutoras de segunda geração como aquelas fabricadas com  $YBa_2Cu_3O_{7-\gamma}(Y-123)$ , também conhecido como *ítrio-bário-cobre-oxigênio* (YBCO), podem transportar uma corrente até 100 vezes maior do que em um condutor de cobre com dimensões similares, o que corresponde a uma densidade de corrente da ordem de  $10^8 \text{ A/m}^2$ , considerando-se a densidade de corrente crítica de engenharia (seção 2.1.4). Isto torna possível a redução de peso e volume de um motor supercondutor quando comparado com um motor convencional [1–4].

Estes materiais são uma possibilidade promissora para o desenvolvimento do setor elétrico mundial. Nas grandes cidades, onde cada vez mais o espaço torna-se um fator crítico, os supercondutores devem assumir um papel de relevância no cenário econômico. Por isso, pesquisas nestas áreas têm se intensificado nos últimos anos e as fitas supercondutoras de segunda geração, que são relativamente novas, têm se tornado objeto de pesquisa nas mais diversas aplicações com supercondutores.

### 1.1 Motivação

O interesse no estudo de máquinas supercondutoras tem crescido nestes últimos anos, especialmente em aplicações que utilizam máquinas rotativas de grande porte [5]. Foram feitas investigações preliminares, realizando simulações com motores síncronos rotativos, e tendo em vista que a utilização de supercondutores no lugar dos fios convencionais apresentam um incremento no torque, e permite reduzir o volume e o peso destas máquinas [6], estes motores foram investigados em maiores detalhes. O volume e o peso são fatores críticos em aplicações como transportes marítimos e aéreos, pois além do ganho em espaço de armazenamento de materiais e acomodação de passageiros, o peso influencia na estabilidade destes navios e aviões.

Outra aplicação importante são as turbinas eólicas de grande porte, equipamentos acima de 10 MW podem ser viáveis com a utilização de geradores supercondutores.

## **1.2 Objetivos**

O principal objetivo deste trabalho é desenvolver um projeto que será ponto de partida para a construção de máquinas rotativas de grande porte. A escolha inicial do motor linear, leva em conta a redução de custos e maior facilidade de construção de pequenas seções da máquina real, o que não é possível com um motor rotativo. O projeto avalia diversas possibilidades de construção destes motores, fazendo modificações no tipo de material utilizado, na geometria e nos enrolamentos deste motor, a fim de encontrar a configuração mais vantajosa em relação à força de tração destes motores.

## **1.3 Metodologia**

Investigações iniciais com motores rotativos foram realizadas com o programa Maxwell [7] que utiliza o método dos elementos finitos. Chegou-se à conclusão que o motor que apresenta o maior torque, pode ter sua seção aproximada de maneira satisfatória de um motor linear, considerando um motor rotativo de grandes dimensões. A partir de então iniciou-se um estudo com os motores lineares que irão permitir uma maior simplicidade e menor custo de construção de uma pequena seção para montagem experimental que será objeto de trabalhos futuros.

## **1.4 Apresentação dos capítulos**

Os capítulos deste trabalho estão divididos da seguinte forma: O presente capítulo apresenta a introdução com a motivação pela escolha do tema proposto, além dos objetivos e a sequência aqui estabelecida. O segundo capítulo trata da revisão bibliográfica realizada sobre o tema, trazendo uma breve descrição do fenômeno da supercondutividade e também das máquinas supercondutoras. O terceiro capítulo apresenta um estudo sobre a influência dos aspectos geométricos dos enrolamentos do rotor de um motor supercondutor rotativo. No capítulo quatro é feito um estudo sobre a variação de parâmetros de motores lineares considerando diversas topologias como: núcleos de aço e ar, além de enrolamentos de cobre e supercondutores. O capítulo cinco apresenta as conclusões relativas a pesquisa realizada e também os trabalhos em andamento e futuros.

# Capítulo 2

## Revisão Bibliográfica

Os materiais supercondutores vêm ganhando um destaque importante, com o crescimento do interesse pela comunidade científica, devido às vantagens que possuem em relação aos materiais convencionais. As aplicações destes materiais em escala industrial ainda são modestas, pois o custo alto é um fator limitante. No entanto há estimativas de que o preço das fitas supercondutoras seja bastante reduzido, aumentando sua comercialização. Este capítulo faz uma breve apresentação do fenômeno da supercondutividade. Também são apresentadas algumas aplicações em grande escala, ou seja, aquelas aplicações que envolvem campos magnéticos intensos e altas potências. Dentre elas se destacam os transportes, geração e armazenamento de energia elétrica.

### 2.1 Supercondutividade

Nesta seção são apresentadas as principais características de um material supercondutor, trazendo uma breve descrição das propriedades destes materiais para uma melhor compreensão de suas aplicações.

#### 2.1.1 A Resistência nula

Não fosse a possibilidade de liquefazer alguns gases a temperaturas baixíssimas, talvez não seria possível a descoberta do estado supercondutor de um material. Pode-se afirmar que, uma das questões principais era o que aconteceria com a resistência dos materiais metálicos em temperaturas próximas do zero absoluto, uma vez que se acreditava que próximo do zero absoluto, os átomos dos metais praticamente não vibrariam e dessa forma os elétrons poderiam “se mover” com mais facilidade. Por outro lado, os elétrons também poderiam reduzir sua mobilidade? O físico escocês, Lord Kelvin, criador da escala de temperaturas absolutas Kelvin, afirmara que a resistividade de um metal diminuía à medida que a temperatura decrescia,

passando por um mínimo e depois indo para o infinito próximo de zero absoluto.

Em 1906, um notável pesquisador holandês Heike Kamerlingh Onnes (Figura 2.1), teve êxito em liquefazer hidrogênio, iniciando um programa para investigar a resistência de metais em baixa temperatura. Em 1908 conseguiu atingir temperaturas da ordem de 4 K, quando liquefez o hélio, o que viria a render-lhe a sua maior descoberta alguns anos mais tarde. O processo de transferência do hélio líquido para um criostato foi demasiadamente complicado, sendo solucionado após muitos meses de intenso trabalho. Prosseguindo com seus estudos para alcançar temperaturas cada vez mais baixas, atingiu valores da ordem de 1.8 K, descobrindo o estado superfluido do hélio que ocorre na temperatura de 2.2 K.



Figura 2.1: Heike Kamerlingh Onnes(1853-1926) - Cientista Holandês que descobriu o fenômeno da supercondutividade [8].

No ano de 1911, Onnes descobriu um fato curioso ao realizar medidas de resistência elétrica com mercúrio, em um famoso experimento realizado no laboratório da universidade de Leiden. No experimento realizado em 23 de maio, foi verificada a validade da lei de Ohm para medidas de resistência em amostras de mercúrio até baixas temperaturas e notou que ao atingir a temperatura de 4.2 K a resistividade deste material caía drasticamente, indo a zero. Ao atingir este estado supercondutor Onnes verificou que ao aumentar a tensão no material, a corrente atingia valores que faziam a amostra transitar novamente ao seu estado normal, ou seja, existe uma corrente crítica que “destroi” a supercondutividade.

A Figura 2.2 apresenta uma reprodução do experimento realizado por Onnes. Em seu caderno de anotações número 56 ele escreveu a seguinte frase: mercúrio praticamente zero [10]. Esta temperatura, mais tarde viria a ser denominada temperatura crítica do material supercondutor, que é a temperatura abaixo da qual o material passa de seu estado normal para o estado supercondutor.

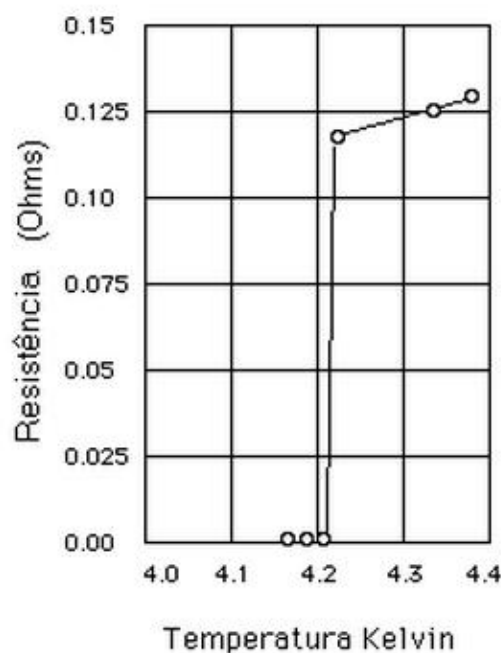


Figura 2.2: Medida da resistência do mercúrio para uma temperatura de 4 K. [9]

### 2.1.2 Campo Crítico e Efeito Meissner

Kamerlingh Onnes, logo após sua descoberta, ficou empolgado com a possibilidade de se construir um forte eletroímã, porém, o trabalho de um pesquisador nem sempre é fácil, ele descobriu que além de uma temperatura crítica os materiais supercondutores possuíam um campo crítico e bem pequeno por sinal, o que o decepcionou profundamente, pois desejava construir magnetos que pudessem produzir intensidade de campo da ordem de 10 T, o que viria a ser possível bem mais tarde com a descoberta de novos materiais. Atualmente o acelerador de partículas do CERN trabalha com campos de 8 T, com bobinas feitas de nióbio-titânio, que possui campo crítico bem elevado, comparado com os materiais conhecidos na época do referido cientista [11].

O importante experimento realizado com amostras de chumbo, constatou que além do desaparecimento da supercondutividade em decorrência da corrente crítica, esta também desaparecia com um campo em torno de 60 mT, que foi denominado campo crítico.

Assim para que possa ser explorado o estado supercondutor de um material, é necessário que valores limites de três grandezas sejam respeitados: a temperatura crítica  $T_C$ , a densidade de corrente crítica  $J_C$  e por fim o campo crítico  $H_C$ . Quaisquer quantidades que ultrapassem estes determinados valores críticos, farão com que a supercondutividade deixe de existir, retornando a seu estado normal.

Walther Meissner descobriu que no interior dos supercondutores o campo magnético se anulava  $B = 0$ , ou seja, as supercorrentes criadas no supercondutor compensava a ação do campo externo, fato este denominado diamagnetismo perfeito, e esta característica é conhecida como efeito Meissner. [10]

### 2.1.3 Supercondutores do Tipo I e II

Os supercondutores Tipo I, são aqueles que apresentam campo crítico muito bem definido, chamado  $H_c$ . Estes quando submetido a um campo externo estando em seu estado supercondutor, ocorre completa expulsão do campo magnético de seu interior. Este campo crítico costuma ser muito baixo, tornando muito limitada a sua utilização em dispositivos práticos.

A partir da descoberta dos supercondutores tipo II, se multiplicaram a sua utilização nas mais diversas aplicações, pois estes possuem elevados campos críticos, permitindo a fabricação dos mais diversos dispositivos que necessitam de campos intensos. Estes na verdade não possuem apenas um campo crítico, possuem dois  $H_{C1}$  e  $H_{C2}$ , que separam três fases do material.

O primeiro deles,  $H_{C1}$  é o limite do diamagnetismo perfeito, em quaisquer valores abaixo deste campo o supercondutor expulsa completamente o fluxo de seu interior. Quando os valores de campo são intermediários entre  $H_{C1}$  e  $H_{C2}$ , acontece a expulsão parcial do fluxo de seu interior, ficando uma parte deste fluxo aprisionado no material. Este fluxo é quantizado e denominado fluxóide. Acima de  $H_{C2}$  o material deixa de ser supercondutor.

Devido ao  $H_{C2}$  elevado, a fabricação de dispositivos de levitação magnética supercondutora torna-se possível. A vantagem deste tipo de levitação é que esta confere uma maior estabilidade, diferentemente de outros tipos conhecidos, como eletrodinâmica e eletromagnética. Uma demonstração de levitação supercondutora realizada no LASUP pode ser observada na Figura 2.3.



Figura 2.3: Demonstração da levitação supercondutora, o bulk supercondutor se transforma em um ímã de polaridade contrária ao campo a que está submetido.

Dentre os supercondutores do tipo II, o  $Nb_3Sn$  se destacou entre os pesquisadores e continua até os dias atuais sendo muito utilizado, pois alcança uma corrente de  $1.5 \times 10^9 A/m^2$  e campos de  $8.8T$ , a uma temperatura de  $4.2 K$ , uma grande evolução quando comparado com os materiais conhecidos à época de Onnes que tinham campos críticos da ordem de  $mT$ . Em seguida o  $Nb - Ti$  surgiu como uma opção promissora atingindo campo crítico de  $14.5 T$  e possibilitou o surgimento do primeiro fio supercondutor multifilamentar produzido comercialmente.

### 2.1.4 Supercondutores de Alta temperatura Crítica

Até a década de 1970, uma das grandes barreiras para as aplicações do supercondutor foi sem dúvida o custo de refrigeração destes dispositivos com hélio líquido. Gasta-se muita energia para alcançar temperaturas tão baixas, tornando muitas vezes a manutenção do funcionamento dos dispositivos supercondutores mais cara que a própria produção dos fios. O composto  $BaLaCuO_x$ , com temperatura crítica em torno de  $30 K$ , foi quem trouxe a perspectiva de que era possível atingir temperaturas críticas cada vez mais altas.

Na década de 1980, iniciaram-se a descoberta dos primeiros compostos com temperaturas críticas maiores que o ponto de ebulição do nitrogênio, que é de  $77 K$ , trazendo uma grande vantagem em relação aos supercondutores até então conhecidos. Estes materiais, conhecidos como supercondutores de alta temperatura crítica (“High Temperature Superconductors”, HTS), possuem custo de refrigeração com o nitrogênio líquido cerca de 70 vezes menor do que com hélio, o que inegavelmente coloca-os em grande vantagem. Dentre os HTS destacaram-se o  $Bi_2Sr_2CaCu_2O_x(Bi - 2212)$  e os compostos de  $YBCO$ . [10]

A Figura 2.4 mostra os principais materiais supercondutores com suas respectivas temperaturas críticas.

A descoberta o composto  $Bi_2Sr_2CaCu_2O_x(Bi - 2212)$  ocorreu em 1989 por Heine, e foi uma grata surpresa por seu elevadíssimo campo crítico de  $25T$ . Os compostos de  $Bi_2Sr_2CaCu_2O_x(Bi - 2212)$ , cumprem muito bem o seu papel em diferentes aplicações como motores, cabos com correntes altas e ímãs de grandes densidades de campo.

No entanto os primeiros experimentos mostraram que a corrente crítica não era tão alta como se esperava, já que o material é anisotrópico. Com o passar do tempo o domínio das técnicas de deposição de filmes finos possibilitaram a produção de supercondutores em forma de fitas, o que tornou as correntes críticas bem maiores. O primeiro supercondutor a ser fabricado com esta técnica foi o composto cerâmico  $Bi_2Sr_2CaCu_2O_x(Bi - 2212)$ , que era fabricado no formato de fitas envoltas por prata, que conferia-lhe boa rigidez mecânica, já que a fragilidade dos materiais cerâ-

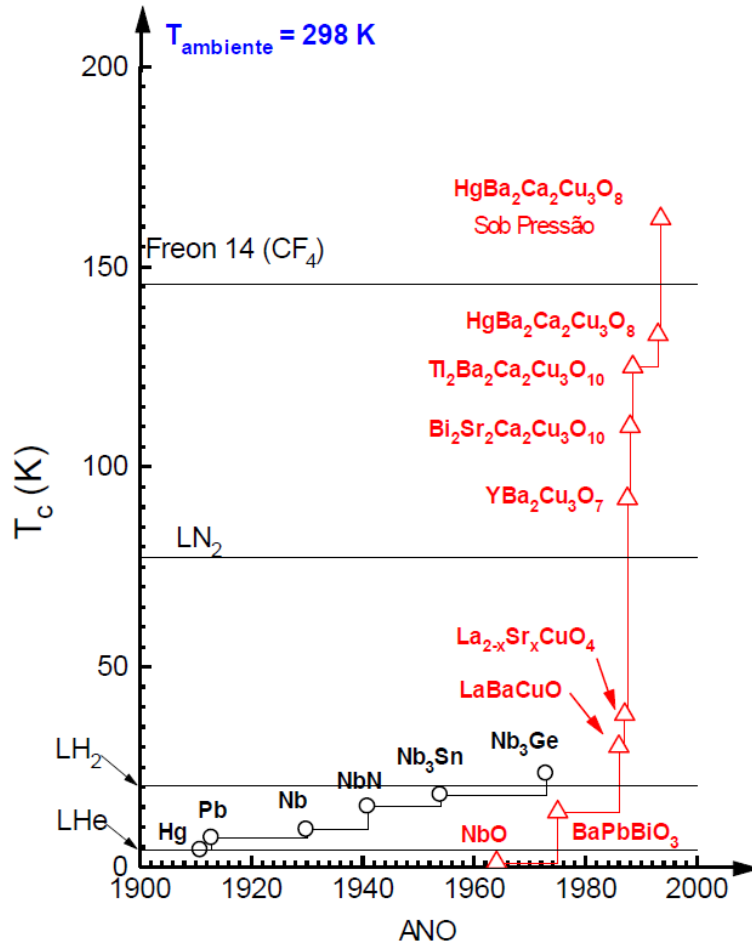


Figura 2.4: Curva de temperatura crítica para os principais materiais supercondutores existentes em relação ao ano de descoberta.

micos é grande. Além deste problema, estas fitas de primeira geração apresentavam grande influência de campos perpendiculares a seu plano, diminuindo muito a corrente crítica. Por fim, a presença da prata na fabricação encarecia muito o processo, limitando as aplicações da fita.

As fitas supercondutoras de segunda geração(2G) surgiram para solucionar alguns dos problemas apresentados pelas de primeira geração(1G). O processo de fabricação utilizando camadas, muito mais complexo que nas fitas 1G, foram um passo importante para conferir estabilidade a fita 2G. Na Figura 2.5 podem-se observar várias camadas na Fita de YBCO, a camada de substrato metálico serve para dar orientação aos grãos do material, enquanto que a camada de cobre serve de estabilizante térmico, ajudando na troca de calor do material supercondutor(SC) com o nitrogênio líquido. Uma terceira camada de prata serve para proteger o supercondutor do ambiente externo e por último a camada com o material supercondutor que possui apenas  $1\mu m$  de espessura e  $4mm$  de largura, ou seja, toda a corrente

de transporte passa apenas por esta fina camada supercondutora. A Figura 2.5 apresenta um modelo de fita supercondutora fabricada pela SUPERPOWER com as suas respectivas camadas.

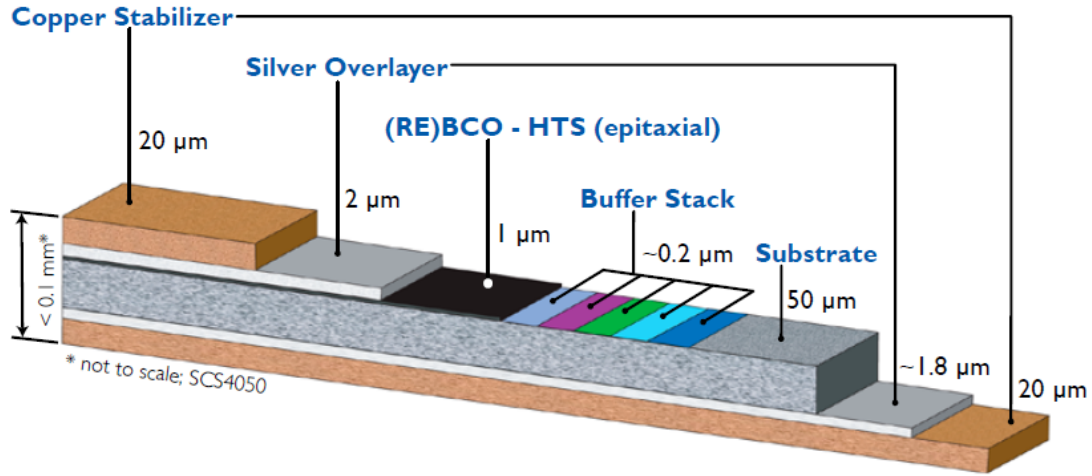


Figura 2.5: Camadas da fita SCS4050 fabricada pela SuperPower [12]

A fita SCS4050, têm uma corrente crítica de 80 A, correspondendo a densidade de corrente crítica de engenharia  $J_E = 2 \times 10^8 A/m^2$ , que é a densidade de corrente crítica levando em consideração toda a seção da fita, incluindo as camadas não condutoras como os substratos, o cobre e a prata. Contudo, toda a corrente é transportada pela fina camada em preto apresentada na Figura 2.5, então a densidade de corrente que passa pelo supercondutor é de  $J_C = 2 \times 10^{10} A/m^2$ , considerando somente a área da seção ocupada pela camada de  $1\mu m$  ocupada pelo material supercondutor. Estima-se que estes valores aumentarão ainda mais com o aperfeiçoamento das técnicas de fabricação e com a descoberta de outros materiais supercondutores.

A partir destas descobertas houve um grande aumento na fabricação destes materiais, pois o gasto de energia para liquefazer o nitrogênio é cerca de 40 vezes menor do que para liquefazer o hélio, tornando o custo para refrigerar os supercondutores bem menor. No entanto o custo de fabricação das fitas supercondutoras ainda é alto, o que tem limitado a fabricação de equipamentos fabricados com estes materiais. Especula-se que com a diminuição do custo destes materiais, o setor elétrico poderá sofrer grandes transformações e novas aplicações importantes possam surgir.

## 2.2 Máquinas Supercondutoras

As pesquisas com máquinas rotativas supercondutoras iniciaram-se após o desenvolvimento de fios de  $Nb - Ti$  e  $Nb_3Sn$  a partir da década de 1960. Estes materiais chamados de supercondutores de baixa temperatura crítica (“Low Temperature Superconductors”, LTS), necessitam de refrigeração com hélio líquido ou gás hélio, o

que trouxe certa dificuldade para o desenvolvimento destas máquinas por conta do custo elevado para manter o supercondutor refrigerado. Após o desenvolvimento dos materiais supercondutores de alta temperatura crítica, que podem ser refrigerados com nitrogênio líquido, a viabilidade econômica para a construção destes motores tem aumentado significativamente e têm surgido projetos de grande porte para os motores supercondutores.

### 2.2.1 Motores Supercondutores Rotativos

Os motores rotativos são uma das principais aplicações para os materiais supercondutores, no entanto ainda não há fabricação em escala industrial, o desenvolvimento destes motores está a nível acadêmico, ou em projetos isolados de grandes empresas. Como estes motores são objeto de interesse para o LASUP, nesta dissertação iniciou-se um estudo inicial sobre motores rotativos, com a apresentação de um trabalho denominado “*Influência da Geometria do Rotor no Torque de um Motor Síncrono Supercondutor*” apresentado no Congresso Brasileiro de Automática 2012(CBA 2012) [6]. No entanto devido a grande complexidade dos motores rotativos pretende-se elaborar um estudo sobre motores lineares, para possibilitar uma maior simplicidade de construção e posterior aquisição de resultados experimentais que servirão como base para uma investigação mais aprofundada dos motores rotativos.

O desenvolvimento destes motores está muito ligado a interesses militares, onde tem-se como principal exemplo a marinha americana, que têm financiado a construção de diversos motores de potências elevadas para serem utilizados em navios de guerra [2]. No entanto, também há o interesse em aplicações de transporte comercial de cargas e passageiros.

Grande parte das topologias pesquisadas nos últimos anos são de motores com núcleos de ar e supercondutores somente nos enrolamentos de campo, que possui alimentação em corrente contínua. Enrolamentos supercondutores para correntes alternadas são evitados, pois estes materiais apresentam perdas Joule devido a variações de campos magnéticos. A Figura 2.6 apresenta o esquema de um motor com esta configuração.

Na década de 2000 foram desenvolvidas pesquisas com motores supercondutores, onde destacam-se as empresas: American Superconductor, Siemens, IHI Marine conforme apresentado na Tabela 2.1. Apenas o primeiro motor desenvolvido pela American Superconductor foi desenvolvido para demonstração, todos os outros tinham foco na propulsão de navios de grande porte. Dentre estes motores o mais potente foi desenvolvido sob encomenda para a Marinha Americana e possui uma potência de 36 MW, gerando um torque de  $2.9 \times 10^6 N.m$  [1].

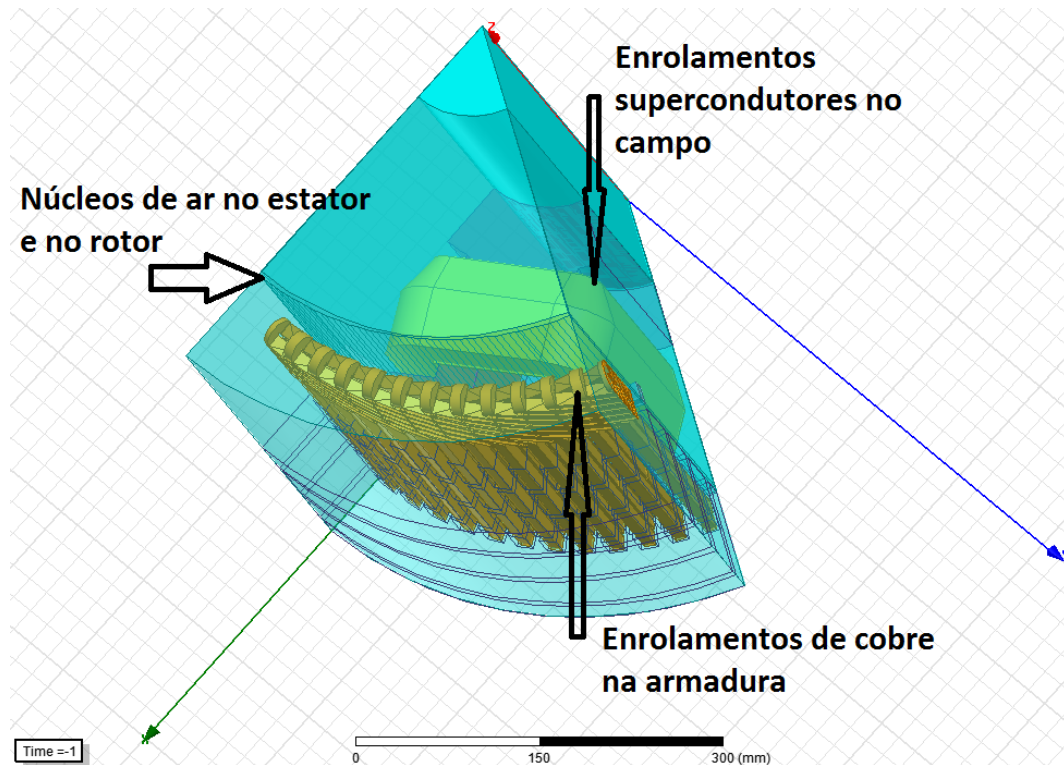


Figura 2.6: Aspecto tridimensional de um motor com núcleos de ar e enrolamentos supercondutores no campo.

Tabela 2.1: Principais pesquisas de motores supercondutores na década de 2000. [10]

| Empresa                      | Características do Motor | Ano de Conclusão |
|------------------------------|--------------------------|------------------|
| American Superconductor(EUA) | Motor de 5 MW            | 2004             |
| American Superconductor      | Motor de 36 MW           | 2008             |
| Siemens(Alemanha)            | Motor de 4 MW            | 2000             |
| IHI Marine(Japão)            | Motor de 2.5 MW          | 2010             |

Além destes motores, desenvolvidos por empresas Americanas, Alemãs e Japonesas, outros países como Coréia e China também têm iniciado projetos nesta área. Recentemente o Ministério de Ciências da China financiou um projeto para a construção de um motor de 1 MW de potência e quatro polos. Este motor apresenta enrolamentos de cobre na armadura e bobinas supercondutoras no campo, conforme pode ser visto em [13]. Além destes, muitos outros motores de menores potências estão em desenvolvimento em diversos países, como na Coréia [14, 15] onde uma série de projetos de motores supercondutores utilizam fitas supercondutoras LTS, como as de  $Bi_2Sr_2CaCu_2O_x(Bi - 2212)$ . A nova tendência de substituição das fitas supercondutoras LTS por HTS pode contribuir muito para o início da produção destes motores em larga escala, já que estas fitas trabalham com densidade de fluxo magnético mais intenso.

### 2.2.2 Motores Supercondutores Lineares

Os motores lineares constituem o que normalmente se chama projeto não-convencional de máquinas elétricas. Isto, devido as suas características diferenciadas, quando comparados com os motores rotativos, que já tem muito bem desenvolvida toda a técnica de projeto e construção. O método dos elementos finitos surgem como um importante aliado em projetos de máquinas não-convencionais, muito mais quando se trata de máquinas construídas com elementos supercondutores. [16].

Existem algumas topologias para construção de motores supercondutores, entre elas os motores com enrolamentos primários supercondutores, conforme pode ser visto nos trabalhos [17, 18], onde no secundário são utilizados imãs permanentes. Nos motores convencionais, um dos maiores problemas encontrados são as perdas por efeito Joule nos enrolamentos. No caso de motores com enrolamentos supercondutores estas perdas podem ser consideradas nulas quando estas fitas transportam corrente contínua. No entanto a utilização de fitas supercondutoras para transportar corrente alternada deve ser observada com cuidado, pois para frequências elevadas podem ocorrer perdas ohmicas não desprezíveis.

Em alguns projetos são utilizados primários com fitas supercondutoras e secundários com enrolamentos convencionais, ou barras curto-circuitadas. Por exemplo, Kim [19] e Keller [20] estudaram os efeitos de se utilizar os materiais supercondutores nos enrolamentos primários de motores lineares.

Alguns projetos utilizam blocos supercondutores no lugar no campo, explorando a levitação magnética supercondutora, no entanto este tipo de motor não tem tido tanta relevância nas pesquisas atuais [21–26].

De forma similar ao motor rotativo supercondutor construído pela American superconductor, motores lineares onde os enrolamentos de campo são de bobinas supercondutoras e os enrolamentos primários são de cobre, apresentando núcleo de ar tanto no primário como no secundário têm sido desenvolvidos [27–29].

### 2.2.3 Geradores supercondutores

Como dito anteriormente a principal vantagem para implementação de máquinas rotativas supercondutoras são as altas densidades de fluxo e correntes. Este incremento irá gerar aumento no torque que implica em redução do volume e peso do motor.

Os geradores supercondutores possuem até 1/3 do peso e as perdas ocasionadas por efeito Joule gira em torno da metade em relação à um gerador convencional [30]. Além disso a baixa reatância síncrona e a rápida resposta à demanda de energia, por causa de sua reduzida inércia, são vantagens relacionadas à um gerador com enrolamentos supercondutores. A Tabela 2.2 mostra alguns dos principais geradores

desenvolvidos na década de 2000.

Tabela 2.2: Principais pesquisas de geradores supercondutores na década de 2000. [10]

| Empresa                      | Características | Ano de Conclusão |
|------------------------------|-----------------|------------------|
| Reliance Electric            | 10 MVA          | 2008             |
| Siemens(Alemanha)            | 4 MVA           | 2005             |
| American Superconductor(EUA) | 40 MVA MW       | 2006             |
| American Superconductor      | Eólico de 8 MW  | 2010             |

Uma importante aplicação para estes geradores é a energia eólica que é similar a produzida por um gerador de uma usina hidroelétrica, sendo o vento o agente responsável por girar a turbina e induzir correntes nos enrolamentos.

Existe a opção de combinar gerador HTS com uma turbina a gás formando um bloco de alimentação, esta combinação tem um peso de 8 a 10 vezes menor que um gerador convencional movido a diesel. Estas unidades compactas irão encontrar também boas aplicações em instalações fixas. Além disso, como se tratam de máquinas mais eficientes o espaço de armazenamento de combustível é reduzido, além de reduzir os efeitos da poluição trazendo benefícios ecológicos e econômicos.

## 2.2.4 Armazenamento de energia

A energia elétrica é muito versátil e eficiente, podendo ser gerada e transmitida a grandes distâncias sem maiores problemas. Um das questões ainda encontradas diz respeito a questão da armazenagem da energia para utilização a posteriori. Encontra-se alguma dificuldade neste aspecto por falta de sistemas seguros e eficientes. Os armazenadores químicos são agressivos ao meio ambiente por conter materiais poluentes, além disso perdem sua carga com o passar do tempo, mesmo que não estejam sendo utilizados.

A geração de energia solar depende de armazenadores de energia, pois está disponível somente durante o dia, e precisa ser guardada para o uso noturno e para dias de baixa insolação. As bobinas supercondutoras por ter resistência nula podem armazenar energia em seu campo magnético através das correntes persistentes que circulam por ela, sem gerar perdas significativas, sendo uma boa solução para o armazenamento de energia do tipo solar sem os inconvenientes da poluição e das perdas causadas por armazenadores convencionais.

Outra forma de armazenagem de energia é o “flywheel”, que é uma máquina rotativa semelhante a um motor, que é acelerada gradativamente até atingir velocidades altíssimas armazenando energia cinética. Esta energia cinética pode ser novamente convertida em energia elétrica no caso de faltas ou aumento da demanda. O flywheel

convencional apresenta um problema em relação ao atrito já que existe o contato mecânico entre os mancais. No flywheel supercondutor este problema é inexistente pois pode ser explorado o efeito de expulsão do fluxo magnético fazendo com que os mancais não tenham contato físico resolvendo o problema do atrito e aumentando a robustez e eficiência do sistema.

Recentemente no Brasil, no início do ano de 2013, houve uma nova ameaça de “apagão” devido aos baixos níveis de água nos reservatórios de usinas hidrelétricas, sendo este um problema bastante sério enfrentado pelo Governo Brasileiro. Estes armazenadores de energia do tipo supercondutor podem vir a contribuir para a solução dos problemas de demanda energética, pois em momentos de excesso de produção, a energia elétrica poderia ser armazenada por dias e até meses nestes dispositivos devido as baixas perdas energéticas, sendo útil em momentos onde houver grande demanda de energia, aumentando a confiabilidade do sistema de transmissão e inclusive resolvendo problemas relacionados a demanda de energia nos horários de pico, em que podem acontecer problemas de falta.

Ainda há muito para ser desenvolvido nesta área, principalmente por conta dos custos das fitas e de problemas relacionados a refrigeração, mas estes equipamentos podem contribuir muito para minimizar os problemas relacionados a demanda de energia no mundo, sendo uma área de pesquisa promissora.

## Capítulo 3

# Estudo das Características Geométricas de Motores Rotativos Supercondutores

Programas de simulação são ferramentas poderosas para identificar as configurações mais adequadas na execução de projetos experimentais. Desta forma, no presente trabalho são realizadas simulações no programa comercial Maxwell, que utiliza o método dos elementos finitos. Estas simulações são de grande importância para diminuir os custos, visto que pode-se estimar valores de grandezas sem que seja necessária a montagem experimental, economizando recursos.

Neste capítulo é apresentado primeiramente um estudo preliminar com motores rotativos que possuem os enrolamentos de campo supercondutores. Este estudo visa reconhecer como as características geométricas dos enrolamentos secundários podem influenciar na resposta de torque de um motor com núcleos de ar. A partir destas análises ficou estabelecido que um caminho mais viável é estudar primeiramente motores lineares para tornar mais simples uma possível montagem experimental.

Esta etapa do trabalho com investigação das características de um motor rotativo supercondutor é um trabalho inicial, que tem por objetivo reconhecer as características básicas de um estudo que faz parte de um projeto de construção de um motor rotativo de grande porte, que será desenvolvido no LASUP. Após a realização destas simulações, com o objetivo de verificar resultados obtidos, estes foram comparados com resultados obtidos experimentalmente de um motor rotativo de grande porte construído pela marinha americana.

Foram feitas variações nas correntes de transporte dos fios, no tipo de material e nas características geométricas do motor proposto, encontrando-se a configuração que apresenta o maior torque.

De forma a permitir uma análise das topologias propostas, adotou-se como valo-

res de referência aqueles utilizados em um motor de construção convencional, cujos principais dados construtivos e características operacionais são apresentados na Tabela 3.1.

A partir deste projeto inicial, foram simuladas algumas variações na construção do rotor, analisando o seu efeito no torque eletromagnético. Conforme será apresentado adiante as características geométricas podem influenciar de maneira significativa na resposta de torque do motor, podendo alcançar valores até duas vezes maiores.

Tabela 3.1: Principais características do motor convencional rotativo.

| Dados Gerais          |           |
|-----------------------|-----------|
| Número de polos       | 6         |
| Tensão                | 400V      |
| Velocidade síncrona   | 1000rpm   |
| Potência              | 538KW     |
| Estator               |           |
| Diâmetro externo      | 736.6 mm  |
| Diâmetro interno      | 558.8 mm  |
| Comprimento do núcleo | 395 mm    |
| Material              | M924G     |
| Numero de ranhuras    | 72        |
| Rotor                 |           |
| Diâmetro externo      | 551.7 mm  |
| Diâmetro interno      | 160 mm    |
| Comprimento do núcleo | 395 mm    |
| Material              | steel1008 |
| Condutores por pólo   | 380       |

Em todas as simulações apresentadas nesta seção, seja de motores convencionais ou motores supercondutores, a alimentação dos enrolamentos do estator (armadura) é feita por tensão alternada trifásica e nos enrolamentos do rotor (campo) é feita por imposição de corrente contínua. A forma e o tamanho dos enrolamentos do estator, não são modificados durante as simulações.

Foi considerado um comprimento fixo para o núcleo de 395 mm. Sempre que houver referência à área dos enrolamentos deve ser considerada a seção reta destes motores considerando que não há variação do comprimento na direção z, que corresponde a uma direção perpendicular ao plano da folha, enquanto que x corresponde a direção horizontal e y a direção vertical.

A malha criada no programa Maxwell 2D é apresentada na Figura 3.1, onde é mostrado apenas 1/6 da seção em corte transversal do motor convencional estudado que possui enrolamentos de cobre e núcleo de aço no estator e no rotor. Este motor está disponível na biblioteca do RMXprt, e foi posteriormente exportado para o programa Maxwell, sendo simulado no modo transiente. Em virtude da simetria

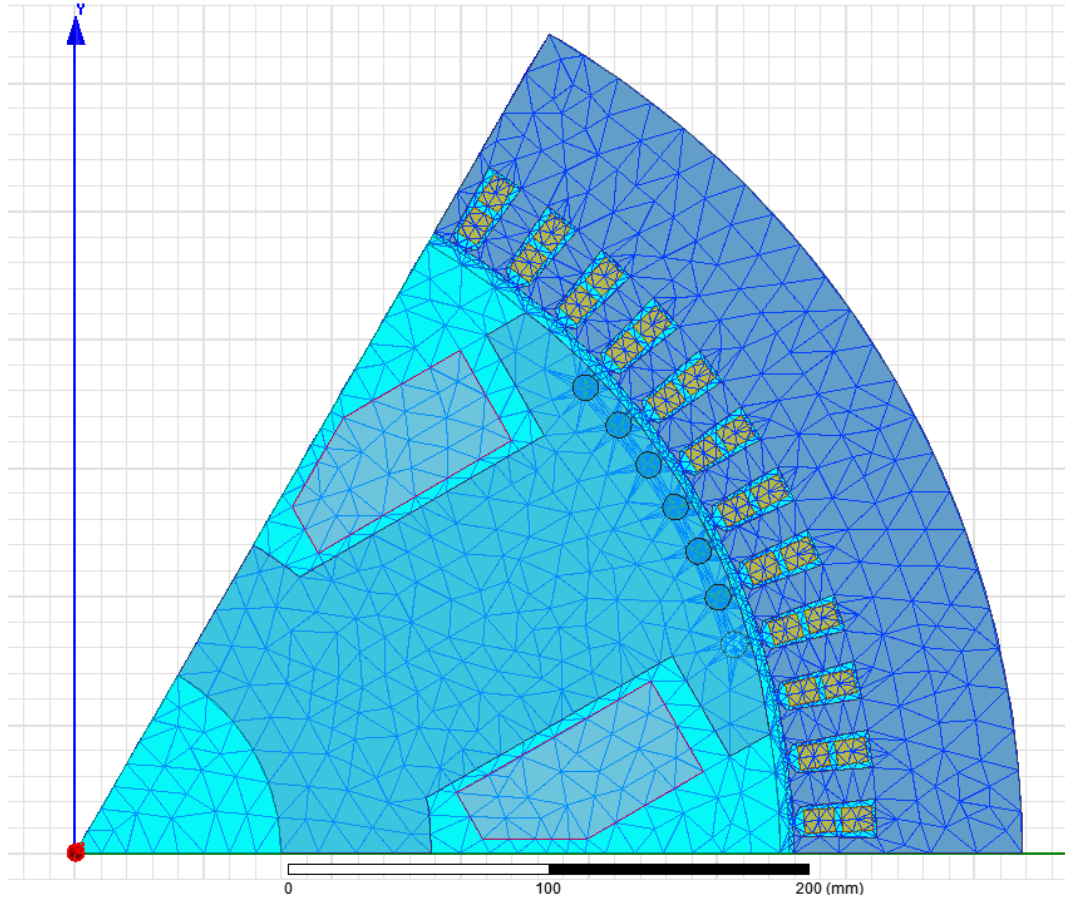


Figura 3.1: Seção com 1/6 do corte transversal do motor mostrando a malha triangular utilizada nas simulações.

do motor as simulações podem ser realizadas apenas nesta seção. A geometria dos enrolamentos do rotor é modificada em cada etapa para identificar qual opção, com enrolamentos supercondutores, apresenta o maior torque.

Para os enrolamentos do tipo supercondutores é utilizada a densidade crítica de corrente de engenharia de  $10^8 A/m^2$ , nos enrolamentos do rotor com alimentação em corrente contínua, enquanto que nos enrolamentos do estator é utilizada uma valor de densidade de corrente de  $10^6 A/m^2$  típica de um enrolamento de cobre convencional. Para o motor convencional é utilizado um valor de densidade de corrente de  $10^6 A/m^2$  nos enrolamentos do rotor e também do estator. Considera-se que o motor supercondutor tem fitas supercondutoras apenas no rotor, o estator tem enrolamentos de cobre [4]. A alimentação dos enrolamentos do estator é feita por imposição de tensão de 400 V do tipo alternada, em todos os casos, enquanto que nos enrolamentos do rotor é feita a imposição de corrente contínua.

### 3.1 Geometria I

A Figura 3.2 mostra as linhas de fluxo magnético no motor com enrolamentos convencionais no rotor, ou seja, com densidade de corrente de  $10^6 A/m^2$ . Os núcleos são de aço tanto no estator quanto no rotor. A curva de torque em função do tempo é mostrada na Figura 3.3. É possível verificar que o valor do torque em regime permanente é de aproximadamente  $3kNm$  para o motor convencional. As oscilações na curva de torque foram observadas, mas não foram investigadas.

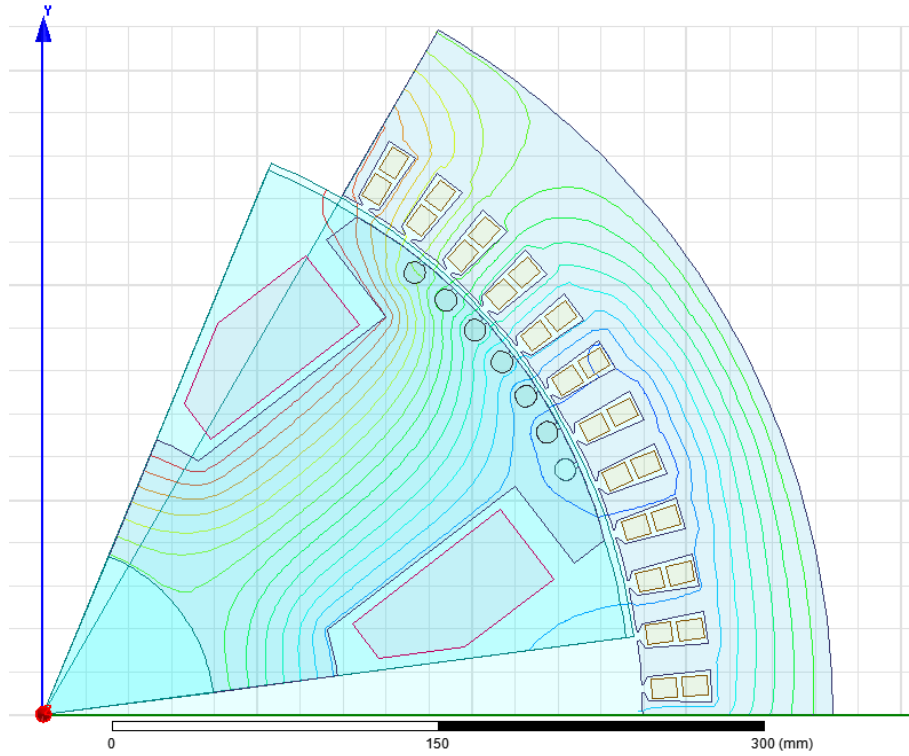


Figura 3.2: Fluxo para o motor Geometria I

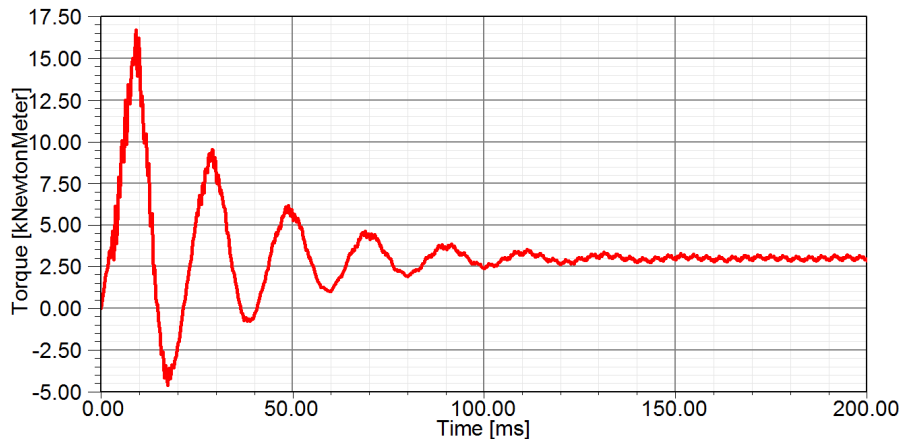


Figura 3.3: Torque em função do tempo para o motor Geometria I.

O núcleo de ferro presente nas partes do motor neste caso, aumentam a permeabilidade direcionando as linhas de fluxo magnético e diminuindo a dispersão. Em algumas regiões do núcleo pode-se notar a saturação do material ferromagnético, conforme visualizado na Figura 3.2 e na Figura 3.4, que mostra a curva  $B \times H$  para o aço utilizado no rotor.

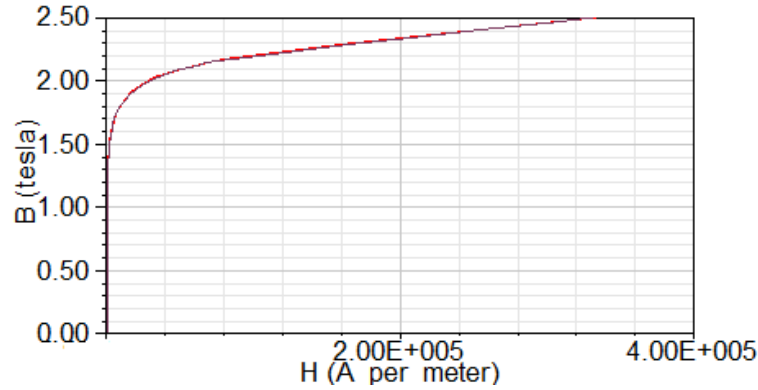


Figura 3.4: Curva  $B \times H$  do aço escolhido para configurações com núcleos ferromagnéticos.

No caso de um motor feito com fitas supercondutoras este problema da saturação se agrava, não fazendo mais sentido em manter o ferro, pois a permeabilidade passa a ser a mesma do ar, necessitando apenas de algum material que forneça a resistência mecânica necessária para o funcionamento do motor, onde pode ser utilizado um material que não seja ferromagnético para não interferir no funcionamento da máquina.

## 3.2 Geometria II

O motor apresentado aqui possui enrolamentos do rotor supercondutores com densidade de corrente de  $10^8 A/m^2$ , e núcleo de aço no estator e no rotor. Os enrolamentos do estator em todas as simulações são de cobre, ou seja, transportam uma densidade de corrente máxima de  $10^6 A/m^2$ . A Figura 3.5 apresenta a densidade de fluxo para este motor. Verificando a curva apresentada na Figura 3.4, é possível observar que a maior parte do núcleo do rotor apresenta saturação.

Neste caso não é mais tão vantajoso utilizar núcleos com material ferro magnético, pois iriam contribuir pouco no aumento da densidade de fluxo magnético no interior do motor. Somente iriam aumentar o volume e peso.

A substituição dos enrolamentos convencionais por supercondutores no rotor contribuiu muito no aumento do torque em regime permanente, conforme apresentado na Figura 3.6, tendo um incremento de  $3kNm$  para  $27,5kNm$ , o que representa um valor cerca de 9 vezes maior que o torque do motor tipo I, o qual possui enrolamentos

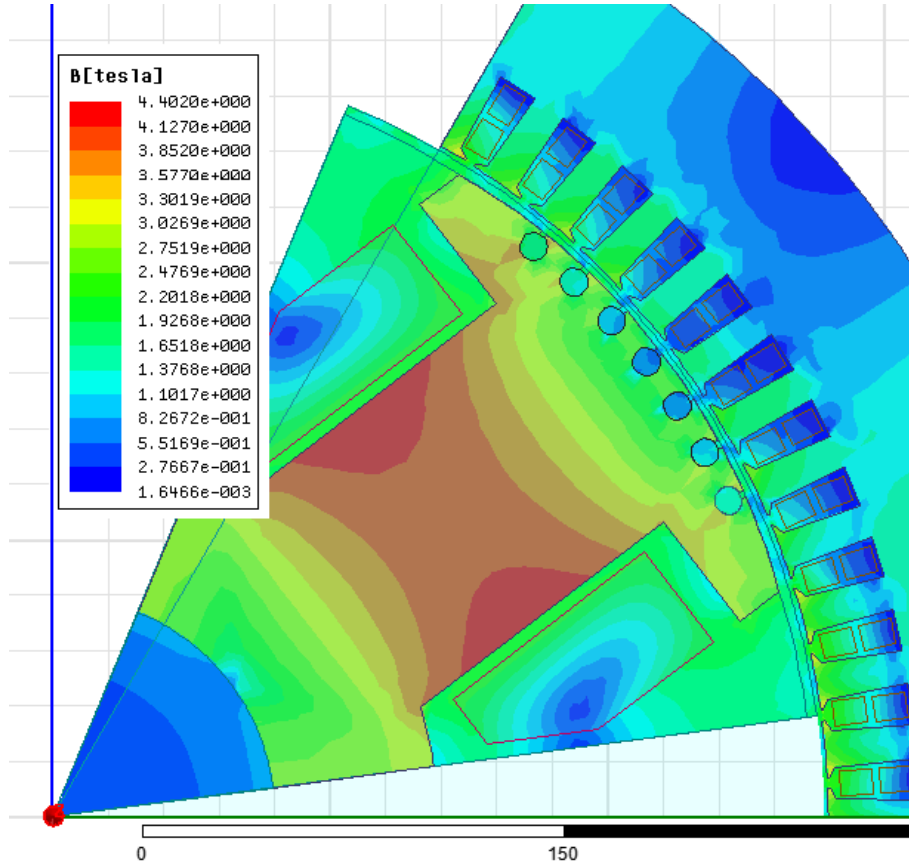


Figura 3.5: Densidade de fluxo para o motor Geometria II.

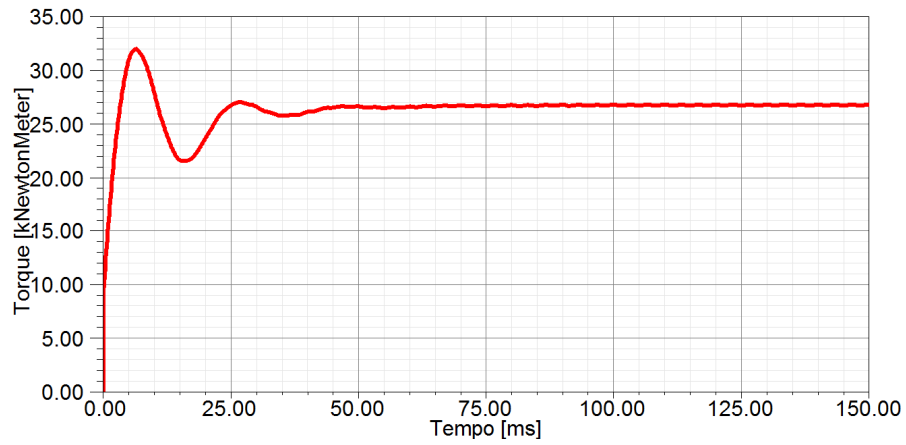


Figura 3.6: Torque em função do tempo para o motor Geometria II.

convencionais.

### 3.3 Geometria III

Nesta etapa, foi investigado o valor do torque quando o material dos núcleos do rotor e estator são modificados de aço para ar, a fim de verificar se é vantajoso manter o material ferromagnético no motor.

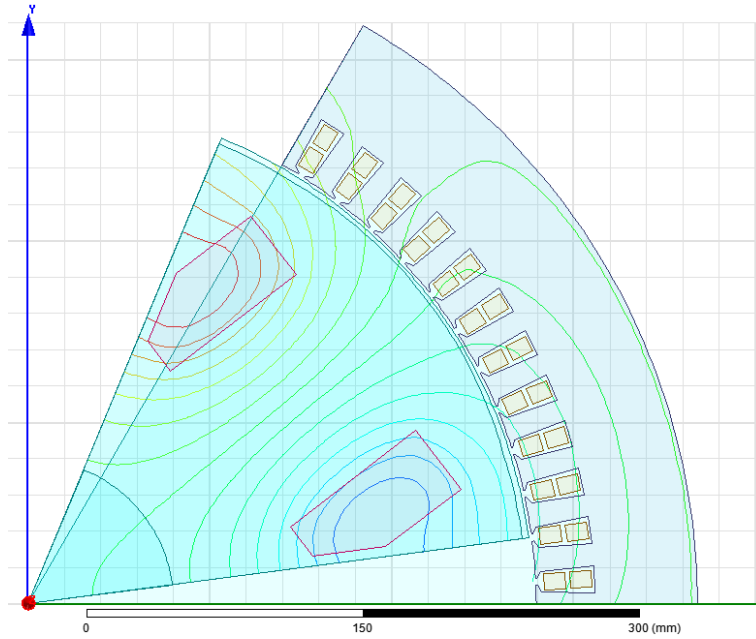


Figura 3.7: Linhas de densidade de fluxo para o motor Geometria III.

Na Figura 3.7 é mostrado um rotor com a mesma configuração geométrica anterior considerando que seus enrolamentos são do tipo supercondutor, com núcleos de ar tanto no rotor quanto no estator.

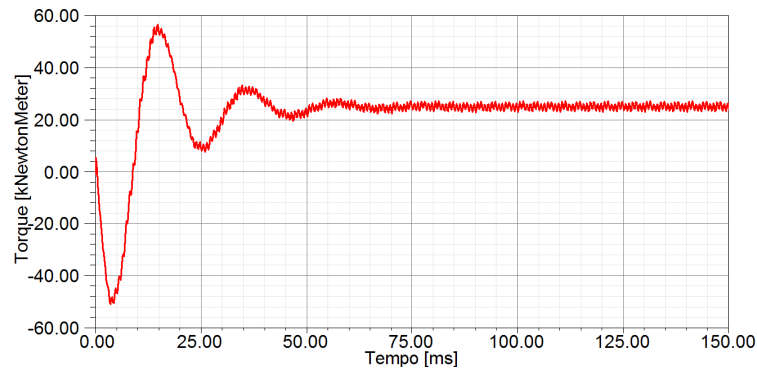


Figura 3.8: Torque para o motor Geometria III.

Na Figura 3.8 o valor do torque deste motor é de cerca de  $24 \text{ kNm}$ , em torno de 10% menor que o torque do motor tipo II, o que mostra que apesar desta redução, a utilização do aço na construção de um motor supercondutor síncrono, representa um desperdício de material, além de aumentar o peso e o volume de forma desnecessária.

Este resultado não é trivial, pois quando se pensa em motores é natural associar sempre a utilização de núcleos de ferro para aumentar a permeabilidade, no entanto os projetos de um motor não-convencional como os motores supercondutores possuem características diferenciadas.

Quando são utilizados enrolamentos convencionais no rotor não é vantajosa a retirada do material ferromagnético, pois do contrário haveria uma redução signifi-

cativa no valor do torque.

Com base nas conclusões aqui estabelecidas, nota-se que é vantajoso investigar os motores com núcleo de ar.

### 3.4 Geometria IV

Tendo em vista que o rotor já não apresenta mais um material ferromagnético para guiar o fluxo magnético produzido, pode-se pensar em outra disposição para os enrolamentos do rotor. Assim, desta etapa em diante, serão testadas diferentes formas geométricas para estas bobinas supercondutoras, com densidade de corrente de  $10^8 A/m^2$ . Os valores das áreas dos enrolamentos do rotor foram mantidos iguais ao valor do motor convencional, para que fossem mais fiéis as comparações entre os motores. Em um primeiro momento os enrolamentos do rotor serão posicionados afastados dos enrolamentos do estator, em seguida serão aproximados.

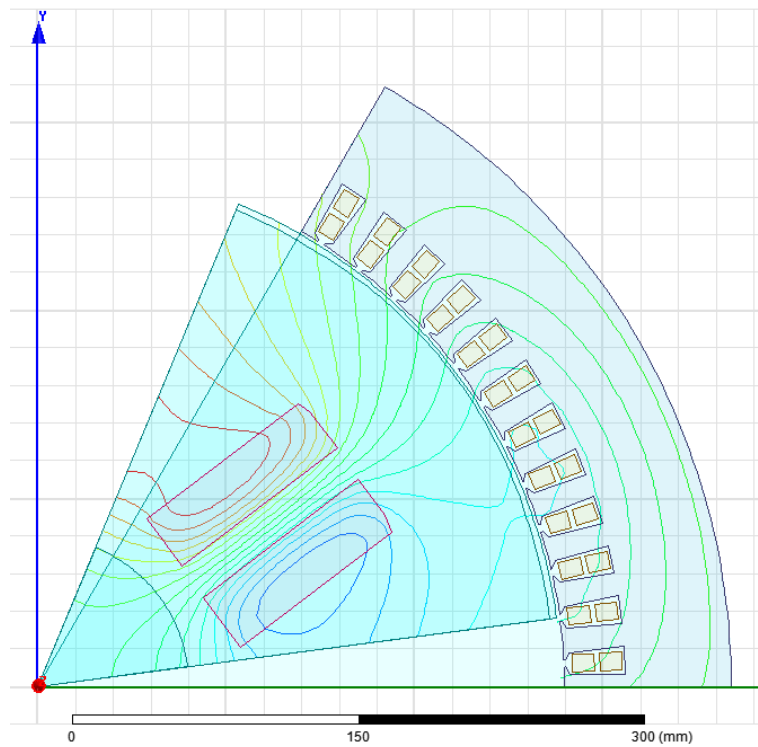


Figura 3.9: Linhas de fluxo para o motor Geometria IV.

A Figura 3.9 apresenta as linhas de fluxo magnético para o motor supercondutor com a configuração de enrolamentos estreitos e afastados do estator. Os resultados coletados na simulação mostram que o torque apresentado tem um valor médio em torno de  $8,4 kNm$ , conforme apresentado na Figura 3.10. Esta redução no torque ocorre pois o fluxo concatenado entre o estator e rotor irá diminuir, devido ao aumento da distância entre eles, quanto mais se tratando de núcleos de ar onde a dispersão e o espraioamento são maiores.

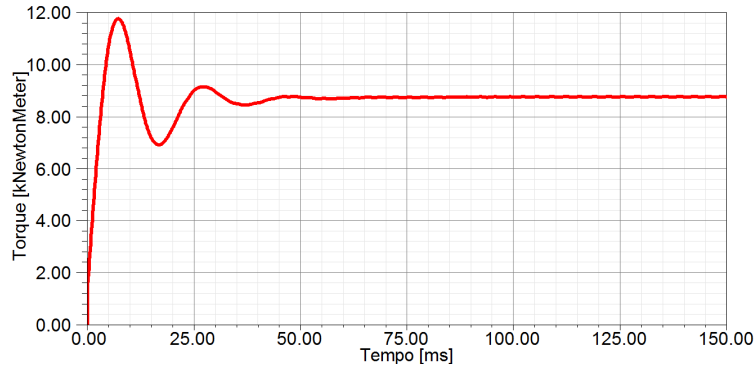


Figura 3.10: Torque em função do tempo para o motor Geometria IV.

### 3.5 Geometria V

O próximo passo é verificar a influência no valor do torque quando os enrolamentos do rotor são aproximados dos enrolamentos do estator conforme apresentado na Figura 3.11.

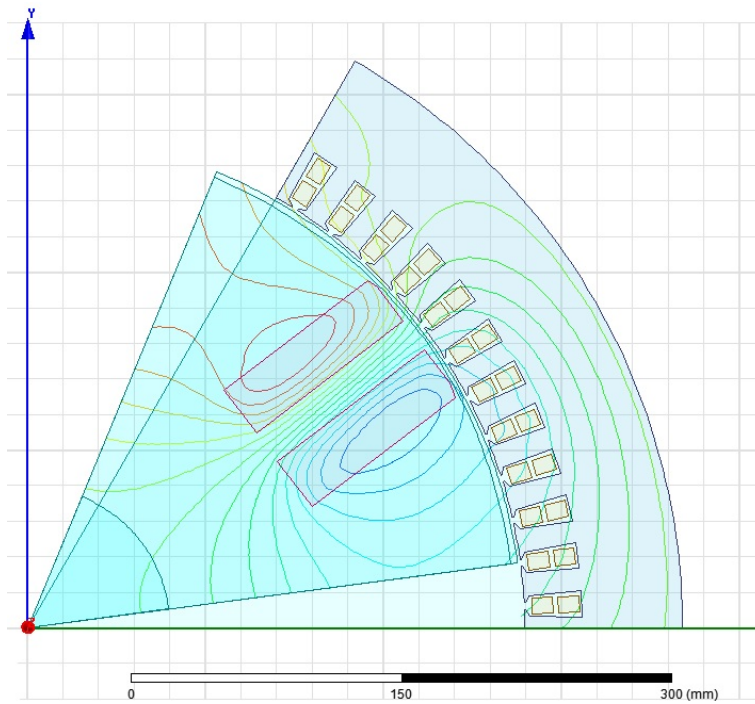


Figura 3.11: Linhas de fluxo para o motor Geometria V.

Pode-se notar que o valor do torque em regime permanente, Figura 3.12, é de aproximadamente  $16\text{ kNm}$ , que corresponde a um valor quase duas vezes maior que o motor apresentado na Figura 3.10.

Como o enrolamento de campo está no ar, quanto mais próximo do estator, maior será o fluxo concatenado com ele, sendo interessante continuar a investigar outras configurações.

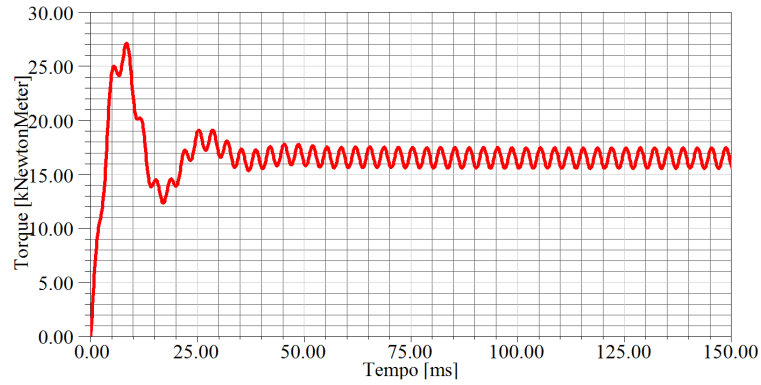


Figura 3.12: Torque em função do tempo para o motor Geometria V.

### 3.6 Geometria VI

Como vimos na configuração tipo V, da Figura 3.11, à medida que aproximamos os enrolamentos do rotor e do estator, maior é o torque. Por isso, não é mais necessário simular formas geométricas onde estes enrolamentos estão afastados.

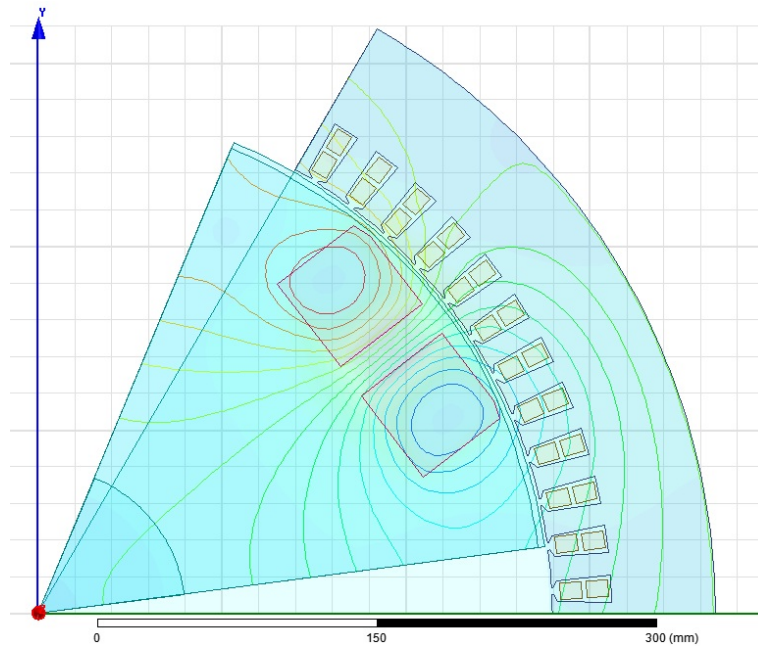


Figura 3.13: Linhas de fluxo para o motor Geometria VI.

Na próxima simulação será apresentada uma configuração geométrica com os enrolamentos do rotor assumindo uma forma mais quadrada, que será chamado de motor supercondutor com enrolamentos intermediários, mostrado na Figura 3.13.

Na Figura 3.14 é mostrado o valor do torque para o motor com esta geometria apresentada, que é de aproximadamente  $25 \text{ kNm}$ .

Após simular três motores com geometrias distintas, com valores de torque diferentes, percebe-se que a forma dos enrolamentos pode modificar o desempenho do

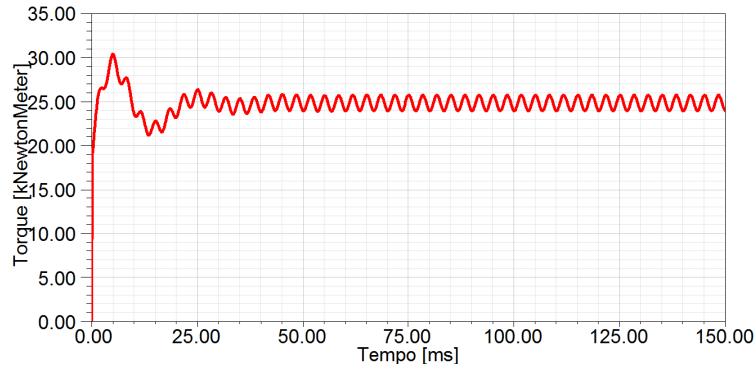


Figura 3.14: Torque em função do tempo para o motor Geometria VI.

motor. Lembrando que foi mantida a mesma densidade de corrente e o mesmo valor da área de seção reta para os enrolamentos do rotor. Assim, teoricamente o custo com material supercondutor seria o mesmo.

### 3.7 Geometria VII

Esta configuração estudada apresenta um motor supercondutor com enrolamentos mais largos. Novamente a simulação é realizada para identificar a influência das formas geométricas dos enrolamentos do rotor no valor do torque. Este motor é apresentado na Figura 3.15.

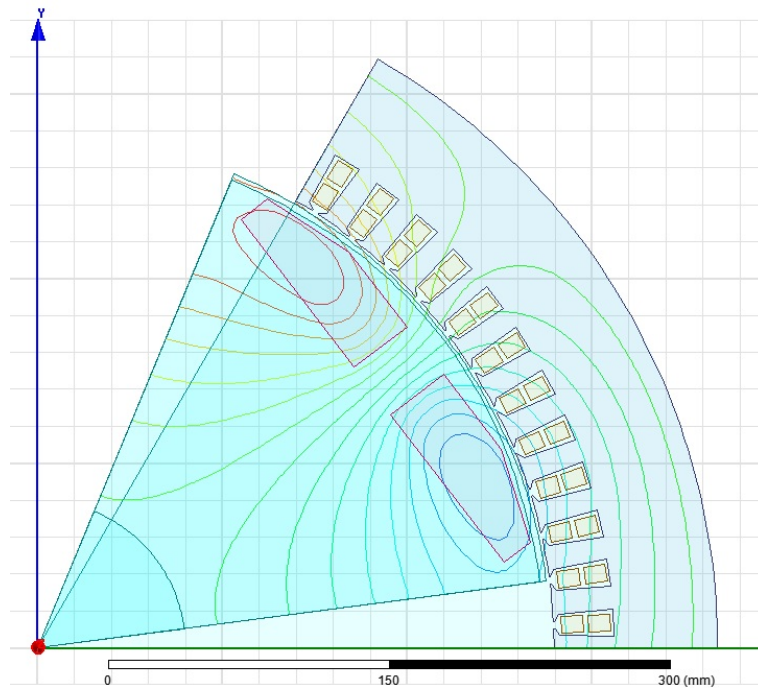


Figura 3.15: Linhas de fluxo para o motor Geometria VII.

A Figura 3.16 mostra um torque de  $33kNm$ , para o rotor com a forma geométrica

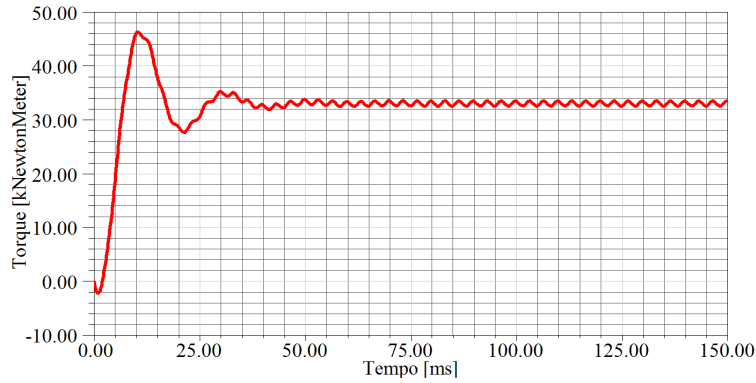


Figura 3.16: Torque em função do tempo para o motor Geometria VII.

apresentada, mostrando que esta é a melhor geometria dentre as que foram simuladas neste trabalho.

Esta escolha implica em um aumento de aproximadamente 10 vezes o torque em relação ao motor do tipo I, portanto observando a relação torque/volume deste motor, nota-se que este apresenta maiores vantagens.

De uma maneira aproximada podem-se considerar os enrolamentos da configuração mostrada como uma seção de um pequeno motor linear, isto sem considerar os efeitos de extremidades próprios dos motores lineares.

### 3.8 Geometria VIII

Nesta última etapa será utilizada a configuração do motor apresentado na Figura 3.17, pois este possui o maior valor de torque. O objetivo é encontrar o volume de um motor com esta geometria, que proporcione um torque aproximadamente igual à máquina convencional apresentada na Figura 3.2. Dessa forma, pode-se determinar qual é, aproximadamente, a redução real de volume da máquina.

Considerando que o motor convencional apresentou um torque de  $3,5kNm$ , a partir disso com base na tentativa e erro foi sendo reduzido o volume do motor tipo VII da Figura 3.15, até encontrar um valor de torque similar conforme apresentado na Figura 3.18.

O motor apresentado na Figura 3.17 possui um volume de cerca de  $0,0115m^3$ , enquanto que o motor convencional com aço possui um volume de  $0,1683m^3$ , considerando que o comprimento do núcleo foi mantido constante, que corresponde a uma redução de 93% no volume, para gerar o mesmo torque em torno de  $3.5kNm$ , conforme visto na Figura 3.18. Porém, não foi levado em conta o volume ocupado pelo sistema de refrigeração o que só poderá ser calculado no projeto final da máquina, não sendo possível estimar somente com a simulação.

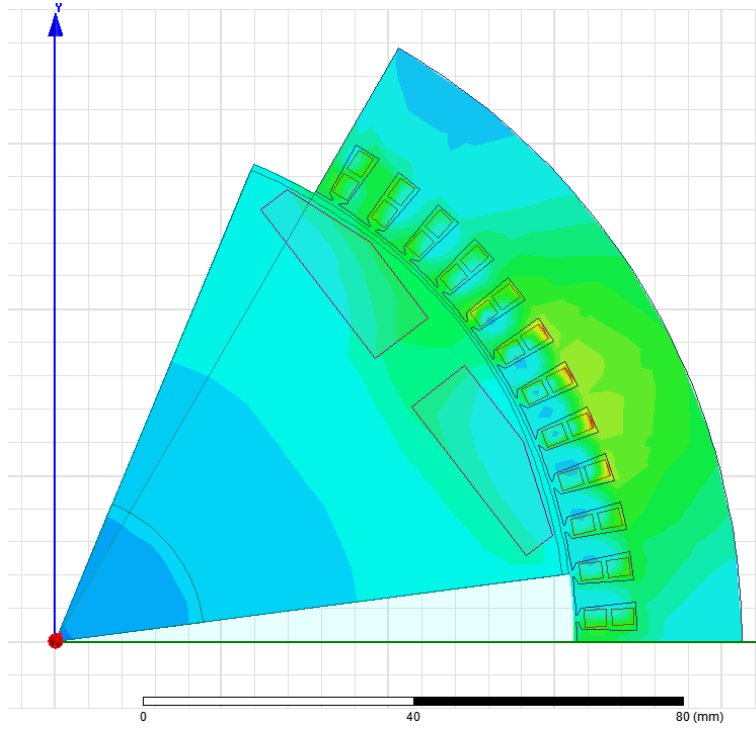


Figura 3.17: Motor supercondutor Geometria VIII.

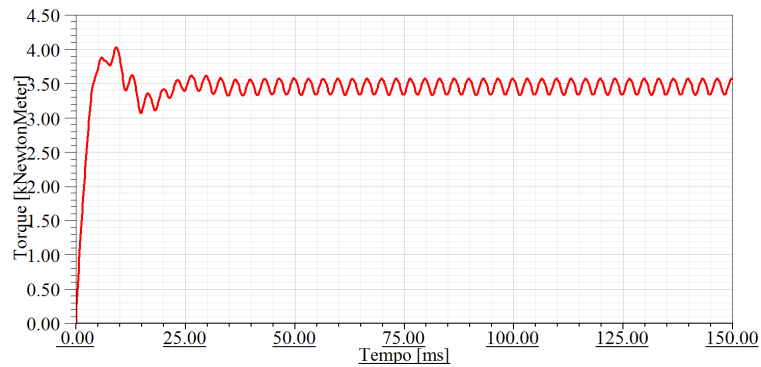


Figura 3.18: Torque em função do tempo para o motor supercondutor Geometria VIII.

### 3.9 Discussões

Ao comparar estes resultados com os obtidos em motores supercondutores construídos para a marinha americana [2], é possível verificar que os valores simulados são razoáveis, pois mesmo levando em consideração todo o aparato relativo à parte criogênica, a redução de volume deste motor supercondutor gira em torno de 85%.

Os resultados das simulações demonstram que o motor Geometria VII (Figura 3.15) é mais vantajoso, pois apresenta o maior torque entre todas as geometrias testadas. Nota-se também que quanto mais próximos os enrolamentos do rotor e do estator melhores são os resultados, pois, na ausência do material ferromagnético, essa disposição minimiza a dispersão de fluxo magnético.

Além disso, é possível perceber que a forma geométrica é um fator que pode influenciar de forma significativa o valor do torque, conforme pode ser visto desde o motor Geometria V até o motor Geometria VII. Isto fica bem visível quando compara-se o motor Geometria V(Figura 3.11) com o motor Geometria VII(Figura 3.15).

Os resultados apresentados neste trabalho se mostraram satisfatórios, pois comparados com projetos de motores reais os dados obtidos se mostraram parecidos [1]. Desta forma, considerando o motor Geometria VII(Figura 3.15), percebe-se que suas bobinas são distribuídas ao longo do primário de forma similar à de um motor linear, assim pretende-se investigar estes motores na próxima seção, pois conforme dito anteriormente apresentam maior simplicidade em sua construção.

A Tabela 3.2 apresenta os casos estudados com suas características de materiais usados e os valores de torque máximo obtidos. Onde os fios podem ser de cobre ou supercondutor(Sc).

Tabela 3.2: Resumo dos casos estudados e seus respectivos torques máximos.

| Caso | Núcleo estator | Núcleo rotor | Fios estator | Fios rotor | Torque máx(KNm) |
|------|----------------|--------------|--------------|------------|-----------------|
| I    | Aço            | Aço          | cobre        | cobre      | 3.5             |
| II   | Aço            | Aço          | cobre        | Sc         | 27.5            |
| III  | Ar             | Ar           | cobre        | Sc         | 24              |
| IV   | Ar             | Ar           | cobre        | Sc         | 9               |
| V    | Ar             | Ar           | cobre        | Sc         | 16              |
| VI   | Ar             | Ar           | cobre        | Sc         | 25              |
| VII  | Ar             | Ar           | cobre        | Sc         | 33              |
| VIII | Ar             | Ar           | cobre        | Sc         | 3.5             |

## Capítulo 4

# Investigação dos Parâmetros de Projeto dos Motores Lineares

Neste capítulo são apresentados resultados relativos a uma análise dos motores lineares estudados. Nestas simulações são investigadas configurações que apresentam mudanças no tipo de material, além de alterações também no seus enrolamentos, que podem transportar correntes iguais ao do cobre ou de supercondutores. Nas próximas seções são apresentadas investigações mais detalhadas de cada tipo de motor estudado, para estimar os valores de campo e força a que ficarão sujeitos os enrolamentos secundários e encontrar os prós e contras em cada aspecto.

Algumas características relativas às bobinas serão investigadas e é importante lembrar que o projeto das bobinas supercondutoras, leva em conta fatores críticos das fitas fabricadas com material supercondutor.

Para construir uma bobina com fitas supercondutoras é necessário primeiramente, levar em consideração o diâmetro mínimo de curvatura destas fitas, para que as mesmas não sejam danificadas. Por isso, nas simulações apresentadas, o diâmetro mínimo de curvatura de 11 mm das fitas SCS4050<sup>1</sup>, fabricadas pela Super Power, será respeitado.

Outro fator que dever ser observado obviamente é o passo polar  $\tau$ , que irá limitar a largura das bobinas supercondutoras, o que influencia diretamente no número de espiras destas bobinas.

O projeto das bobinas consiste em variar alguns parâmetros importantes como:

- Número de camadas
- Tamanho do gap
- Quantidade de bobinas

---

<sup>1</sup>Esta informação pode ser encontrada no site do fabricante <http://www.superpower-inc.com/content/products-services>

- Diâmetro interno das bobinas
- Número de espiras

Os enrolamentos de armadura foram desenhados com base em um módulo existente no laboratório, que faz parte do projeto MAGLEV desenvolvido no LASUP. Os fios são feitos de cobre e o seu núcleo de aço. Esta armadura foi utilizada como base para o trabalho devido a disponibilidade desta para realizar aquisição de dados experimentais como mapeamento de campo, e medidas de força de tração com enrolamentos de campo de fitas supercondutoras.

Apesar da presença do ferro neste motor, serão realizadas simulações com diversas topologias inclusive com núcleo de ar, com o intuito de encontrar qual configuração apresenta a maior vantagem do ponto de vista construtivo e econômico.

A Figura 4.1 mostra a armadura com seus enrolamentos, onde a sua forma geométrica não é modificada ao longo das simulações realizadas, porém o material no núcleo e a densidade de corrente nos condutores serão exploradas sob diversos aspectos como apresentado adiante.

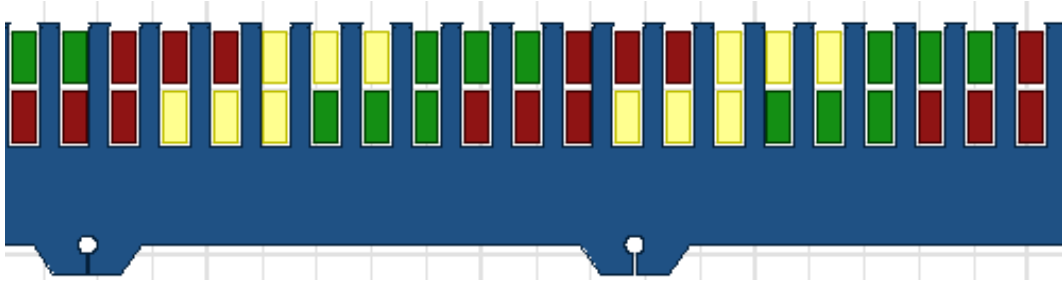


Figura 4.1: Armadura utilizada nas simulações. Os enrolamentos em vermelho apresentam a Fase A, os enrolamentos em verde a Fase B e os enrolamentos em amarelo a Fase C.

A Tabela 4.1 apresenta algumas das principais características construtivas do primário utilizado para as simulações, onde pode-se por exemplo trocar o material de núcleo de ferro para núcleo de ar, e aumentar a corrente de forma que fique compatível com a corrente que percorre o material supercondutor, que para este projeto é de  $2 \times 10^8 A/m^2$ . Não há neste caso preocupação com as perdas Joule em nenhuma das situações estudadas, correntes induzidas também não serão avaliadas, pois a velocidade escolhida nas simulações é muito pequena. Maiores detalhes sobre as características construtivas do módulo primário podem ser vistos no Apêndice A.

As bobinas projetadas neste trabalho têm a forma racetrack mostrada na Figura 4.2, e suas medidas como diâmetro interno e número de espiras são modificadas em cada etapa do projeto, verificando a influência destas grandezas na força de propulsão e na força vertical. O diâmetro  $d$  da bobina corresponde a distância entre

Tabela 4.1: Principais dados construtivos do motor linear com núcleo de ferro e enrolamentos de cobre.

|                      |                |
|----------------------|----------------|
| Passo polar          | 165.6 mm       |
| Número de fases      | 3              |
| Corrente primária    | 53 A           |
| Número de polos      | 6              |
| Resistência de linha | 0.567 $\Omega$ |

as espiras internas e o termo variação de diâmetro se refere a variação do parâmetro  $d$  mostrado na Figura 4.2.

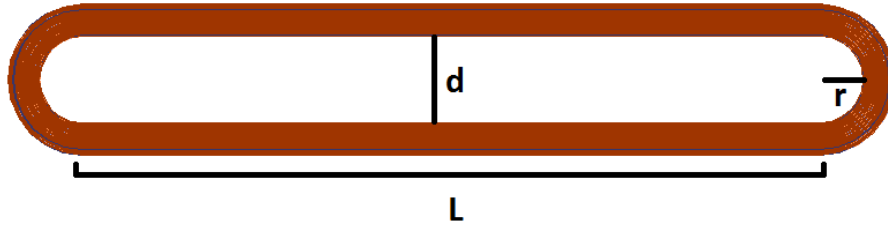


Figura 4.2: Dimensões da bobina supercondutora em formato racetrack.

A única grandeza que será mantida constante durante todo o projeto será o comprimento  $L$ , já que nos enrolamentos primários, este valor não será modificado. É importante esclarecer que, como se tratam de simulações 2D, não é possível considerar os efeitos de cabeça de bobina.

Os valores de comprimento de fitas utilizado em cada projeto, podem ser estimados levando em consideração a Figura 4.2, onde podemos considerar o comprimento das duas partes retilíneas da bobina igual a  $2Ln$ , onde  $L$  é o comprimento de um lado da bobina e  $n$  é quantidade de espiras. As duas cabeças de bobina podem ser consideradas um círculo de raio variável onde cada espira possui um comprimento de  $2\pi r_n$ . A região de cabeça de bobina pode também ser calculada encontrando o comprimento da espira mais interna e acrescentando um valor de  $e_f$  (espessura da fita) +  $e_i$  (espessura do material isolante) para cada espira subsequente e realizando o somatório de todas as espiras conforme apresentado na Equação 4.1:

$$L_T = 2Ln + \sum_{j=1}^n [2\pi(r + (e_f + e_i)n + e_f + e_i)] \quad (4.1)$$

A Equação 4.1 faz uma estimativa da quantidade em metros de fita supercondutora utilizada no projeto. Devido ao custo elevado da fita supercondutora este parâmetro é importante.

Em todas as simulações realizadas com núcleos de aço foi utilizada a curva  $B \times H$  apresentada na Figura 3.4 para o tipo de aço escolhido, para que pudesse ser o mais próximo possível de uma situação real. Nota-se que acima de  $2T$  no joelho da curva

o material começa a saturar, e o material ferromagnético não mais contribui para o incremento da densidade de fluxo naquela região. A alimentação da armadura e do campo foi feita com corrente contínua em todas as etapas com imposição de velocidade nos enrolamentos de campo para fazer variar o ângulo de carga.

O tipo de aço escolhido encontra-se na biblioteca de materiais do programa Maxwell 2D com o nome de *steel1008* [7]. Não foram consideradas correntes parasitas para as simulações aqui realizadas, pois considera-se que o material é do tipo laminado, como usualmente encontra-se em projetos reais.

Primeiramente foi feita uma investigação preliminar de parâmetros básicos como o tamanho do gap e o número de camadas das bobinas para definir uma base para as modificações posteriores. Em seguida foram investigados motores com núcleos de ar fazendo modificações nos enrolamentos, onde o primeiro motor estudado possui cobre na armadura e supercondutor nos enrolamentos de campo e o segundo com os dois enrolamentos supercondutores. Na Seção 4.3 foram investigados dois tipos de motores com núcleos de aço. O primeiro deles possui enrolamentos de cobre e o segundo enrolamentos supercondutores. Por fim, foi investigado um motor com núcleo de aço e enrolamentos de cobre na armadura e núcleo de ar e enrolamentos supercondutores no campo.

## 4.1 Investigação dos Parâmetros Básicos

Nesta etapa são realizadas simulações básicas para escolher parâmetros das bobinas como número de camadas e o tamanho do gap. O termo entreferro foi evitado neste trabalho, pois no caso de motores com núcleo de ar não existe entreferro. Estas simulações preliminares foram realizadas em duas configurações:

- *A* - Motor com núcleo de aço na armadura e ar no campo com bobinas de cobre na armadura e supercondutores no campo.
- *B* - Motor com núcleo de ar na armadura e no campo com bobinas supercondutoras nos dois enrolamentos.

A primeira configuração escolhida leva em conta a possibilidade de aquisição de dados experimentais, já que existe um módulo com núcleo de aço no laboratório. A segunda configuração é investigada pois apresenta vantagens com respeito a redução de volume e peso, pois seus núcleos podem ser feitos de material não-ferromagnético. Após a determinação destes dois parâmetros básicos, ainda serão investigadas outras grandezas e topologias conforme apresentado nas próximas seções.

#### 4.1.1 Investigação da Influência do Tamanho do Gap

A primeira variável a ser investigada no projeto do motor é o gap, que é a distância entre a parte inferior dos enrolamentos do campo e os dentes da armadura. Em motores lineares síncronos é comum trabalhar com gaps grandes quando comparados com motores de indução por exemplo, isto proporciona uma vantagem pois no caso de motores com bobinas supercondutoras o espaço ocupado pelo sistema de refrigeração é significativo, além disso há de se considerar também, a deformação apresentada pelos suportes destas bobinas, devido à força vertical, que é a força na direção  $y$ .

No funcionamento normal de um motor síncrono as bobinas do estator são alimentadas com corrente trifásica balanceada, porém neste trabalho será utilizada corrente contínua. Nas simulações estáticas impõe-se corrente contínua nos enrolamentos com intensidades diferentes para “fotografar” um determinado instante de tempo. Desta forma é possível representar uma situação dinâmica apesar da alimentação com corrente contínua, pois as bobinas de campo podem ser deslocadas em intervalos de distância iguais, e a cada passo é realizada a medida de força a que está sujeito. Estes deslocamentos consistem em uma variação de ângulo de carga equivalente aos do motor rotativo, pois a cada passo observa-se uma diferença de posição entre os campos gerados pelos enrolamentos de armadura e pelos enrolamentos de campo.

Primeiramente foi analisado o motor  $A$ , com núcleo de aço na armadura. Na Figura 4.3 pode-se observar a configuração das correntes nos enrolamentos de armadura, onde o esquema apresentado mostra uma “fotografia” de um certo instante de tempo com alimentação de corrente alternada, que representa um determinado instante de tempo em que a corrente da fase  $A$  atinge o seu valor máximo, enquanto que as correntes nas fases  $B$  e  $C$ , têm a metade do valor máximo. Assim os enrolamentos de armadura são alimentados com corrente contínua de 52 A na fase  $A$ , -26 A na fase  $B$  e na fase  $C$ , onde na Figura 4.4 é possível visualizar a escolha do instante de tempo onde ocorre a configuração de correntes citada, que representa um determinado instante de tempo de alimentação por correntes alternadas trifásicas e balanceadas. Estas correntes de alimentação dos enrolamentos de cobre da armadura foram escolhidas levando em consideração os dados indicados pelo fabricante, conforme apresentado na Tabela 4.1

O ângulo de carga em um motor linear pode ser definido como a distância entre o campo gerado pela armadura e o campo magnético gerado pelos enrolamentos de campo. Cada passo polar corresponde a uma variação de ângulo de  $180^\circ$ , como o motor simulado tem um passo polar de 165.6 mm então cada 0.92 mm corresponde a  $1^\circ$  de diferença entre os campos gerados. A Figura 4.5 mostra de forma simplificada

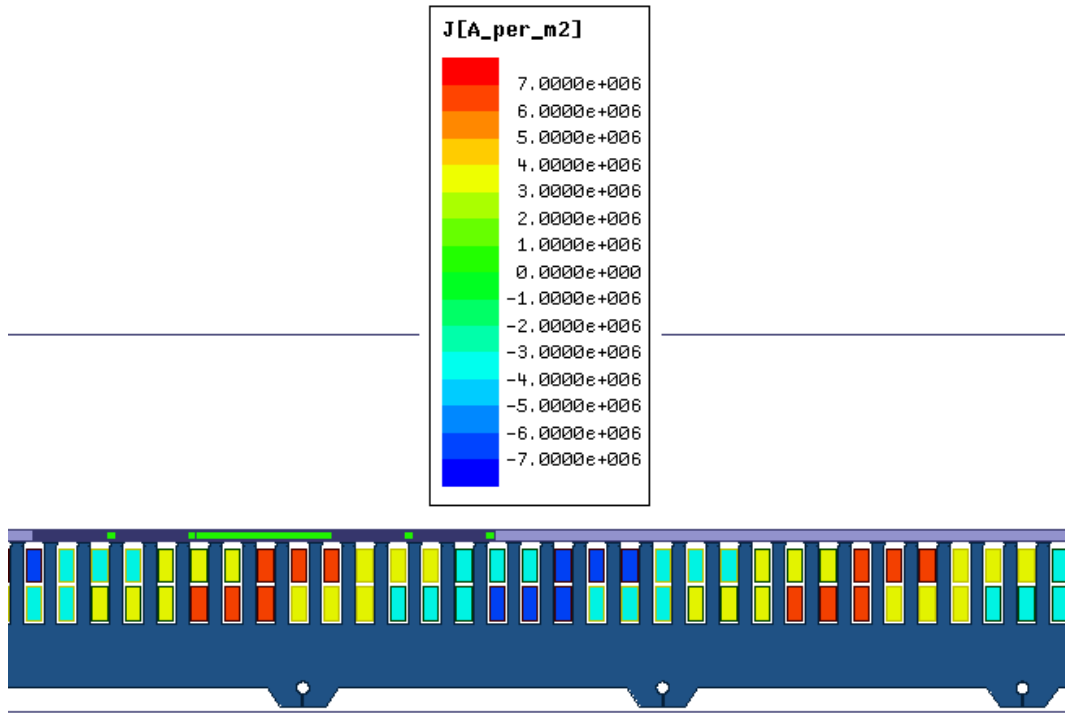


Figura 4.3: Densidade de corrente nos enrolamentos de armadura para o motor A.

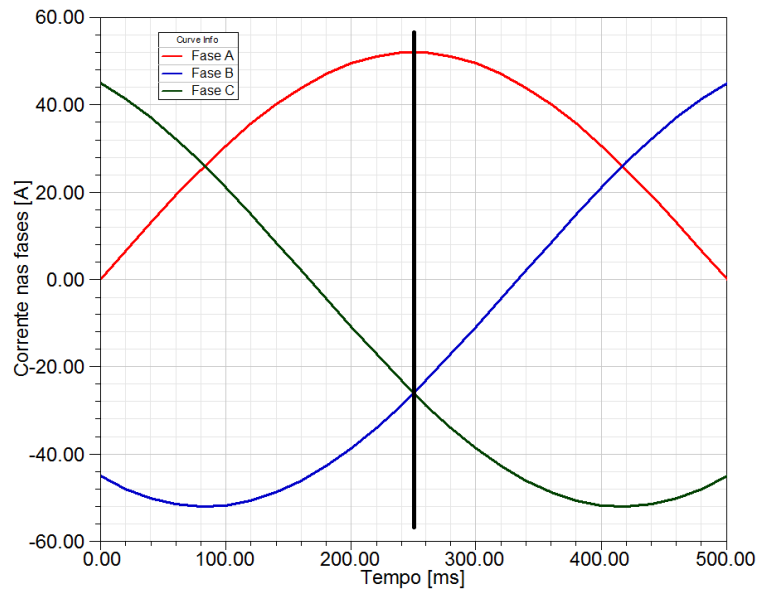


Figura 4.4: Correntes nos enrolamentos trifásicos em função do tempo para o motor A. A barra em preto representa o instante de tempo 250 ms.

como ocorre o movimento do campo em relação a armadura, onde o passo polar é a distância entre o centro de dois enrolamentos consecutivos da mesma fase, como por exemplo a distância entre os dois enrolamentos em vermelho da Figura 4.5. O vetor  $b_r$  representa a densidade de fluxo magnético criada pelos enrolamentos de campo e o vetor  $b_s$  a densidade de fluxo criada pela armadura.

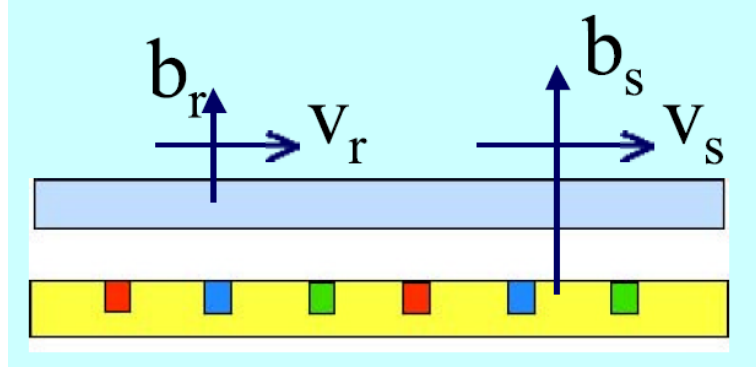


Figura 4.5: Ângulo de carga entre os campos gerados pela armadura e pelo enrolamento de campo. A diferença de posição entre os campos é igual ao ângulo de carga, que depende somente do passo polar do motor. O vetor  $b_s$  é a densidade de fluxo gerada pelos enrolamentos de armadura e o vetor  $b_r$  a densidade de fluxo gerada pelos enrolamentos de campo.

O motor *B* foi analisado considerando uma densidade de corrente  $1.75 \times 10^8 A/m^2$  na armadura como mostra a Figura 4.6. O valor escolhido é menor do que aquele indicado pelo fabricante das fitas, que é de  $2 \times 10^8 A/m^2$ , pois pretende-se utilizar uma margem de segurança nos trabalhos experimentais que ainda serão realizados. A Figura 4.7 mostra uma bobina de 20 mm de diâmetro interno e 100 espiras, que foi utilizada como base para as simulações.

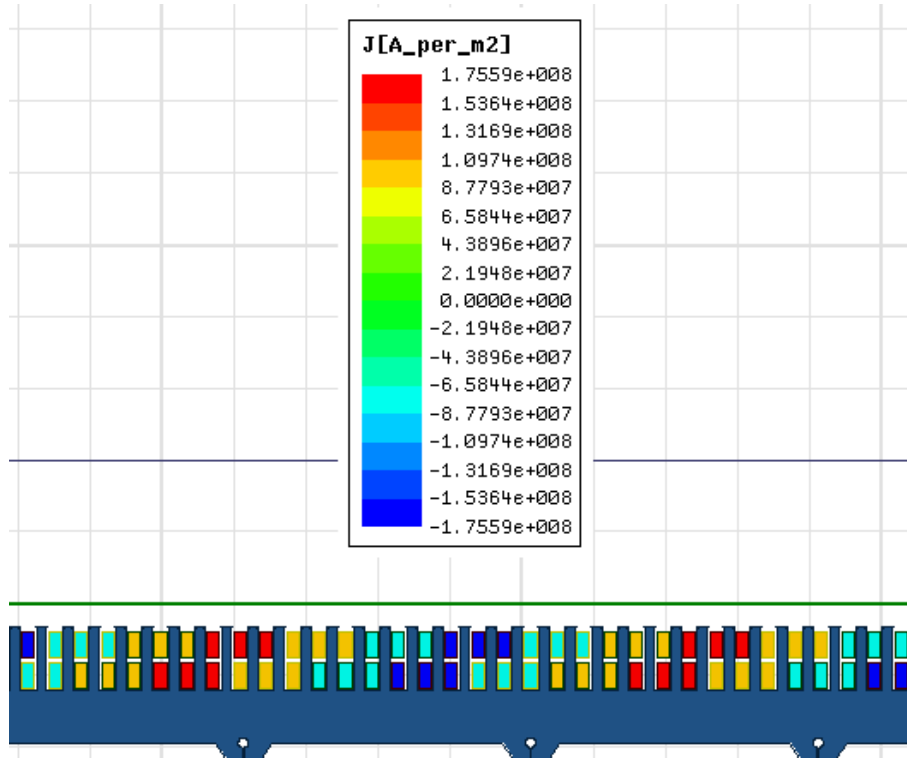


Figura 4.6: Densidade de corrente nos enrolamentos de armadura para o motor B.

Para este projeto, mesmo com o valor do gap aumentando em 67 %, de 6 para 10



Figura 4.7: Bobina de 20 mm de diâmetro interno e 100 espiras.

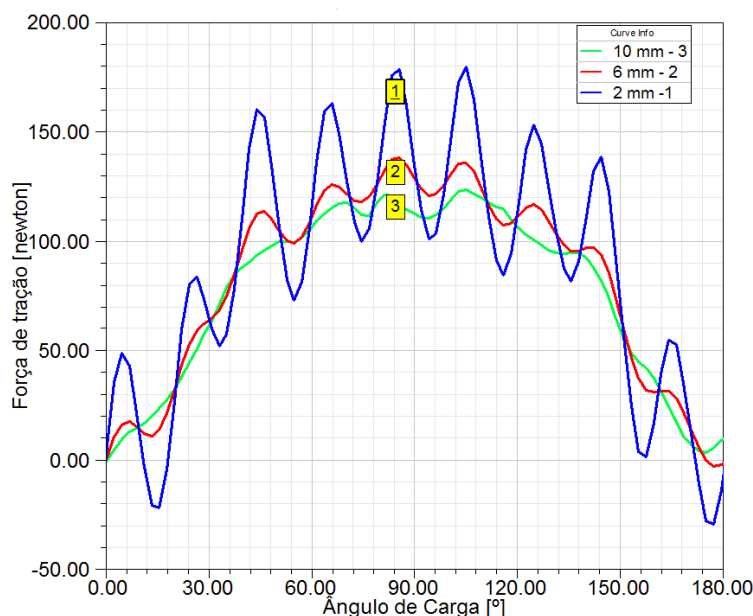


Figura 4.8: Força de tração em função do ângulo de carga variando o gap para o motor A.

mm, o valor da força diminuiu em torno de 10 % para o motor A, conforme mostra a Figura 4.8. No caso do motor B a diferença em percentual também é pequena, cerca de 8 %, conforme visualizado na Figura 4.9.

A variação do gap foi realizada com objetivo principal de avaliar o caráter qualitativo da força, que apresenta um aumento considerável na oscilação a medida que os enrolamentos de campo são aproximados dos enrolamentos de armadura no caso do motor A. Para o motor B(Figura 4.9) este ripple é menor por não existir aço nos núcleos e não existir efeito de ranhura. É importante observar também que a magnitude da força não aumenta significativamente com a diminuição do gap, demonstrando que não há vantagem em diminuir demasiadamente esta grandeza. Por outro lado, um aumento excessivo, pode diminuir o valor eficaz da força. Desta forma analisando os prós e contras ficou estabelecido um gap de 6 mm para servir de base para as próximas simulações.

A Figura 4.10 apresenta o resultado da força vertical para o motor A fazendo variar o gap entre os enrolamentos secundários e os dentes de ferro do primário, e

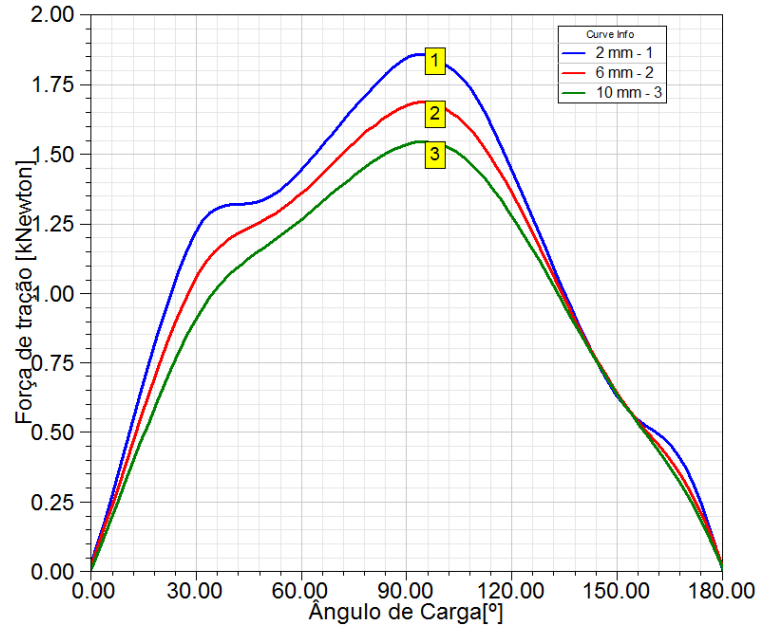


Figura 4.9: Força de tração em função do ângulo de carga variando o gap para o motor B.

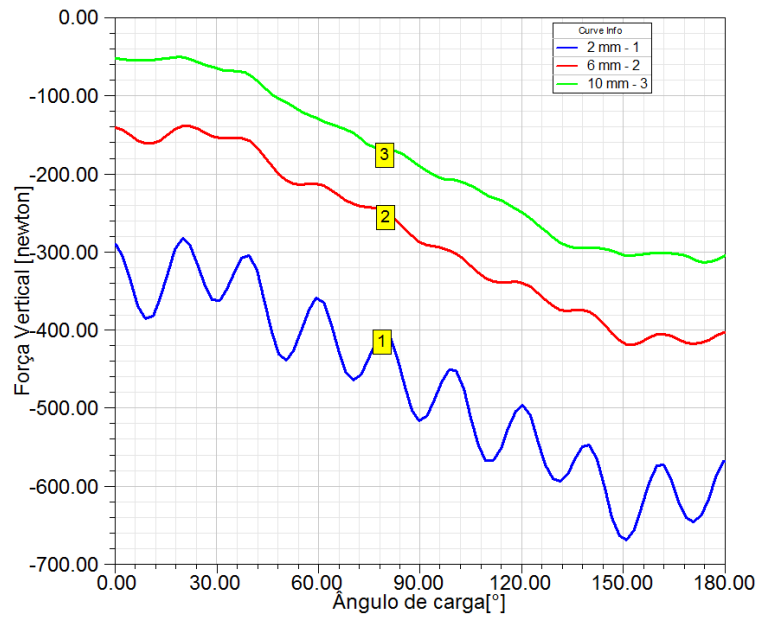


Figura 4.10: Força vertical em função do ângulo de carga variando o gap para o motor A.

a Figura 4.11 mostra a força vertical para o motor B. A Figura 4.12 mostra a força de tração máxima em função do gap para o motor A e para o motor B na escala monolog para melhor visualização.

As forças verticais negativas neste trabalho representam atração entre os enrolamentos de armadura e de campo e as forças positivas representam repulsão. Para o motor A as forças são somente de atração e para o motor B pode ocorrer tanto

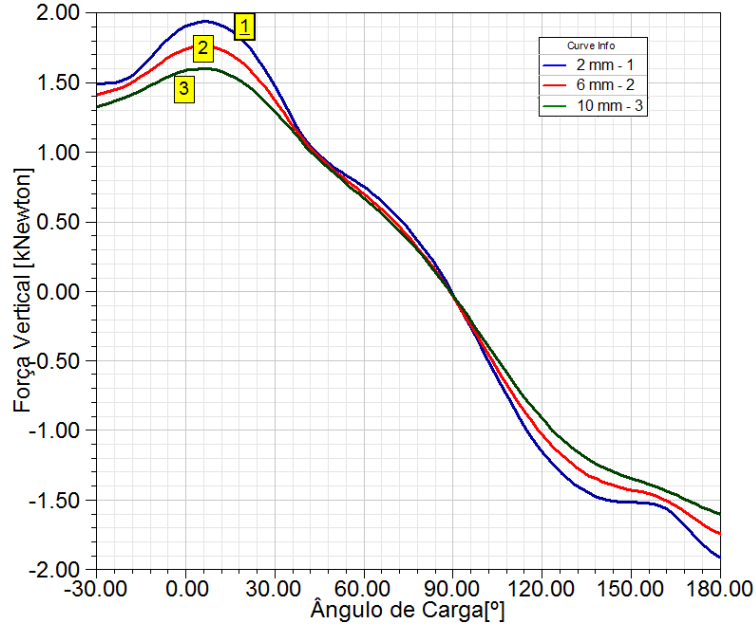


Figura 4.11: Força vertical em função do ângulo de carga variando o gap para o motor B

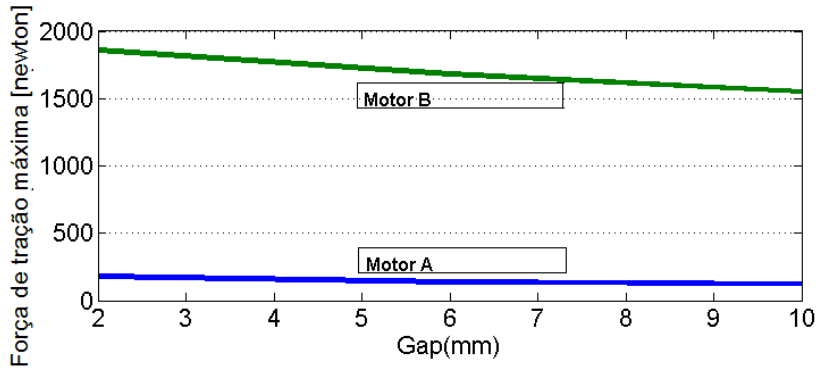


Figura 4.12: Força de tração máxima em função do gap para o motor A e para o motor B.

atração como repulsão.

Gaps muito pequenos aumentam a força vertical, além de apresentar novamente o problema do ripple, o módulo máximo da força para o gap de 2 mm chega a ser duas vezes maior que para o gap de 10 mm no caso A em  $180^0$ , porém no caso do motor B a força vertical em  $0^0$  é igual ao módulo da força de tração em  $90^0$  e as oscilações são menos acentuadas.

#### 4.1.2 Investigação da Influência do Número de Camadas

Muitos projetos realizados com bobinas supercondutoras utilizam a forma de enrolamento chamada dupla camada, buscando facilitar o acesso aos terminais da bobina, onde é possível enrolar as fitas minimizando o risco de dobrar excessiva-

mente o terminal interno da bobina e danificá-la. Por outro lado existe também a possibilidade de criar uma bobina com a parte interna oca, onde pode-se passar um dos terminais sem que seja necessário dobrar a fita, o que é uma outra alternativa para projetos com uma única camada.

A fragilidade do material supercondutor ainda é um problema encontrado na construção deste tipo de bobina, e a solução com dupla camada pode vir a atender as necessidades dos projetistas.

Nesta etapa é investigada a influência na força de propulsão e na força vertical para bobinas de uma e duas camadas, verificando qual a melhor configuração para o projeto em questão.

A Figura 4.13 mostra os valores de força de tração simulados para bobinas de uma camada, curva em azul, e duas camadas, curva em vermelho. Na Figura 4.14 pode-se observar que a força vertical no caso de duas camadas é quase três vezes maior do que com apenas uma camada..

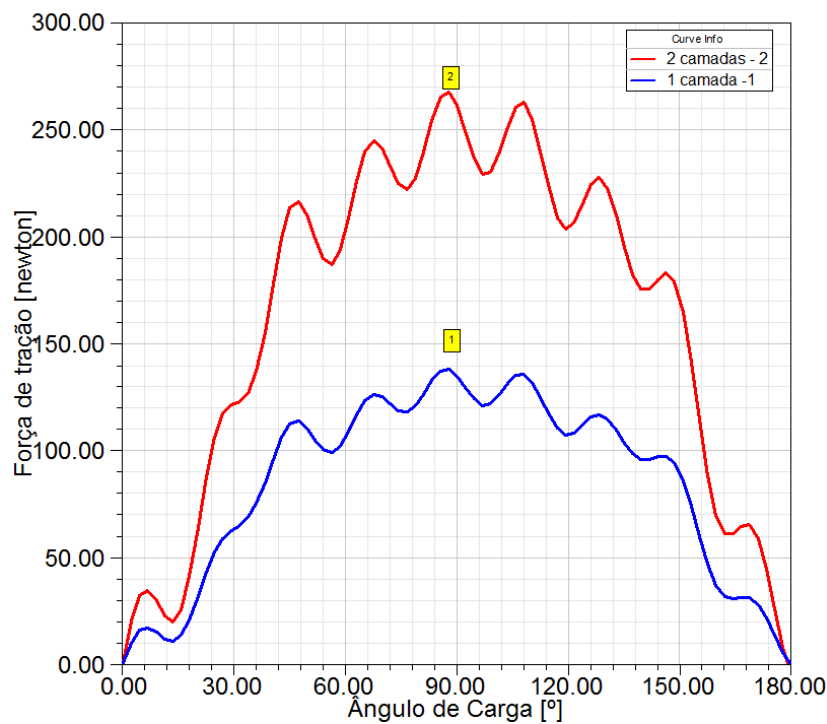


Figura 4.13: Força de tração em função do ângulo de carga variando o número de camadas para o motor A. A curva azul(1) apresenta a força para as bobinas de uma camada e a curva em vermelho(2) as de duas camadas.

Como é observado na Figura 4.13, as bobinas de apenas uma camada apresentam uma força máxima de  $138\text{ N}$  enquanto que a de duas camadas geram uma força de propulsão de  $267\text{ N}$ , ou seja, a quantidade de fita utilizada na montagem das bobinas dobra e a força aumenta praticamente na mesma proporção. O mesmo pode ser observado para o motor B, na Figura 4.15, enquanto o consumo de fitas dobra com

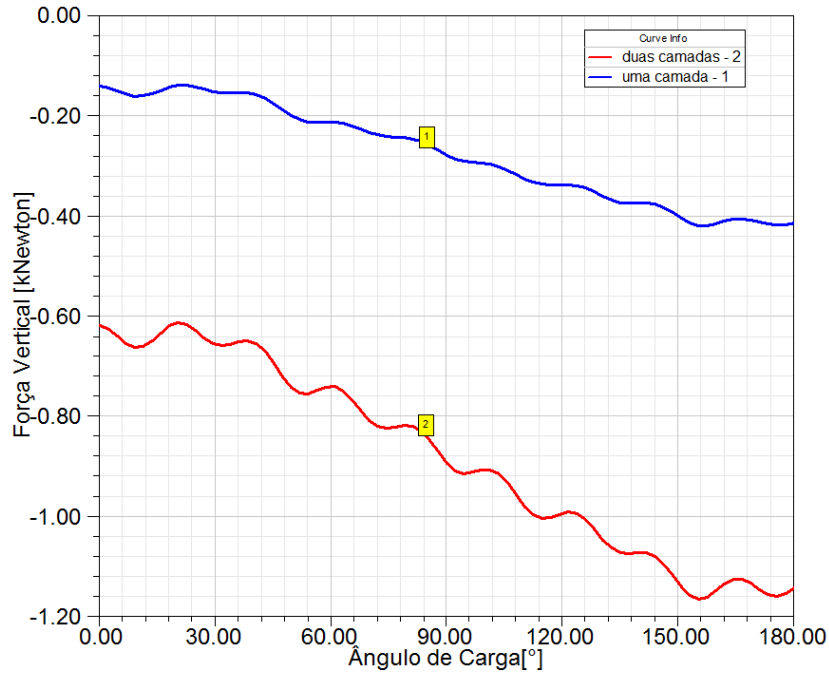


Figura 4.14: Força vertical em função do ângulo de carga variando o número de camadas para o motor A.

a dupla camada, a força aumenta de  $1.7 \text{ kN}$  para  $3.2 \text{ kN}$ . A força vertical para o motor B, Figura 4.16, pode ser do tipo atrativa ou repulsiva.

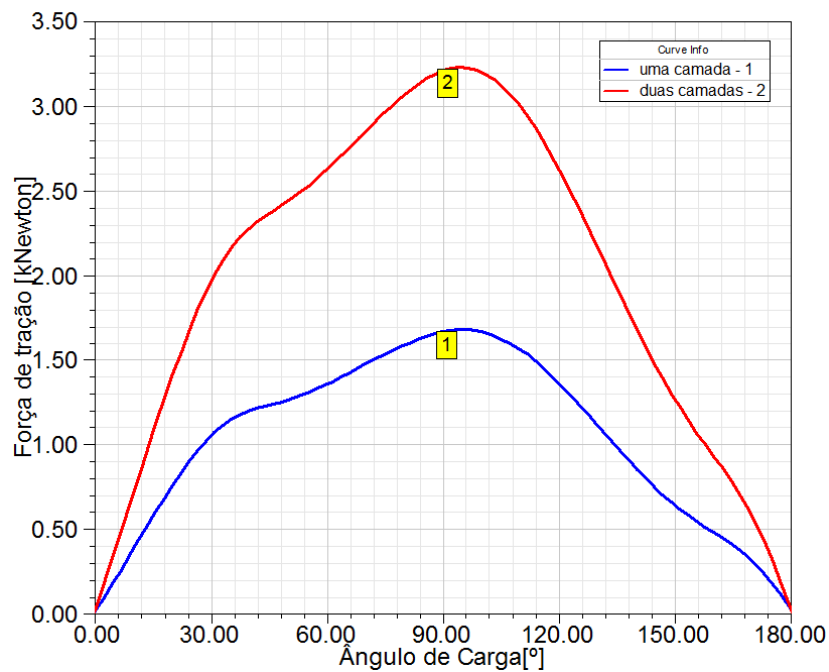


Figura 4.15: Força de tração em função do ângulo de carga variando o número de camadas para o motor B.

Com os resultados apresentados chega-se a conclusão de que para este projeto,

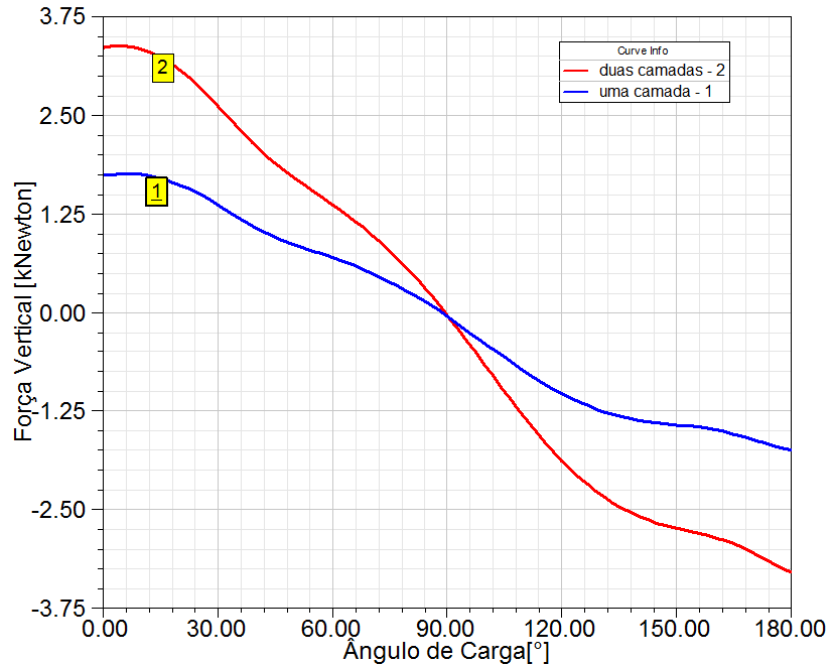


Figura 4.16: Força vertical em função do ângulo de carga variando o número de camadas para o motor B.

as bobinas de uma camada atendem bem as necessidades por ser uma configuração mais simples exigindo um menor de simulação. No entanto para construção das bobinas pode ser mais viável trabalhar com bobinas de dupla camada, pela maior facilidade de enrolar as fitas. Esta escolha irá depender somente da disponibilidade de fitas para construção das bobinas. Contudo, os riscos de danos destas fitas devido as tensões críticas de curvatura, serão avaliados somente em trabalhos experimentais futuros.

## 4.2 Motores Lineares com Núcleo de Ar

Devido às vantagens que apresentam em relação a redução de peso os motores com núcleos de ar têm sido objeto de pesquisa no campo da supercondutividade. Configurações com enrolamentos supercondutores na armadura foram pouco exploradas até o momento devido a problemas de perdas relacionadas às altas frequências de alimentação e também por conta do campo crítico das fitas na direção perpendicular ao plano das fitas. No entanto, com a evolução das fitas supercondutoras este quadro tem mudado e vêm surgindo pesquisas nesta área.

Por isto, nesta etapa pretende-se explorar as características de um motor com núcleo de ar, verificando qualitativa e quantitativamente as forças de tração e vertical em cada caso apresentado. Além disso, é feita uma comparação entre estes motores com núcleo de ar e de aço para estimar a ordem de grandeza da redução de peso em

relação aos motores convencionais.

#### 4.2.1 Cobre na Armadura e Supercondutor no Campo

Nesta etapa é investigado um tipo de motor onde os enrolamentos do primário são feitos com fios de cobre e os enrolamentos de campo com fitas supercondutoras. Agora ambos os núcleos são feitos de material não-ferromagnético com a mesma permeabilidade que o ar. A Figura 4.17 apresenta a densidade de fluxo magnético para o primário com núcleo de ar, onde a altura é de 6 mm em relação a armadura e os fios de cobre com densidade de corrente máxima de até  $5 \times 10^6 A/m^2$ , conforme indicação do fabricante.

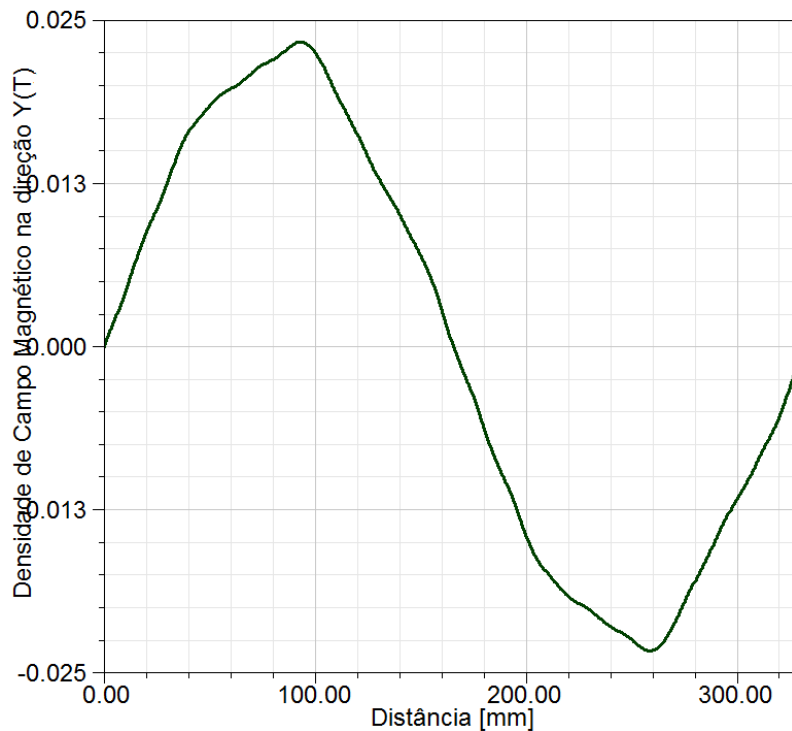


Figura 4.17: Densidade de fluxo magnético para primário com núcleo de ar e condutores de cobre a uma altura de 6 mm em relação aos da armadura.

Comparativamente a um motor com núcleos de aço, em que os enrolamentos tenham a mesma característica, é de se esperar que este motor tenha uma força de tração menor, pois a ausência do aço irá comprometer o direcionamento das linhas de fluxo, causando dispersão, porém existe a vantagem da redução de peso. Comparando com o primário de núcleo de aço, seção 4.3, mais adiante, a densidade de fluxo neste caso se reduz a 1/3 e a sua forma se aproxima de uma senoide apresentando uma quantidade de harmônicos menor, considerando um gap de 6 mm acima dos dentes do motor.

A Figura 4.18 mostra a força de tração em função do ângulo de carga, quando é

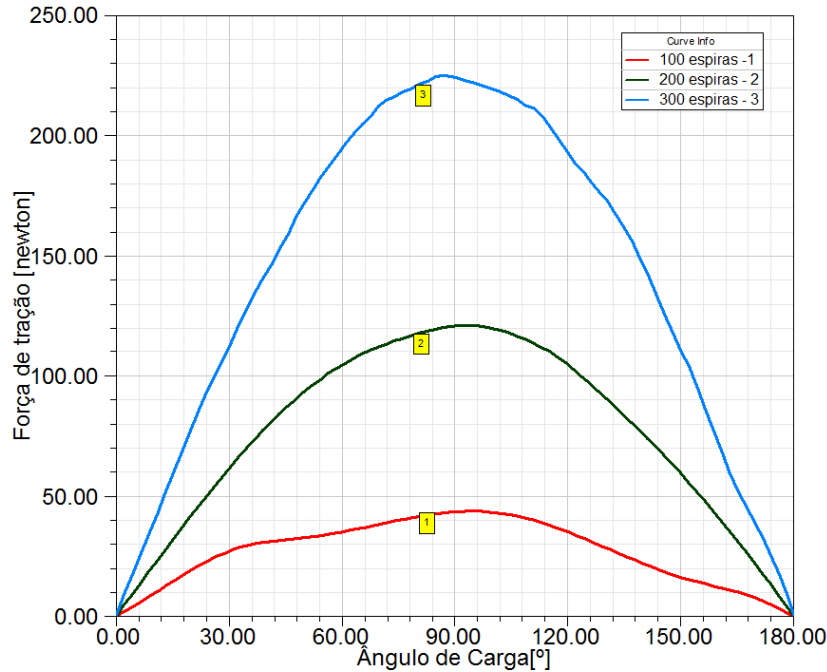


Figura 4.18: Força de tração em função do ângulo de carga variando o número de espiras para primário com núcleo de ar.

variado o número de espiras. Se for realizada uma comparação com o motor estudado com núcleos de aço, nota-se um comportamento bem diferente principalmente com relação à força vertical, Figura 4.19. Apesar da força de tração ter diminuído, pode-se considerar vantajosa esta configuração quando comparada com o motor convencional da seção 4.3, pois haverá uma redução de peso, pela substituição do aço por material não-ferromagnético de menor densidade, como por exemplo a fibra de vidro. Pode-se considerar também que haverá redução de volume do motor, pois como a densidade de fluxo magnético no motor com bobinas supercondutoras é maior, é possível construir um motor de tamanho menor gerando a mesma força.

Na Figura 4.19 são mostrados os valores para a força vertical em função do ângulo de carga, variando o número de espiras das bobinas. Novamente surgem tanto valores positivos como negativos, ou seja, a força pode ser tanto atrativa, como também, repulsiva. Além disso, o valor da força máxima vertical diminui bastante por conta da ausência do aço, a força surge então somente pela interação criada pelos enrolamentos. Na Figura 4.20 pode-se observar o que acontece para este tipo de motor quando é variado o diâmetro interno das bobinas. Percebe-se uma variação menor na força quando comparado com a variação de força ao aumentar-se o número de espiras.

Outra característica que é visível neste tipo de motor é a diminuição do ripple, que era percebido com maior intensidade no caso do motor com aço, pois não há mais material ferromagnético, a curva de força se aproxima de uma senoide. No

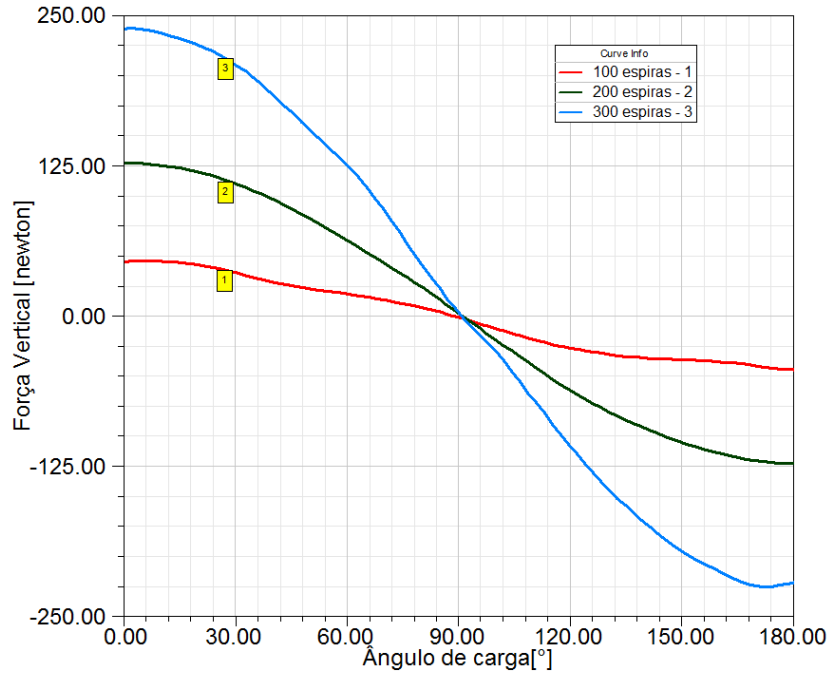


Figura 4.19: Força vertical em função do ângulo de carga variando o número de espiras primário com núcleo de ar.

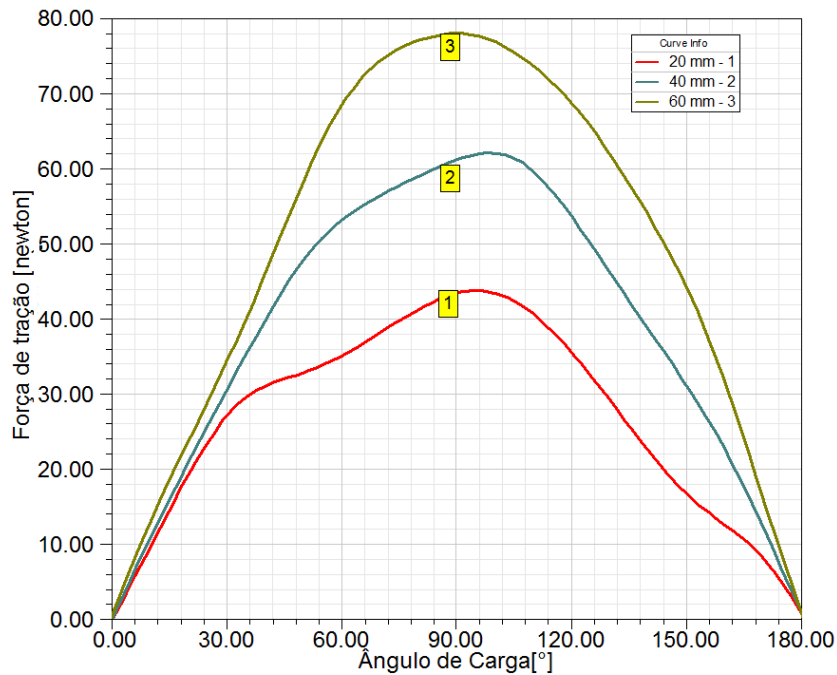


Figura 4.20: Força de tração em função do ângulo de carga variando o diâmetro interno para primário com núcleo de ar.

entanto, a falta do ferro faz com que as linhas de fluxo não tenham um caminho bem definido e conseqüentemente a dispersão é acentuada, além disso o módulo do campo cai à um valor aproximadamente igual à  $1/4$  do valor com núcleo de aço, pois a presença do ferro aumenta significativamente a intensidade do campo magnético.

Por outro lado, este fato pode ser compensado utilizando-se enrolamentos supercondutores também no primário, o que levaria a um incremento de campo que compensaria a ausência do ferro, além de diminuir o volume conforme será visto na próxima subseção.

#### 4.2.2 Supercondutores na Armadura e no Campo

O motor aqui investigado possui núcleos de ar no primário e no secundário, com correntes supercondutoras sendo transportadas em ambos os enrolamentos. Com base na corrente utilizada para as bobinas supercondutoras, foi utilizada uma densidade de corrente de  $1.75 \times 10^8 \text{ A/m}^2$  nas bobinas de campo.

A Figura 4.21 mostra a densidade de fluxo à uma distância de 6 mm acima da armadura com núcleos de ar e enrolamentos feitos com fitas supercondutoras. Neste caso a corrente imposta nos enrolamentos primários têm a mesma densidade da corrente de trabalho das fitas supercondutoras. Com isto, a diminuição do fluxo por conta da ausência do aço é compensada com o incremento de corrente, que gerará campos de maior intensidade.

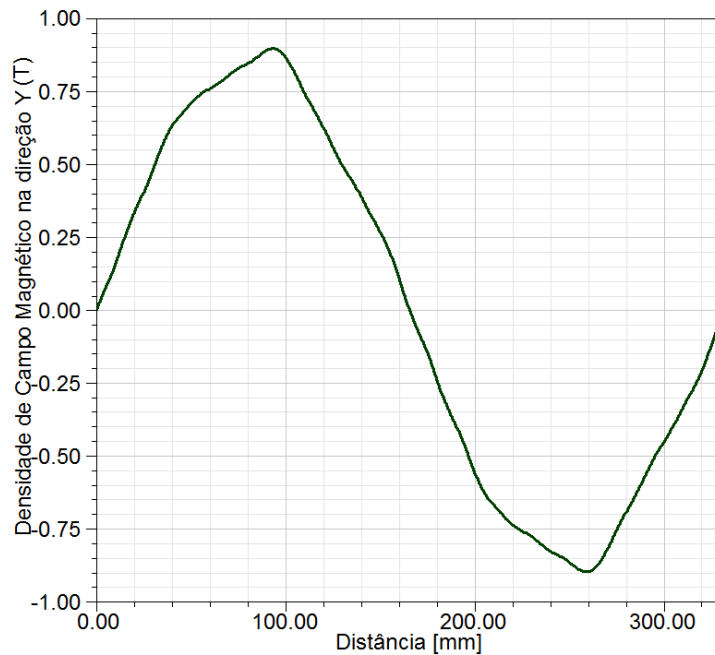


Figura 4.21: Densidade de fluxo para armadura com núcleo de ar e supercondutor na armadura.

O valor máximo da densidade de fluxo magnético produzida pelos enrolamentos de armadura aumenta cerca de 40 vezes em relação a armadura com núcleo de ar e enrolamentos de cobre. Este tipo de configuração é interessante quando os fatores peso e volume são cruciais no projeto, como no caso de navios, e muitas vezes podem ser uma alternativa essencial para o desenvolvimento de certas aplicações. O

custo dos materiais supercondutores utilizados pode ser compensado com o ganho de eficiência e espaço de armazenamento de cargas e passageiros. Na Figura 4.22 é possível verificar a distribuição das linhas de fluxo para o caso com 300 espiras, onde nota-se que estas linhas não se concentram no interior das bobinas supercondutoras como no caso do núcleo de aço, havendo uma considerável dispersão, ainda assim é a força tem um aumento significativo.

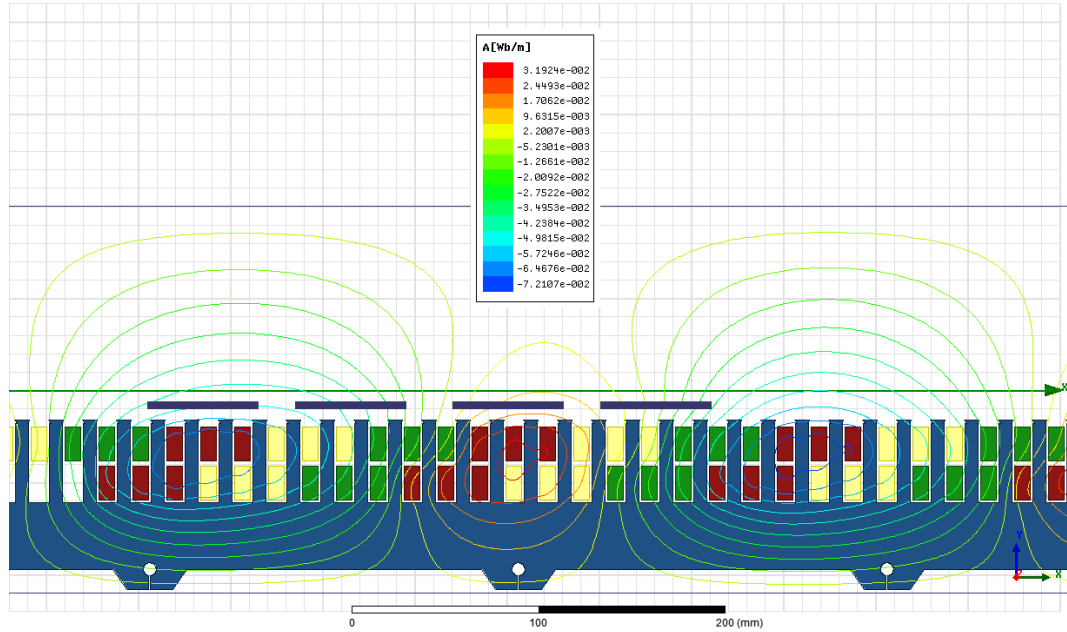


Figura 4.22: Linhas de fluxo para motor com os núcleos de ar e enrolamentos supercondutores no primário e no secundário.

As Figuras 4.23 e 4.24, apresentam os resultados obtidos para a força de tração e vertical respectivamente, fazendo variar o diâmetro interno das bobinas. Novamente o comportamento qualitativo é muito parecido como o caso anterior a única diferença está no considerável aumento de força por conta da imposição de uma corrente intensa na armadura. Neste caso a força chega a  $3 \text{ kN}$ , enquanto que no primeiro motor investigado era de pouco mais de  $80 \text{ N}$ . É claro que este ganho foi proporcionado pela substituição dos enrolamentos de cobre por enrolamentos supercondutores na armadura. Porém, é possível também pensar de uma outra forma, se o projeto fosse realizado com objetivo de atingir uma força de  $80 \text{ N}$ , um motor como este com os dois enrolamentos supercondutores, poderia ser projetado com peso e dimensões bem menores, por causa dos fortes campos gerados por estes supercondutores e da ausência do aço. A força vertical(Figura 4.24), novamente apresenta valores máximos em módulo que são parecidos com a força de tração.

Quando o número de espiras é modificado como apresentado nas Figuras 4.25 e 4.26, observa-se um incremento de força de mais de 500% de 100 para 300 espiras. A força aumenta de  $230 \text{ N}$  para quase  $9 \text{ kN}$ , comparando este motor com o motor da

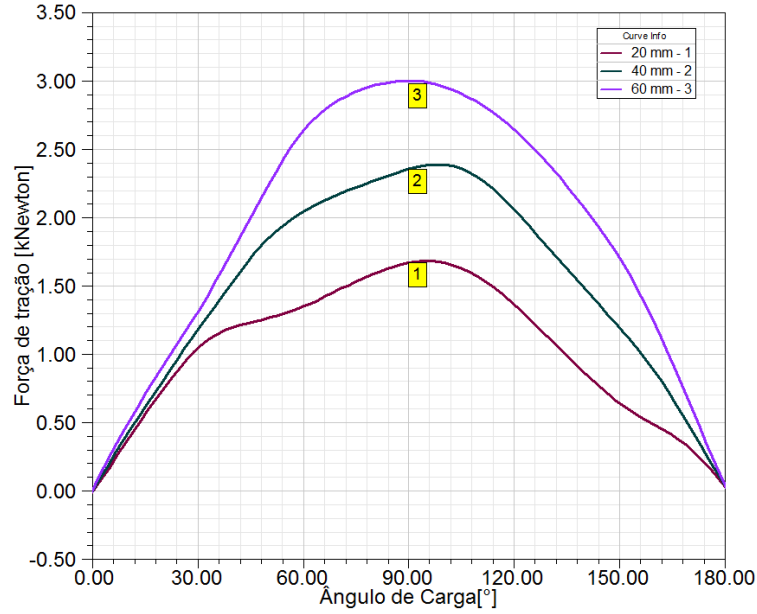


Figura 4.23: Força em função do ângulo de carga variando o diâmetro interno para primário com núcleo de ar e supercondutor no primário.

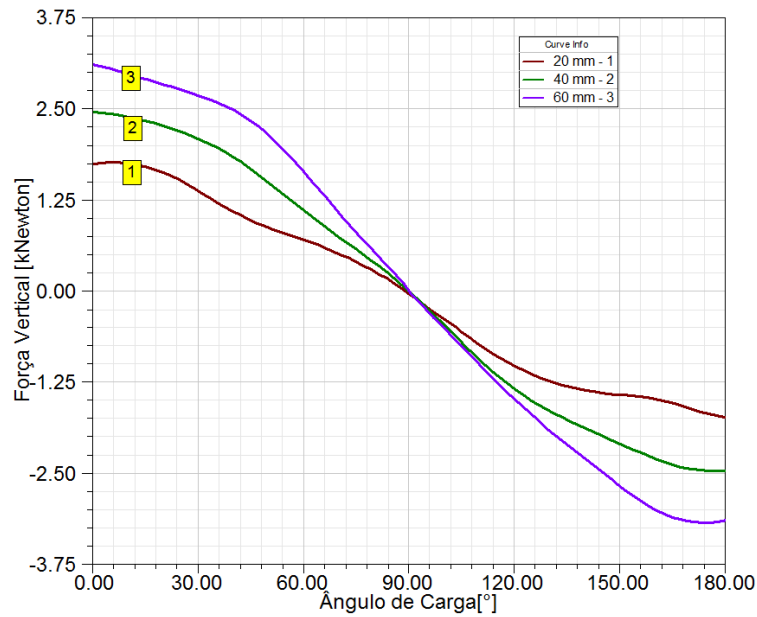


Figura 4.24: Força vertical em função do ângulo de carga variando o diâmetro interno para primário com núcleo de ar e supercondutor no primário.

seção 4.2.1, o que representa um ganho de força de quase 40 vezes pela substituição dos enrolamentos de cobre do primário por fitas supercondutoras. No entanto este tipo de motor com enrolamentos de armadura e de campo do tipo supercondutor ainda não é comum na literatura, principalmente por conta dos custos e das perdas por efeito Joule em corrente alternadas que dependem da frequência de alimentação.

A força vertical máxima neste tipo de motor é da ordem da força de tração

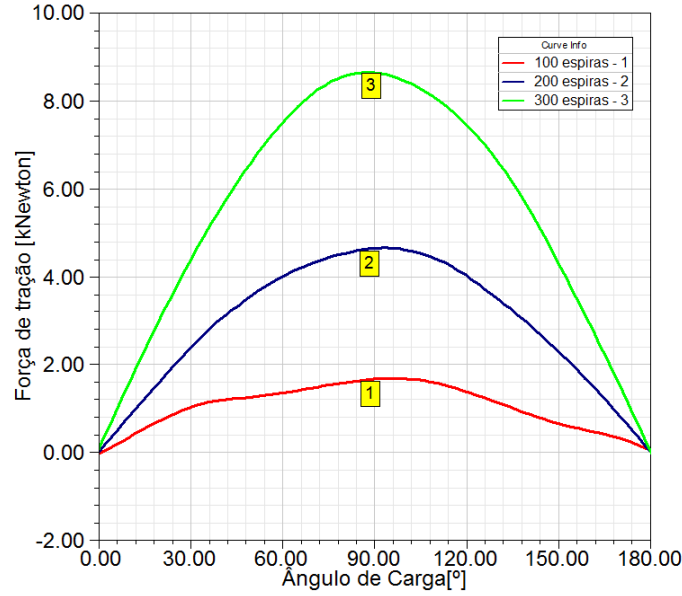


Figura 4.25: Força de tração em função do ângulo de carga variando o número de espiras para primário com núcleo de ar e supercondutor no primário.

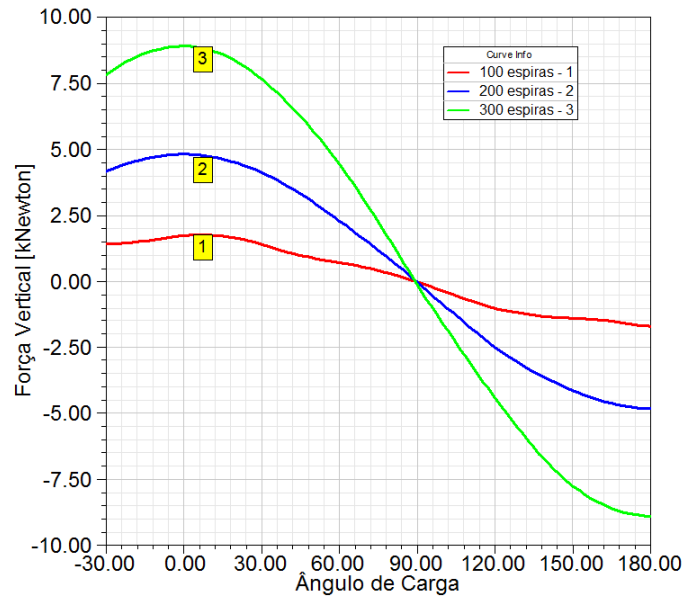


Figura 4.26: Força vertical em função do ângulo de carga variando o número de espiras para primário com núcleo de ar e supercondutor no primário.

conforme visto nas Figuras 4.25 e 4.26.

A força de atrito em trens por exemplo é essencial para estabilidade nas curvas e uma maior aceleração. Contudo em projetos como de levitação magnética supercondutora, operar o motor síncrono em ângulos entre 0 e  $90^0$ , no caso do motor apresentado, pode ser útil pois irá gerar uma força de repulsão, contribuindo para aumentar o gap de levitação, proporcionando uma maior segurança do sistema.

Uma outra vantagem destes motores com núcleos de ar é a diminuição do ripple,

fazendo com que a forma da força seja muito próxima de uma senoide, o que pode facilitar muito o controle destes motores no caso de operação de um protótipo, fazendo com que o movimento da parte móvel seja mais estável e suave comparativamente ao motor com ferro.

A Figura 4.27 mostra a força de tração máxima em função do número de espiras(a) e em função do diâmetro(b) para os motores apresentados na seção 4.2, onde a escala monolog foi utilizada para uma melhor visualização. É possível notar pela inclinação da reta e pela variação da força que o parâmetro que proporciona o maior incremento de força no caso destes motores é o número de espiras.

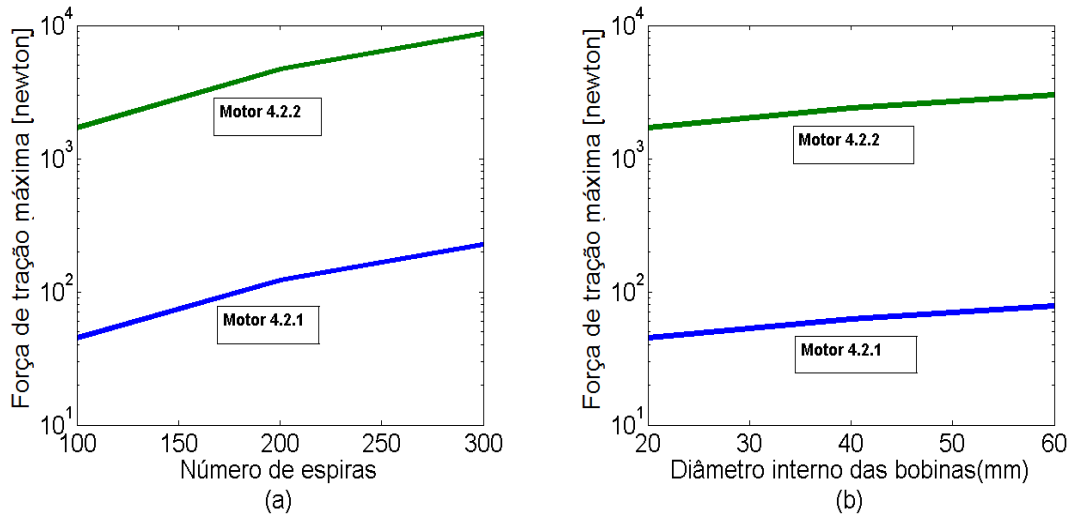


Figura 4.27: Força máxima em função do número de espiras(a) e em função do diâmetro interno das bobinas(b).

## 4.3 Motores Lineares com Núcleo de Aço

Nesta etapa são investigadas duas configurações, a primeira apresenta fios de cobre em ambos os enrolamentos, que é um motor do tipo convencional e a segunda apresenta fitas supercondutoras em ambos os enrolamentos para que sejam verificadas as características relacionadas à saturação do ferro, quando submetido a densidades de campo magnético intensas.

### 4.3.1 Enrolamentos de Cobre na Armadura e no Campo

O motor investigado nesta seção é um motor convencional, ou seja, com núcleos de aço e enrolamentos de cobre tanto na armadura quanto no campo. Este é um motor tradicional utilizado que será analisado apenas para realizar comparações com as topologias projetadas. Conforme mostrado na Figura 4.28 nota-se que no caso

deste motor com enrolamentos de cobre a força de tração máxima é de 20 N para um diâmetro interno das bobinas de campo de 20 mm. Comparando com o motor que possui enrolamentos supercondutores no campo, onde a força é de 140 N, verifica-se uma força sete vezes maior, além da vantagem daquele motor em relação a este na redução de peso do campo já que o ferro pode ser substituído por um outro material mais leve. No entanto, esta redução não é tão significativa, pois a maior parte do aço encontra-se na armadura.

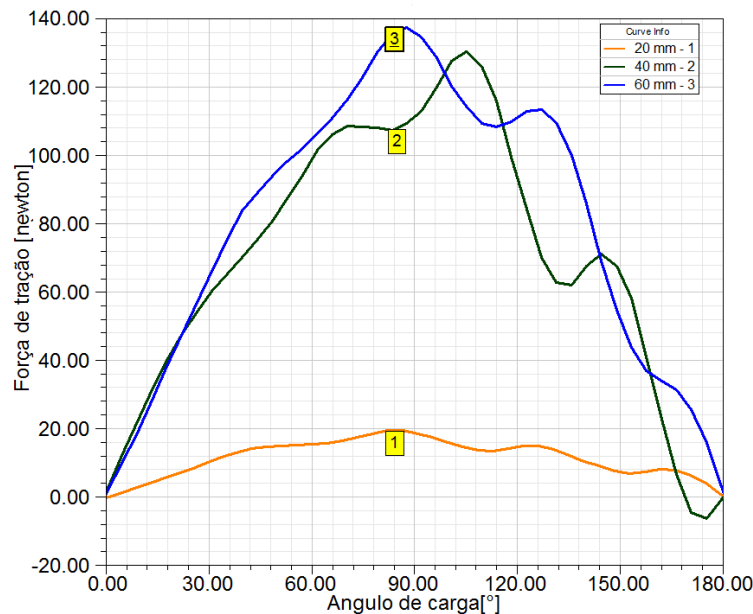


Figura 4.28: Força de tração em função do ângulo de carga variando o diâmetro para armadura e campo com núcleo de aço e enrolamentos de cobre na armadura e no campo.

A Figura 4.29 apresenta as linhas de fluxo para o motor com núcleo de ferro e enrolamentos convencionais de cobre, com uma bobina de 300 espiras. Naturalmente, o aço concatena o fluxo que atravessa as duas bobinas, minimizando a dispersão.

A diminuição da densidade de fluxo ocasionada pela substituição dos enrolamentos supercondutores por enrolamentos de cobre é compensada em parte pela presença do aço que maximiza a densidade de fluxo na região das bobinas. Nota-se que a força de tração máxima aumenta de 20 N para 83 N quando o diâmetro interno das bobinas triplica, como apresentado na Figura 4.28.

A Figura 4.30 apresenta a força de tração para este motor convencional quando é variado o número de espiras das bobinas. É importante observar que o diâmetro neste caso permanece constante e igual a 20 mm.

Neste tipo de motor o aumento do diâmetro interno das bobinas influencia mais do que aumentar o número de espiras, pois há um incremento no fluxo devido a presença de uma quantidade maior de aço no núcleo deste motor

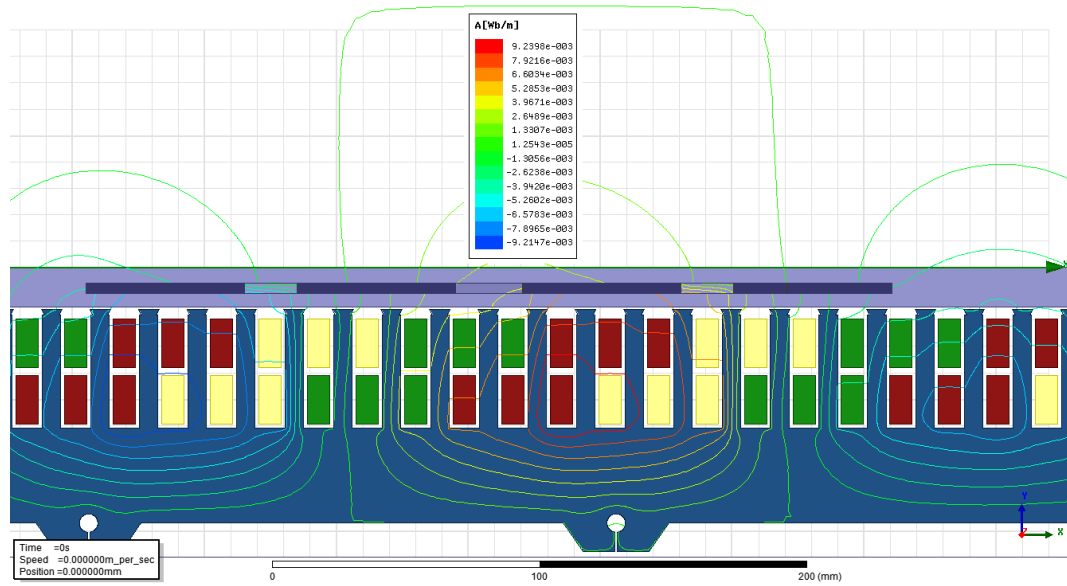


Figura 4.29: Linhas de fluxo para o motor com núcleos de aço e enrolamentos de cobre.

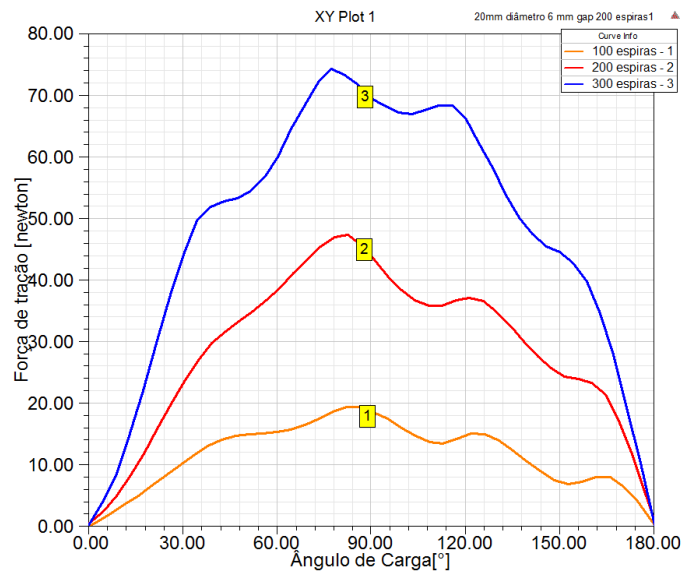


Figura 4.30: Força de tração em função do ângulo de carga variando as espiras para armadura e campo com núcleo de aço e enrolamentos de cobre na armadura e no campo, utilizando-se bobinas de 20 mm de diâmetro.

### 4.3.2 Enrolamentos Supercondutores na Armadura e no Campo

O motor apresentado nesta etapa apresenta a configuração com enrolamentos supercondutores na armadura e no campo, porém ambos com núcleo de aço. Estas simulações também servem para comparar esta configuração com a configuração do motor que utiliza núcleos de ar.

A Figura 4.31 apresenta a densidade de fluxo magnético quando um primário

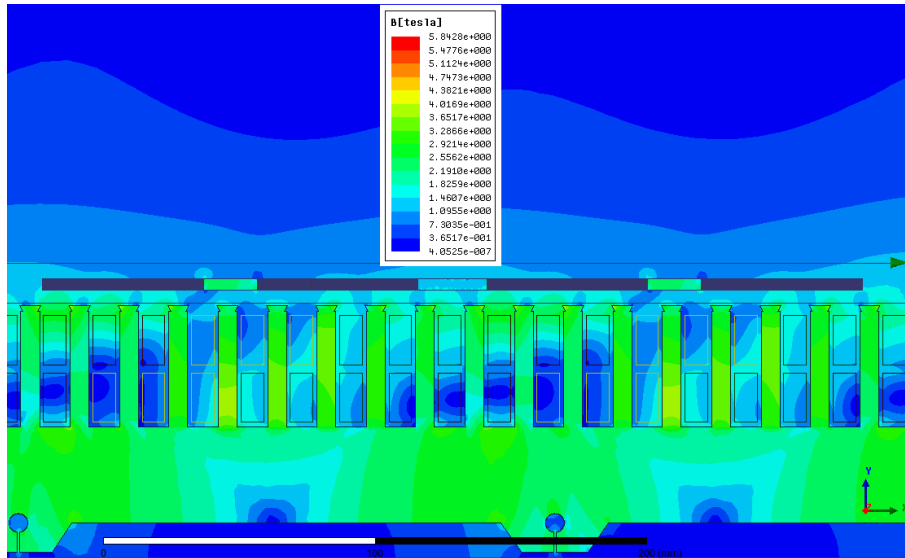


Figura 4.31: Densidade de fluxo magnético no primário com aço e enrolamentos supercondutores

com núcleo de ferro possui enrolamentos do tipo supercondutor. Nota-se a grande saturação no aço, que chega a densidades de fluxo da ordem de  $4T$ , o que pode representar um desperdício de material já que este material não terá mais utilidade para aumentar a densidade de campo na região. Porém, um estudo será realizado para efetuar comparações.

A Figura 4.32 apresenta a força de tração para duas bobinas diferentes, a primeira com 20 mm de diâmetro e 300 espiras e a segunda com 60 mm de diâmetro e 100 espiras. Observa-se que neste tipo de motor, diferentemente do anterior, o fator que mais influencia na força é o número de espiras.

A força vertical para a bobina de 60 mm, mostrada na Figura 4.33 apresenta desbalanceamento, pois o aço neste caso não está completamente saturado, fazendo com que exista ainda atração entre os materiais ferromagnéticos. É possível que para a bobina de 300 espiras o material ferromagnético esteja bem mais saturado do que neste caso, e desta forma o aço passa a se comportar como ar. Para comprovar esta suspeita foi realizada uma série de simulações de força vertical variando a corrente nas bobinas do secundário, considerando um motor com núcleos de ferro e enrolamentos supercondutores no primário.

Para verificar o problema do desbalanceamento com mais detalhes foi realizada uma simulação com núcleos de ferro nos dois enrolamentos. Foi escolhido um primário supercondutor, e a corrente foi sendo aumentada gradativamente para fazer uma avaliação a respeito da densidade de fluxo  $B$  na direção  $x$  próximo à região do núcleo secundário.

Fazendo um comparativo entre bobina de 60 mm de diâmetro de 100 espiras é possível verificar na Figura 4.34 que o núcleo de ferro tem uma saturação menor que

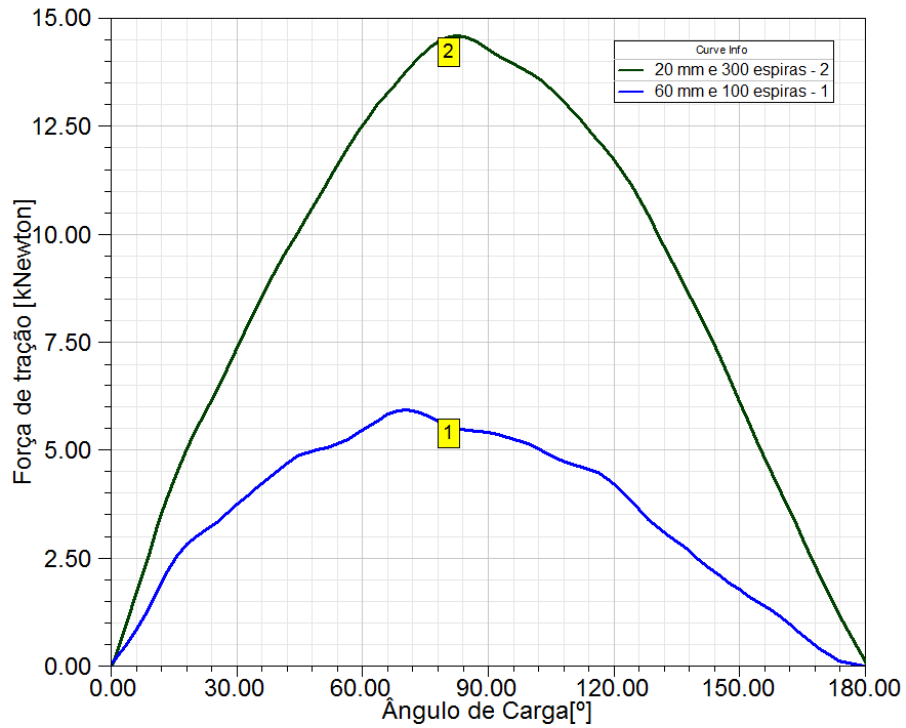


Figura 4.32: Força de tração variando ângulo de carga para motor com enrolamentos supercondutores e núcleo de aço.

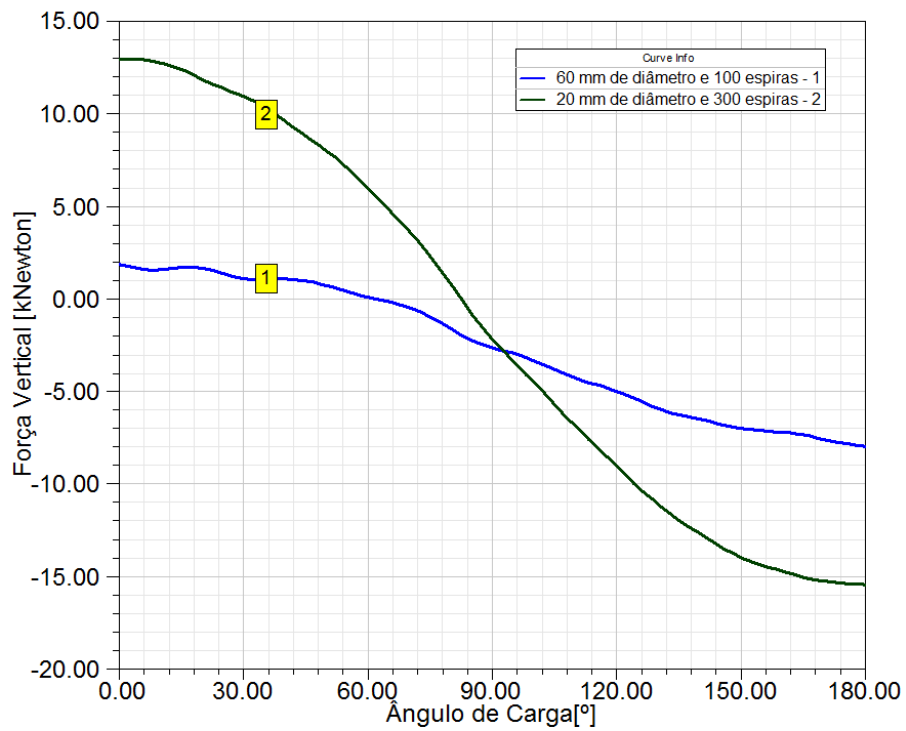


Figura 4.33: Força vertical variando ângulo de carga para motor com enrolamentos supercondutores e núcleo de aço.

para as bobinas de 300 espiras onde núcleo apresenta-se com uma saturação bem mais acentuada, sendo possível observar valores de densidade de fluxo magnético

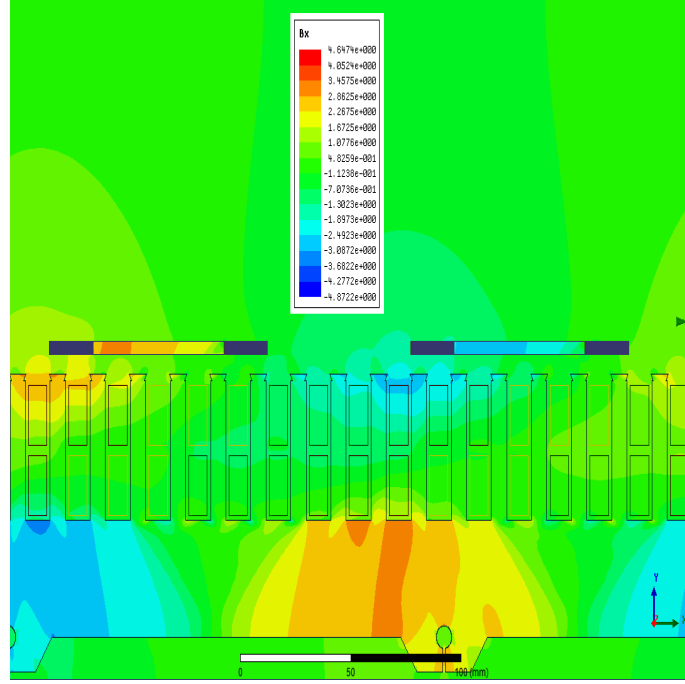


Figura 4.34: Densidade de fluxo para corrente de 70 A no campo e bobina de 60 mm de diâmetro e 100 espiras.

maiores que 2 T nos dentes de ferro do núcleo da armadura, conforme apresentado na Figura 4.31, enquanto que para a bobina de 60 mm existem regiões nos núcleos com densidades de fluxo inferiores a 1 T.

## 4.4 Motor Linear com Parte do Núcleo de Ar

Nesta etapa, foram investigadas grandezas de projeto do motor, quando tem-se núcleo de aço e cobre na armadura, com núcleo de ar e supercondutor nos enrolamentos de campo. Este tipo de configuração não é usual na literatura, mas para avaliar seus benefícios e desvantagens foram consideradas neste trabalho. Como já dito, esta configuração de armadura com núcleo de aço leva também em consideração a existência de um módulo a disposição no laboratório, onde será possível efetuar medidas experimentais em trabalhos futuros.

Foram investigadas as características da densidade de fluxo magnético ao longo do motor, para que os resultados obtidos nas simulações possam ser interpretados de forma adequada. Por isto, são investigados nesta etapa as características do campo magnético para o motor apresentado na Figura 4.35.

A Figura 4.36 apresenta a densidade de campo magnético  $B$  ao longo do trilho, com imposição de corrente contínua nas fases, e com núcleo ferromagnético. É possível perceber uma forma de onda contendo harmônicos, que são mais acentuados

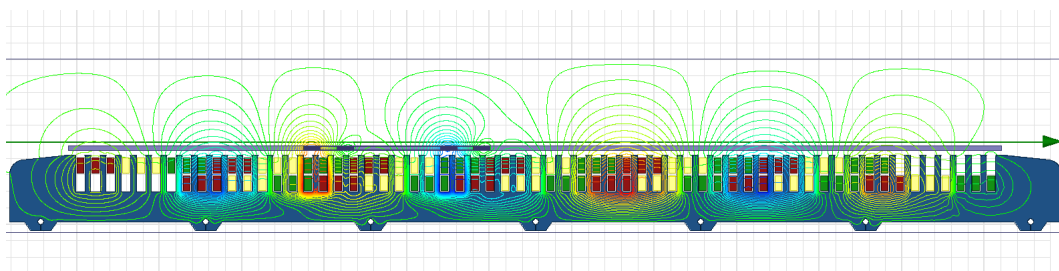


Figura 4.35: Linhas de fluxo magnético ao longo do motor impondo corrente contínua nas fases.

por causa da existência do aço. Os dentes de aço presentes fazem com que a relutância varie a cada mudança de posição, e se o centro da bobina estiver posicionado exatamente acima de um dente, o valor da densidade de fluxo será maior devido a presença do aço que direciona as linha de fluxo para passar naquele determinado espaço.

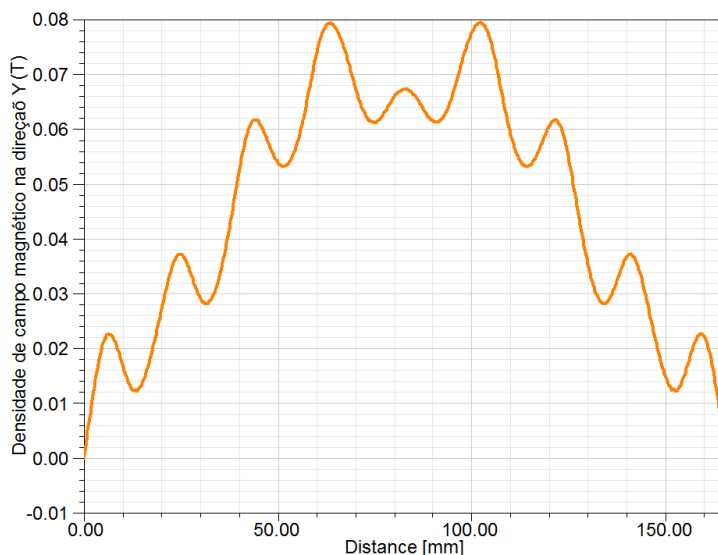


Figura 4.36: Mapeamento da densidade de fluxo magnético ao longo do motor impondo corrente contínua nas três fases, para um gap de 6 mm acima dos dentes da armadura.

Na Figura 4.37 é apresentado um gráfico que mostra o comportamento do campo em função da distância, ao longo da armadura, para vários instantes de tempo e a uma altura de 6 mm acima dos dentes de aço da armadura.

A densidade de fluxo da bobina de campo somada aquela apresentada na Figura 4.36 dará a densidade de fluxo resultante no “entreferro” a uma altura de 6 mm em relação aos dentes da armadura e a força também tem uma forma parecida, já que é diretamente dependente da densidade de fluxo magnético.

Além das oscilações vistas na Figura 4.36, pode-se esperar também, dos resultados experimentais, oscilações ainda maiores, pois a operação normal de um motor

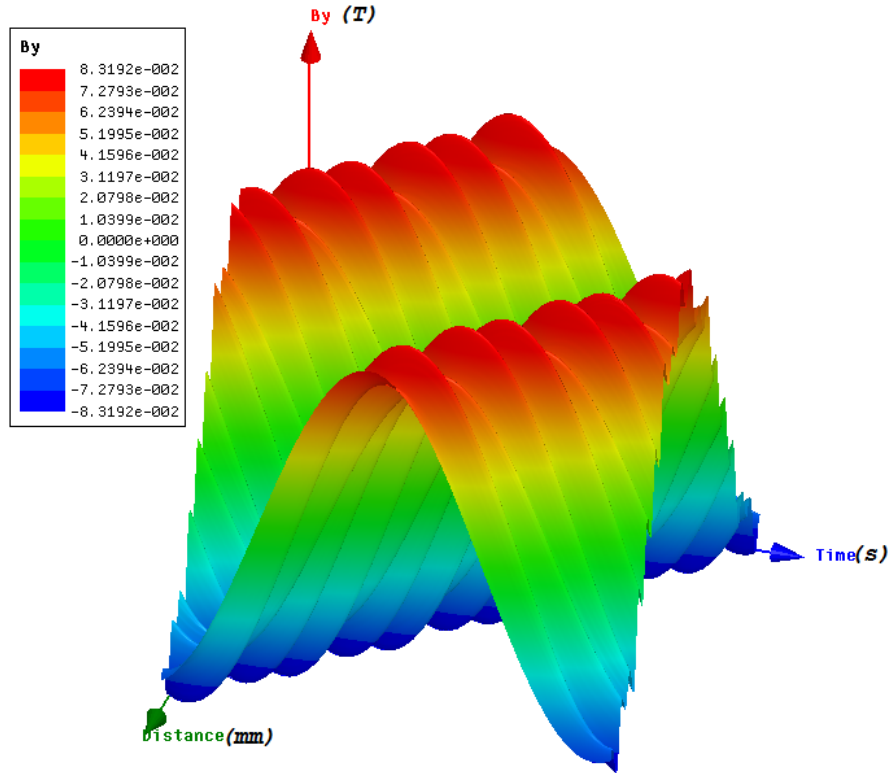


Figura 4.37: Mapeamento da densidade de fluxo magnético a 6 mm de altura da armadura em função da distância para vários instantes de tempo.

implica em movimento, desta forma, se a velocidade for alta, além da variação de relutância devido aos dentes de aço na armadura, ainda deve-se esperar efeitos de tensão induzida que irão influenciar a forma e intensidade da força.

A Figura 4.38 apresenta os resultados simulados para vários diâmetros internos, onde é possível notar uma tendência de diminuição no ripple a medida em que aumenta o valor do diâmetro interno das bobinas. Como a bobina fica mais larga, passa a receber uma influência maior dos dentes vizinhos, fazendo com que o fluxo médio enlaçado fique mais constante. Na Figura 4.39 são apresentados os valores de força vertical encontrados fazendo variar o diâmetro das bobinas onde mais uma vez percebe-se que as forças são do tipo atrativa, pois o aço ainda não está completamente saturado.

A Figura 4.40 apresenta os valores de força de tração para bobinas com diferentes números de espiras. O número de espiras de fato exerce uma influência significativa na força para este caso. Triplicando o número de espiras a força de tração aumenta cerca de 6 vezes. Ao contrário do que foi visto no motor apresentado na seção 4.3.1, neste caso, onde tem-se bobinas supercondutoras no campo, é mais vantajoso aumentar o número de espiras do que o diâmetro interno das bobinas. A Figura 4.41 mostra a força máxima de tração em função do número de espiras e em função do diâmetro

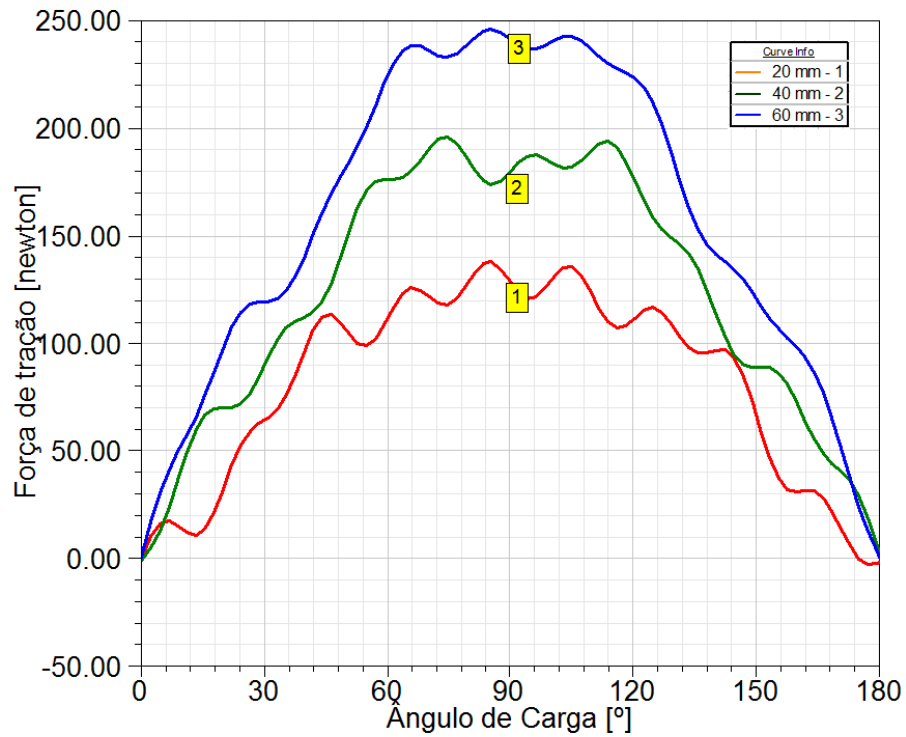


Figura 4.38: Força para bobina de 100 espiras para vários diâmetros internos

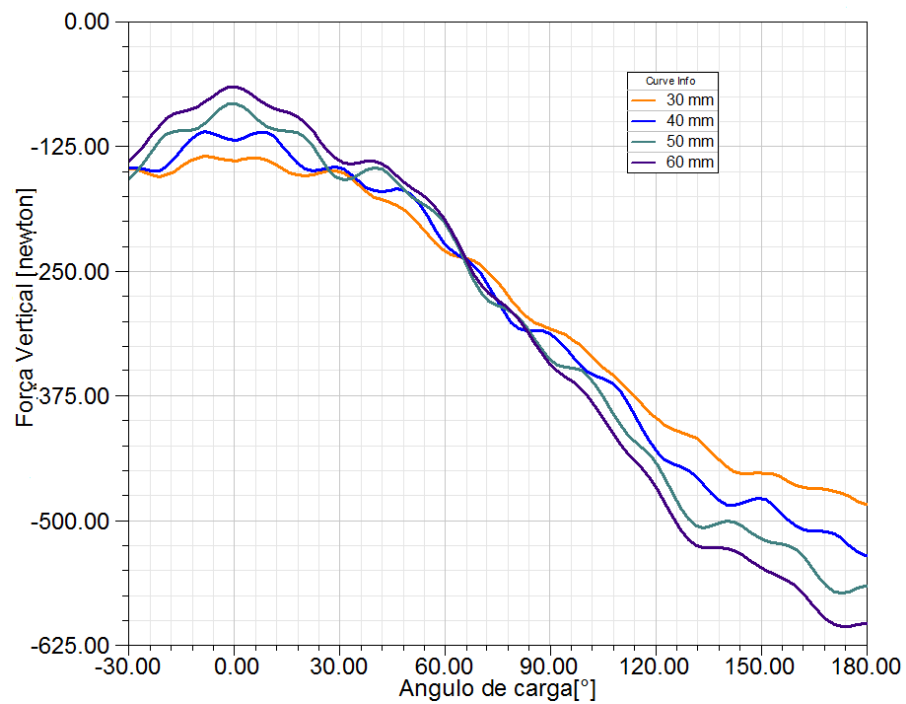


Figura 4.39: Força vertical variando o diâmetro interno das bobinas.

interno das bobinas.

Pode-se realizar uma estimativa de força/comprimento de fita assim como foi feito com o motor com núcleos de ar, onde os resultados são apresentados na Tabela 4.2. A configuração 3 representa bobinas com 20 mm de diâmetro interno e 300 espiras,

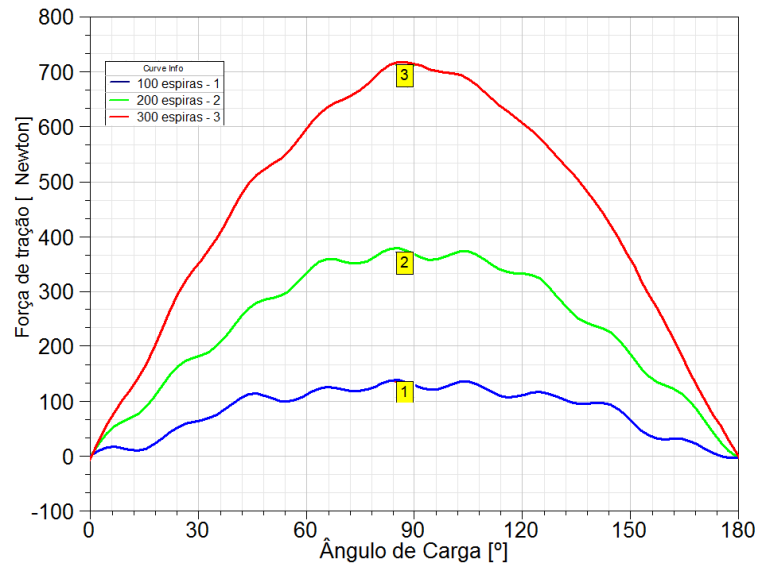


Figura 4.40: Força em função do ângulo de carga variando o número de espiras da bobina

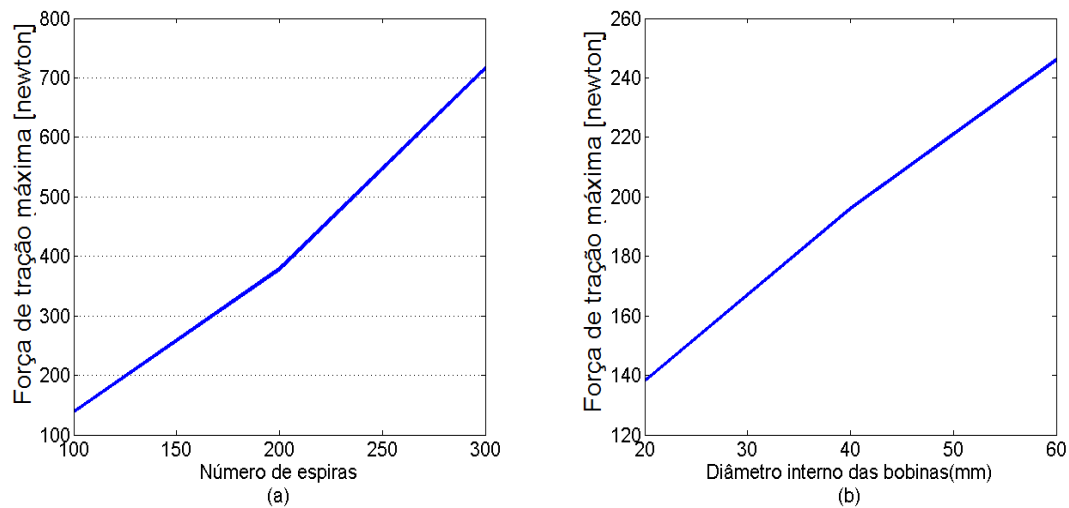


Figura 4.41: Força máxima em função do número de espiras(a) e em função do diâmetro interno das bobinas(b).

enquanto que a configuração 4 representa bobinas com 60 mm de diâmetro e 100 espiras.

Tabela 4.2: Consumo de fitas para o motor com núcleo de aço na armadura.

|                | Força/comprimento de fita (N/m) |
|----------------|---------------------------------|
| Configuração 3 | 1.72                            |
| Configuração 4 | 1.50                            |

Novamente a bobina com mais espiras tem uma vantagem na relação força/comprimento de fita em pouco mais de 10 %.

## 4.5 Análises e Discussões

Foi realizada uma comparação entre os resultados obtidos para os motores lineares estudados, com o objetivo de encontrar a melhor relação força/peso, sempre considerando a maior força obtida em cada caso.

Pode-se realizar uma estimativa de redução de peso destes motores. considere-se que todo o aço é substituído por TVE(G10), que é um material feito com fibra de vidro, e que não influencia na densidade de fluxo magnético no circuito. Este tipo de material possui uma densidade de  $1.85 \text{ g/cm}^3$  e o aço  $7.9 \text{ g/cm}^3$ , ou seja, a redução de massa somente dos núcleos é de pelo menos 76 %, isto considerando que não há variação na geometria do projeto, o que pode trazer grandes benefícios em aplicações como grandes embarcações, por exemplo.

O peso do núcleo das bobinas de campo e de seus enrolamentos não foram considerados neste cálculo, por representar cerca de 1/100 do peso da armadura, neste projeto específico. O volume  $V$  do núcleo como dos enrolamentos da armadura é dado pelo produto da área da seção  $A_s$  multiplicado pela profundidade  $z$  da parte útil da armadura:

$$V = A_s.z \quad (4.2)$$

a massa é igual a:

$$m = d.V \quad (4.3)$$

e o peso pode ser calculado por:

$$P = m.g \quad (4.4)$$

onde  $d$  é a densidade do material e a aceleração da gravidade  $g$  foi considerada igual  $10 \text{ m/s}^2$ .

O termo núcleo de ar é utilizado para designar um núcleo que utiliza um tipo de material que não seja ferromagnético. Por isso para estes motores podemos considerar um material como a fibra de vidro, por exemplo. Considerando as informações apresentadas na Tabela 4.3 e as equações 4.2, 4.3 e 4.4, o peso calculado para os enrolamentos e núcleos foram calculados:

- Peso total da armadura com núcleo de aço = 1391 N
- Peso total da armadura com núcleo de ar = 545 N

Para verificar qual tipo de motor estudado apresenta a maior relação força/peso foi construída a Tabela 4.4, onde cada motor é identificado por meio do número da seção onde foi apresentado.

Tabela 4.3: Dados gerais dos materiais dos motores lineares.

|                                     |               |
|-------------------------------------|---------------|
| Densidade do cobre                  | 8920 $kg/m^3$ |
| Densidade do aço                    | 7900 $kg/m^3$ |
| Densidade da fibra de vidro         | 1850 $kg/m^3$ |
| Volume do núcleo da armadura        | 0.014 $m^3$   |
| Volume dos enrolamentos da armadura | 0.0032 $m^3$  |

Analisando a relação força/peso apresentada na Tabela 4.4 e comparando os motores 4.2.1 e 4.3.1 verifica-se que a utilização de supercondutor no campo faz o peso diminuir para cerca de 14% do peso do motor convencional, já que possui uma densidade de força em torno de sete vezes maior. Isto se for considerada uma relação linear entre força e peso para todos os motores estudados.

Tabela 4.4: Valores estimados da força de tração em função do peso do motor.

|             | Força/peso |
|-------------|------------|
| Motor 4.2.1 | 0.41       |
| Motor 4.2.2 | 15.87      |
| Motor 4.3.1 | 0.06       |
| Motor 4.3.2 | 10.5       |
| Motor 4.4   | 0.51       |

Comparando o motor 4.2.1 que apresenta núcleo de ar com o motor 4.4 que apresenta núcleo de ferro na armadura verifica-se que a força em relação ao peso do motor é cerca de 19% maior para o motor 4.4. No entanto deve-se considerar que o motor com núcleo de ar pode ter seu peso ainda mais reduzido se for retirada uma parte do núcleo, como a região mostrada na Figura 4.42, o que também iria contribuir para redução de volume do motor. Como o material do núcleo serve somente para sustentação mecânica, não irá contribuir com o aumento da densidade de fluxo, desta forma pode-se realizar um projeto onde todo o material utilizado servirá apenas para sustentação mecânica dos enrolamentos.

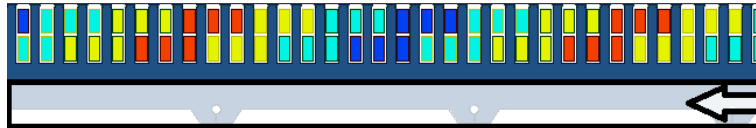


Figura 4.42: Região do núcleo de armadura que pode ter suas dimensões reduzidas.

O motor 4.3.2 apresenta a maior força em módulo. Porém o motor 4.2.2 apresenta a melhor relação força/peso, em torno de 34% maior que o motor com núcleos de aço, ou seja, se a força e o peso apresentarem uma relação linear, para obter a mesma força de 14.6 kN o peso da armadura do motor com núcleos de ar

seria de 925 N enquanto que daquele com núcleos de aço seria de 1385 N. O que mostra que neste caso específico não faz sentido manter o aço.

# Capítulo 5

## Conclusões e Trabalhos Futuros

Neste capítulo são apresentadas as conclusões relativas aos resultados obtidos e também os projetos em andamento e futuros.

### 5.1 Conclusões

As formas geométricas dos enrolamentos de motores supercondutores podem alterar os valores de torque e força, tendo relevância em projetos que utilizam núcleos de ar, onde configurações de enrolamentos distribuídas ao longo do estator apresentam o maior torque, como visto no capítulo 3.

Para os motores lineares investigados, aquele com enrolamentos supercondutores e núcleos de ar, apresentado na subseção 4.2.2, pode apresentar uma relação força/peso trezentas vezes maior que o motor convencional, que usa enrolamentos de cobre, mostrado na subseção 4.3.1. No entanto a possibilidade de construção de um protótipo deste tipo está condicionada a evolução das fitas no transporte de corrente alternada.

Dentre os motores que possuem supercondutores somente no campo, o motor apresentado na subseção 4.4 apresentou a maior vantagem no quesito força em relação ao peso. No entanto os projetos de motores lineares podem ser aperfeiçoados para reduzir também o volume, considerando modificações geométricas no núcleo da armadura, o que irá aumentar ainda mais a relação força/peso do motor.

Dentre os motores com os dois enrolamentos supercondutores, o motor com núcleos de ar, mostrado na subseção 4.2.2, apresenta relação força/peso quase 1.5 vezes maior que o motor com núcleos de aço, subseção 4.3.2, demonstrando que para estas configurações com os dois enrolamentos supercondutores, é inadequada a utilização do aço.

A relação força/comprimento de fita utilizada em cada projeto se mostrou mais vantajosa para variações no número de espiras, que é cerca de 10% maior quando

comparada com a variação do diâmetro interno das bobinas, com excessão do motor convencional, onde o diâmetro interno do núcleo exerce maior influência.

## 5.2 Trabalhos Futuros

Como o motor estudado na seção 4.4(núcleo de aço e cobre na armadura e núcleo de ar e supercondutor nos enrolamentos de campo) apresentou uma boa relação força/peso, pretende-se dar continuidade a este trabalho construindo bobinas supercondutoras para realizar medidas de força e validar as simulações realizadas nesta etapa. A armadura real que será utilizada para estas medições pode ser vista na Figura 5.1.

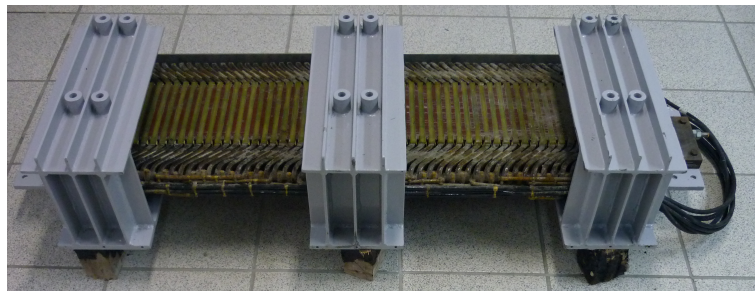


Figura 5.1: Aparência do módulo primário utilizado para medidas de força de propulsão.

Está em andamento a construção de um sistema de medições de força de tração apresentado na Figura 5.2, e as primeiras medidas serão realizadas com bobinas feitas com fitas de cobre, Figura 5.3, que servirão para adquirir experiência na confecção destas bobinas supercondutoras, até que estejam disponíveis as fitas supercondutoras que foram encomendadas a empresa Superpower.

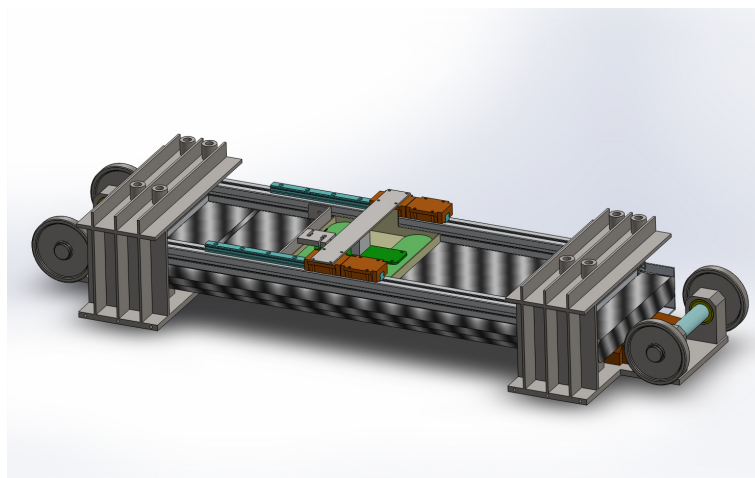


Figura 5.2: Esquema do trilho para movimentação das bobinas e aquisição dos resultados experimentais.

A escolha inicial por fitas de cobre deve-se também ao seu baixo custo e menor fragilidade, o que possibilita realizar testes iniciais e para evitar danos as fitas supercondutoras.

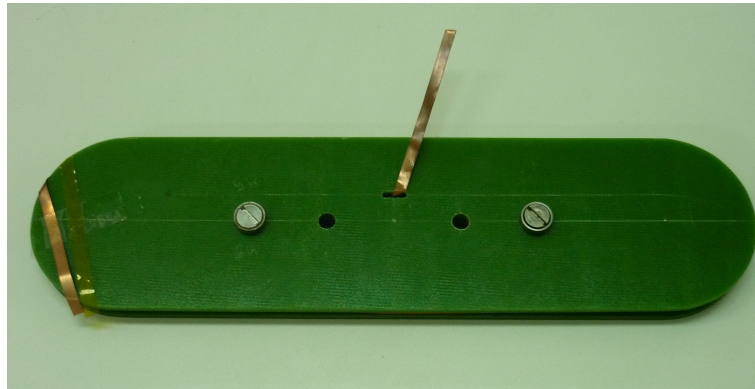


Figura 5.3: Bobina de cobre, de 20 mm de diâmetro e 100 espiras, construída para aquisição de resultados experimentais.

Além disso, pretende-se investigar o comportamento destas fitas supercondutoras quando transportam corrente alternada, para verificar a viabilidade de construção de um protótipo que tenha núcleo de ar com enrolamentos do tipo supercondutor na armadura e no campo.

# Referências Bibliográficas

- [1] GAMBLE, B., SNITCHLER, G., MACDONALD, T. “Full Power Test of a 36.5 MW HTS Propulsion Motor”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. VOL. 21, n. 3, pp. 1083–1088, 2011.
- [2] BRETZ, E. A. “Superconductors on the high seas”, *IEEE Spectrum*, v. 41, n. 1, pp. 60–67, 2004.
- [3] DOMBROVSKI, V., DRISCOLL, D., SHOYKHET, B. A., et al. “Design and Testing of a 1000-hp High-Temperature Superconducting Motor”, *IEEE Transactions on energy conversion*, v. 20, n. 3, pp. 638–643, 2005.
- [4] KWON, Y., SOHN, M., BAIK, S. “Development of a 100 hp Synchronous Motor With HTS Field Coils”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 15, n. 2, pp. 2194–2197, 2005.
- [5] GIERAS, J. F. “Superconducting electrical machines - state of the art.” *Przegląd Elektrotechniczny(Electrical Review)(polonesa)*, , n. 12, pp. 1–20, 2009.
- [6] DA CRUZ, V. S., FERREIRA, A. C., DE ANDRADE JUNIOR, R., et al. “Influência da Geometria do Rotor no Torque de um Motor Síncrono Supercondutor”, *Congresso Brasileiro de Automática*, pp. 1791–1797, 2012.
- [7] “Programa Maxwell 2d (ANSOFT)”. Disponível em: <<http://www.ansys.com/Products/Simulation+Technology/Electromagnetics/Electromechanical+Design/ANSYS+Maxwell>>. Acesso em Fevereiro de 2013.
- [8] “Nobel Prize”. Disponível em: <[www.nobelprize.org](http://www.nobelprize.org)>. Acesso em Janeiro de 2013.
- [9] “Seara da ciência”. Disponível em: <<http://www.seara.ufc.br/especiais/fisica/supercondutividade/supercondutividade1.htm>>. Acesso em Fevereiro de 2013.
- [10] ROGALLA, H., KES, P. H. *100 years of superconductivity*. 1 ed. New York, Taylor e Francis Group, 2012.

- [11] “European Council for Nuclear Research”. Disponível em: <<http://lhc.web.cern.ch/lhc/>>. Acesso em Dezembro de 2012.
- [12] “Superpower Inc. A Furukawa Company”. Disponível em: <<http://www.superpower-inc.com/system/file>>. Acesso em Janeiro de 2013.
- [13] JUN, Z., FENG, X., WEI, C., et al. “The Study and Test for 1MW High Temperature Superconducting Motor”, *IEEE/CSC e ESAS European Superconductivity News Forum*, v. 22, n. 4LB-03, 2012.
- [14] KWON, Y., SOHN, M., BAIK, S., et al. “Development of HTS motor for Industrial Applications”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 17, n. 10.1109/PES.2006.1709642, 2007.
- [15] KWON, Y., SOHN, M., BAIK, S., et al. “Development of a 100 hp Synchronous Motor With HTS Field Coils”, *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 15, pp. 2194– 2197, 2005.
- [16] MOREIRA., M. A. C. *Projeto de Motores Lineares com Auxílio do Método dos Elementos Finitos*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2005.
- [17] KIM, W. S., JUNG, S. Y., CHOI, H. Y., et al. “Development of a Superconducting Linear Synchronous Motor”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. VOL. 12, n. 1, pp. 842–845, 2002.
- [18] PINA, J. M., NEVEST, M. V., RODRIGUEST, A. L. “Case Study in the Design of HTS Machines: an All Superconducting Linear Synchronous Motor”, *Power engineering, Energy and Eletrical Drives*, pp. 185 – 190, 2007.
- [19] KIM, W. S., JUNG, S. Y., CHOI, H. Y., et al. “Development of a Superconducting Linear Synchronous Motor”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 12, n. 1, pp. 842 – 845.
- [20] KELLERS, J., BEHRENS, P., BÜHRER, C., et al. “Development of HTS Linear Motors for Industry”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 17, n. 2, pp. 2121–2124, 2007.
- [21] PENG, Y., ZHAO, L., LI, R., et al. “Design Study on a Large Force Superconducting Linear Driver”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 17, n. 2, pp. 1537–1540, 2007.

- [22] ZHENG, L., JIN, J. “Investigation of HTS Bulk Magnet Linear Synchronous Motors”, *IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices*, pp. 17–21, 2009.
- [23] TERAOKA, Y., SEKINO, M., OHSAKI, H. “Design Study of Linear Synchronous Motors using Superconducting Coils and Bulks”, *The 2010 International Power Electronics Conference*, pp. 1760–1765, 2010.
- [24] GUO, Y., JIN, J., ZHU, J., et al. “Performance Analysis of a Linear Synchronous Motor with HTS Bulk Magnets”, *XIX International Conference on Electrical Machines*, , n. 10.1109/ICELMACH.2010.5608163, 2010.
- [25] JIN, J. X., ZHENG, L. H., GUO, Y. G., et al. “Performance Characteristics of an HTS Linear Synchronous Motor With HTS Bulk Magnet Secondary”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 47, n. 6, pp. 2469–2477, 2011.
- [26] LI, J., YEN, F., ZHENG, S., et al. “Normal Force Analysis on a High Temperature Superconducting Linear Synchronous Motor”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 22, n. 10.1109/TASC.2011.2180688, 2012.
- [27] ZHENG, S. J., YEN, F., LI, J., et al. “Performance of a Small-Scale High Temperature Superconducting Linear Synchronous Motor Prototype”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 22, n. 10.1109/TASC.2011.2173487, 2012.
- [28] YEN, F., ZHENG, S., CHEN, X., et al. “Superconducting Excitation System of a Small Scale Linear Synchronous Motor”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 22, n. 3, pp. 1089–1092, 2012.
- [29] LI, J., YEN, F., ZHENG, S., et al. “Normal Force Analysis on a High Temperature Superconducting Linear Synchronous Motor”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 21, n. 3, pp. 1051–1054, 2012.
- [30] SNITCHLER, G., GAMBLE, B., KING, C., et al. “10 MW Class Superconductor Wind Turbine Generators”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 21, n. 3, pp. 1089–1092, 2011.

# Apêndice A

## Dados Construtivos da Armadura

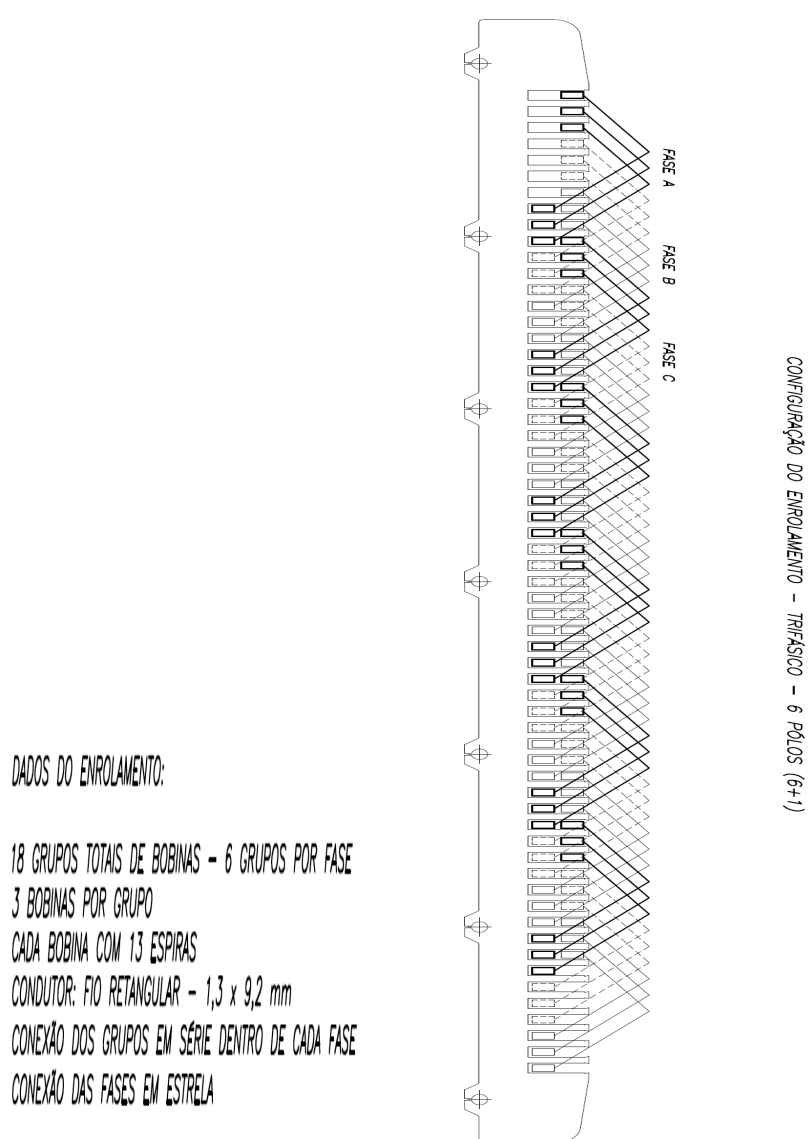


Figura A.1: Dados gerais do módulo de Armadura.

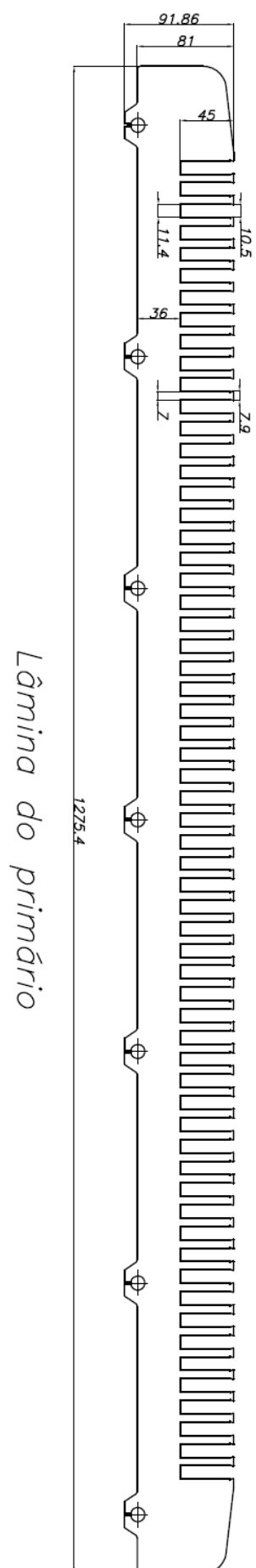


Figura A.2: Medidas dos parâmetros em mm