



**COPPE/UFRJ**

MODELAGEM DE MANCAIS LINEARES SUPERCONDUTORES  
CONSIDERANDO O RESFRIAMENTO NA PRESENÇA DE CAMPO MAGNÉTICO

Daniel Henrique Nogueira Dias

Tese de Doutorado 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 Doutor em Ciências em Engenharia Elétrica.

Orientador: Rubens de Andrade Jr.

Rio de Janeiro  
Setembro de 2009

MODELAGEM DE MANCAIS LINEARES SUPERCONDUTORES  
CONSIDERANDO O RESFRIAMENTO NA PRESENÇA DE CAMPO  
MAGNÉTICO

Daniel Henrique Nogueira Dias

TESE 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 DOUTOR EM  
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

Aprovada por:

---

Prof. Rubens de Andrade Jr., D.Sc.

---

Prof. Richard Magdalena Stephan, Dr.-Ing.

---

Prof. Antônio Carlos Ferreira, Ph.D.

---

Prof. Durval Rodrigues Junior, D.Sc.

---

Prof. Fernando Manuel Araújo-Moreira, D.Sc.

---

Prof. Guilherme Gonçalves Sotelo, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

SETEMBRO DE 2009

Dias, Daniel Henrique Nogueira

Modelagem de mancais lineares supercondutores considerando o resfriamento na presença de campo magnético/Daniel Henrique Nogueira Dias. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2009.

XV, 142 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Rubens de Andrade Jr.

Tese (doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Elétrica, 2009.

Referencias Bibliográficas: p. 103-107.

1. Modelo do Estado Crítico. 2. Mancais Magnéticos Supercondutores. 3. Simulação de Supercondutores. I. de Andrade Jr., Rubens. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Elétrica. III. Título.

# Agradecimentos

Em especial à minha esposa Carolina de Souza Teixeira, que sempre me deu forças e muito incentivo para alcançar meus objetivos,  
aos meus pais, em quem pude sempre contar e por sempre me apoiar em minhas decisões e nos momentos de maiores dificuldades,  
aos amigos e colegas de trabalho do LASUP, pela grande contribuição dada para realização do trabalho e também, não menos importante, pelos momentos de descontração,  
ao meu orientador Dr. Rubens de Andrade Jr. e ao Prof. Dr. Richard Magdalena Stephan pelo apoio e incentivo dado durante este período e  
ao CNPq e à CAPES pelo apoio financeiro aos meus estudos.

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

MODELAGEM DE MANCAIS LINEARES SUPERCONDUTORES  
CONSIDERANDO O RESFRIAMENTO NA PRESENÇA DE CAMPO  
MAGNÉTICO

Daniel Henrique Nogueira Dias

Setembro/2009

Orientador: Rubens de Andrade Jr.

Programa: Engenharia Elétrica

O presente trabalho tem como objetivo desenvolver uma técnica para modelagem de mancais lineares supercondutores a ser utilizada como ferramenta de simulação para o desenvolvimento de um veículo de levitação magnética supercondutora (MagLev). Esta técnica consiste na modelagem de supercondutores utilizando o modelo do estado crítico. Este é um modelo semi-empírico que permite tratar o supercondutor como um condutor elétrico não linear. A simulação dos supercondutores é realizada através do método dos elementos finitos (MEF) com formulação pelo potencial vetor magnético em conjunto com uma minimização por diferenças finitas (MDF). Com o modelo desenvolvido, é possível considerar o aprisionamento de fluxo no interior do supercondutor (a causa da histerese na força de levitação) na simulação dos mancais magnéticos supercondutores. Dessa forma, são realizadas simulações de força de levitação e força lateral para a transição supercondutora tanto na ausência (Zero Field Cooling - ZFC) quanto na presença (Field Cooling - FC) de campo magnético. Para validação das simulações são utilizados sistemas de medidas de força e de mapeamento de campo magnético de modo a confrontá-las com resultados experimentais. Os resultados obtidos nas simulações mostram-se em acordo com os resultados experimentais.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

SUPERCONDUCTING LINEAR BEARINGS MODELLING CONSIDERING THE  
FIELD COOLING PROCESS

Daniel Henrique Nogueira Dias

September/2009

Advisor: Rubens de Andrade Jr.

Department: Electrical Engineering

This work aims to develop a technique for modelling of superconducting linear bearings to be used as a simulation tool for the development of a superconducting magnetic levitation vehicle (MagLev). This technique represents the superconductors using the critical state model. This is a semi-empirical model that allows to treat the superconductors as a non-linear electrical conductor. The simulations are performed using the finite element method (FEM) with a formulation by the magnetic vector potential together with a minimization of finite differences (FDM). With the developed model, it is possible to consider the trapped field within the superconductor (the cause of hysteresis in the levitation force) in the simulation of superconducting magnetic bearings. Thus, levitation force and lateral force simulations are performed with superconducting transition both in the absence (Zero Field Cooling - ZFC) and in the presence (Field Cooling - FC) of magnetic field. To validate the simulations experimental rigs to measure the magnetic force and to map the magnetic field are used in order to compare them with experimental data. Results obtained with the simulations show in agreement with the experimental results.