

### OTIMIZAÇÃO DE TRILHO MAGNÉTICO DE UM SISTEMA DE LEVITAÇÃO SUPERCONDUTORA PARA VEÍCULO MAGLEV

Eduardo Souza Motta

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 Engenharia Elétrica.

Orientadores: Richard Magdalena Stephan José Herskovits Norman

Rio de Janeiro Novembro de 2011

#### OTIMIZAÇÃO DE TRILHO MAGNÉTICO DE UM SISTEMA DE LEVITAÇÃO SUPERCONDUTORA PARA VEÍCULO MAGLEV

Eduardo Souza Motta

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.

Examinada por:

Prof. Richard Magdalena Stephan, Dr.-Ing.

Prof. José Herskovits Norman, D.Sc.

Mh & A al I J

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

Prof. Luiz Le

Prof. Paulo Antônio Pereira Wendhausen, Dr.-Ing.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL NOVEMBRO DE 2011 Motta, Eduardo Souza

Otimização de Trilho Magnético de um Sistema de Levitação Supercondutora para Veículo MagLev/Eduardo Souza Motta. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2011. XVI, 97 p.: il.; 29, 7cm. Orientadores: Richard Magdalena Stephan José Herskovits Norman (doutorado) – UFRJ/COPPE/Programa Tese de Engenharia Elétrica, 2011. Referências Bibliográficas: p. 85 – 89. Supercondutividade. 2. Levitação. 3. 1. Otimização. I. Stephan, Richard Magdalena et al. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Elétrica. III. Título.

Para minha filha Bárbara Vieira Motta.

### Agradecimentos

Aos meus familiares, em especial ao meu pai Winston Rodrigues Motta e minha mãe Maria da Glória Souza Motta, pela educação a mim ministrada e total incentivo à continuidade dos meus estudos.

Aos meus orientadores Richard Magdalena Stephan e José Herskovits Norman, pelos ensinamentos repassados e ajudas providenciais. À equipe do *LASUP*, especialmente ao Ocione José Machado, pela contribuição na montagem do trilho magnético fruto deste trabalho.

Às Indústrias Nucleares do Brasil, pela liberação e incentivo à continuidade dos meus estudos. Em especial aos meus ex superiores, os engenheiros eletricistas Samuel Fayad Filho e Arlindo Coelho Fragoso Júnior, e ao Marcio Peixoto de Souza Mello, que viabilizaram a conclusão desse trabalho.

Aos meus amigos, mesmo aqueles que não compreendem o porque do meu esforço acadêmico demasiado. Em especial aos meus amigos da área acadêmica Daniel Henrique Nogueira Dias, Guilherme Gonçalves Sotelo, Leonardo de Almeida Matos Moraes e Henry Octavio Cortes Ramos. Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

#### OTIMIZAÇÃO DE TRILHO MAGNÉTICO DE UM SISTEMA DE LEVITAÇÃO SUPERCONDUTORA PARA VEÍCULO MAGLEV

Eduardo Souza Motta

Novembro/2011

Orientadores: Richard Magdalena Stephan José Herskovits Norman

Programa: Engenharia Elétrica

Este trabalho dedica-se ao estudo de otimização de um sistema de levitação constituído por um trilho magnético e um veículo contendo supercondutores de elevada temperatura crítica. Ele visa a determinação de uma geometria que minimize o investimento necessário, atendo ainda os requisitos do projeto. As variáveis utilizadas na otimização são as dimensões dos magnetos do trilho e do circuito magnético de ferro. As restrições de projeto consideradas são a força de levitação e as facilidades para a montagem do sistema. O processo de determinação da geometria ótima é efetuado por busca extensiva, algoritmos genéticos e um algoritmo de ponto interior de direção viável. As restrições de força são analisadas durante os processos de otimização utilizando-se o Método de Elementos Finitos juntamente com os Modelos de Permeabilidade Nula e Congelamento Total de Fluxo. Os resultados obtidos são verificados por simulação pelo Modelo de Bean e também experimentalmente. Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

# OPTIMIZATION OF A MAGNETIC RAIL OF A SUPERCONDUCTING MAGLEV VEHICLE

Eduardo Souza Motta

November/2011

Advisors: Richard Magdalena Stephan José Herskovits Norman

Department: Electrical Engineering

This work studies the optimization of a levitation system constituted by a magnetic rail and a vehicle containing high temperature superconductors (HTS). It intents to determine a geometry that minimizes the necessary investment, respecting the design restrictions. The variables used in the optimization process are the dimensions of the permanent magnetic blocks and the iron of the magnetic circuit. The design restrictions are the levitation force and assemblage facilities. The optimization process is performed by extensive search, genetic algorithm and a feasible direction interior point algorithm. The design restrictions are determined by the Finite Element Method together with Null Permeability and Total Flux Freezing models. The results are verified by simulation with Bean Model and also checked experimentally.

## Sumário

Li	Lista de Figuras x					
Li	sta d	e Tabelas xv	7			
Li	sta d	e Abreviaturas xv	i			
1	Intr	odução	L			
	1.1	Veículos Urbanos com Rodas	1			
	1.2	Veículos com Levitação Eletromagnética	2			
		1.2.1 Veículo com Levitação Eletromagnética Ativa	3			
		1.2.2 Veículo com Levitação Eletrodinâmica	5			
		1.2.3 Veículo com Levitação Supercondutora	5			
	1.3	Magnetos Permanentes	7			
	1.4	Objetivos do trabalho	)			
	1.5	Organização do trabalho	)			
	1.6	Síntese do capítulo	)			
<b>2</b>	Sup	ercondutividade 11	L			
	2.1	Introdução Histórica	1			
	2.2	Supercondutor do Tipo I	2			
	2.3	Supercondutor do tipo II	3			
	2.4	Síntese do capítulo	3			
3	Feri	ramentas Utilizadas na Otimização 17	7			
	3.1	Busca Extensiva	3			
	3.2	Algoritmos Genéticos	)			
	3.3	Feasible Direction Interior Point Algorithm	1			
	3.4	Método dos Elementos Finitos e Modelos de Supercondutividade 2'	7			
		3.4.1 Método dos Elementos Finitos	7			
		3.4.2 Modelo de Permeabilidade Nula para o Cálculo da Força de				
		Levitação para o Processo de Otimização	3			

		3.4.3	Modelo de Aprisionamento Total de Fluxo para o Cálculo da	
			Força de Estabilidade Lateral	29
		3.4.4	Modelo de Bean para o Cálculo da Força de Levitação	31
	3.5	Interfa	ce entre os Algoritmos de Otimização e o $MEF$	35
	3.6	Síntese	do capítulo	36
4	$\operatorname{Res}$	ultados	s Obtidos utilizando o FDIPA	37
	4.1	Primei	ra Etapa de Otimização utilizando o $FDIPA$	37
	4.2	Segund	la Etapa de Otimização Utilizando o <i>FDIPA</i>	42
	4.3	Result	ados de Simulação por Bean e Experimentais	45
	4.4	Síntese	do capítulo	60
<b>5</b>	Res	ultados	o Obtidos utilizando Busca Extensiva e Algoritmos	
			8	
	Ger	néticos		61
	<b>Ger</b> 5.1	<b>néticos</b> Criosta	to do MagLev-Cobra	<b>61</b> 61
	Ger 5.1 5.2	n <b>éticos</b> Criosta Resulta	ados Obtidos por Busca Extensiva e Algoritmos Genéticos	<b>61</b> 61 64
	Ger 5.1 5.2 5.3	<b>héticos</b> Criosta Resulta Testes	ato do MagLev-Cobra	<b>61</b> 61 64 71
	Ger 5.1 5.2 5.3 5.4	néticos Criosta Resulta Testes Síntese	ato do MagLev-Cobra	<b>61</b> 64 71 80
6	Ger 5.1 5.2 5.3 5.4 Cor	néticos Criosta Resulta Testes Síntese nclusõe	ato do MagLev-Cobra	<ul> <li>61</li> <li>64</li> <li>71</li> <li>80</li> <li>81</li> </ul>
6	Ger 5.1 5.2 5.3 5.4 Cor 6.1	néticos Criosta Resulta Testes Síntese nclusões Conclu	ato do MagLev-Cobra	<ul> <li>61</li> <li>64</li> <li>71</li> <li>80</li> <li>81</li> </ul>
6	Ger 5.1 5.2 5.3 5.4 Cor 6.1 6.2	néticos Criosta Resulta Testes Síntese nclusões Conclu Próxim	ato do MagLev-Cobra	<ul> <li>61</li> <li>64</li> <li>71</li> <li>80</li> <li>81</li> <li>84</li> </ul>
6 Re	Ger 5.1 5.2 5.3 5.4 Cor 6.1 6.2 eferê	néticos Criosta Resulta Testes Síntese nclusõea Conclu Próxim ncias E	to do MagLev-Cobra	<ul> <li>61</li> <li>64</li> <li>71</li> <li>80</li> <li>81</li> <li>84</li> <li>85</li> </ul>

## Lista de Figuras

1.1	Comparação entre o momento de flexão em uma viga bi-apoiada para	
	uma carga pontual $P$ e uma carga distribuída, [1]	2
1.2	Esquema do sistema de levitação ativa	4
1.3	Esquema do veículo de levitação eletrodinâmica	5
1.4	Vista interna do modelo em escala real do MagLev-Cobra	6
1.5	Vista do veículo MagLev-Cobra sobre uma laje de concreto.	7
1.6	curva B versus H característica de um ímã permanente	8
2.1	Diagrama de fases de um supercondutor em função da sua temper-	
	atura, campo magnético aplicado e corrente	12
2.2	Fluxóide gerado por aplicação de campo externo	14
2.3	Ilustração da rede de Abrikosov, baseado em [2]	15
2.4	Diagrama de fases dos supercondutores do tipo I e II, onde $H_A$ é a	
	intensidade de campo magnético aplicada e $T$ a temperatura. $\ .\ .\ .$	16
3.1	Diagrama esquemático da otimização por $BE$	18
3.2	Representação gráfica da equação 3.1	19
3.3	Representação de um indivíduo em $AG$	20
3.4	Diagrama esquemático da otimização por $AG$	22
3.5	Representação gráfica da recombinação de genes	23
3.6	Representação gráfica da mutação de um gene	23
3.7	Gráfico contendo duas variáveis $(x_1 \in x_2)$ da função objetivo (equação	
	3.5), utilizada para testes do AG. Os valores de $x_3$ , $x_4$ e $x_5$ foram	
	fixados em 3, 4 e 5, respectivamente. Verifica-se os inúmeros mínimos	
	locais da mesma.	24
3.8	Direção de busca de uma função $f$ de duas variáveis e uma restrição $g.$	27
3.9	Curva B x H do material ferromagnético utilizado (aç o $SA1010)$ no	
	sistema de levitação.	28

3.10	Simulação de força de levitação de um bloco supercondutor sobre um trilho de ímãs em configuração de concentração de fluxo, utilizando-se	
	MEF. Nota-se a expulsão do fluxo magnético do interior do super-	
	condutor, dado a permeabilidade nula imposta na região supercondu-	
	tora.	29
3.11	Simulação da densidade de fluxo magnético em um bloco supercon-	
-	dutor sobre um trilho de ímãs em configuração de concentração de	
	fluxo, utilizando-se <i>MEF</i> . Note-se que a densidade de fluxo mag-	
	nético não é alterada pelo bloco supercondutor, dado que a permea-	
	bilidade $\mu = \mu_0$ é imposta na região supercondutora.	30
3.12	Simulação de força de estabilidade lateral devido ao aprisionamento	
	da densidade de fluxo magnético pelo supercondutor em sua posição	
	central, conforme apresentado na figura 3.11	30
3.13	Fluxograma com o algoritmo para o cálculo do perfil de corrente no	
	supercondutor, utilizado em [3]	33
3.14	Perfil da densidade de corrente que flui no supercondutor devido a	
	presença do campo magnético externo produzido por um trilho de	
	imãs permanentes (utilizado Bean e $J_C = 1.2 \times 10^7 A/m^2$ ), juntamente	
	com a densidade de fluxo magnético. As etapas apresentadas são: (a)	
	resfriamento do bloco supercondutor na presença de campo a uma	
	altura de 25 mm; (b) aproximação do bloco ao trilho até uma distância	
	mínima de 5 mm; (c) afastamento do bloco ao trilho até uma altura	
	de 50 mm; (d) afastamento do bloco ao trilho até uma altura de 100 $$	
	mm e; (e) retornado do bloco à sua posição inicial. Extraido de $\left[4\right]$	34
3.15	Fluxograma da iteração entre o $AO$ e o $MEF$	36
4.1	Geometria inicial A do sistema de levitação, utilizado como ponto	
	inicial da otimização com o <i>FDIPA</i> . Variáveis de otimização cotadas	
	(exceto dimensões do bloco supercondutor). Dimensões em milímetros.	39
4.2	Foto da seção do trilho com a geometria inicial $\mathbf{A}$ do sistema de	
	levitação, utilizado como ponto inicial da otimização com o FDIPA.	40
4.3	Geometria $\mathbf{B}$ , obtida através da otimização da geometria $\mathbf{A}$ , após	
	21 iterações do FDIPA, tendo somente a força de levitação como	
	restrição de projeto. Dimensões em milímetros	41
4.4	Força de estabilidade lateral em função do deslocamento para as con-	
	figurações inicial (geometria ${\bf A})$ e geometria dada pela primeira etapa	
	de otimização (geometria ${\bf B}).$ Nota-se que para o pior caso, geometria	
	${\bf B},$ a força de estabilidade lateral é cerca de 50 % superior à máxima	
	possível do projeto.	42

xi

4.5	Simulação do deslocamento para cima do componente de aço carbono	
	central do trilho magnético da geometria ${\bf B},$ apresentada na figura 4.3,	
	para o estudo de sua estabilidade $\hfill \ldots \hfill \hfill \ldots \hfill \ldots \hfill \hfill \ldots \hfill \ldots \hfill \ldots \hfill \ldots \hfill \hfill \ldots \hfill \ldots \hfill \ldots \hfill \hfill \ldots \hfill \hfill \ldots \hfill \hfill \hfill \ldots \hfill \hfil$	43
4.6	Geometria $\mathbf{C}$ , obtida pelo <i>FDIPA</i> , tendo como ponto inicial a geome-	
	tria ${\bf B},$ respeitando as restrições de projeto: força de levitação e a não	
	necessidade de elementos de fixação complementares. Dimensões em	
	milímetros.	45
4.7	Forças de levitação calculadas pelo Modelo de Bean para trilhos das	
	geometrias $\mathbf{A}, \mathbf{B} \in \mathbf{C}, \text{ em } ZFC. \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots$	46
4.8	Ímã na geometria ótima fabricado para a efetuação dos experimentos	
	da gemometria $\mathbf{C}$	47
4.9	Simulação do ímã da geometria $\mathbf{C}$ por $MEF$	48
4.10	Sistema de mapeamento de campo magnético do <i>IFW</i> -Dresden	49
4.11	Densidade de fluxo magnético perpendicular à superfície da face ad-	
	junta ao concentrador de fluxo central da geometria $\mathbf{C}$ , medido a 1	
	mm de distância	50
4.12	Densidade de fluxo magnético perpendicular à superfície da face ad-	
	junta ao concentrador de fluxo central da geometria $\mathbf{C}$ , medido (no	
	centro do ímã) e simulado a 1mm de distância	51
4.13	Densidade de fluxo magnético perpendicular à superfície do ímã uti-	
	lizado na geometria ${\bf C},$ medido (no centro do ímã) e simulado a 1mm	
	de distância. As medições foram efetuadas em sentido anti-horário.	
	(a) - Face apresentada nas figuras 4.11 e 4.12; (b) - Face oposta à	
	face (a); (c) - Topo do ímã e; (d) - Base do ímã. Densidade de fluxo	
	magnético [T] por distância [mm]	52
4.14	Componentes do trilho magnético da geometria $\mathbf{C}$ , exceto magnetos	
	permanentes	53
4.15	Desenho em corte do trilho magnético da geometria C	53
4.16	Trilho da geometria ${\bf C}$ montado	54
4.17	Blocos supercondutores utilizados na medição das forças de levitação	
	dos trilhos das geometrias ${\bf A}$ e ${\bf C}$ (construído pelo $IFW\text{-}{\rm Dresden},$	
	com as alterações de fixação do concentrador de fluxo central). $\ .\ .$	55
4.18	Sistema de medição de forças, com seis graus de liberdade, posto em	
	operação no $IFW\mbox{-}Dresden$ por integrantes da equipe do $LASUP.$	56
4.19	Forças de levitação medidas de trilhos singelos das geometrias ${\bf A}$ e	
	${\bf C}$ (construído pelo $IFW\text{-}{\rm Dresden},$ com as alterações de fixação do	
	concentrador de fluxo central)	57

4.20	Comparação entre as densidades de fluxo magnético medida e	
	simulada do trimo da geometria C construido no $TFW$ -Diesden,	
	utilizado pag atimizaçãos a simulaçãos dos (mãs pormanentos)	EQ
4 91	Comparação entre as densidados da fluxa magnética medida a	99
4.21	comparação entre as densidades de nuxo magnetico medida e simulada da trilha da geometria $C$ construída na $IEW$ Dresdon	
	utilizando se o valor de forea correitiva corricido para $700050 \text{ A}/\text{m}$	50
	utilizando-se o valor de lorça coercitiva corrigido para 700959 A/III.	09
5.1	Desenho em corte do criostato desenvolvido pel a $ATZ$ para o veículo	
	MagLev-Cobra.	62
5.2	Criostato desenvolvido pel a $ATZ$ para o veículo MagLev-Cobra. $\ .\ .$	63
5.3	Posicionamento do criostato no veículo MagLev-Cobra . $\ .\ .\ .$ .	63
5.4	Trilho da geometria ${\bf D}$ obtido por otimização com $BE.$ Variáveis de	
	otimização cotadas. Dimensões em milímetros	64
5.5	Trilho da geometria ${\bf F}$ obtido por otimização com $AG,$ utilizando a	
	geometria ${\bf D}$ como ponto inicial	65
5.6	Trilho da geometria ${\bf E}$ obtido pela análise do resultado da geometria	
	${\bf F},$ na qual os ímãs laterais inferiores foram reduzidos d rasticamente	
	quando comparados aos da geometria $\mathbf{D}.$	66
5.7	Trilho da geometria ${\bf E}$ montado para verificação experimental de seu	
	desempenho em conjunto com o criostato desenvolvido pel a $ATZ.\ .$ .	66
5.8	Trilho da geometria ${\bf G}$ obtido por otimização com $AG,$ utilizando a	
	geometria ${\bf E}$ como ponto inicial	67
5.9	Comparação de forças simuladas pelo modelo de Bean e medidas para	
	as geometrias $\mathbf{E} \in \mathbf{G}$ , no caso de $FC$ de 35 mm. $\ldots \ldots \ldots \ldots$	68
5.10	Trilho da geometria ${\bf G}$ montado para verificação experimental de seu	
	desempenho, comparando-o com a geometria ${\bf E}.$	69
5.11	Comparação de forças experimentais para as geometrias ${\bf E}$ e ${\bf G},$ em	
	quarto casos de $FC$ . (a) - $ZFC$ ; (b) - $FC$ de 25 mm; (c) - $FC$ de 30	
	mm e; (d) - $FC$ de 35 mm. Força [N] por distância [mm]	70
5.12	Comparação da densidade de fluxo magnético nas direções (a) hori-	
	zontal $x \in (b)$ vertical $y$ , das geometrias $\mathbf{E} \in \mathbf{G}$	71
5.13	Martelo de borracha utilizado para a aplicação de um impulso de força	
	no criostato, visando a análise dinâmica dos sistemas de levitação.	
	Um paquímetro é colocado ao lado para referência dimensional	72
5.14	Aparato experimental utilizado para a análise dinâmica dos sistemas	
	de levitação supercondutora	73
5.15	Resposta a um impulso do sistema de levitação da geometria $\mathbf{G}$ , com	
	criostato sem massa adicional.	74

5.16	Transformada rápida de Fourier (FFT) da parte de interesse do sinal	
	apresentado na figura 5.15	75
5.17	Esquema massa-amortecedor-mola, representando o sistema de levi-	
	tação supercondutora.	76
5.18	Rigidez dos sistemas de levitação das geometrias ${\bf E}$ e ${\bf G},$ para dois	
	FC e variando-se a massa (carga e descarga)	78
5.19	Coeficiente de atrito viscoso dos sistemas de levitação das geometrias	
	$\mathbf{E} \in \mathbf{G}$ , para dois $FC$ e variando-se a massa (carga e descarga)	78
5.20	Frequência de oscilação dos sistemas de levitação das geometrias ${\bf E}$ e	
	$\mathbf{G}$ , para dois $FC$ e variando-se a massa (carga e descarga)	79
5.21	Amortecimeto dos sistemas de levitação das geometrias ${\bf E}$ e ${\bf G},$ para	
	dois $FC$ e variando-se a massa (carga e descarga)	79

## Lista de Tabelas

1.1	Principais projetos de veículos de levitação magnética que estão sendo	
	desenvolvidos atualmente.	3
1.2	Parâmetros característicos dos ímãs de ferrite, SmCoe e NdFeB (val-	
	ores apresentados de referência, podendo variar de acordo com o pro-	
	cesso produtivo, estequiometria, etc.)	9
4.1	Redução de custos por material do sistema de levitação obtida da	
	primeira etapa de otimização (otimização da geometria ${\bf A}$ para a ge	
	ometria <b>B</b> ), utilizando o $FDIPA$ para um trilho simples de 100 km	
	de comprimento.	41
4.2	Redução de custos por material do sistema de levitação obtida da	
	primeira etapa de otimização (otimização da geometri a ${\bf B}$ para a ge	
	ometria C), utilizando o $FDIPA$ para um trilho simples de 100 km	
	de comprimento.	45
4.3	Comparação entre as geometrias ${\bf A}$ e ${\bf C}$ pelos modelos de Permeabi-	
	lidade Nula e de Bean.	47
5.1	Comparação de desempenho entre as geometrias ${\bf E}$ e ${\bf G}.$	70
6.1	Resumo dos trilhos magnéticos estudados neste trabalho	81

### Lista de Abreviaturas

AG	Algoritmo Genético, p. 8
AMV	Aparelho de Mudança de Via, p. 84
AO	Algoritmos de Otimização, p. 34
ATZ	Adelwitz Technologiezentrum GmbH, p. 60
BE	Busca Extensiva, p. 8
FC	Field Cooling, p. 28
FDIPA	Feasible Direction Interior Point Algorithm, p. 8
$\operatorname{FFT}$	Fast Fourier Transform, p. 74
HTS	High Temperature Superconductors, p. 10
IFW-Dresden	Leibniz - Institut für Festkörper und Werkstoffforschung - Dres- den, p. 45
KKT	Karush-Kuhn-Trucker, p. 24
LASUP	Laboratório de Aplicações de Supercondutores, p. 5
MATF	Modelo de Aprisionamento Total de Fluxo, p. 28
MDF	Método de Diferença Finitas, p. 31
MEF	Método de Elementos Finitos, p. 8
MPN	Modelo de Permeabilidade Nula, p. 8
MTV	Método do Trabalho Virtual, p. 27
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro, p. 5
VLT	Veículo Leve sobre Trilhos, p. 1
ZFC	Zero Field Cooling, p. 28

### Capítulo 1

### Introdução

Grande parte da população mundial se encontra em metrópoles. Um dos maiores problemas da alta densidade demográfica destes centros é a saturação de suas vias, levando a congestionamentos diários. Este fato implica na necessidade de um transporte público eficiente, com custos competitivos de operação, manutenção e implantação. Baseando-se nessas características necessárias, esse capítulo tem como objetivo a comparação entre diferentes sistemas de transporte de massa e a apresentação da motivação deste trabalho.

### 1.1 Veículos Urbanos com Rodas

O metrô se apresenta como uma solução ideal para transporte urbano. Contudo, apesar de não requerer desapropriações, faz-se necessário um grande investimento para a abertura de túneis subterrâneos. Apesar da utilização de cavadeiras automatizadas, a abertura dos túneis representa grande parte do investimento necessário das obras metroviárias.

Além disso, a limitação da inclinação máxima de 4% (veículos de levitação magnética possuem a inclinação superior, limitada somente pelo conforto do usuário) implica na construção de estações de grande profundidade, resultando no encarecimento da obra, na necessidade de operação constante de escadas rolantes ou elevadores e consequente desconforto para os passageiros, em especial os idosos ou pessoas com dificuldades de locomoção.

Como uma alternativa ao metrô, existem sistemas de média capacidade em via elevada, como por exemplo o Veículo Leve sobre Trilhos (VLT).

Este veículo, assim como o metrô, possui rodas. As desvantagens de veículos que possuem rodas serão abordadas na seção subsequente deste capítulo.

### 1.2 Veículos com Levitação Eletromagnética

Estes tipos de veículos, chamados MAGLEV, utilizam a levitação eletromagnética no lugar de rodas. Assim, o atrito é reduzido drasticamente. Esse fato acarreta na redução dos custos de operação e manutenção, dado que não há desgaste de componentes girantes. Além disso, a poluição sonora produzida por esse tipo de transporte também é inferior, permitindo a sua operação próxima à residências. A redução do atrito e vibrações também acarreta em uma viagem mais confortável.

Outra vantagem de não possuir rodas é a distribuição uniforme de seu peso, requerendo assim estruturas de sustentação menos robustas (consequentemente mais baratas) e compactas. Este fato pode ser verificado na figura 1.1, onde o momento fletor é reduzido pela metade em relação à carga pontual.



Figura 1.1: Comparação entre o momento de flexão em uma viga bi-apoiada para uma carga pontual P e uma carga distribuída, [1].

Apesar de apresentado na figura 1.1 com o mesmo peso P, o veículo MAGLEV é mais leve que o com rodas, dado que não necessita de eixos, rodas e *trucks*.

Outro ponto forte da não existência de rodas é a possibilidade da construção de veículos segmentados em pequenos módulos (aproximadamente 1,5 m), conectados entre si. Isso permite a realização de curvas fechadas, acompanhando vias existentes, rios e canais. Em adição, a construção modular do veículo permite a alteração do comprimento do mesmo com maior facilidade, decorrente de uma alteração de número de passageiros, por exemplo.

A tecnologia de levitação magnética para sistemas de transporte iniciou-se focada para aplicações de alta velocidade (transporte interurbano). Contudo, verificouse que esta tecnologia se aplicava em veículos de baixa velocidade, ideais para o transporte urbano. Este fato pode ser confirmado conforme apresentações efetuadas na conferência MagLev 2011 [5], resumidas na tabela 1.1. Este tipo de aplicação é a estudada neste trabalho.

País	Nome	Tipo	Velocidade
Alemanha	Transrapide	EML $^1$	Alta
Japão	JR-MagLev	EDL $^2$	Alta
EUA	GA	EDL	Baixa
EUA	MagLev2000	EDL	Baixa
EUA	MagneMotion M3	EML	Baixa
EUA	MagnePlane	EDL	Baixa
Japão	HSST-Linimo	EML	Baixa
China	SMT	EDL	Baixa
Coréia	KIMM & KRRI	EML	Baixa
Brasil	MagLev-Cobra	SML $^3$	Baixa

Tabela 1.1: Principais projetos de veículos de levitação magnética que estão sendo desenvolvidos atualmente.

 $^1$ Levitação Eletromagnética Ativa, <br/>²Levitação Eletromagnética Dinâmica e $^3$ Levitação Supercondutora.

São três tecnologias de levitação magnética, as quais serão abordadas nas subseções subsequentes.

#### 1.2.1 Veículo com Levitação Eletromagnética Ativa

Este tipo de levitação é efetuada por eletroímãs instalados ao longo de todo o trem interagindo com um trilho ferromagnético. Há também eletroímãs para obter-se a estabilidade lateral. A corrente desses eletroímãs é controlada eletronicamente, mantendo o veículo na posição desejada. Por se tratar de um sistema de equilíbrio instável, o controle da levitação deve ser eficiente e redundante, garantindo assim, sua operação com segurança. A figura 1.2 apresenta o esquema do sistema de levitação ativa.



Figura 1.2: Esquema do sistema de levitação ativa.

Um exemplo de aplicação prática dessa tecnologia é o veículo *Transrapid* [6]. Neste trem, a distância entre os eletroímãs e o trilho é mantida em 10 mm. O sistema de levitação é alimentado por baterias contidas no trem, as quais são recarregadas por geradores lineares integrados no sistema de levitação. O veículo é capaz de vencer inclinações de 10 %, acelerando do repouso até 300 km/h em 5 km.

O veículo *Transrapid* é composto por no mínimo duas seções. Entre elas, seções adicionais, tanto para passageiros (com capacidade de 90 pessoas cada) quanto para carga, podem ser inseridas.

A propulsão e freagem deste veículo é efetuada por motores síncronos instalados no trilho, alimentados por corrente alternada de frequência variável. A velocidade do trem é determinada pela frequência da corrente aplicada no motor linear. Caso se deseje acelerar o veículo, o sentido do campo viajante produzido pelo motor linear é o mesmo do trem. Caso contrário, inverte-se o sentido do campo, trabalhado o motor como gerador (podendo ainda devolver esta energia ao sistema elétrico).

A sustentação dos trilhos podem ser constituídas de concreto ou aço. Podem ser elevadas ou no nível do solo. A mudança de trilho pode ser efetuada sem a redução de velocidade, com a deformação elástica de guias metálicos.

O sistema *Transrapid* está implementado comercialmente na China desde 2004. Consiste em um sistema de duas vias de 30 km, interligando o Aeroporto Internacional de Pudong à Estação de Metrô de Long Yang, em Shanghai. Nesta conexão, o trem atinge a velocidade de 430 km/h, levando somente 8 min para completar o percurso.

#### 1.2.2 Veículo com Levitação Eletrodinâmica

Este tipo de veículo utiliza a repulsão entre campos eletromagnéticos do trem e do trilho. O campo contido no trem pode ser produzido por eletroímãs ou ímãs permanentes. Os trilhos deste veículo possuem bobinas condutoras. Com o movimento do trem, há a variação do campo magnético nestas bobinas, induzindo assim uma tensão nas mesmas (conforme a lei de Faraday, [7]). Estando estas bobinas em um circuito elétrico fechado, há correntes proporcionais à tensão induzida. Estas correntes produzem campos magnéticos (conforme lei de Ampère, [7]). A interação entre os campos do trem e o induzido faz com que o trem levite. A estabilidade lateral do veículo é possível pela interconexão engenhosa de bobinas alojadas lateralmente ao veículo, como mostrado na figura 1.3.

A propulsão e freagem deste veículo é efetuada pelo mesmo princípio apresentado na subseção anterior.

Uma linha experimental para testes de aproximadamente 18 km foi inaugurada no Japão em 1996 [8]. Em 2003, o recorde de velocidade para veículos terrestres foi atingido, 581 km/h.



Figura 1.3: Esquema do veículo de levitação eletrodinâmica

Contudo, para que a levitação ocorra, o trem necessita estar em movimento. O veículo inicia sua levitação após atingir cerca de 120 km/h. Assim, o mesmo necessita de rodas, não possuindo algumas das vantagens apresentadas para veículos sem rodas.

#### 1.2.3 Veículo com Levitação Supercondutora

Este tipo de levitação baseia-se na expulsão de campo magnético do interior do supercondutor, o Efeito Meissner [9]. No caso de supercondutores do tipo II, essa expulsão é parcial o que diminui a força de levitação. Contudo, a parte de campo que penetra no supercondutor proporciona ao sistema de levitação um equilíbrio

estável, dispensando assim sistemas de controle ativos. As principais características dos magnetos permanentes, responsáveis pela intensidade de campo magnético aplicada aos blocos supercondutores, serão apresentadas na seção subsequente deste capítulo. O fenômeno da supercondutividade e os modelos utilizados nesse trabalho para representá-lo serão abordados com detalhes nos dois capítulos subsequentes, respectivamente.

Com o desenvolvimento de supercondutores de alta temperatura crítica, a aplicação do efeito da supercondutividade tornou-se viável. O  $YBa_2Cu_3O_x$  (YBCO), por exemplo, possui temperatura crítica em torno de 95 K. Isso possibilita o seu resfriamento utilizando-se nitrogênio líquido, o qual entra em ebulição em 77 K. Assim, a energia necessária para o funcionamento do sistema de levitação consiste majoritariamente nas perdas térmicas do criostato no qual estão inseridos os supercondutores e o nitrogênio líquido.

Por se tratar de um tecnologia recente, não há aplicação comercial desta tecnologia. Contudo, o Laboratório de Aplicações de Supercondutores, LASUP, situado na Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, está construindo um modelo de veículo em escala real para a efetuar experimentos e testes. O veículo que está sendo construído é chamado de MagLev-Cobra [1], o qual é apresentado na figura 1.4. Este veículo está sendo projetado para trafegar em lajes de concreto suspensas, conforme apresentado na figura 1.5.



Figura 1.4: Vista interna do modelo em escala real do MagLev-Cobra.



Figura 1.5: Vista do veículo MagLev-Cobra sobre uma laje de concreto.

#### **1.3** Magnetos Permanentes

Os magnetos permanentes, ou ímãs, são materiais ferromagnéticos que possuem uma densidade de fluxo magnético residual considerável em uma determinada direção. A qualidade de um ímã é dada pelo valor da densidade de fluxo magnético residual do mesmo (quanto maior, melhor) e pela capacidade da manutenção deste valor quando aplicada uma intensidade de campo magnético sobre o ímã no sentido oposto ao de magnetização do mesmo.

Assim, para a determinação das características magnéticas de um ímã são utilizados, geralmente, três parâmetros: densidade de fluxo magnético residual  $(B_r)$ ; força coercitiva  $(F_{coe})$  e; coercitividade intrínseca  $(H_{ci})$ .

Apresenta-se na figura 1.6 uma curva B versus H característica de um ímã permanente [10], onde os três parâmetros apresentados podem ser visualizados.



Figura 1.6: curva B versus H característica de um ímã permanente.

Para a magnetização de um ímã permanente um pulso de campo magnético é aplicado no mesmo. Ao final deste pulso, i. e. intensidade de campo magnético externo nulo, a densidade de fluxo magnético remanescente no material será dada pelo parâmetro  $B_r$ .

Contudo, em inúmeras aplicações práticas, intensidades de campo magnético são aplicadas aos ímãs permanentes. Por isso, além do valor de  $B_r$  ser relevante, a capacidade de manutenção da densidade de fluxo magnético residual consiste em outra característica importante do material. O valor de intensidade de campo magnético externo aplicado no sentido contrário à magnetização do ímã que implica a anulação de sua densidade de fluxo magnético é chamada de força coercitiva  $F_{coe}$ .

Aumentando-se o valor de intensidade de campo magnético externo aplicado no sentido contrário à magnetização do ímã ocorre a inversão do sentido de magnetização do material. O valor de intensidade que isto ocorre é chamado de coercividade intrínseca  $H_{ci}$ .

Além disto, o aquecimento do material magnético acima de uma determinada temperatura (temperatura de Curie  $T_{Curie}$ ) implica sua desmagnetização.

Assim, quanto maior este valor desses parâmetros, melhor a qualidade do ímã.

Os principais magnetos permanentes utilizados atualmente são: ferrite, SmCo e NdFeB. Apresenta-se na tabela 1.2 os parâmetros característicos destes materiais.

Tabela 1.2: Parâmetros característicos dos ímãs de ferrite, SmCoe e NdFeB (valores apresentados de referência, podendo variar de acordo com o processo produtivo, estequiometria, etc.).

	$B_r[T]$	$F_{coe}[A/m]$	$H_{ci}[A/m]$	$T_{Curie}[^{o}C]$
Ferrite	0,4	240	240	450
$\operatorname{SmCo}$	1,1	450	550	700
NdFeB	1,1	800	1600	300

A utilização do ferrite foi descartada dado os valores baixos de seus parâmetros característicos (o valor de  $B_r$  deste material não é adequado à força de levitação do sistema estudado). O valor de  $B_r$  do SmCo e NdFeB é semelhante, tendo o SmCo a vantagem da alta temperatura de Curie. Contudo, por este trabalho tratar de um sistema de levitação a ser utilizado em temperatura ambiente, esta vantagem não foi considerada. Sendo o ímã de SmCo mais caro que o de NdFeB, escolheu-se o ímã de NdFeB como aquele adequado ao sistema de levitação supercondutora a ser utilizado no projeto MagLev-Cobra.

É válido ressaltar que a densidade de fluxo magnético (B) e a intensidade de campo magnético (H) (cujas unidades no sistema internacional são T e A/m, respectivamente) serão muitas vezes tratadas como campo no decorrer do texto por simplicidade.

#### 1.4 Objetivos do trabalho

Grande parte do investimento necessário para a implantação de um veículo MagLev com levitação supercondutora é o seu sistema de levitação. Ele é constituído por um trilho magnético com ímãs permanentes, principal custo do projeto [11], e circuito magnético de ferro e criostátos contendo blocos supercondutores ao longo do veículo. Além disto, o material constituinte dos ímãs permanentes tem elevado seu preço consideravelmente nos últimos dois anos [12]. Há inúmeros trabalhos estudando diferentes configurações de sistemas de levitação supercondutora e sua performance [13, 14, 15, 16, 17, 18].

Esse sistema deve garantir uma força de levitação que suporte o veículo em plena carga e a sua montagem deve ser de fácil repetitividade em grande escala.

Assim, visa-se a determinação de uma geometria ótima deste sistema, a qual implica em um custo mínimo, respeitando as restrições de projeto apresentadas no parágrafo anterior. O sistema otimizado será aplicado ao veículo MagLev-Cobra.

Para isso, utilizam-se dois programas trabalhando em sincronia. Um respon-

sável pelo processo de otimização. O outro, responsável pelo cálculo das restrições de projeto. As técnicas utilizadas na otimização foram a Busca Extensiva (BE) [13], Algoritmo Genético (AG) [19] e o Feasible Direction Interior Point Algorithm (FDIPA) [20]. O Método de Elementos Finitos (MEF), juntamente com o Modelo de Permeabilidade Nula (MPN), determina a força de levitação do sistema, principal restrição de projeto. A sincronização dos dois programas é efetuada através de índices de iteração escritos em arquivos de texto.

O modelo do supercondutor utilizado no processo de otimização é simplista, contudo, válido para a análise comparativa entre geometrias diferentes. Assim, após a determinação da geometria ótima, reavaliou-se as restrições de projeto com o Modelo de Bean [21], o qual é adequadamente realista para o sistemas de levitação do veículo em questão [3].

A utilização do Modelo de Bean diretamente no processo de otimização é inviável dado o tempo transcorrido em seu processamento.

Algumas geometrias ótimas foram determinadas e construídos protótipos dos mais promissores para a validação experimental do trabalho.

#### 1.5 Organização do trabalho

Essa tese foi dividida em seis capítulos. O primeiro dedicou-se à introdução do trabalho, onde foram apresentadas uma análise comparativa entre alternativas de transporte de massa, a motivação e objetivo do trabalho, assim como a estrutura do texto desse documento. O segundo apresenta o efeito da supercondutividade. O terceiro capítulo aborda as ferramentas utilizadas para a determinação da geometria ótima do sistema de levitação. O quarto apresenta os resultados obtidos utilizando-se os métodos de BE e AG. E, finalmente no sexto, as conclusões obtidas e as próximas etapas do trabalho são relatadas.

#### 1.6 Síntese do capítulo

Este capítulo apresentou uma revisão de diferentes tipos de transportes de massa. A partir desta comparação, o trem de levitação supercondutora MagLev-Cobra se mostrou promissor para aplicações em transporte de massa urbano. O principal custo desta tecnologia consiste na construção de seus trilho magnéticos, justificando o trabalho de otimização do seu sistema de levitação. Características magnéticas dos ímãs e a escolha do NdFeB. Os objetivos e as motivações desta proposta também foram apresentados.

### Capítulo 2

### Supercondutividade

#### 2.1 Introdução Histórica

Supercondutividade é o nome dado à combinação das propriedades elétricas e magnéticas que aparecem quando determinados materiais são resfriados a temperaturas extremamente baixas. Este efeito só pôde ser descoberto após 1908, quando Kamerling Onnes conseguiu liquefazer o hélio, obtendo temperaturas por volta de 1 K [2]. Onnes (1911) estava investigando a resistividade do mercúrio a baixas temperaturas. O esperado era que a resistividade decaísse gradativamente com a diminuição da temperatura, mas sua resistividade caía abruptamente para valores não mensuráveis na temperatura de 4 K. Assim, Onnes chamou este estado de estado de supercondutividade.

Descobriu-se, um ano depois, que o estado de supercondutividade era influenciado pela intensidade de campo magnético aplicada, e que as propriedades magnéticas do elemento no estado supercondutor diferiam muito das propriedades do material na temperatura ambiente.

Atualmente, sabe-se que grande parte dos elementos são supercondutores a baixas temperaturas. Descobriu-se ainda que algumas ligas cerâmicas possuem temperatura de transição para o estado supercondutor em temperaturas superiores (*High Temperature Superconductors, HTS*), por volta de 100 K.

Por muito tempo, pensou-se que todos os supercondutores se comportavam da mesma maneira. É sabido que há dois tipos de supercondutores classificados como tipo I e tipo II. Eles possuem muitas características em comum, mas diferem no comportamento magnético. Estas diferenças serão apresentadas mais detalhadamente nas duas seções subsequentes deste capítulo.

#### 2.2 Supercondutor do Tipo I

Este tipo de supercondutor não apresenta as características necessárias para ser utilizado em levitação magnética. Por isso, será pouco detalhado neste trabalho.

Os supercondutores do tipo I são aqueles que estão no estado não supercondutor (normal) ou no estado supercondutor, não possuindo um estado intermediário (estado misto, fenômeno explicado na seção subsequente deste capítulo). As variáveis que determinam o estado do material são a sua temperatura, a intensidade de campo magnético nele aplicada e a corrente que ele transporta. Esta relação pode ser observada no diagrama de fases apresentado na figura 2.1.



Figura 2.1: Diagrama de fases de um supercondutor em função da sua temperatura, campo magnético aplicado e corrente.

Quando o material se encontra no estado supercondutor, ocorre o efeito Meissner, isto é, o fluxo magnético é expulso do interior do supercondutor.

Uma forma simplificada, porém não verdadeira fisicamente, de se representar o comportamento magnético de um supercondutor, quando exposto a um campo magnético externo, é considerá-lo um material magnético, com suscetibilidade negativa e unitária, um diamagneto ideal. Este foi o modelo utilizado no processo de otimização, dado que o tempo cálculo da força de levitação por ele é adequado. O valor de força encontrado com este modelo é cerca de 2 vezes o valor real [3], contudo, o mesmo é válido para comparações entre trilhos com geometrias diversas, aplicável assim, ao trabalho proposto.

Na verdade, a expulsão do fluxo magnético do interior do supercondutor ocorre pela presença de correntes superficiais de blindagem. Estas correntes podem ser determinadas a partir do modelo de London [2] e [22] (válida no calibre de Coulomb, isto é, campos variando lentamente), apresentado na equação 2.1.

$$\overrightarrow{J}_{s} = \frac{-1}{\mu_{0}\lambda_{L}^{2}}\overrightarrow{A}$$
(2.1)

onde  $\mu_0$  é a permeabilidade do vácuo,  $\lambda_L$  é a profundidade de penetração,  $\overrightarrow{J_s}$  é a densidade de supercorrente e  $\overrightarrow{A}$  é o potencial vetor magnético.

Um sistema de levitação composto por um supercondutor do tipo I não é viável devido ao fato de seu campo crítico, campo na qual ele passa a ser um material não supercondutor, ser muito baixo.

#### 2.3 Supercondutor do tipo II

Por muito tempo, acreditou-se que todos os supercondutores se comportavam da mesma maneira. Contudo, alguns tipos de supercondutores não se comportavam como o esperado. Acreditava-se que este comportamento anormal era dado pelas impurezas presentes no supercondutor. Entretanto, em 1957 Abrikosov publicou um artigo teórico [23] explicando esses efeitos anormais que apareciam em determinados supercondutores. Esses novos tipos de supercondutores foram chamados de supercondutores do tipo II.

Como visto na seção anterior deste capítulo, o total cancelamento do fluxo magnético no interior do supercondutor, o efeito Meissner, ocorre nos supercondutores do tipo I. Este efeito implica na existência de uma energia de superfície, presente na superfície entre as regiões supercondutora e a normal [2]. Esta energia é muito importante e determina o tipo de supercondutor.

Nos supercondutores do tipo I esta energia de superfície é positiva. Assim, quando se aplica um campo magnético no material, de forma a minimizar sua energia, a superfície entre os estados normal e supercondutor é a menor possível. Logo, a superfície entre os estados normal e supercondutor é a própria superfície externa da amostra, para que a amostra inteira esteja no estado supercondutor.

Suponha que o valor da energia de superfície seja negativa. Com isso, quando um campo magnético fosse aplicado no supercondutor o aparecimento de regiões normais dentro do supercondutor iria reduzir a energia da amostra. Assim, o material passaria a um estado de regiões normais e supercondutoras misturadas, chamado de estado misto. Os supercondutores nos quais isso ocorre são os chamados do tipo II.

O sinal da energia de superfície depende dos valores do comprimento de coerência  $\xi$  e da profundidade de penetração  $\lambda$ . O raio em que se considera que não existem super-elétrons (portadores das correntes do supercondutor) é dado pelo comprimento de coerência, enquanto que o raio em que se considera que há fluxo magnético é

dado pela profundidade de penetração. Mais especificamente, o sinal da energia de superfície depende da razão entre esses dois parâmetros, razão esta conhecida como o parâmetro de Ginzburg-Landau  $\kappa$ , dado pela equação 2.2.

$$\kappa = \frac{\lambda}{\xi} \tag{2.2}$$

O parâmetro de Ginzburg-Landau é invariante com a temperatura, pois os valores do comprimento de coerência  $\xi$  e da profundidade de penetração  $\lambda$  variam da mesma forma com a temperatura, para temperaturas próximas à temperatura crítica  $T_C$ . A temperatura crítica  $T_C$  é aquela em que o estado supercondutor deixa de ocorrer, conforme apresentado na figura 2.1.

Os valores de que determinam o sinal da energia de superfície são apresentados nas inequações 2.3 abaixo:

$$\kappa < 0,71 \rightarrow TipoI; \kappa > 0,71 \rightarrow TipoII.$$
 (2.3)

Como visto anteriormente, regiões normais dentro do supercondutor do tipo II reduzem sua energia livre. De forma a minimizar a razão entre o volume e a área da região normal imersa no supercondutor, estes núcleos normais (fluxóides ou vórtices) adquirem uma forma aproximadamente cilíndrica e paralela ao campo externo aplicado  $\overrightarrow{H_A}$ , conforme a figura 2.2.



Figura 2.2: Fluxóide gerado por aplicação de campo externo

Cada fluxóide contém um quantum de fluxo magnético,  $\phi_0$ . Os núcleos normais geralmente se organizam naturalmente de forma triangular. Possuem um raio muito pequeno para minimizar a razão entre o volume e a área.

Como o fluxo magnético não penetra nas regiões supercondutoras, formam-se

vórtices de corrente em torno dos núcleos normais. A interação da corrente que circunda um núcleo normal com o fluxo presente em outro núcleo normal resulta em uma força de repulsão entre eles. Esta repulsão é análoga à repulsão presente entre solenóides paralelos. Por causa desta interação, os núcleos normais geralmente se organizam em uma forma hexagonal periódica, formando uma rede chamada de rede de fluxóides (rede de Abrikosov). Esta configuração pode ser revelada depositando-se um pó muito fino de material ferro-magnético sobre o supercondutor no estado misto, conforme ilustrado na Figura 2.3.



Figura 2.3: Ilustração da rede de Abrikosov, baseado em [2].

Considerando agora um supercondutor imperfeito, este supercondutor possuirá defeitos, nos quais não há supercondutividade. Assim, um fluxóide, em cujo o centro a supercondutividade é reprimida, tenderá a ficar aprisionado neste defeito. Isto ocorre naturalmente, pois o vórtice aprisionado não necessita gastar a energia que gastaria caso estivesse forçando uma região anteriormente supercondutora a tornar-se normal.

Como há uma interação entre os fluxóides, o aprisionamento de um único fluxóide por uma imperfeição do material reflete no aprisionamento de vários fluxóides dentro de uma região em torno desta imperfeição.

O modelo utilizado para calcular a força de estabilidade lateral considera o aprisionamento perfeito de todo o campo aplicado no supercondutor. O valor de força lateral encontrada com este modelo é superior ao valor real, contudo, o mesmo é válido para comparações entre trilhos com geometrias diversas, aplicável assim, ao trabalho proposto.

O estado misto ocorre somente entre dois limites de intensidade de campo magnético. A intensidade de campo crítico inferior  $H_{C1}$  é aquela em que o material pode ter sua energia livre reduzida pela penetração de um fluxóide. Seu valor aproximado é dado pela equação 2.4.

$$H_{C1} \cong \frac{H_C}{\kappa} \tag{2.4}$$

A intensidade de campo magnético crítico superior, a qual se excedido leva o material a passar para o estado normal, é dado aproximadamente pela equação 2.5.

$$H_{C2} \cong \kappa H_C \tag{2.5}$$

Nota-se que para valores elevados de  $\kappa$ , a intensidade de campo magnético crítica inferior é muito baixa e a intensidade de campo crítica superior é muito alta. Este fato implica na potencial aplicabilidade dos supercondutores do tipo II. O diagrama de fases de supercondutores do tipo I e II é apresentado na figura 2.4.



Figura 2.4: Diagrama de fases dos supercondutores do tipo I e II, onde  $H_A$  é a intensidade de campo magnético aplicada e T a temperatura.

### 2.4 Síntese do capítulo

Este capítulo apresentou uma introdução histórica da supercondutividade, os tipos de supercondutores e os modelos utilizados no processo de otimização.

### Capítulo 3

# Ferramentas Utilizadas na Otimização

O principal custo do sistema de transporte que utiliza a levitação supercondutora consiste nos magnetos permanentes utilizados nos trilhos magnéticos [11]. Observase em inúmeros trabalhos anteriores à esta tese que, geralmente, a busca por uma geometria e/ou configuração de trilho que aumente a razão força de levitação por volume de ímã é determinada por testes experimentais, sem nenhuma metodologia de otimização [14, 15, 16, 17, 24]. O aumento desta razão consiste em uma redução de custo do projeto.

A determinação de uma geometria ótima para sistema de levitação do veículo MagLev-Cobra objetiva obter um custo mínimo respeitando as restrições desse projeto. No caso estudado, o custo mínimo consiste basicamente na redução do volume de ímãs permanentes. A principal restrição do projeto é a manutenção de uma força de levitação mínima, que garanta o funcionamento adequado do veículo.

A utilização de metodologias de otimização possuem a vantagem de analisar geometrias ou configurações que, baseando-se somente no bom senso dos projetistas, não seriam estudadas. Agregando-se a experiência dos projetistas aos algoritmos matemáticos, através de restrições adicionadas no processo de otimização, resultados que apresentam grande performance podem ser determinados.

Para a determinação de um sistema de levitação de alta performance, utilizam-se dois programas trabalhando em sincronia: os algoritmos responsáveis pela otimização dimensional do projeto (BE, AG e o FDIPA) e; o MEF responsável pelo cálculo das forças envolvidas nesse sistema, verificando-se assim, as principais restrições de projeto. No caso estudado, estes programas são o MATLAB e o ANSYS, respectivamente.

A sincronização dos dois programas é efetuada através de índices de iteração escritos em arquivos de texto. Este índice permite a interação de dois programas distintos de forma coordenada.

#### 3.1 Busca Extensiva

O método Busca Extensiva (BE) consiste em alterar o valor de uma variável em passos e entre limites pré-determinados, mantendo-se todas as outras variáveis constantes. Repetindo este processo para as demais variáveis, todas as combinações entre as variáveis dentro dos limites escolhidos são analisadas, escolhendo-se a melhor solução.

Dada sua simplicidade de implementação, é geralmente utilizada como recurso inicial de busca de melhores soluções em projetos onde o tempo computacional elevado no processo de otimização não é relevante e o espaço possível de busca é conhecido (geralmente dado por restrições comerciais, restrições do processo produtivo referente ao projeto ou experiência do projetista).

Sua implementação utiliza laços finitos, cada um representando uma variável. O laço representando a *n-ésima* está contido no laço na (n-1)-ésima variável, e assim sucessivamente até a primeira variável do problema. Sendo que, a cada iteração, a solução atual é comparada com a solução ótima global, substituindo-a caso apresente melhor desempenho. O esquema deste algoritmo é apresentado na figura 3.1.



Figura 3.1: Diagrama esquemático da otimização por BE.

Apesar da fácil implementação, este método não utiliza nenhum recurso para acelerar o processo de busca, tornando-se ineficaz nos casos em que a avaliação da função objetivo requerer esforço computacional elevado. Além disto, ele se limita a um espaço de busca inicialmente restrito, podendo ainda, efetuar buscar em regiões onde o projeto a ser otimizado se torna inviável.

Um exemplo da utilização da BE é aplicado à função monovariável 3.1. O método pode ser aplicado à funções multivariáveis. Contudo, o exemplo escolhido é monovariável para facilitar a visualização gráfica do mesmo (figura 3.2).

$$f(x) = 5 * |\cos(x)| + |x - \frac{3}{2}\pi|$$
(3.1)



Figura 3.2: Representação gráfica da equação 3.1.

O mínimo global desta função é zero, para o valor de  $x = \frac{3}{2}\pi$ . Imagina-se que a equação 3.1 foi analisada pela *BE*, e que *x* foi variado em passos de 0,1, de 0 até 3. O mínimo encontrado da função seria 3,26 para o valor de *x* de 1,6. Nota-se que o algoritmo possui fácil implementação, contudo não foi capaz de determinar um mínimo próximo ao global dado que o espaço de busca não foi adequado.

Repetindo-se o processo, agora no espaço de busca de 0 a 6, a BE apresenta resultado satisfatório. Neste caso, o mínimo encontrado da função seria 0,07 para o valor de x de 4,7.

#### 3.2 Algoritmos Genéticos

O método dos Algoritmos Genéticos (AG) foi desenvolvido por Holland em 1962 [19]. É um método de otimização estocástico baseado nos mecanismos naturais da evolução e genética [25]. Ele segue o princípio de que uma população evolui de uma forma tal que a sua adequação média a um ambiente melhora com o passar das gerações [26].

Metáforas biológicas são utilizadas para elucidar o funcionamento destes algoritmos, como:

- Indivíduo é o conjunto de dados (genes) que representa uma possível solução;
- População é o conjunto de indivíduos;
- *Geração* é um passo do processo evolutivo, i. e., a criação de uma nova população baseada em alterações de uma população anterior;
- *Evolução* é a alteração das populações com a passar das gerações, considerando-se a maior probabilidade de sobrevivência do mais apto (*Seleção* do indivíduo mais apto para sua perpetuação);
- *Recombinação (Crossover)* é a troca de informação genética entre indivíduos de uma população, gerando um novo indivíduo e;
- Mutação é a alteração de uma informação genética de um indivíduo.

O Indivíduo pode ser dividido em três partes: a primeira refere-se à sua identificação no processo de otimização (seu número dentro da população atual e o número da geração em que se encontra); a segunda parte guarda seus genes (informações das variáveis do projeto daquela solução potencial) e; a terceira é relativa a sua avaliação ou aptidão à sobrevivência (valor de sua função objetivo, viabilidade e adequabilidade). A representação do indivíduo é apresentada na figura 3.3.



Figura 3.3: Representação de um indivíduo em AG.

No caso da otimização do sistema de levitação magnética do MagLev-Cobra, os genes dos indivíduos representam as dimensões dos magnetos e peças ferromagnéticas do sistema.

A avaliação do indivíduo contem a área de ímã de uma seção do trilho magnético (somente o custo do ímã foi considerado nesta otimização, dado que o mesmo é consideravelmente superior ao aço carbono), o valor da função objetivo (a qual tem informações da área de ímã mais as restrições de projeto), a função adequabilidade (correlata à função objetivo [27]) e um indicador de avaliação (uma bandeira indicando a necessidade de reavaliação da função objetivo somente no caso que o indivíduo foi alterado no processo evolutivo).
A função objetivo é definida por

$$P(x) = F(x) + \sum_{i=1}^{m} f_i(x)$$
(3.2)

onde F(x) é a função que se objetiva redução (no caso a seção de ímã) e  $f_i(x)$  as penalidades do projeto. Estas penalidades são inseridas no processo de otimização para se obter soluções viáveis. A penalidade, equivalente à uma restrição de desigualdade, é definida por

$$f_i = a_i \frac{|g_i(x) - g_i|}{g_i} \ se \ g_i(x) < g_i; f_i = 0 \ se \ g_i(x) > g_i.$$
(3.3)

onde  $a_i$  é o peso dado à restrição, com valor maior que zero. Geralmente, escolhe-se um valor que implique em um aumento considerável da função objetivo, para que a solução respeite as restrições do projeto com a evolução do AG. Na otimização do trilho magnético, utilizou-se um peso  $a_i = 10$ , sendo a única restrição considerada a força de levitação.

A função de adequabilidade está intimamente ligada à função objetivo, definida pela equação 3.4

$$f_{ad}(x) = b(f_{max} - P(x))$$
 (3.4)

onde b é um coeficiente de ajuste e  $f_{max}$  é o maior valor da função objetivo da geração corrente. Assim, a equação 3.4 é sempre positiva, o seu maior valor é objetivado. O desvio padrão da função adequabilidade nos trás informações sobre a diversidade de uma população.

O esquema AG é apresentado na figura 3.4.



Figura 3.4: Diagrama esquemático da otimização por AG.

A população inicial foi obtida a partir de um indivíduo ADÃO, representando uma solução obtida pela BE. O mesmo foi mantido na população inicial, sendo que os outros indivíduos foram gerados variando-se as dimensões da solução ADÃO em um percentual previamente determinado (variação com probabilidade uniforme de mais ou menos 50 % foi utilizada). Este processo foi repetido até que fossem gerados dez vezes a quantidade de indivíduos da população inicial ( $10^*N_{indivíduos}$ ), sendo escolhidos os  $N_{indivíduos}$  (utilizado  $N_{indivíduos} = 30$ ) mais diversos, conforme os valores de suas funções adequabilidade. Esta forma de inicialização garante um espaço de busca adequado, evitando a convergência precoce do AG em um mínimo local. Por este fato, algoritmos heurísticos de otimização como o AG podem ser utilizados para determinar o ponto inicial de uma otimização mais refinada por um algoritmo determinístico [28, 29].

A seleção dos indivíduos que passarão seu material genético à próxima geração é efetuada através de torneio. Nele, uma sub-população é escolhida aleatoriamente dentro da população, sendo o indivíduo genitor aquele que apresentar menor função objetivo. Quanto maior o tamanho desta sub-população, maior a pressão de que o melhor indivíduo daquela população domine a geração subsequente (aumentando o risco de convergência para um mínimo local). Por outro lado, quanto menor esta sub-população, mais tempo o AG demorará para convergir. O tamanho da subpopulação utilizado foi de três indivíduos (10 % do tamanho da população).

Após a seleção, os indivíduos genitores podem ser alterados por duas formas:

recombinação (*crossover*) ou mutação. A alteração do indivíduo é determinada de forma probabilística, i. e., um indivíduo selecionado pode ou não ser alterado antes de ser transposto para a geração subsequente. A probabilidade de recombinação utilizada é de 40 % e a de mutação de 10 % inicialmente. A probabilidade de mutação passa a ser de 20 % caso em um número determinado de gerações a função de adequabilidade varie pouco (população está estagnada e uma mutação bem sucedida pode encontrar uma solução melhor).

A recombinação consiste na troca de informação entre dois indivíduos genitores, formando dois novos indivíduos. Os dados recombinados também são selecionados de forma aleatória no começo do processo. No final do processo de otimização, as recombinações são pontuais (somente uma variável é trocada entre dois indivíduos), objetivando refinar a busca da solução ótima. A figura 3.5 demonstra a recombinação de dois indivíduos.



Figura 3.5: Representação gráfica da recombinação de genes.

A outra forma de alteração do indivíduo é a mutação. A probabilidade de ocorrência desta operação é menor que a de recombinação, dado que a chance desta operação ser bem sucedida é pequena. Contudo, quando isto ocorre, há grandes saltos evolutivos, podendo gerar soluções consideravelmente melhores. A figura 3.6 demonstra a mutação de um indivíduo.

Identidade	Genes	Avaliação
Identidade	Genes	Avaliação

Figura 3.6: Representação gráfica da mutação de um gene.

O processo de otimização é efetuado até que um dos critérios de paradas seja atingido. Os utilizados são: número de gerações seja atingido (cerca de 10 vezes o número de variáveis do projeto) e até que a população esteja estagnada (variação do desvio padrão da função de adequabilidade da população não se altere por um determinado número de gerações). Os parâmetros de otimização escolhidos [29] foram testados previamente na função objetivo teste 3.5,

$$f(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) = 2,5 * (|sin(x_1 - 1)| + |sin(x_2 - 2)|) + |(x_1 - 1)| + |(x_2 - 2)| + |(x_3 - 3)| + |(x_4 - 4)| + |(x_5 - 5)|,$$
(3.5)

apresentada parcialmente graficamente na figura 3.7. A mesma foi escolhida por apresentar inúmeros mínimos locais. O algoritmo desenvolvido convergiu para o mínimo global da função teste com os parâmetros de ajuste apresentados nesta seção do capítulo.



Figura 3.7: Gráfico contendo duas variáveis  $(x_1 e x_2)$  da função objetivo (equação 3.5), utilizada para testes do AG. Os valores de  $x_3$ ,  $x_4 e x_5$  foram fixados em 3, 4 e 5, respectivamente. Verifica-se os inúmeros mínimos locais da mesma.

#### 3.3 Feasible Direction Interior Point Algorithm

O Feasible Direction Interior Point Algorithm, FDIPA [20], é utilizado para minimizar uma função f(x), considerando restrições de desigualdade g(x) < 0. Começando-se em um ponto  $x^1$  definido pelas restrições de desigualdade, este algoritmo gera uma sequência de pontos viáveis, sempre em uma direção decrescente da função objetivo f(x).

Isto é equivalente à resolução das condições ótimas de Karush-Kuhn-Trucker, KKT, conforme apresentado nas equações 3.6 a 3.9,

$$\nabla f(x) + \nabla g(x)\lambda = 0 \tag{3.6}$$

$$G(x)\lambda = 0 \tag{3.7}$$

$$\lambda \ge 0 \tag{3.8}$$

$$g(x)\lambda \le 0, \tag{3.9}$$

onde G(x) é uma matriz diagonal com  $G_{ii} = g_i(x)$ . O método de Newton é utilizado para a resolução do sistema não linear das equações 3.6 a 3.9 em relação a  $(x, \lambda)$ , representado por 3.10,

$$\begin{pmatrix} H(x^k,\lambda^k) & \nabla g(x^k) \\ \Lambda^k \nabla g(x^k) & G(x^k) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x^{k+1} & -x^k \\ \lambda_0^{k+1} & -\lambda^k \end{pmatrix} = -\begin{pmatrix} \nabla f(x^k) + \nabla g(x^k)\lambda^k \\ G(x^k)\lambda^k \end{pmatrix},$$
(3.10)

onde  $H(x^k, \lambda^k)$  é a Hessiana do Lagrangiano e  $\Lambda$  é a matriz diagonal com  $\Lambda_{ii} = \lambda_i$ . No lugar da Hessiana exata, uma matrix definida positiva  $S^k$  pode ser utilizada (como a aproximação Quasi-Newton da  $H(x^k, \lambda^k)$  ou a matriz identidade).

Definindo-se a direção de busca primária  $d_0^k = x^{k+1} - x^k$  pode ser provado que se trata de uma direção de descida, mas não necessariamente uma direção viável. Isto pode ser verificado utilizando-se a segunda equação do sistema 3.10 estando em um ponto sobre uma restrição *i*, isto é,  $g_i^k = 0$ . Assim,

$$\nabla g_i(x^k)d_0^k = 0, \qquad (3.11)$$

logo, a direção  $d_0^k$  é tangente à região viável.

Para evitar esse efeito, a direção utilizada no processo de otimização d é obtida somando-se à direção primária  $d_0$  um termo de correção, conforme a equação 3.12

$$d^k = d_0^k + \rho d_1^k. ag{3.12}$$

A determinação da direção  $d_1$  é efetuada utilizando-se um sistema semelhante

ao 3.10, conforme apresentado em 3.13,

$$\begin{pmatrix} S(x^k,\lambda^k) & \nabla g(x^k) \\ \Lambda^k \nabla g(x^k) & G(x^k) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1^{k+1} & -x_1^k \\ \lambda_1 & -\lambda^k \end{pmatrix} = -\begin{pmatrix} \nabla g(x^k)\lambda^k \\ G(x^k)\lambda^k + \lambda \end{pmatrix}, \quad (3.13)$$

onde  $d_1^k = x_1^{k+1} - x_1^k.$ Utilizando  $\rho$  conforme equação 3.14,

$$0 \le \rho \le \frac{(\alpha - 1)d_0^{k^t} \nabla f(x^k)}{d_1^{k^t} \nabla f(x^k)},$$
(3.14)

sendo  $\alpha$  um número positivo e menor que a unidade. Definida a direção de busca d, um novo ponto com um valor da função objetivo menor que o anterior e ainda viável será determinado por um método de busca linear (Armijo, Seção Áurea, Wolf, etc [30]).

Na otimização em questão, as derivadas foram calculadas por Diferenças Finitas Adiantadas (*Forward Finite Differences*), utilizou-se a aproximação Quasi-Newton e busca linear foi efetuada pelo método de Wolfe.

Este processo de busca é efetuado até algum critério de parada ser alcançado. É válido ressaltar que não há garantia da determinação do mínimo global da função objetivo, sendo válida a repetição do processo de busca com inúmeros pontos iniciais.

Apresenta-se na figura 3.8 como exemplo uma representação da direção de busca de uma função f(x) de duas variáveis  $x_1 e x_2$ , com uma restrição  $g_1(x) < 0$ . Nota-se que o sentido de busca inicial  $d_0$  é contrária ao do gradiente da função objetivo. Contudo, o mesmo leva a uma solução inviável. Por este fato, a direção de busca é corrigida pelo vetor  $\rho d_1$ , obtendo-se a direção de busca d que reduz o valor da função objetivo e viável.



Figura 3.8: Direção de busca de uma função f de duas variáveis e uma restrição g.

## 3.4 Método dos Elementos Finitos e Modelos de Supercondutividade

#### 3.4.1 Método dos Elementos Finitos

O Método dos Elementos Finitos, (MEF), foi desenvolvido inicialmente para análises estruturais. Apesar do tratamento matemático dado ao método em 1943 [31], ele começou a ser utilizado para a resolução de problemas eletromagnéticos a partir de 1968 [32].

Este método possui grande aplicabilidade para resolução de problemas envolvendo geometrias complexas e materiais não homogêneos. Ele pode ser dividido em 4 etapas:

- Divisão do problema em elementos;
- Aplicação das equações governantes típicas de cada elemento;
- Interconexão de todos os elementos e;
- Resolução do sistema de equações encontrado.

Para o cálculo da força de levitação e força de estabilidade lateral, a densidade de fluxo magnetostático do sistema é calculada. Para isso, o potencial vetor magnético

 $\overrightarrow{A}$ , definido pela equação 3.15, é utilizado no calibre de Coulomb<sup>1</sup>.

$$\overrightarrow{B} = \nabla \times \overrightarrow{A} \tag{3.15}$$

Logo, calculando-se  $\overrightarrow{A}$ , a densidade de campo magnético  $\overrightarrow{B}$  é consequentemente determinada.

Sabe-se que  $\overrightarrow{B} = \mu \overrightarrow{H} + \mu_0 \overrightarrow{M}$ , onde  $\mu$  é a permeabilidade magnética do meio e  $\overrightarrow{M}$  é a magnetização do material. Para o ar, alumínio e ímãs permanentes a permeabilidade considerada foi a do vácuo,  $\mu_0$ . Contudo, somente no magneto permanente, considerou-se  $\overrightarrow{M}$  não nulo (impondo-se uma força coercitiva).

No material ferromagnético, a relação entre  $\overrightarrow{B}$  e  $\overrightarrow{H}$  foi considerada através da curva característica do aço SA1010 [33]. Esta relação considera a saturação deste material conforme apresentada na figura 3.9.



Figura 3.9: Curva B x H do material ferromagnético utilizado (aço SA1010) no sistema de levitação.

Para o supercondutor, a permeabilidade magnética considerada variou conforme o caso estudado. Tanto para o cálculo da força de levitação quanto da força lateral, o Método do Trabalho Virtual (MTV) foi utilizado durante o processo de otimização.

## 3.4.2 Modelo de Permeabilidade Nula para o Cálculo da Força de Levitação para o Processo de Otimização

Para a determinação da força de levitação,  $\mu = 0$  foi utilizado na região supercondutora. Contudo, a utilização do  $\mu$  nulo implica em uma divisão por zero na relação

 ${}^{1}\nabla.\overrightarrow{A} = 0$ 

entre *B* e *H*. Assim, utilizou-se um zero numérico na simulação de  $10^{-6}\mu_0$ . Podese verificar na figura 3.10 que, utilizando-se o zero numérico apresentado, não há penetração do fluxo magnético na região supercondutora. A exclusão total de fluxo representa o caso de supercondutor resfriado na ausência de campo externo aplicado, chamado de *Zero Field Cooling, ZFC*. É válido ressaltar que a exclusão total de fluxo não ocorre em supercondutores do tipo II com os valores de intensidade de campo magnético para o sistema de levitação proposto, resultando assim em uma simulação de força de levitação com valor máximo teórico [3].



Figura 3.10: Simulação de força de levitação de um bloco supercondutor sobre um trilho de ímãs em configuração de concentração de fluxo, utilizando-se *MEF*. Nota-se a expulsão do fluxo magnético do interior do supercondutor, dado a permeabilidade nula imposta na região supercondutora.

#### 3.4.3 Modelo de Aprisionamento Total de Fluxo para o Cálculo da Força de Estabilidade Lateral

Para o cálculo da força de estabilidade lateral, diferentemente do efetuado para o cálculo da força de levitação,  $\mu = \mu_0$  foi imposto ao supercondutor. Com isso, a densidade de fluxo magnético gerada por um trilho de ímãs permanentes na região supercondutora, estando o bloco em uma posição inicial, é calculada, como se não houvesse influência o bloco supercondutor. Impor a densidade de campo magnético no interior do supercondutor igual à calculada na sua posição inicial representa o aprisionamento de campo ideal no supercondutor (*Field Cooling, FC* ideal) [34]. Assim, qualquer deslocamento do supercondutor em relação a sua posição inicial implicara em uma força que tenderá restaurá-lo à sua posição inicial. Este consiste no Modelo de Aprisionamento Total de Fluxo (*MATF*).

Para determinar a estabilidade do bloco supercondutor, calculou-se o a densidade

de fluxo magnético gerada pelos ímãs na região supercondutora estando o supercondutor no centro do trilho (conforme figura 3.11), armazenando-se o potencial vetor magnético A na superfície do bloco em um vetor. Este potencial vetor magnético armazenado é imposto ao supercondutor deslocado lateralmente, conforme figura 3.12. A imposição do do vetor A armazenado equivale ao aprisionamento de campo ideal. Sendo assim, há uma força que tende a restaurar a posição inicial do supercondutor, a chamada força de estabilidade lateral.



Figura 3.11: Simulação da densidade de fluxo magnético em um bloco supercondutor sobre um trilho de ímãs em configuração de concentração de fluxo, utilizando-se MEF. Note-se que a densidade de fluxo magnético não é alterada pelo bloco supercondutor, dado que a permeabilidade  $\mu = \mu_0$  é imposta na região supercondutora.



Figura 3.12: Simulação de força de estabilidade lateral devido ao aprisionamento da densidade de fluxo magnético pelo supercondutor em sua posição central, conforme apresentado na figura 3.11.

O aprisionamento total de fluxo não ocorre, de forma análoga ao apresentado para o ZFC, resultando na simulação da força de estabilidade lateral máxima teórica. A força de estabilidade lateral se manteve estável em todas as simulação efetuadas. Assim, verificou-se que seu cálculo durante o processo de otimização acarretaria em um esforço computacional desnecessário caso o trilho otimizado apresentasse geometria semelhante ao inicial.

#### 3.4.4 Modelo de Bean para o Cálculo da Força de Levitação

O modelo de permeabilidade nula se mostrou adequado para a comparação entre sistemas de levitação semelhantes (mesma geometria e configuração, com pequenas alterações dimensionais). Entretanto, este modelo pode apresentar resultados força de levitação superior ao valor real (variando de cerca de duas vezes para ZFC, até quatro vezes para FC) [3].

Há outras maneiras mais precisas para simular supercondutores, como por exemplo o Modelo de Bean [21, 35]. Contudo, estas não foram utilizadas durante o processo de otimização. A utilização direta do Modelo de Bean é inviável dado o seu elevado tempo de processamento para convergência da solução[4] (a simulação de um caso pelo Modelo de Permeabilidade Nula dura cerca de 30 s, enquanto, utilizando-se o mesmo computador, demora cerca de 24 h a simulação por Modelo de Bean).

Todavia, antes da prototipagem das configurações obtidas nos processos de otimização, as forças de levitação foram calculadas utilizando o Modelo de Bean. Este modelo apresenta resultados adequadamente próximos às medidas reais, conforme verificado em diversos trabalhos [3, 4, 13, 36].

A abordagem apresentada por Bean consiste no modelo do estado crítico na sua forma mais simples ( $J_C$  constante) utilizado para representar supercondutores do tipo II no estado misto (conforme apresentado na subseção 2.3). Ele considera que as forças de Lorentz nos fluxoides do supercondutor são iguais às forças de aprisionamento nos mesmos (causadas por defeitos na estrutura cristalina do supercondutor). Essa consideração implica em uma densidade de corrente supercondutora constante, que pode assumir um dos seguintes valores no interior do material:  $+J_C$ ,  $-J_C$  ou 0.

Assim, pelo Modelo de Bean, o supercondutor pode estar em duas condições: corrente nula ou transportando a corrente crítica constante  $J_C$ , sendo que o campo elétrico calculado determina a condição do supercondutor [3], conforme a equação 3.16

$$E = 0 \longrightarrow \frac{\partial J}{\partial t} = 0$$
  

$$E \neq 0 \longrightarrow \frac{\partial J}{\partial t} \neq 0,$$
(3.16)

onde J é a densidade de corrente e t é o tempo.

A implementação numérica deste modelo foi inicialmente proposta por [37] e é apresentada em detalhes em [3, 4, 38, 39], onde se comprova sua validade com dados experimentais.

Utilizam-se o MEF e o Método de Diferença Finitas (MDF) para o cálculo do campo elétrico na região supercondutora devido a dois fatores: a variação da densidade de fluxo magnético provocada pelo trilho de ímãs permanentes (externo ao supercondutor) e; a variação da densidade de fluxo magnético devida às correntes supercondutoras (interno ao supercondutor). O MEF já foi abordado no item 3.4.1 e é utilizado para o cálculo do campo elétrico interno ao supercondutor.

O MDF consiste na "discretização" temporal de um problema. No caso, ele é utilizado para o cálculo do campo elétrico provocado pela variação da densidade de fluxo magnético externa ao supercondutor (proveniente do trilho magnético), quando este é movido em relação ao trilho. Sendo assim, a "discretização" temporal, neste caso, é correlata à uma "discretização" dimensional. Considera-se que o supercondutor está movendo-se em relação ao trilho magnético (da posição de FC para a posição a ser analisada) em passos discretos de 1 mm. Com isso, o campo elétrico induzido no supercondutor pela densidade de fluxo magnético externa ao mesmo é determinado.

Altera-se o perfil de corrente no interior do supercondutor de forma iterativa até que os campos elétricos externo e interno coincidam, dentro de um erro tolerável. A metodologia, aqui explicada sucintamente, é apresentada no fluxograma 3.13, extraido de [3].



Figura 3.13: Fluxograma com o algoritmo para o cálculo do perfil de corrente no supercondutor, utilizado em [3].

Tendo o perfil da corrente supercondutora e a densidade de fluxo magnético proveniente do trilho de ímãs permanentes, calcula-se a força de levitação pela Equação de Lorentz.

A figura 3.14 apresenta o perfil de corrente de um bloco supercondutor utilizandose o Modelo de Bean e as linhas de fluxo magnético devido ao trilho magnético externo. No caso apresentado na figura o supercondutor é: (a) resfriado na presença de campo magnético a uma altura de 25 mm; (b) aproximado ao trilho até uma distância mínima de 5 mm; (c) afastado do trilho até uma altura de 50 mm; (d) afastado do trilho até uma altura de 100 mm, onde é praticamente nula a influência do trilho magnético e; (e) retornado à sua posição inicial. Nota-se pelos itens (a) e (d) da figura que o perfil de corrente no supercondutor difere para uma mesma altura de levitação, dependendo da variação de campo magnético ao qual o bloco foi submetido. Este fato implica em uma histerese na curva de força em função da altura do supercondutor. Nota-se pelas figuras 4.7 e 5.9 que o Modelo de Bean é capaz de simular este comportamento histerético (experimentalmente apresentado nas figuras 4.19 e 5.11).



Figura 3.14: Perfil da densidade de corrente que flui no supercondutor devido a presença do campo magnético externo produzido por um trilho de imãs permanentes (utilizado Bean e  $J_C = 1.2 \times 10^7 A/m^2$ ), juntamente com a densidade de fluxo magnético. As etapas apresentadas são: (a) resfriamento do bloco supercondutor na presença de campo a uma altura de 25 mm; (b) aproximação do bloco ao trilho até uma distância mínima de 5 mm; (c) afastamento do bloco ao trilho até uma altura de 50 mm; (d) afastamento do bloco ao trilho até uma altura de 100 mm e; (e) retornado do bloco à sua posição inicial. Extraido de [4]

## 3.5 Interface entre os Algoritmos de Otimização e o *MEF*

Os Algoritmos de Otimização (AO) e o MEF são implementados em programas de computador distintos, MATLAB e ANSYS, respectivamente. Em consequência disto, uma metodologia de interação entre os programas utilizados foi desenvolvida. A interação entre os AO e MEF é efetuada através de arquivos de texto e índices de sincronização, conforme representado pelo fluxograma 3.15. Estes arquivos são as chamadas saídas apresentadas neste fluxograma. A utilização do índice (número inteiro positivo) garante que o AO e o MEF estejam no mesmo passo, ou iteração, do processo de busca do trilho ótimo.

Inicialmente o AO escreve em um arquivo de texto, saída do AO, o índice da iteração e os parâmetros geométricos do sistema de levitação (índice 1 e parâmetros geométricos iniciais). Em seguida, o AO começa a ler o arquivo de saída do MEFaté que o índice da iteração do MEF seja igual ao do AO. Quando esta condição é atingida, a força de levitação calculada (principal restrição do projeto) pelo MEFé considerada pelo AO, continuando o processo de otimização. O índice da iteração é incrementado (para o valor dois) e os parâmetros geométricos alterados conforme determinado pelo AO.

Metodologia análoga é utilizada para que o MEF leia os parâmetros geométricos calculados pelo AO. O arquivo texto, saída do MEF, é inicializado com índice zero em sua primeira iteração antes do cálculo da restrição de projeto. A inicialização com o valor zero previne que o AO efetue a leitura de um valor espúrio da restrição do projeto. Assim, o AO fica lendo a saída do MEF a cada segundo, até que o índice de iteração unitário seja encontrado. Em paralelo, o algoritmo do MEF efetua a leitura dos parâmetros geométricos contidos na saída do AO e calcula a força de levitação, escrevendo subsequentemente o índice 1 em sua saída, juntamente com a força de levitação calculada para a geometria inicial. Incrementa seu índice (agora para dois) e volta a ler o índice da iteração na saída do AO.

Este processo (de atualização do índice de iteração, alteração dos parâmetros geométricos e cálculo de força de levitação) é repetido até que algum critério de parada do AO seja atingido.



Figura 3.15: Fluxograma da iteração entre o AO e o MEF.

## 3.6 Síntese do capítulo

Este capítulo apresentou as ferramentas utilizadas para a otimização: a BE, o AG e o FDIPA. Além disto, apresentou o MEF e modelos de supercondutores para o cálculo da força de levitação, principal restrição de projeto, durante o processo de otimização (MPN e, utilizado inicialmente, o de MATF) e anterior a prototipagem (Modelo de Bean). E, finalmente, a interface entre os AO e o MEF durante o processo de otimização.

# Capítulo 4

# Resultados Obtidos utilizando o FDIPA

Aplicando a ferramenta de otimização *FDIPA* e avaliação de restrições do projeto do sistema de levitação MagLev-Cobra [40], os seguintes resultados foram obtidos.

## 4.1 Primeira Etapa de Otimização utilizando o FDIPA

Nesta primeira fase, dez parâmetros geométricos foram utilizados como variáveis visando a minimização do custo do sistema de levitação (dimensões dos magnetos permanentes, concentradores de fluxo magnético de aço carbono e bloco supercondutor). Somente a força de levitação foi considerada como restrição do projeto. Foram adicionadas, em todas as otimização efetuadas, restrições complementares para o funcionamento correto do MEF. Estas restrições impediam que o AO produzisse dimensões negativas ou menores que 0,01 mm (dimensão mínima para que o ANSYS funcionasse adequadamente). Além disto, á dimensões dos componentes foram limitados entre 2 mm e 100 mm (valor inferior dada a resistência mecânica dos componentes e a superior dada a limitação do processo produtivo dos ímãs).

A função objetivo nesta etapa do trabalho, i. e. o custo do projeto, considera somente o custo volumétrico dos materiais, exceto para o supercondutor, onde foi considerado o custo por área, dada as características intrínsecas da fabricação de blocos supercondutores. O pó constituinte do bloco é sinterizado em torno de uma semente, para cristalização orientada do material, havendo assim uma correlação direta entre sua área e volume de material utilizado. Com isso, o preço do bloco pode ser considerado em função da sua área.

A função custo f, equação 4.1, representa o valor do projeto. A consideração do custo adicional para a fabricação de geometrias não usuais de magnetos permanentes

foi relevada dado que, para produção em grande escala, este valor seria negligenciável comparado ao valor da matéria prima.

$$f = C_{Trilho}(A_2P_2 + A_3P_3 + A_4P_4) + C_{Trem}L_{Supercondutor}P_1$$

$$(4.1)$$

Em que:

- $C_{Trilho}$  é o comprimento do trilho magnético;
- $C_{Trem}$  é o comprimento do veículo;
- $L_{Supercondutor}$  é a largura do bloco supercondutor;
- $A_2$  é a área do ímã;
- $A_3$  é a área do ferro;
- $A_4$  é a área do alumínio;
- $P_1$  é o preço por área do supercondutor;
- $P_2$  é o preço volumétrico do ímã;
- $P_3$  é o preço volumétrico do ferro e;
- $P_4$  é o preço volumétrico do alumínio.

As constantes utilizadas da equação 4.1, baseadas nos preços dos materiais adquiridos pelo LASUP no início do ano de 2008, são:

- $C_{Trilho} = 100 \text{ [km]};$
- $C_{Trem} = 100 \text{ [m]};$
- $P_1 = 208333,33 \left[\frac{US\$}{m^2}\right];$
- $P_2 = 200000 \left[\frac{US\$}{m^3}\right];$
- $P_3 = 10360,98 \left[\frac{US\$}{m^3}\right] e;$
- $P_4 = 21633,69 \left[\frac{US\$}{m^3}\right].$

A geometria inicial  $\mathbf{A}$ , utilizada no processo de otimização, é apresentada na figura 4.1.



Figura 4.1: Geometria inicial **A** do sistema de levitação, utilizado como ponto inicial da otimização com o *FDIPA*. Variáveis de otimização cotadas (exceto dimensões do bloco supercondutor). Dimensões em milímetros.

A geometria  $\mathbf{A}$  apresentada na figura 4.1 foi escolhida dado que o LASUP possui um trilho de 1 m comprimento com estas dimensões. Apresenta-se na figura 4.2 uma seção desse trilho.



Figura 4.2: Foto da seção do trilho com a geometria inicial  $\mathbf{A}$  do sistema de levitação, utilizado como ponto inicial da otimização com o *FDIPA*.

A principal restrição do projeto é a força de levitação do sistema estudado. A força de levitação de um veículo é diretamente proporcional ao seu comprimento (quanto maior o comprimento do veículo, maior será a quantidade de blocos supercondutores nele presente). Assim, ao invés de utilizar-se a força de levitação [N], optou-se pela utilização do valor desta força por unidade de comprimento  $\left[\frac{N}{m}\right]$ .

Essa geometria apresenta uma força de levitação simulada pelo Modelo de Permeabilidade Nula de 12749  $\frac{N}{m}$ . Valor este, superior à força mínima do projeto de 12000  $\frac{N}{m}$  para este modelo de supercondutor. Considerou-se, nesta etapa do processo de otimização, a força de levitação mínima de projeto de 12300  $\frac{N}{m}$ , valor este correspondente a uma redução de 3,52 % da força inicial.

Apresenta-se na figura 4.3 a geometria  $\mathbf{B}$ , após 21 iterações do FDIPA.



Figura 4.3: Geometria **B**, obtida através da otimização da geometria **A**, após 21 iterações do *FDIPA*, tendo somente a força de levitação como restrição de projeto. Dimensões em milímetros.

Com isso, o custo inicial (baseado na equação 4.1) deste sistema passou de 138,81 milhões de US\$ para 86,06 milhões de dólares, uma redução de 38,00 %. Apresentase na tabela 4.1 a redução dos custos por material.

lizando o <i>FDIPA</i> para um trilho simples de 100 km de comprimento.									
	Geometria	Custo	Custo	Custo	Custo	Custo			
_	analizada	Aço $^1$	Ímã Alumínio Supercondutor		Total				
-	А	2,07	1320	0,87	1,87	1370			
	В	1,43	830	0,20	1,20	860			

Tabela 4.1: Redução de custos por material do sistema de levitação obtida da primeira etapa de otimização (otimização da geometria  $\mathbf{A}$  para a geometria  $\mathbf{B}$ ), utilizando o *FDIPA* para um trilho simples de 100 km de comprimento.

<sup>1</sup>Custo [MUS],

Para uma verificação da estabilidade lateral efetuou-se a simulação das configurações inicial (geometria **A**) e da obtida na primeira etapa da otimização efetuada com o *FDIPA* (geometria **B**) (figuras 4.1 e 4.3, respectivamente). A aceleração lateral máxima considerada foi de 3,6  $\frac{m}{s^2}$ , aceleração limitada pelo conforto dos usuários do veículo [6]. Tendo o veículo 1200  $\frac{kg}{m}$ , isto implica em uma força lateral de 4320  $\frac{N}{m}$ . O deslocamento lateral máximo considerado para este projeto é de 10 mm. Assim, conforme a figura 4.4, ambas configurações respeitam esta restrição (com cerca de 50 % de folga no pior caso). Além disto, pode-se limitar a aceleração lateral do veículo controlando-se sua velocidade angular. Dado o resultado apresentado na figura 4.4 e a possibilidade do controle da velocidade angular do veículo, optou-se por não incluir esta restrição nos processos de otimização subsequentes pelo custo computacional envolvido.



Figura 4.4: Força de estabilidade lateral em função do deslocamento para as configurações inicial (geometria  $\mathbf{A}$ )e geometria dada pela primeira etapa de otimização (geometria  $\mathbf{B}$ ). Nota-se que para o pior caso, geometria  $\mathbf{B}$ , a força de estabilidade lateral é cerca de 50 % superior à máxima possível do projeto.

## 4.2 Segunda Etapa de Otimização Utilizando o FDIPA

Trilhos utilizando ímãs permanentes retangulares, como os da geometria  $\mathbf{A}$ , possibilitam a ejeção de seus componentes instáveis. Por este fato, elementos fixadores devem ser utilizados, conforme apresentado na figura 4.2. Contudo, para o trilho da geometria  $\mathbf{B}$ , apresentado na figura 4.3, há a possibilidade de uma fixação intrínseca à geometria. Dada à forma trapezoidal dos magnetos, i. e. dimensão da base superior ao topo, estes componentes ficariam impossibilitados de serem ejetados, resultando, assim, em uma economia considerável na montagem do sistema pelo fato de não utilizar componentes fixadores adicionais.

Contudo, os componentes ferromagnéticos da geometria B possuiriam a liber-

dade para serem ejetados do sistema. Para investigar a estabilidade da peça de aço carbono central, deslocou-se a mesma em 0,1 mm para cima (conforme figura 4.5), analisando a força resultante deste deslocamento.



Figura 4.5: Simulação do deslocamento para cima do componente de aço carbono central do trilho magnético da geometria **B**, apresentada na figura 4.3, para o estudo de sua estabilidade

Constatou-se, pela simulação apresentada na figura 4.5, que esta parte do sistema de levitação não apresenta um equilíbrio estável, apresentando uma força no sentido do deslocamento de 5959,07  $\frac{N}{m}$ .

A instabilidade dos componentes de aço carbono laterais ao trilho foi verificada experimentalmente no *LASUP* na montagem do trilho da geometria **A**. A tendência de subir destes componentes pode ser explicada pela redução da relutância magnética (estes componentes tentem ao topo do ímã, de maneira a formar um caminho com relutância magnética mínima para o fechamento das linhas de fluxo magnético dos ímãs).

Nesta segunda etapa do processo de otimização, dada à instabilidade dos componentes ferromagnéticos, implementaram-se restrições no processo de otimização de forma a obter-se uma geometria que houvesse a fixação dos componentes de aço carbono sem a necessidade de parafusos (a utilização de parafusos acarretaria na elevação do custo de montagem do trilho). Para tal, foram impostos rebaixos nestes componentes.

Considerando o limite de deformação elástica do material ferromagnético de 18  $\frac{kg}{mm^2}$  (inferior ao descrito em norma técnica [41]), a menor seção do material ferromagnético central para suportar a força de 5959,07  $\frac{N}{m}$  teria que possuir uma largura de 0,033 mm. Assim, a largura mínima considerada no processo de otimização foi de 2 mm, 60 vezes superior à mínima necessária.

Implementaram-se também rebaixos de 2 mm nos componentes ferromagnéticos laterais. Além disso, o supercondutor foi dividido em três partes iguais, podendo assim representar três blocos distintos ou a região de fronteira entre sementes de um bloco único.

Na segunda etapa de otimização utilizando o *FDIPA* foram variados 11 parâmetros geométricos. A altura do supercondutor foi retirada do processo de otimização e fixada em 15 mm, dado que, para o modelo do supercondutor de permeabilidade magnética nula, esta variável pouco influencia no valor da força de levitação. Isto se deve ao fato de que, considerando o supercondutor como um diamagneto perfeito não há limitação alguma ao seu desempenho. Assim, uma fina camada deste material diamagnético perfeito, blindaria todo o fluxo magnético gerado pelos ímãs permanentes, não sendo relevante, a presença de mais supercondutor acima dela. Entretanto, em supercondutores reais, a blindagem de um campo externo não é efetuada integralmente e é limitada pelo valor da corrente crítica  $J_C$ , sendo relevante a altura do supercondutor.

Foram acrescidas ao processo de otimização: a distância entre os três blocos de supercondutores e; a largura da base das peças de ferromagnéticas laterais ao trilho diferindo da largura do topo destas peças.

Nesta etapa, reduziu-se a força de levitação mínima para 12000  $\frac{N}{m}$ , valor mínimo aceitável para o projeto. Com a inclusão das restrições de montagem do sistema de levitação, a diminuição do custo do material foi inferior à primeira etapa de otimização. Neste caso, houve uma redução para 113,72 milhões de US\$, equivalente a 18,08 % após 9 iterações do *FDIPA* com geometria semelhante à geometria **B**, apresentada na figura 4.3. Contudo, a configuração obtida **C**, apresentada na figura 4.6, não necessita de parafusos para a fixação dos ímãs permanentes (dada sua geometria trapezoidal) e componentes ferromagnéticos (dado os rebaixos impostos durante o processo de otimização), implicando uma redução considerável no custo de montagem do trilho. Além disto, o bloco supercondutor de 90 mm de largura, originalmente utilizado para a geometria **A**, foi reduzido para um de 60 mm, a ser utilizado na geometria **C**.

Apresenta-se na tabela 4.2 a alteração dos custos por material.



Figura 4.6: Geometria  $\mathbf{C}$ , obtida pelo *FDIPA*, tendo como ponto inicial a geometria  $\mathbf{B}$ , respeitando as restrições de projeto: força de levitação e a não necessidade de elementos de fixação complementares. Dimensões em milímetros.

Tabela 4.2: Redução de custos por material do sistema de levitação obtida da primeira etapa de otimização (otimização da geometria  $\mathbf{B}$  para a geometria  $\mathbf{C}$ ), utilizando o *FDIPA* para um trilho simples de 100 km de comprimento.

Geometria	Custo	Custo	Custo	Custo	Custo
analizada	Aço <sup>2</sup>	Ímã	Alumínio	Supercondutor	Total
А	2,07	1320	0,87	1,87	1370
В	2,19	1000	0,06	1,27	1040

 $^{1}$ Custo [MUS\$],

Nota-se pelas constantes utilizadas na equação 4.1 e pelos valores apresentados nas tabelas 4.1 e 4.2 que o principal custo do sistema de levitação em análise são os magnetos permanentes. Por este motivo, somente a quantidade dos ímãs permanentes serão considerados nas otimizações subsequentes, respeitando-se a força de levitação mínima do projeto MagLev-Cobra.

## 4.3 Resultados de Simulação por Bean e Experimentais

Durante o processo de otimização, o modelo de supercondutividade por permeabilidade nula foi utilizado dado o seu tempo de processamento reduzido quando comparado ao modelo de Bean. Contudo, para a verificação dos resultados encontrados, a força de levitação foi calculada utilizando-se o Modelo de Bean e protótipos foram manufaturados para a comprovação experimental.

Entretanto, no caso dos resultados obtidos com o *FDIPA*, o pedido de fabricação dos ímãs do trilho ótimo foi realizado ao mesmo tempo que a simulação utilizando o Modelo de Bean. Isto foi efetuado dado que os experimentos ocorreriam no *Leibniz* - *Institut für Festkörper und Werkstoffforschung* - *Dresden (IFW*-Dresden) [42] em uma data pré-determinada e, caso o pedido não fosse processado em tempo, os testes poderiam ser inviabilizados.

Apresentam-se na figura 4.7 as forças de levitação para os trilhos inicial (geometria **A**, figura 4.1); primeira etapa da otimização (geometria **B**, figura 4.3) e; segunda etapa da otimização (geometria **C**, figura 4.6). Ambas otimizações utilizando o *FDIPA* e para o caso de *ZFC*.



Figura 4.7: Forças de levitação calculadas pelo Modelo de Bean para trilhos das geometrias  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{B} \in \mathbf{C}$ , em ZFC.

Utilizando-se este modelo, os picos de força com o supercondutor a 10 mm de altura são 10570, 9770 e 8176  $\frac{N}{m}$  para os trilhos inicial (**A**), primeira etapa (**B**) e segunda etapa (**C**) de otimização com o *FDIPA*, respectivamente. Constatou-se então que a redução inicialmente esperada de 5,87 % foi na verdade de 22,65 %.

Este fato mostra que a utilização do modelo de permeabilidade nula é restrito às análises de geometrias semelhantes. Após tal constatação, as otimização posteriores foram restritas a geometrias semelhantes. Apresentam-se na tabela 4.3 os valores da razão força de levitação por custo pelos modelos de permeabilidade nula e Bean.

ModeloGeo. AGeo. CutilizadoFL / Custo 3FL / CustoPerm. nula91,85105,52Bean76,1571,89

Tabela 4.3: Comparação entre as geometrias  $\mathbf{A} \in \mathbf{C}$  pelos modelos de Permeabilidade Nula e de Bean.

<sup>1</sup>Força de Levitação / Custo [(Nm)/MUS\$],

Para a verificação final dos resultados do processo de otimização ímãs na geometria trapezoidal foram fabricados [43] e enviados ao IFW-Dresden.



Figura 4.8: Ímã na geometria ótima fabricado para a efetuação dos experimentos da gemometria  $\mathbf{C}$ .

Visando verificar a qualidade dos ímãs mediu-se a densidade de fluxo magnético perpendicular às superfícies dos mesmos, comparando os resultados experimentais aos obtidos por simulação em MEF, conforme figura 4.9. A força coercitiva utilizada na simulação do ímã isolado foi a mesma utilizada nas simulações de força de levitação (891267 A/m). Para a medição da densidade de fluxo magnético dos ímãs, utilizou-se o sistema de mapeamento de campo apresentado na figura 4.10.



Figura 4.9: Simulação do ímã da geometria  $\mathbf{C}$  por MEF.



Figura 4.10: Sistema de mapeamento de campo magnético do IFW-Dresden.

Conforme apresentado na figura 4.11, a homogeneidade na magnetização do magneto foi analisada. Descontando-se os 10 mm iniciais do mapeamento, devido ao mesmo iniciar-se fora da superfície do magneto e haver efeito de borda, constatou-se que a magnetização do magneto fora homogênea.



Figura 4.11: Densidade de fluxo magnético perpendicular à superfície da face adjunta ao concentrador de fluxo central da geometria  $\mathbf{C}$ , medido a 1 mm de distância .

Apresentam-se na figura 4.12 as densidades de fluxos magnéticos perpendiculares simulada e medida no centro da face do ímã adjunta ao concentrador de fluxo central do trilho, a 1 mm de distância. A comparação das densidades medidas e simuladas nas outras faces é mostrada na figura 4.13.



Figura 4.12: Densidade de fluxo magnético perpendicular à superfície da face adjunta ao concentrador de fluxo central da geometria  $\mathbf{C}$ , medido (no centro do ímã) e simulado a 1mm de distância.



Figura 4.13: Densidade de fluxo magnético perpendicular à superfície do ímã utilizado na geometria **C**, medido (no centro do ímã) e simulado a 1mm de distância. As medições foram efetuadas em sentido anti-horário. (a) - Face apresentada nas figuras 4.11 e 4.12; (b) - Face oposta à face (a); (c) - Topo do ímã e; (d) - Base do ímã. Densidade de fluxo magnético [T] por distância [mm].

Verificou-se pelos mapeamentos de campos efetuados que a magnetização do ímã aparentava estar adequada em relação aos parâmetros das simulações efetuadas.

Em paralelo às avaliações dos ímãs, ocorria a fabricação dos componentes complementares do trilho magnético, concentradores de fluxo e fixadores de alumínio, pela oficina de usinagem do *IFW*-Dresden.

Para a construção dos componentes do trilho, foram repassados ao IFW-Dresden desenhos dos mesmos que possibilitassem suas confecções utilizando-se máquinas de usinagem usuais. Contudo, o instituto optou pela confecção de peças inteiriças, utilizando-se corte por eletroerosão. Apresentam-se nas figuras 4.14,4.15 e 4.16 os componentes do trilho magnético da geometria **C** (exceto os magnetos permanentes), o desenho do trilho montado e uma foto do mesmo, respectivamente.



Figura 4.14: Componentes do trilho magnético da geometria  $\mathbf{C}$ , exceto magnetos permanentes.



Figura 4.15: Desenho em corte do trilho magnético da geometria  ${\bf C}.$ 



Figura 4.16: Trilho da geometria C montado.

Comparando-se as figuras 4.6 e 4.15 nota-se que na base do concentrador de fluxo central confeccionado foi adicionada uma barra de seção quadrada, com largura de 15 mm. Esta massa adicional foi inserida pela oficina de usinagem do instituto com o intuito de melhorar a fixação deste componente. Contudo, diminuiu consideravelmente a densidade de fluxo magnético na região do supercondutor dada a alteração da relutância magnética na parte inferior do trilho. Pelo modelo de permeabilidade nula, este fato reduziu a força de levitação em 9,94 % para uma altura de levitação de 12 mm. A altura de levitação foi alterada de 10,2 mm para 12 mm durante o decorrer do projeto para que se desse uma maior margem de segurança para o correto funcionamento do veículo (evitar o contato mecânico entre os criostatos que contém os supercondutores e o trilho magnético, considerando o espaço necessário à inclusão de uma parede de isolação térmica).

Para a efetuação das medidas de força de levitação das geometrias  $\mathbf{A} \in \mathbf{C}$  os blocos supercondutores, apresentados na figura 4.17, foram utilizados. Estes blocos consistiam em uma peça única (30 x 90 mm), compostas de três partes iguais (o bloco foi fabricado utilizando-se três sementes para a orientação da sua rede cristalina), cada qual com 30 mm de largura. O mesmo foi cortado em uma fronteira de duas partes desse bloco. Com isso, obteve-se dois blocos: um com 30 mm de largura e o outro com 60 mm.



Figura 4.17: Blocos supercondutores utilizados na medição das forças de levitação dos trilhos das geometrias  $\mathbf{A} \in \mathbf{C}$  (construído pelo *IFW*-Dresden, com as alterações de fixação do concentrador de fluxo central).

Utilizaram-se o sistema de medidas do LASUP (apresentado nas figuras 5.7 e 5.10), os blocos supercondutores apresentados na figura 4.17 e a seção de trilho (apresentada na figura 4.2) para a medição da força de levitação da geometria **A**. É válido ressaltar que medida de força de levitação da geometria **A** idealmente seria efetuada utilizando o bloco supercondutor antes do mesmo ser cortado. Contudo, dado que os testes na geometria **C** transcorreram antes que os da geometria **A**, o corte teve de ser efetuado. Entretanto, pelo corte ter sido efetuado em uma linha equidistante de duas sementes, a influência do mesmo pode ser negligenciada.

Utilizaram-se o sistema de medidas do IFW-Dresden (apresentado nas figura 4.18), o bloco supercondutor de 30 x 60 mm (apresentado na figura 4.17) e a seção de trilho (apresentada na figura 4.16) para a medição da força de levitação da geometria **C**. O sistema de medidas do IFW-Dresden foi posto em operação com o auxílio de integrantes da equipe do LASUP durante a efetuação do presente trabalho, sendo este fato detalhado em [4], demandando, assim, grande parte do tempo inicialmente planejado para efetuação de experimentos.



Figura 4.18: Sistema de medição de forças, com seis graus de liberdade, posto em operação no IFW-Dresden por integrantes da equipe do LASUP.

Ambas medidas foram efetuadas por colaboradores do LASUP que não o autor deste trabalho e, por isto, não foram devidamente fotodocumentadas. Apresenta-se na figura 4.19 as forças de levitação experimentais para os trilhos das geometrias **A** e **C** construído no *IFW*-Dresden.


Figura 4.19: Forças de levitação medidas de trilhos singelos das geometrias  $\mathbf{A} \in \mathbf{C}$  (construído pelo *IFW*-Dresden, com as alterações de fixação do concentrador de fluxo central).

Note-se pela figura 4.19 que as forças medidas são 3948 e 2122 N/m para os trilhos das geometrias  $\mathbf{A} \in \mathbf{C}$  respectivamente. Estes valores equivalem à uma redução real de 46,3 %.

Dada a diferença entre os valores de redução de força esperado e medido, uma reanálise do trilho magnético ótimo foi efetuada. Avaliou-se inicialmente a densidade de fluxo magnético no centro do trilho a uma altura de 12 mm e constatou-se que o valor medido foi 286,2 mT, enquanto o simulado foi de 363,9 mT. Efetuou-se então o mapeamento da densidade de fluxo magnético do trilho, comparando-o com a simulação, conforme figura 4.20.



Figura 4.20: Comparação entre as densidades de fluxo magnético medida e simulada do trilho da geometria  $\mathbf{C}$  construído no IFW-Dresden, utilizando-se o valor de força coercitiva de 891267 A/m (mesmo valor utilizado nas otimizações e simulações dos ímãs permanentes).

Dado os resultados de mapeamento dos ímãs apresentados nas figuras 4.11 e 4.12, o primeiro item analisado por simulação foi os concentradores ferromagnéticos. Para tal, impõe-se um valor de permeabilidade magnética relativa constante, variando de um valor não nulo abaixo da unidade até 10.000. Somente com um valor abaixo do unitário (irreal mesmo o ferro estando totalmente saturado), o valor de densidade de fluxo magnético medida foi alcançado, descartando-se esta possibilidade.

Em seguida, verificou-se a qualidade dos ímãs variando-se suas forças coercitivas. Multiplicou-se o valor da força coercitiva, utilizado no processo de otimização e de análise da qualidade dos ímãs, pela razão entre os valores de densidade de fluxo magnético medida e simulada (inicialmente 0,7865), verificando-se o valor simulado de densidade a 12 mm de altura. Repetiu-se este processo, por tentativa e erro, até que os valores simulado e experimental coincidissem, conforme figura 4.21, para uma força coercitiva de 700959 A/m.



Figura 4.21: Comparação entre as densidades de fluxo magnético medida e simulada do trilho da geometria  $\mathbf{C}$  construído no IFW-Dresden, utilizando-se o valor de força coercitiva corrigido para 700959 A/m.

O fato atribuído à redução da força coercitiva dos ímãs foi o processo de usinagem, o qual o componente foi submetido segundo informações do fabricante. Para fabricar o magneto na geometria requisitada, um bloco retangular de material foi confeccionado e o material excedente foi retirado. Devido a esse processamento, parte do material magnético sofreu aquecimento demasiado, perdendo sua magnetização. Fato similar a este foi observado no trilho concentrador de polo único e ímãs de 1"x 1"x 1/2" construído pelo *LASUP*, o qual foi submetido ao processo de lixamento e a força coercitiva teve que ser reduzida para que a simulação de seu perfil de campo ficasse de acordo com os experimentos efetuados [36]. A degradação da qualidade do ímã não pode ser detectada com o mapeamento da densidade de fluxo magnético de um ímã isolado, dado que as medidas experimentais e de simulação (utilizando-se uma força coercitiva de 891267 A/m) apresentaram resultados semelhantes, conforme figura 4.13. Assim, verificou-se que este procedimento não é suficiente para determinar a qualidade dos magnetos permanentes.

Dado os resultados insatisfatórios obtidos utilizando-se ímãs com geometria não usual, optou-se pela utilização de ímãs com seção retangulares nos processos de otimização efetuados a posteriori.

### 4.4 Síntese do capítulo

Este capítulo apresentou os resultados obtidos no processo de otimização utilizando o *FDIPA*, tendo como ponto inicial a geometria **A** (trilho o qual utilizava magnetos retangulares de seção 30 por 120 mm). Inicialmente, considerou-se somente a força de levitação como restrição, testando-se sua estabilidade lateral ao final do processo. A segunda etapa considerou além da força de levitação, a restrição da não utilização de parafusos de fixação no trilho magnético, obtendo-se o trilho utilizando ímãs trapezoidais (geometria **C**). Testou-se a qualidade dos ímãs trapezoidais pela medição da densidade de fluxo magnético sobre os mesmos. Montou-se a geometria **C**, efetuando a comparação das forças de levitação desta geometria com a geometria **A**. Concluiu-se que o método de comparação de desempenho de trilhos utilizando o Modelo de Permeabilidade Nula é válido para geometrias semelhantes e que o mapeamento do ímã isolado não é suficiente para determinar sua qualidade. Por isso, a geometria retangular dos magnetos permanentes foi imposta nos processos de otimização subsequentes.

# Capítulo 5

# Resultados Obtidos utilizando Busca Extensiva e Algoritmos Genéticos

Em paralelo ao estudo de otimização apresentada no capítulo 4, efetuada com blocos supercondutores isolados, o LASUP adquiriu criostatos contendo blocos supercondutores visando a construção em escala real do protótipo do veículo MagLev-Cobra. Sendo assim, as otimizações abordadas neste capítulo são efetuadas para o criostato descrito subsequêntemente. Analisando-se inúmeras configurações de trilhos magnéticos por otimização por Busca Extensiva (BE) e refinando os resultados mais promissores utilizando Algoritmos Genéticos (AG), os seguintes resultados foram obtidos.

### 5.1 Criostato do MagLev-Cobra

Como fora descrito no capítulo 2, o supercondutor necessita estar abaixo de uma determinada temperatura para que o estado de supercondutividade se apresente. Além disto, ele deve estar fixado adequadamente, de forma que as forças de sua interação com o campo externo gerado pelo trilho magnético não comprometam sua integridade. Outro fator de degradação de blocos supercondutores é a umidade. Por esses três fatores apresentados, um criostato [44] contendo os blocos supercondutores foi fabricado pela Adelwitz Technologiezentrum GmbH (ATZ) [45].

Apresenta-se na figura 5.1 o criostato utilizado no MagLev-Cobra. O mesmo possui um reservatório interno de aproximadamente 5 kg para nitrogênio líquido. Esta quantidade de nitrogênio, aliada ao isolamento térmico obtido por uma parede dupla com vácuo de  $10^{-4}$  mbar, mantém os blocos supercondutores resfriados por aproximadamente 24 h.



Figura 5.1: Desenho em corte do criostato desenvolvido pela ATZ para o veículo MagLev-Cobra.

A parede dupla na parte inferior do criostato é de somente 2 mm. Os resultados apresentados neste capítulo consistem da distância da parede inferior do criostato ao trilho magnético, diferindo dos resultados apresentados no capítulo 4 (distância entre o bloco supercondutor e o trilho). É válido ressaltar que quanto menor esta parede for, melhor o sistema de levitação. Isto se deve ao fato da força de levitação ser inversamente proporcional à distância do bloco supercondutor e o trilho magnético.

O criostato possui duas colunas de blocos supercondutores de  $YBa_2Cu_3O_X$  com seção de 63 por 13 mm, totalizando 24 blocos por criostato. Estes blocos são fixados à uma placa de cobre, responsável pela resistência mecânica do equipamento e o resfriamento por condução dos supercondutores. O nitrogênio líquido em contato com a placa a resfria e, consequentemente, também resfria os supercondutores. Este resfriamento indireto inibe a degradação por umidade dos blocos supercondutores. Apresenta-se na figura 5.2 uma foto do criostato descrito e na figura 5.3 sua localização na veículo.



Figura 5.2: Criostato desenvolvido pel<br/>a ${\cal ATZ}$ para o veículo MagLev-Cobra.



Figura 5.3: Posicionamento do criostato no veículo MagLev-Cobra.

### 5.2 Resultados Obtidos por Busca Extensiva e Algoritmos Genéticos

Em trabalhos paralelos efetuados no LASUP, várias configurações de trilho foram testadas para o criostato apresentado na seção 5.1 deste capítulo. Maiores detalhes podem ser verificados em [13].

Aplicou-se a metodologia de otimização por BE nas configurações escolhidas, obtendo-se o melhor custo benefício (i. e. maior razão força de levitação por volume de ímã permanente) para a geometria **D**, apresentada na figura 5.4. As dimensões dos ímãs e concentradores de fluxo magnético foram variados de 35 mm a 60 mm. Esta geometria foi montada pelo *LASUP* para testes.



Figura 5.4: Trilho da geometria  $\mathbf{D}$  obtido por otimização com BE. Variáveis de otimização cotadas. Dimensões em milímetros.

Aplicou-se então o FDIPA objetivando melhorar o desempenho obtido pela geometria **D**. Contudo, após duas iterações, o mesmo convergiu para uma geometria extremamente semelhante à inicial. Este fato se deve à geometria **D** ser um mínimo local da função custo, convergindo assim o FDIPA para o mesmo mínimo local (diferindo somente valores inferiores ao passo de 0,1 mm, utilizado na BE, para a obtenção geometria **D**). Por isso, a utilização do FDIPA foi descartada nesta etapa do processo de busca da geometria ótima e substituído pela otimização por AG dada suas características apresentadas na seção 3.2.

Aplicou-se AG, tendo a geometria **D** como ponto inicial. Nesta primeira fase,

a espessura dos concentradores de fluxo magnético tinham a liberdade de serem reduzidas a 0,1 mm. Com isso, a configuração Halbach [24] podia ser obtida pelo processo de otimização. Contudo, apesar dos resultados promissores obtidos (redução de volume de ímã com aumento da força de levitação pelo MPN), a eficácia da geometria Halbach obtida não foi confirmada pelo Modelo de Bean. Por este fato, os resultados obtidos não foram apresentados neste trabalho, limitando-se a espessura mínima dos concentradores de fluxo nas otimizações subsequentes. Novamente, verificou-se a validade da utilização do MPN à, somente, geometrias semelhantes.

Aplicando agora AG na geometria  $\mathbf{D}$ , limitando-se a configuração Halbach parcial, com os parâmetros já apresentados na seção 3.2, em três rodadas distintas, obteve-se a geometria  $\mathbf{F}$ , apresentada na figura 5.5. As dimensões dos componentes podiam variar entre 2mm e 100 mm. Nota-se que os ímãs laterais inferiores desta configuração foram reduzidos consideravelmente em relação à geometria  $\mathbf{D}$ . Tal fato conduziu ao refazimento dos testes do trilho da geometria  $\mathbf{D}$ , retirando-se os ímãs laterais inferiores (geometria  $\mathbf{E}$ ).



Figura 5.5: Trilho da geometria  $\mathbf{F}$  obtido por otimização com AG, utilizando a geometria  $\mathbf{D}$  como ponto inicial.

É válido ressaltar que os ímãs retirados da geometria  $\mathbf{D}$  eram os mais caros (custo por volume de material). Os testes efetuados com a geometria  $\mathbf{E}$  demonstraram uma queda da força de levitação pequena, com uma redução de custo considerável (um resumo comparando o desempenho das geometrias relevantes é apresentado no final da seção deste capítulo, na tabela 5.1). Pelo exposto, a geometria  $\mathbf{D}$  foi substituída





Figura 5.6: Trilho da geometria  $\mathbf{E}$  obtido pela análise do resultado da geometria  $\mathbf{F}$ , na qual os ímãs laterais inferiores foram reduzidos drasticamente quando comparados aos da geometria  $\mathbf{D}$ .



Figura 5.7: Trilho da geometria  $\mathbf{E}$  montado para verificação experimental de seu desempenho em conjunto com o criostato desenvolvido pela ATZ.

Aplicou-se novamente a otimização por AG tendo como parâmetro inicial agora a geometria **E**. O resultado desta otimização, após pequenos ajustes para garantir o uso de concentradores de fluxo com dimensões comerciais, é a geometria **G**, apresentada na figura 5.8.



Figura 5.8: Trilho da geometria **G** obtido por otimização com AG, utilizando a geometria **E** como ponto inicial.

Pelo modelo de permeabilidade nula, as geometrias  $\mathbf{E} \in \mathbf{G}$  apresentaram a mesma força de levitação para um gap de 10 mm (entre o trilho e a face inferior do criostato). Contudo, pelo modelo de Bean para o caso de FC de 35 mm, a geometria  $\mathbf{E}$  apresentou uma força de 3097 N por criostato, enquanto a geometria  $\mathbf{G}$  apresentou 2940 N, conforme mostra a figura 5.9. Isto consiste em uma redução de 5,1 % na força de levitação. A geometria  $\mathbf{E}$  possui uma área de seção de magneto permanente de 6411 mm<sup>2</sup> e a  $\mathbf{G}$  5980 mm<sup>2</sup>, uma redução de 6,7 % no volume de ímã. Por este fato, constatou-se que a razão força de levitação por custo aumentaria e decidiuse construir o protótipo da geometria  $\mathbf{G}$  para validação experimental do estudo. Outro ponto a ser ressaltado é a redução de 28,3 % no aço carbono utilizado como concentrador de fluxo magnético do trilho.



Figura 5.9: Comparação de forças simuladas pelo modelo de Bean e medidas para as geometrias  $\mathbf{E} \in \mathbf{G}$ , no caso de FC de 35 mm.



Figura 5.10: Trilho da geometria  $\mathbf{G}$  montado para verificação experimental de seu desempenho, comparando-o com a geometria  $\mathbf{E}$ .

Para a comparação adequada do desempenho dos trilhos das geometrias  $\mathbf{G} \in \mathbf{E}$ , efetuaram-se medidas experimentais em vários casos de FC, conforme apresentado na figura 5.11 e tabela 5.1. Nota-se que a razão força de levitação por área de ímã permanente da seção do trilho (proporcional ao custo do sistema de levitação) é superior para a geometria  $\mathbf{G}$  em todos os casos analisados.



Figura 5.11: Comparação de forças experimentais para as geometrias  $\mathbf{E} \in \mathbf{G}$ , em quarto casos de FC. (a) - ZFC; (b) - FC de 25 mm; (c) - FC de 30 mm e; (d) - FC de 35 mm. Força [N] por distância [mm].

Tipo de	Geo. E	Geo. G	Geo. E	Geo. G
resfriamento	$\mathbf{FL}^{-1}$	$\mathbf{FL}$	FL/area <sup>2</sup>	FL/area
ZFC <sup>3</sup>	3049,7	3142,6	0,4757	0,5255
FC 35 mm $^4$	3293,5	3114,2	0,5137	0,5208
FC $30 \text{ mm}$	3082,7	3080,5	0,4808	0,5151
FC 25 mm $$	2807,3	$2905,\!8$	$0,\!4379$	$0,\!4859$

Tabela 5.1: Comparação de desempenho entre as geometrias  $\mathbf{E} \in \mathbf{G}$ .

<sup>1</sup>Força de Levitação em [N], <sup>2</sup>área em mm<sup>2</sup>, <sup>3</sup>distância mínima entre trilho, criostato de 8 mm e <sup>4</sup> distância mínima entre trilho e criostato de 5 mm.

Enquanto a geometria  $\mathbf{G}$  estava sendo estudada somente por simulação, o desempenho da geometria  $\mathbf{E}$  já havia sido testado experimentalmente. Dado o desempenho adequado atestado da geometria  $\mathbf{E}$ , o *LASUP* adquiriu a quantidade de ímãs perma-

nentes para a construção de um trilho duplo de cerca de 200 m com esta geometria. Por isso, verificou-se a densidade de fluxo magnético sobre os dois trilhos, conforme apresentado na figura 5.12. Nota-se que os perfis da densidade de fluxo magnético das geometrias são similares. Como não há variação significativa do valor da densidade de fluxo magnético entre os trilhos, não há campo elétrico induzido (Lei de Faraday) em um bloco supercondutor caso o mesmo seja transposto entre os trilhos das geometrias  $\mathbf{E} \in \mathbf{G}$ . Não havendo campo elétrico induzido, o perfil de corrente no interior do supercondutor é mantido (conforme equação 3.16), podendo assim, emendar-se os trilhos sem restrição alguma ao movimento do veículo.



Figura 5.12: Comparação da densidade de fluxo magnético nas direções (a) horizontal  $x \in (b)$  vertical y, das geometrias  $\mathbf{E} \in \mathbf{G}$ .

### 5.3 Testes dinâmicos dos trilhos das geometrias E e G

Na seção 5.2 deste capítulo, efetuou-se a comparação de desempenho quasi-estático dos trilhos das geometrias  $\mathbf{E} \in \mathbf{G}$ . Para tal, a força de levitação da interação do criostato, apresentado nas figuras 5.1 e 5.2, com os trilhos em estudo (geometrias  $\mathbf{E} \in \mathbf{G}$ ) foi medida em função da distância entre estes dois componentes, movendo-se

o criostato, em passos de 1mm, lentamente (1 mm/s, efetuando a medida com o criostato parado por 1 s).

Contudo, na operação real de um sistema de transporte, é possível que o veículo sofra forças abruptas, induzindo a vibração do veículo. Pode-se citar como exemplo de forças desta natureza: a entrada e saída de passageiros; a passagem do veículo por um ponto do trilho com magnetização não adequada (um "buraco" magnético); a passagem do veículo por uma bifurcação do trilho; etc.

Por isso, apesar da otimização efetuada neste trabalho ter sido baseada em simulações estáticas, o comportamento dinâmico dos sistemas de levitação foi estudado experimentalmente. Analisou-se a aceleração destes sistemas a uma entrada tipo impulso.

A entrada tipo impulso foi efetuada por um martelo de borracha macia, conforme apresentado na figura 5.13. A escolha deste tipo de instrumento foi baseada no fato que este material é capaz de excitar o sistema em baixas frequências [46, 47], evitando, assim, a indução de respostas não lineares que ocorrem em altas frequências. Este efeito adverso foi verificado experimentalmente quando um martelo com cabeça de teflon foi utilizado.



Figura 5.13: Martelo de borracha utilizado para a aplicação de um impulso de força no criostato, visando a análise dinâmica dos sistemas de levitação. Um paquímetro é colocado ao lado para referência dimensional. A aceleração do criostato foi medida através de um sensor PCB Piezotronics (com ganho 5,21  $\frac{mV}{m/s^2}$ ) e um condicionador de sinal da mesma marca. A saída deste condicionador foi medida pelo osciloscópio Tektronix TDS 2014, sendo amostrados 10 s em uma taxa de aquisição de 250 Hz. Apresenta-se na figura 5.14 o aparato experimental montado e na figura 5.15 a resposta de um dos testes efetuados.



Figura 5.14: Aparato experimental utilizado para a análise dinâmica dos sistemas de levitação supercondutora.



Figura 5.15: Resposta a um impulso do sistema de levitação da geometria  $\mathbf{G}$ , com criostato sem massa adicional.

O sinal aquisitado foi gravado e transmitido para um computador, sendo analisado posteriormente no MATLAB. Nesta análise, desprezaram-se os dados anteriores ao impulso aplicado. Utilizando-se a ferramenta do MATLAB de Transformada Rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform*, FFT), a parte de interesse do sinal apresentado na figura 5.15 foi analisada no domínio da frequência. Nota-se, pela figura 5.16, que o sistema apresenta somente uma frequência de ressonância.



Figura 5.16: Transformada rápida de Fourier (FFT) da parte de interesse do sinal apresentado na figura 5.15.

Dado os resultados apresentados nas figuras 5.15 e 5.16, o sistema de levitação pode ser modelado como um sistema oscilante com amortecimento viscoso sub-crítico [46, 48]. A equação da posição deste sistema pode ser modelada por uma massa m, uma mola com rigidez k e um amortecedor com coeficiente de atrito viscoso c, conforme figura 5.17.



Figura 5.17: Esquema massa-amortecedor-mola, representando o sistema de levitação supercondutora.

A posição do criostato (massa m) em função do tempo é dada pela solução da equação 5.1

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0. \tag{5.1}$$

Dividindo-se a equação 5.1 pela massa m, tem-se

$$\ddot{x} + \frac{c}{m}\dot{x} + \frac{k}{m}x = 0, \qquad (5.2)$$

que pode ser reescrita por

$$\ddot{x} + 2\xi\omega_n \dot{x} + \omega_n^2 x = 0, \tag{5.3}$$

onde  $\xi$  é denominado amortecimento.

A equação 5.3 consiste em uma equação diferencial ordinária de segunda ordem, a qual pode ser resolvida assumindo uma solução da forma  $x(t) = Xe^{st}$  [49]. Substituindo esta solução na equação 5.3, obtemos as raízes da equação

$$s_{1,2} = -\xi\omega_n \pm \omega_n \sqrt{\xi^2 - 1}.$$
 (5.4)

A resposta do sistema depende do parâmetro  $\xi$ . ( $\xi$  positivo, representando o atrito viscoso, implicando em um sistema exponencial decrescente;  $\xi$  menor que 1, sistema oscilante).

A frequência natural de oscilação não amortecida do sistema é dada por  $\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$ (c = 0, ou  $\xi = 0$ ). Para sistemas amortecidos, a frequência de oscilação amortecida  $\omega_a$  é menor que a  $\omega_n$  [49]. Contudo, em sistemas onde o amortecimento é pequeno, a diferença entre estes valores é irrisória, podendo ser desconsiderada. No caso estudado, pode-se desconsiderar esta diferença [47, 49]. Sendo assim, a frequência de oscilação do sistema será chamada de somente  $\omega$ . Logo, a rigidez da mola k pode ser calculada por

$$k = m\omega^2. \tag{5.5}$$

Nota-se pela figura 5.15 que o sistema estudado consiste em um sistema amortecido com amortecimento menor que o crítico  $(0 < \xi < 1)$ , i.e. o sistema oscila antes de se acomodar em sua posição de equilíbrio. Logo, a posição do criostato em função do tempo pode ser dada por

$$x(t) = Xe^{-\alpha t}\sin(\omega t + \theta).$$
(5.6)

O coeficiente da exponencial decrescente  $\alpha$ , apresentado na equação 5.6, é dado pela parte real das raízes  $s_{1,2}$  (equação 5.4). Assim, o amortecimento pode ser determinado por

$$\xi = \frac{\alpha}{\omega},\tag{5.7}$$

e o coeficiente de atrito viscoso dado por

$$c = 2m\alpha. \tag{5.8}$$

Dado o fato que a função do MATLAB *FFT* determinou a presença de somente uma frequência de ressonância, utilizou-se diretamente a ferramenta de ajuste de curvas do MATLAB CFTOOL para estimar os parâmetros da equação 5.6 utilizando os dados levantados experimentalmente. Consequentemente, pelas equações 5.5, 5.7 e 5.8, a rigidez, o amortecimento e o coeficiente de atrito viscoso do sistema foram calculados. É válido ressaltar que, pela solução da posição do criostato ser uma exponencial, a equação da aceleração possui os mesmos parâmetros que esta (frequência de oscilação e coeficiente temporal de redução), diferindo somente por um fator de multiplicação.

O comportamento dos trilhos das geometrias  $\mathbf{E} \in \mathbf{G}$  foi estudado em duas alturas de FC (25mm e 35mm) e suportando três massas distintas (a massa própria do criostato, na adição de duas massas de teste e na retirada destas duas massas). Em cada altura de FC, a massa é mudada na sequência 19,3 kg; 28,4 kg; 34,1 kg; 28,4 kg e; 19,3 kg.

Os resultados obtidos são apresentados nas figuras 5.18, 5.19, 5.20 e 5.21.



Figura 5.18: Rigidez dos sistemas de levitação das geometrias  $\mathbf{E} \in \mathbf{G}$ , para dois FC e variando-se a massa (carga e descarga).



Figura 5.19: Coeficiente de atrito viscoso dos sistemas de levitação das geometrias  $\mathbf{E} \in \mathbf{G}$ , para dois FC e variando-se a massa (carga e descarga).



Figura 5.20: Frequência de oscilação dos sistemas de levitação das geometrias  $\mathbf{E} \in \mathbf{G}$ , para dois FC e variando-se a massa (carga e descarga).



Figura 5.21: Amortecimeto dos sistemas de levitação das geometrias  $\mathbf{E} \in \mathbf{G}$ , para dois FC e variando-se a massa (carga e descarga).

Nota-se pela figura 5.18 que a rigide<br/>zkcresce com a diminuição da altura de

FC. Este fato pode ser explicado pelo fato de que quanto menor o FC, mais campo é aprisionado no supercondutor (*flux pinning*), aumentando a rigidez do sistema [47]. Quando as massas de teste são retiradas, dado ao fato do criostato ter sido aproximado do trilho com a adição da carga e consequentemente mais fluxo ter sido aprisionado no supercondutor, a rigidez do sistema é aumentada. Assim, a rigidez aumenta na descarga do sistema para a mesma massa quando comparada ao carregamento do mesmo.

Observa-se na figura 5.19 que o comportamento do coeficiente de atrito viscoso c é similar ao comportamento da rigidez k.

Verifica-se pela figura 5.20 que a frequência de ressonância decai com o aumento da massa do sistema. É esperado que com o aumento da inércia do sistema, ele tenda a oscilar em menor frequência. Contudo, no caso estudado, o aumento de massa implica também no aumento da rigidez do sistema (figura 5.18). Logo, pela equação 5.5, conclui-se que o aumento da rigidez é inferior ao aumento da massa.

A figura 5.21 mostra que o amortecimento  $\xi$  aumenta com a diminuição do FC. Notas-e que os valores obtidos são positivos é próximos ao valor nulo, conforme esperado. Além disto, o valor de  $\xi$  é superior na descarga do sistema para a mesma massa quando comparado ao carregamento do mesmo (em especial na altura de FCde 25 mm).

Apesar da otimização ter sido efetuada para uma situação estática, a geometria  $\mathbf{G}$  apresentou comportamento dinâmico igual ou superior à geometria  $\mathbf{E}$  em todos os casos analisados, sendo por isso, mais adequada à aplicação deste sistema no veículo MagLev-Cobra.

### 5.4 Síntese do capítulo

Este capítulo apresentou o criostato a ser utilizado no projeto MagLev-Cobra. Apresentou também os resultados obtidos no processo de otimização por Busca Extensiva ( $\mathbf{E}$ , Halbach parcial sem os ímãs laterais inferiores) e Algoritmos Genéticos( $\mathbf{G}$ , configuração idêntica à  $\mathbf{E}$  com dimensões distintas). Os experimentos demonstraram o bom desempenho da geometria  $\mathbf{G}$ , obtida pelo uso de ambas metodologias de otimização (BE para determinar o ponto inicial da busca por AG). A mesma apresentou a razão força de levitação por área de ímã permanente da seção do trilho superior à  $\mathbf{E}$  em todos os casos estudados. Verificou-se ainda a possibilidade de emendar trilhos das geometrias  $\mathbf{E} \in \mathbf{G}$ . Além disto, apesar de não ter sido o foco deste trabalho, a geometria  $\mathbf{G}$  apresentou um desempenho igual ou superior à geometria  $\mathbf{E}$  nos testes dinâmicos efetuados.

# Capítulo 6

# Conclusões e Próximas Etapas

### 6.1 Conclusões

Apresenta-se na tabela 6.1 um resumo das geometrias estudadas neste trabalho.

Geometria	Descrição suscinta
Geo. A	Trilho com ímãs retangulares de 30 por 120 mm. Utilizado como ponto inicial de busca com o $FDIPA$ .
Geo. <b>B</b>	Trilho com ímãs trapezoidais, obtido pelo <i>FDIPA</i> tendo so- mente a força de levitação como restrição. Geometria não manufaturada.
Geo. C	Trilho com ímãs trapezoidais, obtido pelo $FDIPA$ tendo a força de levitação e fixação intrinsecamente estável como restrições.
Geo. D	Trilho com ímãs retangulares em configuração Halbach parcial, obtido por $BE$ .
Geo. $\mathbf{E}$	Trilho com ímãs retangulares em configuração Halbach par- cial, sem os ímãs laterais inferiores.
Geo. $\mathbf{F}$	Trilho com ímãs retangulares em configuração Halbach par- cial, obtido por $AG$ . Utilizada a geometria <b>D</b> como ponto inicial. Geometria não manufaturada.
Geo. <b>G</b>	Trilho com ímãs retangulares em configuração Halbach parcial e sem os ímãs laterias inferiores, obtido por $AG$ . Utilizada a geometria <b>E</b> como ponto inicial.

Tabela 6.1: Resumo dos trilhos magnéticos estudados neste trabalho.

Os resultados obtidos pela otimização do sistema de levitação magnética supercondutora foram considerados satisfatórios.

Apesar de não se obter a força esperada com a geometria de ímãs trapezoidal (trilho da geometria  $\mathbf{C}$ ), o processo de prototipagem deste trilho promoveu conhecimentos relevantes para a obtenção da geometria ótima final deste trabalho, a  $\mathbf{G}$ .

Verificou-se que o Modelo de Permeabilidade Nula não deve ser descartado, dado o tempo de processamento computacional reduzido. Contudo, o mesmo deve ser restringido à análises de geometrias semelhantes. A comparação de geometrias muito diferentes implica em erros que podem invalidar a comparação de desempenho das mesmas.

O Modelo de Bean se mostrou adequado à análise de todas as geometrias estudadas no trabalho, servindo adequadamente de parâmetro para a decisão da prototipagem, ou não, de uma configuração. Contudo, devido ao seu elevado tempo computacional, não pode ser utilizado diretamente nas otimizações efetuadas. O mesmo foi utilizado ao final de cada etapa de otimização.

Constatou-se que a qualidade de um magneto permanente não pode ser determinada com o mapeamento de sua densidade de fluxo magnético de forma isolada. Ímãs, aparentemente adequados quando analisados de forma isolada, apresentaram resultados insatisfatórios quando interagindo com outros ímãs para a formação de um trilho (geometria  $\mathbf{C}$ ). Além disto, a utilização de geometrias não-usuais deve ser analisada de forma criteriosa, sendo a interação com o fabricante das mesmas essencial. No caso do ímã trapezoidal, o fabricante usinou uma peça inicialmente retangular, degradando a qualidade da mesma.

Concluiu-se que para a obtenção de otimizações satisfatórias, as restrições de projeto devem ser estudadas profundamente. Para tal, é valida uma forte interação com pessoas experientes no projeto a ser otimizado. No caso estudado, somente a força de levitação foi considerada nos algoritmos de otimização. Contudo, as restrições considerando as facilidade de construção dos componentes do trilho, assim como da montagem do mesmo, foram intensamente discutidas com os integrantes do *LASUP* e incorporadas ao processo de otimização indiretamente.

Todos os métodos de otimização utilizados neste trabalho apresentaram resultados satisfatórios, considerando as limitações inerentes a cada um:

A Busca Extensiva (*BE*) possui facilidade de implementação e é geralmente utilizado como recurso inicial. Contudo, analisa inúmeros casos inviáveis, possui área de busca restrita (dependendo fortemente da experiência da pessoa que o utiliza) e não possui metodologia alguma para acelerar o processo de busca do ponto ótimo (inviabilizando o método quando o tempo de otimização é limitado ou o cálculo da restrição é computacionalmente custoso).

- O método dos Algoritmos Genéticos (AG) é baseado nos mecanismos naturais da evolução e genética. O mesmo é capaz de varrer uma vasta área de busca, podendo achar soluções não intuitivas à profissionais experientes no projeto a ser otimizado. Apesar de haver uma metodologia para acelerar o processo de busca, o método efetua inúmeras iterações para a determinação do ponto ótimo.
- O *FDIPA* apresenta grande precisão e velocidade de convergência. Contudo, é incapaz de otimizar um projeto quando o ponto inicial consiste em um mínimo local do mesmo.

Pelas características apresentadas, a utilização dos métodos de forma combinada foi escolhida, sendo coerentes os resultados obtidos neste trabalho.

A utilização do FDIPA, tendo a geometria **A** como ponto inicial, apresentou ganhos teóricos consideráveis. É válido ressaltar que a geometria **A** não é uma geometria ótima fruto de alguma otimização anterior, i. e. um mínimo local. Quando o FDIPA foi utilizado com a geometria **D** como ponto inicial, o mesmo convergiu para uma configuração extremamente similar. Pela opção da utilização de aço carbono (concentrador de fluxo magnético) em dimensões comerciais, esta otimização foi ineficaz.

A utilização das geometrias obtidas com BE como pontos iniciais da busca por AG apresentou os melhores resultados. Isto se deve ao fato do AG analisar pontos do projeto fora do espaço de busca delimitado na BE. Inicialmente, esta interação dos métodos resultou na retirada dos ímãs laterais inferiores da geometria **D**, obtendo-se a geometria **E**. Este fato reduziu o custo do trilho magnético sem interferir significativamente na força de levitação. Além disto, utilizando-se a geometria E como ponto inicial da otimização efetuada por AG, obteve-se a geometria **G**. A geometria G utiliza 6,7 % menos ímã que a geometria E, equivalente à uma economia de aproximadamente US\$ 130.000 por quilômetro de trilho magnético duplo (considerando o preço do ímã permanente de 300350 US $/m^3$ ). Além disto, há a redução de 28,3 % do volume de aço carbono. A configuração G apresentou a razão força de levitação por área de ímã da seção do trilho superior em todos os casos analisados, o que justificou a submissão de uma patente garantindo a propriedade intelectual deste produto. Outro ponto a ser ressaltado é a possibilidade de emendar os trilhos das geometrias E e G. Além disto, apesar de não ter sido o foco central deste trabalho, a geometria G apresentou um desempenho igual ou superior à geometria E nos testes dinâmicos efetuados.

### 6.2 Próximas Etapas

A comparação das geometrias  $\mathbf{E} \in \mathbf{G}$  deve ser complementada. Isto será possível com as melhorias, que estão em curso, do sistema de medidas do *LASUP*. Com isso, a força de estabilidade lateral, torque induzido por rotação do criostato e comportamento dinâmico do sistema de levitação (simulando o funcionamento real do veículo MagLev-Cobra) poderão ser analisados.

Dado os resultados satisfatórios obtidos nas otimizações efetuadas, outros pontos do projeto MagLev-Cobra podem ser beneficiados. Um item, por exemplo, é a otimização da geometria da bifurcação do trilho magnético (Aparelho de Mudança de Via, AMV). Esta bifurcação deverá ser construída com um circuito magnético ativo. A otimização deste item focaria à manutenção da configuração da densidade de fluxo magnético gerada pelo trilho magnético de ímãs permanentes sobre a bifurcação. Com isso, não haveria restrições ao movimento do veículo sobre a bifurcação magnética ativa.

## **Referências Bibliográficas**

- STEPHAN, R. M., DAVID, E. D., DE HASS, O. "An Urban Transportation Solution Using HTS-Superconductors and Permanent Magnets". In: *Proc.* of MAGLEV, pp. No. 28, pp. 1–4, San Diego, USA, 2008.
- [2] ROSE-INNES, A. C., RHODERICK, E. H. Introduction to Superconductivity. 2<sup>a</sup>-reimpressa ed. Oxford, Inglaterra, Pergamon, 1994.
- [3] SOTELO, G. G. Modelagem de Supercondutores Aplicada ao Projeto de Mancais Magnéticos. Tese de D.Sc., Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2007.
- [4] DIAS, D. H. N. Modelagem de Mancais Lineares Supercondutores Considerando o Resfriamento na Presença de Campo Magnético. Tese de D.Sc., Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2009.
- [5] In: Proc. of MAGLEV Conference, Daejeon, Coréia, 2011.
- [6] WEBSITE. "http://www.transrapid.de"., em: 01/04/2008.
- [7] HAYT JR., W. H. *Eletromagnetismo*. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos, 2001.
- [8] WEBSITE. "http://www.rtri.or.jp/index.html"., em: 01/04/2008.
- MOON, F. C. Superconductin levitation: Applications to bearings and magnetic transportation. 1<sup>a</sup> ed. Nova York, A Wiley-Interscience, 1994.
- [10] CAMPBELL, P. Permanent Magnet Materials and their Application. Cambridge University Press, 1994.
- [11] SOTELO, G. G., DIAS, D. H. N., MACHADO, O. J., et al. "Experiments in a Real Scale MagLev Vehicle Prototype. In: European Conference on Applied Superconductivity", *Journal of Physics: Conference Series*, v. 234, pp. 1–7, 2010.
- [12] WEBSITE. "http://www.dailyfinance.com"., em: 13/06/2011.

- [13] SOTELO, G. G., DIAS, D. H. N., DE ANDRADE JR., R., et al. "Tests on a Superconductor Linear Magnetic Bearing of a Full-Scale MagLev Vehicle", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity (Print)*, v. 21, pp. 1464–1468, 2011.
- [14] H. JING, J. W., WANG, S., WANG, L., et al. "A two-pole Halbach permanent magnet guideway for high temperature superconducting Maglev vehicle", *Physica C*, pp. 426–430, 2007.
- [15] LIU, W., WANG, S. Y., JING, H., et al. "Levitation performance of YBCO bulk in different applied magnetic fields", *Physica C*, v. 468, pp. 974–977, 2008.
- [16] VALLE, N. D. D., SANCHEZ, A., PARDO, E., et al. "Optimizing levitation force and stability in superconducting levitation with translational symmetry", *Applied Physics Letters*, v. 10, pp. 042503, 2007.
- [17] SASAKI, S., SHIMADA, K., YAGAI, T., et al. "Suitable Shape and Arrangement of HTS Bulk and Permanent Magnet for Improving Levitation Force in a Magnetic Levitation Type Superconducting Seismic Isolation Device", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 20 n.3, pp. 985–988, 2010.
- [18] LIU, L., WANG, J., WANG, S., et al. "Flux Concentrator Optimization of PMG for High-Temperature Superconducting Maglev Vehicle System", *Physica C*, v. 157, pp. 67–72, 2009.
- [19] HOLLAND, J. H. "Outline for a logical theory of adaptive systems", JACM, v. 9, pp. 279–314, 1962.
- [20] HERSKOVITS, J. N. "A Feasible Directions Interior Point Technique for Nonlinear Optimization", JOTA - Journal of Optimization Theory and Applications, v. 99, pp. 121–146, Janeiro 1998.
- [21] BEAN, C. P. "Magnetization of hard superconductors", *Physical Review Let*ters, v. 8, pp. 250–253, Março 1962.
- [22] SOTELO, G. G., KASAL, R. B., DE ANDRADE JR., R., et al. "Utilização das Equações de London para a Modelagem de Supercondutores". In: Anais do Momag 2004 - XI Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica e VI Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo, v. I, São Paulo, Agosto 2004.

- [23] ABRIKOSOV, A. A. "Theoretical Prediction of Vortices in Type-II Superconductors", USSR Soviet Physics JETP, v. 5, pp. 1174–1182, December 1957.
- [24] DENG, Z., ZHENG, J., SONG, H., et al. "A new HTS/PMG Maglev Design using Halbach Array", *Materials Science Forum - Trans Tech Publications*, *Switzerland*, v. 546-549, pp. 1941–1944, 2007.
- [25] DA SILVA, A. P. A., FALCÃO, D. M. Modern Heuristic Optimization Techniques: Theory and Applications to Power Systems. Wiley, 2007.
- [26] DARWING, C. On the Origin of Species. John Murray III, 1859.
- [27] WANG, Z., CUI, D., ZHOU, H., et al. "Optimization Design of Rectifier Transformer Coil Based on Genetic Algorithm", *Power Electronics and Motion Control Conference*, v. 2, pp. 549–552, agosto 2004.
- [28] PICAUD, V., HIEBEL, P., KAUFFMANN, J. "Optimization of SMES and superconducting magnets with a derivative free deterministic method", *Mathematics and Computers in Simulation*, v. 62, pp. 393–406, 2003.
- [29] WANG, C., WANG, Q., HUANG, H., et al. "Electromagnetic optimization design of a HTS magnet using the improved hybrid genetic algorithm", *Cryogenics*, v. 46, pp. 349–353, 2006.
- [30] LUENBERGER, D. G. Linear and Nonlinear Programing. 2<sup>a</sup> ed. Stanford University-California, Addison-Wesley Publishing Company, 1984.
- [31] COURANT, R. "Variational methods for the solution of problems of equilibrium and vibrations", Bull. Amer. Math. Soc., v. 49, pp. 1–23, 1943.
- [32] SADIKU, M. N. O. Numerical techniques in Eletromagnetics. 2<sup>a</sup> ed. EUA, CRC Press, 2001.
- [33] ANSYS Reference Manual. Ansys Co., 2003.
- [34] CAMACHO, D., MORA, J., FONTCUBERTA, J., et al. "Calculation of levitation forces in permanent magnet-superconductor systems using finite element analysis,", *Journal of Applied Physics*, v. 82(3), pp. 1461–1468, Setembro 1997.
- [35] BEAN, C. P. "Magnetization of high-field superconductors", Review of Modern Physics, v. 36, n. 1, pp. 31–39, Janeiro 1964.

- [36] DIAS, D. H. N., MOTTA, E. S., SOTELO, G. G., et al. "Simulations and Tests of Superconducting Linear Bearings of a MAGLEV Prototype", *IEEE Transaction on Applied Superconductivity*, v. 19, pp. 2120–2123, 2009.
- [37] BARNES, G., MCCULLOCH, M., DES-HUGHES, D. "Computer modelling of tipe ii superconductors in applications", *Superconducting and Science Technology*, v. 12, pp. 518–522, Setembro 1999.
- [38] RUIZ-ALONSO, D., COOMBS, T. A., CAMPBELL, A. M. "Numerical analysis of high-temperature superconductors with the critical-state model", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 14, pp. 2053–2063, 2004.
- [39] RUIZ-ALONSO, D., COOMBS, T. A., CAMPBELL, A. M. "Numerical solutions to the critical state in a magnet-high temperature superconductor interaction", *Superconducting and Science Technology*, v. 18, pp. 209–214, Setembro 2005.
- [40] MOTTA, E. S., DIAS, D. H. N., STEPHAN, R. M., et al. "Optimization of the HTS-superconducting vehicle maglevcobra levitation system". In: Proc. of WCSMO, Lisboa, Portugal, 2009.
- [41] ASTM A36 / A36M 08 Standard Specification for Carbon Structural Steel. N. 10.1520/A0036 A0036M 08. ASTM, 2008.
- [42] WEBSITE. "http://www.ifw-dresden.de"., em: 13/06/2011.
- [43] "industri@mail.nbptt.zj.cn"., Comunicação pessoal em: 18/02/2009.
- [44] WERFEL, F. N., FLOEGEL-DELOR, U., RIEDEL, T., et al. "HTS Magnetic Bearings in Prototype Application", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 20, pp. No. 3, 874–879, 2010.
- [45] WEBSITE. "http://www.atz-gmbh.com/"., em: 13/06/2011.
- [46] YANG, W., LIU, Y., WEN, Z., et al. "Hysteresis force loss and damping properties in a pratical magnet-superconductor maglev test vehicle", *Supercond. Sci. Technol.*, v. 21, pp. 7pp, 2008.
- [47] YANG, W., LIU, Y., WEN, Z., et al. "Dynamic Force Properties of a High Temperature Superconducting Maglev Test Vehicle", *IEEE Transactions* on Applied Superconductivity, v. 18, pp. 799–802, 2008.

- [48] DENG, Z. G., ZHENG, J., ZHANG, J., et al. "Studies on the levitation height decay of a high temperature superconducting Maglev vehicle", *Physica C*, v. 463-465, pp. 1293–1296, 2007.
- [49] BEARDS, C. F. Structural Vibration: Analysis and Damping. Butterworth-Heinemann, 1996.

# Apêndice A

# Artigo Publicado em Periódico Internacional

Artigo "Optimization of a linear superconducting levitation system", publicado na *IEEE Transaction on Applied Superconductivity*. Aceito em 06 de junho de 2011. DOI (identifier) 10.1109/TASC.2011.2161986.

# Optimization of a linear superconducting levitation system

Eduardo Souza Motta, Daniel Henrique Nogueira Dias, Guilherme Goncalves Sotelo, Henry Octavio Cortes Ramos, Jose Herskovits and Richard Magdalena Stephan

Abstract—The Laboratory for Applied Superconductivity from the Federal University of Rio de Janeiro (LASUP) has been developing a superconducting magnetic levitation urban train named MagLev-Cobra. It is a kind of Light Rail Vehicle (LRV) where the conventional wheel-rail track is substituted by a rail of Ne-Fe-B magnets and carbon-steel interacting with superconductors bulks installed in the vehicle to promote the levitation. The main cost of this levitation system is the magnetic rail. Therefore, any improvement in the shape and configuration of magnets and iron has a significant budgetary impact. In this paper, the optimization carried out with the Feasible Direction Interior Point Algorithm (FDIPA), Extensive Search (ES) and Genetic Algorithm (GA) of magnetic rails are presented. The objective is to find the geometry that minimizes the total cost, for a given levitation force, considering some practical restrictions. The levitation force restriction is calculated using Finite Element Method (FEM). During the optimization process the superconductor null permeability model is used. Finally, the results are checked with the Bean Model and verified experimentally. Measurements of the levitation force and the field mapped over the magnetic rails are presented. Significant reduction of soft and hard ferromagnetic material was reached.

#### Index Terms-Superconductivity, Levitation, Optimization

A list of abbreviations is given to facilitate the paper understanding.

- ES Extensive Search;
- FDIPA Feasible Direction Interior Point Algorithm;
- GA Genetic Algorithm;
- GF Guidance Force;
- LASUP Laboratory for Applied Superconductivity;
- LF Levitation Force;
- $LF_{\min}$  Minimal Design Levitation Force;
- OP Optimization Process and;
- SLMB Superconducting Linear Magnetic Bearing.

Manuscript received May 4, 2011; revised July 4, 2011 and July 6, 2011; accepted July 6, 2011. This work was supported in part by Indústrias Nucleares do Brasil S. A.INB, by Leibniz Institute for Solid State and Materials Research - IFW-Dresden, by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, by the Deutscher Akademischer Austausch Dienst, by the Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro, and by the Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico. This paper was recommended by Associate Editor L. Chiesa.

E. S. Motta is with the Brazilian National Nuclear Energy Commission -CNEN and Laboratory on Applied Superconductivity, Federal University of Rio de Janeiro, 68553, Rio de Janeiro-RJ, Brazil.

D. H. N. Dias and G. G. Sotelo are with the Fluminense Federal University (UFF), Rio de Janeiro-RJ, Brazil.

H. O. C. Ramos and J. Herskovits are with the Laboratory of Engineering Optimization, Federal University of Rio de Janeiro, Rio de Janeiro- RJ, Brazil.

R. M. Stephan is with the Laboratory on Applied Superconductivity, Federal University of Rio de Janeiro, Rio de Janeiro-RJ, Brazil.

Color versions of one or more of the figures in this paper are available online at http://ieeexplore.ieee.org.

Digital Object Identifier 10.1109/TASC.2011.2161986

#### I. INTRODUCTION

T HIS paper presents the optimization process of a SLMB, designed for an urban train that is being developed by the LASUP from the Federal University of Rio de Janeiro, Brazil, called MagLev-Cobra. There are many advantages in using this technology, as presented in [1]. As an example it can be cited the civil engineering costs lower than the necessary for subways.

The main cost of this project is the magnetic rail [2], consisted of Ne-Fe-B Permanent Magnets (PM) and carbonsteel. Moreover, the PM material price has been increased by the factor of two within the last two years [3]. Therefore, any improvement in the magnetic rail has a significant budgetary impact. There are many works analyzing different SLMB configurations and their performance [4], [5], [6], [7], [8], [9]. The most common configurations are: iron flux concentrator; Halbach and; partial Halbach [5]. In most previous works, except [4], the SLMB are studied without an optimization methodology. In the present work, to determine a design with minimal cost, ensuring a specific levitation force, an optimization is carried out with the FDIPA [10], ES [4] and GA [11], using MATLAB. The LF, which is main design restriction, is evaluated by a Finite Element Model (FEM) using ANSYS, considering the superconductor as a perfect diamagnetic [12]. The GF is not considered in the optimization process due to the additional computational time that would be necessary and since the main restriction in the operation of the MagLev-Cobra transportation system is given by the LF. In fact, the necessary GF can be limited imposing the angular velocity of the vehicle in curves.

The results of the OP are presented. The LF is checked with the Bean Model [13], [14] and also verified experimentally at liquid nitrogen temperature (77 K). The magnetic field above the rails is also mapped.

#### II. OPTIMIZATION PROCESSES

#### A. The FDIPA

The FDIPA [10] is a technique that solves nonlinear constrained optimization problems, used to minimize the SLMB cost [15]. Through Newton-like iterations it finds points that satisfy first order necessary optimality conditions. Starting at an initial feasible point, this algorithm defines a sequence of feasible points, always in a descent direction of the objective function.

The descent direction of the objective function is composed by two components. The primal direction is a descent direction, but not necessarily feasible. To avoid this effect, the used direction is obtained adding a term to the primal direction, deflecting it into a feasible region.

A constrained line search is then performed to obtain a satisfactory reduction of the function without loosing the feasibility. The fact of giving feasible points makes FDIPA very efficient in engineering design, where functions evaluation is in general very expensive. Since, any intermediate design can be employed, the iterations can be stopped when the cost reduction per iteration becomes small enough.

#### B. Extensive search

This method consists in changing the value of one variable in steps and keeping the others variables constant. Repeating this process for all design variables, all variables combinations are evaluated in a predetermined limit.

Considering the simplicity of this method, it is used as the first optimization process when the variables limits are well defined and the computational time to evaluate the restrictions is not relevant.

Although its easy implementation, this method do not use any kind of resource to accelerate the search process, becoming unpractical when the evaluation of the restrictions or objective function demands a high computing time. Furthermore, the search region is limited and unfeasible solutions can be also evaluated.

#### C. Genetic algorithm

The GA was developed by Holland in 1962 [11] and it is based on natural genetic evolution [16], that means the fact that the average fitness of a population improves over the generations. There are some biological metaphors that help to elucidate how the GA operates:

- Individual: a set of data, representing a possible solution;
- Population: a set of individuals;
- Generation: a step in the evolution process;
- Genes: design variables;
- Crossover: change of genes between two individuals and;
- Mutation: alteration of genes of one individual.

An individual is divided in three parts: identification, genes (corresponding to the SLMB dimensional variables) and its evaluation. The evaluation consists in the objective function, and adequacy function [17]. The objective function is defined by

$$P(x) = F(x) + f(x),$$
(1)

where F(x) is the PM section area and f(x) is a design penalty, given by

$$f(x) = \begin{cases} a_i \frac{|LF(x) - LF_{min}|}{LF_{min}} & \text{for } LF(x) < LF_{min} \\ 0 & \text{for } LF(x) \ge LF_{min}, \end{cases}$$
(2)

where  $a_i$  is a positive constant with a value that ensure the design restrictions are respected. In this case,  $a_i = 10$ , LF(x) is the LF for a set of dimension variables x.

The adequacy function is defined by

$$f_{\rm ad}(x) = b[P_{\rm max} - P(x)],\tag{3}$$

where b is a positive constant and  $P_{\text{max}}$  is the maximum value of P(x), over all generations. Therefore, (3) is always positive and its maximum value is objectified. The standard deviation  $\sigma$  of adequacy function of one population gives its diversification. When the  $\sigma$  value is close to zero for a given number of generation, the evaluation is considered stagnated. The GA consists of the following steps:

- Create the initial population;
- Do the next three steps until one stop criteria is reached;
- Select the permutated individuals;
- Modify the selected individuals and;
- Reassess the population.

The initial population is created from the individual Adam (the best solution given by ES [4]). He is kept in the initial population, and the other individuals are created varying the Adam genes (SLMB dimensions) plus or minus 50 %, using a uniform probability distribution. This process is repeated until three hundred individuals are created. These individuals are ranked according to (3). From this ranked list, the individuals  $_k$  are selected, where k is a full number that varies from 1 to 290, in steps of 10. The initial population is given by Adam and these selected individuals. This initialization guarantees an appropriate search area, preventing premature evolution stagnation.

The selection of individuals that are going to pass to the next generation is performed by tournament. Three individuals are chosen randomly, selecting in this sub-population the individual with better objective function.

The selected individual has 40% probability to be changed by crossover and initially, 10% by mutation in the seventy first generations. After that or if the population is stagnant over twenty generations, the mutation probability is increased to 20%.

The variables that are changed by crossover process are chosen initially randomly. After eighty generations, only one variable is changed to refine the optimal search. A similar strategy is used with mutation, but after one hundred generations.

The optimization process is done until one of two stopping criteria is reached: 1) after one hundred and fifty generations or; 2) population stagnant for thirty generations. These parameters were based on [17], and tested with the objective function T(x) presented in (4). T(x) has several local minimums given by the synodal function and only one global minimum. The GA reached its global minimum in all rounds.

$$T(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) = 2.5 * [|\sin(x_1 - 1)| + |\sin(x_2 - 2)|] + |x_1 - 1| + |x_2 - 2| + |x_3 - 3| + |x_4 - 4| + |x_5 - 5|$$
(4)

#### D. Superconductor model

The FEM method [18] is used to evaluate the forces between the superconductor and the magnetic rail. The superconductor is modelled as a perfect diamagnetic material to determine the LF [12] during the OP due to its fast evaluation. This consideration implies in an evaluated force greater than the real LF. Therefore, the optimized rails LF are checked with simulations using Bean Model before the prototyping.


Fig. 1. Flowchart of optimization algorithm and FEM software interaction.

# E. Interaction between FEM software and optimization algorithms

The interface between FEM and OP softwares is made with two text files, as presented in Fig. 1. Initially the OP writes the interaction indices and the SLMB dimensions to be used in the FEM software. Then, OP starts reading with one Hertz frequency the text from FEM software. This frequency value is used to avoid interference in the processing time.

When the FEM software evaluates the LF, this value is written in the FEM software output text file with the interaction indices. Thereon, the LF is considered in the OP. An analogous methodology is applied on the FEM software.

# III. RESULTS

## A. FDIPA Results

The rail presented in Fig. 2 (geometry A) is used as initial point of FDIPA. This search is carried out in two stages, both with the main goal of cost reduction while keeping a  $LF_{min}$ . In the first stage (21 FDIPA iterations), no assemblage restrictions are considered (only minimal dimensions to ensure mechanical resistance). However, the reached geometry has non stable components being necessary the use of screws. Therefore, in the second stage (9 FDIPA iterations), the non-screws assemblage restriction is added. The optimal rail geometry B is presented in Fig. 2 and 3.

The superconductor dimensions are also optimized with FDIPA. For geometry A a three seed superconductor bulk (made by Leibniz Institute for Solid State and Materials Research, IFW-Dresden) with a cross section of 90 mm width and 15 mm height is used. For geometry B, the same block is cut, having a smaller cross section of 60 mm width and two seeds.

The expected cost reduction is 25.3%, with a decrease on the LF of 8.0 % for a twelve millimeter gap by simulation results [15]. However, the measured LF reduction is 46.3 %, as presented in Fig. 4.

Many reasons for this force results are investigated: differences between the design and built rail prototype, flux concentrator material, superconductor seeds position [19] and magnetic quality. The mapped field of one single magnet is similar to the simulated one, as presented in Fig. 5. Although,



Fig. 2. Initial FDIPA geometry (A) and final FDIPA geometry (B). Dimension in millimeters.



Fig. 3. FDIPA final geometry (B) prototype with 125 mm length. Fixing components cut with electroerosion and PM machined.



Fig. 4. Measured LF/legth [N/m] per gap [mm] for geometries A (solid line) and B (circles), in the Zero Field Cooling (ZFC) case. The LF [N] is measured with superconductors bulks of 30 mm length and then multiplied by 33.33 to give the LF per meter [N/m] presented in the graphic.

the magnetic field over the optimal rail was lower than the simulated one with the same coercitive force used in the single magnet simulation. By trial and error, the coercitive force in the simulation of rail B is reduced from 891267 A/m (the value used in one single magnet simulation and also in all rails using rectangular PM) to 700959 A/m in order to adjust the calculated field with the measured one, as presented in Fig. 6. With this adjustment, the measured and simulated LF are similar. It is verified that the magnetic field mapping of a



Fig. 5. Comparison of simulated (solid line) and measured (circles) perpendicular magnetic field [T] 1 mm above one magnet side (in contact with the central carbon-steel piece). This verification is performed to validate the magnets parameters used in the FEM model.



Fig. 6. Measured (circles) and simulated perpendicular field [mT] above 12 mm gap from geometry B rail, with coercitive force of 891267 N/m (initial simulation, dashed line) and 700959 A/m (adjusted simulation, solid line).

single piece is not sufficient to determine the magnetic quality.

The theoretical cost reduction using FDIPA shows its potential use when the initial geometry is not a local minimum of the objective function. However, the coercitive force reduction, which can be justified by PM machining (the magnet was rectangular and then machined to the non-usual trapezoidal shape), harmed the magnetic field above the rail. A similar fact was observed in another rail built in LASUP, which was sanded [20]. In fact, the influence of the machining on the properties of PM deserve more research. Therefore, the rectangular PM shape restriction is also imposed. Moreover, assemblage easiness (based on previous works developed by LASUP) and rectangular PM shapes are used in the next optimizations.

The FDIPA is also used to optimize the rectangular geometry D (Fig. 7). However, this geometry D being an ES local minimal, FDIPA converges after two iterations to a geometry with practically the same dimensions of the initial one.



Fig. 7. Two most promising geometries from ES optimization [4]. Dimension in millimeters.

### B. ES Results

Intending to determine the rail to be used in MagLev-Cobra design several geometries and configurations are tested with ES [4]. It is observed that the partial Halbach configuration gives the major levitation force per PM ratio. The most promising configurations are presented in Fig. 7.

For geometries C, D, E and F (Figs. 7 and 8) a cryostat developed by Adelwitz Technologiezentrum GmbH - ATZ (Fig. 9), with two superconductors bulks rows with cross section of 64 mm width and 13 mm height each one, is used [4], [21].

#### C. GA Results

Firstly, the geometry C is used as initial point in three GA rounds. Using the parameters described in the present paper, the geometry E, Fig. 8, is reached. As can be observed, the magnets in lower external parts of the rail are sharply reduced. Therefore, the geometry D is tested and observed that the ratio LF per PM volume is greater than in geometry C.

The GA search is repeated with geometry D (6411 mm<sup>2</sup> PM section area) as initial point. The geometry F (5980 mm<sup>2</sup> PM section area) is obtained after three GA independent rounds and some adjustments to ensure commercial carbonsteel sections, reducing 6.7 % PM volume and 23.8 % carbonsteel for a constant LF. Simulated [13], [14] and measured results for geometries D and F in field fooling (FC) of 35 mm case are presented in Fig. 10. Measured results for zero-field cooling (ZFC) and different FC are presented in Fig. 11 and table I. The ratio LF per magnetic volume is superior in all studied cases for geometry F.

In order to complement the comparison between D and F geometries, the magnetic field in horizontal  $(B_x)$  and vertical  $(B_y)$  directions is mapped at a 10 mm gap over the magnetic rails, as shown in Fig. 12. Despite the significant PM volume reduction, it can be observed that the vertical and horizontal magnetic fields are very similar for both geometries.



Fig. 8. Optimal geometries obtained with GA, using geometries C and D as initial points (E and F, respectively). Dimension in millimeters.



Fig. 9. Geometry F prototype and measurement system.



Fig. 10. Simulated and measured LF [N] per gap [mm] results for geometries D (solid line for simulation and asterisks for measures) and F (dashed line for simulation and circles for measures) in the 35 mm Field Cooling case.

## **IV. CONCLUSIONS**

Although the fast convergence and promising theoretical results of FDIPA, PM non-usual shape fabrication process negatively affected its performance. Furthermore, FDIPA was not efficient using ES local minimum as its initial point. Due



Fig. 11. Measured LF [N] per gap [mm] for geometries D (solid line) and F (circles) in: (a) ZFC, (b) 25 mm FC, (c) 30 mm FC and (d) 35 mm FC cases.

 TABLE I

 GEOMETRIES D AND F COMPARATIVE RESULTS

Cooling	Geo. D	Geo. F	Geo. D	Geo. F	LF/area
case	LF <sup>1</sup>	LF	LF/area <sup>2</sup>	LF/area	variation
ZFC <sup>3</sup>	3049.7	3142.6	0.4757	0.5255	+10.47 %
FC <sup>4</sup> 35 mm	3293.5	3114.2	0.5137	0.5208	+1.37 %
FC 30 mm	3082.7	3080.5	0.4808	0.5151	+7.13 %
FC 25 mm	2807.3	2905.8	0.4379	0.4859	+10.97 %





Fig. 12. Horizontal  $(B_x)$  and vertical  $(B_y)$  magnetic field [mT] above geometries D and F, over the horizontal direction [mm]. The horizontal (x direction) and vertical (y direction) axes origin is located in the middle of the magnetic rails, at a 10 mm gap over them, as presented in Figs. 7 and 8.

to the limited search area of ES, the GA was able to determine a better SLMB geometry. The optimization process carried out by GA reduced 6.7 % of PM material and 23.8 % of carbonsteel compared to ES result for the same LF. The comparison of geometries D and F performance is presented in Fig. 11 and table I for several FC cases, and also in Fig. 12. The ratio LF per magnet cross section area is superior in all studied cases for geometry F. The estimated cost reduction to PM is approximately US\$ 130 000 per kilometer (considering PM cost of 300350 US $/m^3$ ), for a double rail of geometry F, compared to geometry D.

#### ACKNOWLEDGMENT

The authors would also like to thank the LASUP's technician O. J. Machado for all the support given in the geometry-F rail assemblage.

### REFERENCES

- R. M. Stephan, E. D. David, and O. de Hass, "An urban transportation solution using hts-superconductores and permanent magnets," in *Proc.* of MAGLEV, San Diego, USA, 2008, pp. No. 28, pp. 1–4.
- [2] G. G. Sotelo, D. H. N. Dias, O. J. Machado, E. D. David, R. de Andrade Jr., R. M. Stephan, and G. C. Costa, "Experiments in a real scale maglev vehicle prototype," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 234, pp. 1–7, 2010.
- [3] (2011, jun) Rare earth metals inc (ra) historical prices. [Online]. Available: http://www.dailyfinance.com
- [4] G. G. Sotelo, D. H. N. Dias, R. de Andrade Jr., and R. M. Stephan, "Tests on a superconductor linear magnetic bearing of a full-scale maglev vehicle," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity (Print)*, vol. 21, pp. 1464–1468, 2011.
- [5] Z. Deng, J. Zheng, H. Song, S. Wang, and J. Wang, "A new hts/pmg maglev design using halbach array," *Materials Science Forum - Trans Tech Publications, Switzerland*, vol. 546-549, pp. 1941–1944, 2007.
- [6] J. W. H. Jing, S. Wang, L. Wang, L. Liu, J. Zheng, Z. Deng, G. Ma, Y. Zhang, and J. Li, "A two-pole halbach permanent magnet guideway for high temperature superconducting maglev vehicle," *Physica C*, pp. 426–430, 2007.
- [7] W. Liu, S. Y. Wang, H. Jing, J. Zheng, M. Jiang, and J. S. Wang, "Levitation performance of ybco bulk in different applied magnetic fields," *Physica C*, vol. 468, pp. 974–977, 2008.
- [8] N. D. D. Valle, A. Sanchez, E. Pardo, D. Chen, and C. Navau, "Optimizing levitation force and stability in superconducting levitation with translational symmetry," *Applied Physics Letters*, vol. 10, p. 042503, 2007.
- [9] S. Sasaki, K. Shimada, T. Yagai, M. Tsuda, T. Hamajima, K. Kawai, and K. Yasui, "Suitable shape and arrangement of hts bulk and permanent magnet for improving levitation force in a magnetic levitation type superconducting seismic isolation device," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 20 n.3, pp. 985–988, 2010.
- [10] J. N. Herskovits, "A feasible directions interior point technique for nonlinear optimization," *JOTA - Journal of Optimization Theory and Applications*, vol. 99(1), pp. 121–146, 1998.
- [11] J. H. Holland, "Outline for a logical theory of adaptative systems," Association for Computer Machinery - ACM, vol. 9, pp. 297–314, 1962.
- [12] G. G. Sotelo, "Modelagem de supercondutores aplicada ao projeto de mancais magneticos," Thesis, In portuguese. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2007.
- [13] C. P. Bean, "Magnetization of hard superconductors," *Physical Review Letters*, vol. 8, p. 250, 1962.
- [14] D. H. N. Dias, E. S. Motta, G. G. Sotelo, and R. de Andrade Jr., "Experimental validation of field cooling simulations in linear superconducting levitation system," *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 23, pp. 075013–075018, 2010.
- [15] E. S. Motta, D. H. N. Dias, R. M. Stephan, J. N. Herskovits, and L. Kuehn, "Optimization of the hts-superconducting vehicle maglevcobra levitation system," in *Proc. of WCSMO*, Lisbon, Portugal, 2009.
- [16] C. Darwing, On the Origin of Species. John Murray III, 1859.
- [17] W. Zhurong, C. Duwu, Z. Hongfang, and Y. Gang, "Optimization design of rectifier transformer coil based on genetic algorithm," in *Power Electronics and Motion Control Conference*, 2004, pp. 549–552.
- [18] M. N. O. Sadiku, *Elements of Electromagnetics*. Oxford University Press, 2001.
- [19] C. Hofmann and G. Ries, "Modelling the interactons between magnets and granular high  $t_c$  superconductor material with a finit-element method," *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 14, pp. 34–40, 2001.
- [20] D. H. N. Dias, E. S. Motta, G. G. Sotelo, R. de Andrade Jr., R. M. Stephan, L. Kuehn, O. de Haas L., and Schultz, "Simulations and tests of superconducting linear bearings for a maglev prototype," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 19, pp. 2120–2123, 2009.

[21] F. N. Werfel, U. Floegel-Delor, T. Riedel, R. Rothfeld, D. Wippich, and B. Goebel, "Hts magnetic bearings in prototype application," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 20, pp. No. 3, 874–879, 2010.



Eduardo Souza Motta received the B.Sc. degree in electrical engineering from Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), Juiz de Fora, Brazil, in 2004, and the M.Sc. degree in electrical engineering from Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ), Rio de Janeiro, Brazil, in 2007, where he is a D.Sc. candidate. From 2005 to 2010, he worked as an engineer at Indústrias Nucleares do Brasil (INB), Resende, Brazil. Since 2010, he has been with Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN). His main interests are in the fields of

applications of superconductivity, optimization and nuclear engineering.



Daniel Henrique Nogueira Dias received the B.Sc. degree in physics, in 2003, and the B.Sc. degree in electrical engineering, in 2011, both from Federal University of Rio de Janeiro (UFRJ). The M.Sc. degree in physics from Universidade Federal Fluminense (UFF), Niteroi, Brazil, and the D.Sc. from (COPPE/UFRJ) in 2009. At present, he is a Professor in the Department of Electrical Engineering at UFF. His research interest has been in the application of superconductors to electrical engineering.



Guilherme Goncalves Sotelo recived the B.Sc. degree in physics, in 2000, and the B.Sc. degree in electrical engineering, in 2009, both from Federal University of Rio de Janeiro (UFRJ). The M.Sc. and the D.Sc. degrees in electrical engineering were received, respectively, in 2003 and 2007, from COPPE/UFRJ. He was a post-doc fellow at LASUP between 2007 and 2009. Since 2009 he works as Associate Professor in the Department of Electrical Engineering at Fluminense Federal University (UFF). His research interest has been in the application of

superconductors to develop electrical engineering devices.



Henry Octavio Cortés Ramos received the B.Sc. degree in mechanical engineering from the National University of Colombia, Bogotá, Colombia, in 2005, and the M.Sc. degree in mechanical engineering from the Federal University of Rio de Janeiro (UFRJ), in 2007, where he is a D.Sc. candidate. He is currently with the Engineering Optimization Laboratory (OptimizE), Department of Mechanical Engineering, UFRJ. His main research interests include design science and optimization, with applications to engineering optimization.



Jose Herskovits received the BSc. degree in industrial engineering from the University of the Republic of Uruguay in 1972, the MSc. in mechanical engineering from the Federal University of Rio de Janeiro (UFRJ), in 1977, and the Dr. Eng. degree in mathematics of decision at Paris IX (Dauphine) University, in 1982. He works on the development of numerical optimization algorithms and their applications in engineering analysis and design. Prof. Herskovits is the author of a general interior point technique for nonlinear constrained optimization and

a series of iterative algorithms based on this technique. These methods are largely employed by engineers and researchers. Jose Herskovits is full professor at the Mechanical engineering Program of COPPE/UFRJ.



**Richard Magdalena Stephan** received the B.Sc. degree in electrical engineering from Instituto Militar de Engenharia (IME), Rio de Janeiro, in 1976, the M.Sc. degree in electrical engineering from Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ) in 1980, and the Dr.-Ing. degree in electrical engineering from Ruhr Universitt Bochum, Germany, in 1985. He has an MBA degree (2005) from the Center for Scientific Enterprise, London (CSEL), on Technology Enterprise Development. During 1977, he worked as an engineer at Furnas Centrais Eltricas,

Rio de Janeiro. Since 1978, he has been with the Department of Electrical Engineering, UFRJ. He spent a sabbatical leave at CEPEL, the Research Center of ELETROBRAS, in 1993. His main interests are in the fields of applications of superconductivity, control of electrical drives and power electronics. Dr. Stephan is member of SOBRAEP and IEEE.