



#### UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica

## Jaime Ayres de Oliveira Junior

## OTIMIZAÇÃO DE SISTEMA DINÂMICO DE SUSPENSÃO VEICULAR ELETROMECÂNICA UTILIZANDO ALGORITMO GENÉTICO

Bauru 2016 Jaime Ayres de Oliveira Junior

## OTIMIZAÇÃO DE SISTEMA DINÂMICO DE SUSPENSÃO VEICULAR ELETROMECÂNICA UTILIZANDO ALGORITMO GENÉTICO

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Bauru, Programa de Pós-Graduação em engenharia Mecânica na Área de Projetos Mecânicos, como parte dos requisitos necessários à obtenção de Título de Mestre em Engenharia Mecânica. Orientador: Prof. Dr. Marcos Silveira

Bauru 2016 Oliveira Jr, Jaime Ayres. Otimização de sistema dinâmico de suspensão veicular eletromecânica utilizando algoritmo genético / Jaime Ayres de Oliveira Junior, 2016 77 f.

Orientador: Marcos Silveira

Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2016

1. Suspensão eletromecânica. 2. Otimização. 3. Algoritmo genético. I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. II. Título.

#### UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA



#### Câmpus de Bauru



ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE JAIME AYRES DE OLIVEIRA JUNIOR, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA, DA FACULDADE DE ENGENHARIA.

anne

Prof. Dr. MARCOS SILVEIRA

Prof. Dr. PAULO JOSÉ PAUPITZ/GONÇALVES

Prof. Dr. FABRICIO CESAR LOBATO DE ALMEIDA

Faculidade de Engenharia - Câmpus de Bauru -Avenida Engenheiro Luiz Edmundo Carrijo Coube, 14-01, 17033390, Bauru - São Paulo

Dedico este trabalho a minha amada esposa Ellen e aos meus filhos Sarah e Rafael, quem me deram forças e me encorajaram durante toda essa jornada. Aos meus pais que me ensinaram os valores da vida e a perseverar buscando alcançar meus sonhos. A todos os meus amigos e professores que contribuíram para o meu conhecimento. "Existem apenas duas maneiras de ver a vida. Uma é pensar que não existem milagres e a outra é que tudo é um milagre."

Albert Einstein

## Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, pois é ele quem me guia e está comigo em todos os momentos da minha vida.

A minha família, especialmente a minha esposa Ellen, pois sem ela muitas vezes fazendo a minha parte para com meus filhos na minha ausência, não seria possível realizar este feito. Aos meus filhos Sarah e Rafael, pois mesmo sem entenderem ainda, me deram muita força quando precisei. Aos meus pais que me proporcionaram a base necessária para me tornar quem sou e me incentivaram a estudar e buscar meus sonhos.

Agradeço ao meu orientador Professor Dr. Marcos Silveira por acreditar em mim e compreender as minhas dificuldades. Por me ajudar em todas as etapas deste trabalho, sem medir esforços.

A todos os meus professores do grupo de pesquisa, Professor Dr. Paulo José Paupitz Gonçalves, Professor Dr. Bento Rodrigues de Pontes Jr. e Professor Titular Dr. José Manoel Balthazar por contribuírem imensamente para o meu conhecimento.

Aos colegas e amigos que fiz durante esta longa jornada que de uma forma ou outra contribuíram para que este projeto fosse concluído: Pedro, Bruno, Willian, Alexander, Felipe, Lucas, Najla, Michael e em especial aos amigos Adriano Mazotti, Rodrigo Rocha e Julio César Moraes Fernandes quem muito me ajudaram durante todo esse tempo.

Agradeço a fundação Capes por financiar este projeto de pesquisa concedendo a bolsa de estudos.

#### OTIMIZAÇÃO DE SISTEMA DINÂMICO DE SUSPENSÃO VEICULAR ELETROMECÂNICA UTILIZANDO ALGORITMO GENÉTICO

Palavras chaves: suspensão eletromecânica, otimização, algoritmo genético

Resumo - O objetivo deste trabalho é analisar o comportamento dinâmico de um sistema de suspensão eletromecânica aplicado a veículos, aplicando um algoritmo genético para maximizar o conforto dos passageiros e maximizar a energia recuperada através do subsistema elétrico. Em sistemas de suspensão mecânica, a energia vibratória é dissipada, por exemplo, em um amortecedor viscoso. É utilizado um modelo de quarto de carro com dois graus de liberdade para expressar a dinâmica vertical do sistema. Utiliza-se a equação de Euler-Lagrange para relacionar os tipos de energia envolvidos (cinética, potencial, elétrica e magnética) para escrever as equações dinâmicas do sistema. O modelo é constituído de dois domínios, um mecânico, do qual fazem parte massa e rigidez, e um elétrico, do qual faz parte um circuito RLC. Os dois domínios são associados através de um transdutor. Neste caso, uma bobina converte o movimento do subsistema mecânico em corrente elétrica no subsistema elétrico. Devido ao grande número de parâmetros e à existência de múltiplos objetivos, opta-se por utilizar um algoritmo genético para realizar a otimização do sistema de suspensão. O desempenho do algoritmo de otimização é analisada observando-se convergência e exploração do espaço de busca. Os resultados são obtidos através de expressões analíticas e simulações numéricas.

#### OPTIMIZATION OF DYNAMICAL SYSTEM OF ELECTROMECHANICAL VEHICLE SUSPENSION USING GENETIC ALGORITHM

**Key words:** electromechanical suspension, optimization, genetic algorithm

**Abstract** - The objective of this study is to analyze the dynamic behavior of an electromechanical suspension system applied to vehicles, applying a genetic algorithm to maximize passenger comfort and to maximize the energy recovered through the electrical subsystem. In mechanical suspension systems, vibration energy is dissipated, for example, by a viscous damper. A quarter car model with two degrees of freedom is used to express the vertical dynamics of the system. The Euler-Lagrange equations are used to relate the types of energy involved (kinetic, potential, electrical and magnetic) to write the dynamic equations of the system. The model consists of two domains, a mechanic, which comprises mass and stiffness, and an electric, a RLC circuit. The two subsystems are associated with a transducer. In this case, a moving coil converts the movement of the mechanical subsystem in electrical current in the electrical subsystem. Due to the large number of parameters and the existence of multiple objectives, it is chosen to use a genetic algorithm to perform optimization of the suspension system. The performance of the optimization algorithm is analyzed observing convergence and search space exploration. The results are obtained by analytical expressions and numeric simulations.

# LISTA DE FIGURAS

1.1	Sistema de suspensão veicular mecânica - fonte: Rao (2004)	2
1.2	Modelo físico (a) e detalhe do transdutor de energia mecânica em elétrica do sistema de suspensão eletromecânica (b)	4
2.1	Modelo físico (a) e detalhe do transdutor de energia mecânica em elétrica	
	do sistema de suspensão eletromecânica (b)	7
3.1	Histórico de deslocamento (a) e plano de fase com seção de Poincaré (b) do subsistema mecânico. Histórico de deslocamento (c) e plano de fase	
	com seção de Poincaré (d) do sistema eletromecânico.	13
3.2	Regime estacionário dos históricos de deslocamento (a), velocidade (b) e	
	aceleração (c) do sistema mecânico	13
3.3	Regime estacionário dos históricos de deslocamento (a), velocidade (b) e	
	aceleração (c) do sistema eletromecânico	14
3.4	Regime estacionário dos históricos de carga (a) e corrente (b) do sistema	
	eletromecânico.	14
3.5	Históricos de energia cinética e potencial (a), magnética e elétrica (b) e	
	energia dissipada (c)	14
3.6	Variação da aceleração e energia elétrica em função da massa (a) e do	
~ -	coeficiente de rigidez (b) do sistema eletromecânico	15
3.7	Variação da aceleração e energia elétrica em função da indutância (a) e	1.0
	da capacitância (b) do sistema eletromecânico	16
3.8	Variação da aceleração e energia elétrica em função da resistência elétrica	
	do sistema eletromecânico	17
3.9	Variação da aceleração e energia elétrica em função do campo magnético	
	(a) e do comprimento de bobina do sistema eletromecânico (b)	17
3.10	Variação da aceleração e energia elétrica em função frequência de excita-	
	ção do sistema eletromecânico	18

4.1	Valores máximos (a), mínimos (b) e médios (c) de aptidão em função do	
	número de gerações, e distribuição dos valores usados para cada parâme-	
	tro (d) utilizando 16 indivíduos e probabilidade de mutação 1%	22
4.2	Valores máximos (a), mínimos (b) e médios (c) de aptidão em função do	
	número de gerações, e distribuição dos valores usados para cada parâme-	
	tro (d) utilizando 56 indivíduos e probabilidade de mutação 1%. $\ldots$ .	23
4.3	Valores máximos (a), mínimos (b) e médios (c) de aptidão em função do	
	número de gerações, e distribuição dos valores usados para cada parâme-	
	tro (d) utilizando 96 indivíduos e probabilidade de mutação 1%	23
4.4	Valores máximos da função aptidão em função do tamanho da população.	24
4.5	Valores máximos (a), mínimos (b) e médios (c) de aptidão em função do	
	número de gerações, e distribuição dos valores usados para cada parâme-	
	tro (d) utilizando 16 indivíduos e probabilidade de mutação 5%	25
4.6	Valores máximos (a), mínimos (b) e médios (c) de aptidão em função do	
	número de gerações, e distribuição dos valores usados para cada parâme-	
	tro (d) utilizando 56 indivíduos e probabilidade de mutação 5%	25
4.7	Valores máximos (a), mínimos (b) e médios (c) de aptidão em função do	
	número de gerações, e distribuição dos valores usados para cada parâme-	
	tro (d) utilizando 96 indivíduos e probabilidade de mutação 5%	26
4.8	Valores máximos da função aptidão em função do tamanho da população.	26
4.9	Valores máximos (a), mínimos (b) e médios (c) de aptidão em função do	
	número de gerações, e distribuição dos valores usados para cada parâme-	
	tro (d) utilizando 16 indivíduos e probabilidade de mutação 20%.	27
4.10	Valores máximos (a), mínimos (b) e médios (c) de aptidão em função do	
	número de gerações, e distribuição dos valores usados para cada parâme-	
	tro (d) utilizando 56 indivíduos e probabilidade de mutação 20%	28
4.11	Valores máximos (a), mínimos (b) e médios (c) de aptidão em função do	
	número de gerações, e distribuição dos valores usados para cada parâme-	
	tro (d) utilizando 96 indivíduos e probabilidade de mutação 20%.	28
4.12	Valores máximos da função aptidão em função do tamanho da população.	29
4.13	Valores máximos (a), mínimos (b) e médios (c) de aptidão em função do	
	número de gerações, e distribuição dos valores usados para cada parâme-	
	tro (d) utilizando 16 indivíduos, probabilidade de mutação 5% e tamanho	
	da perturbação de 10%.	30
	T	20

4.14	Valores máximos (a), mínimos (b) e médios (c) de aptidão em função do	
	número de gerações, e distribuição dos valores usados para cada parâme-	
	tro (d) utilizando 56 indivíduos, probabilidade de mutação 5% e tamanho	
	da perturbação de 10%.	30
4.15	Valores máximos (a), mínimos (b) e médios (c) de aptidão em função do	
	número de gerações, e distribuição dos valores usados para cada parâme-	
	tro (d) utilizando 96 indivíduos, probabilidade de mutação 5% e tamanho	
	da perturbação de 10%. $\ldots$	31
4.16	Valores máximos da função aptidão em função do tamanho da população.	31
4.17	Valores máximos (a), mínimos (b) e médios (c) de aptidão em função do	
	número de gerações, e distribuição dos valores usados para cada parâme-	
	tro (d) utilizando 16 indivíduos, probabilidade de mutação 5% e tamanho	
	da perturbação de 20%. $\ldots$ $\ldots$ $\ldots$ $\ldots$ $\ldots$	32
4.18	Valores máximos (a), mínimos (b) e médios (c) de aptidão em função do	
	número de gerações, e distribuição dos valores usados para cada parâme-	
	tro (d) utilizando 56 indivíduos, probabilidade de mutação 5% e tamanho	
	da perturbação de 20%	33
4.19	Valores máximos (a), mínimos (b) e médios (c) de aptidão em função do	
	número de gerações, e distribuição dos valores usados para cada parâme-	
	tro (d) utilizando 96 indivíduos, probabilidade de mutação 5% e tamanho	
	da perturbação de 20%. $\ldots$	33
4.20	Valores máximos da função aptidão em função do tamanho da população.	34
4.21	Valores máximos (a), mínimos (b) e médios (c) de aptidão em função do	
	número de gerações, e distribuição dos valores usados para cada parâme-	
	tro (d) utilizando 16 indivíduos, probabilidade de mutação 5% e tamanho	
	da perturbação de 40%. $\ldots$	35
4.22	Valores máximos (a), mínimos (b) e médios (c) de aptidão em função do	
	número de gerações, e distribuição dos valores usados para cada parâme-	
	tro (d) utilizando 56 indivíduos, probabilidade de mutação 5% e tamanho	
	da perturbação de 40%. $\ldots$	35
4.23	Valores máximos (a), mínimos (b) e médios (c) de aptidão em função do	
	número de gerações, e distribuição dos valores usados para cada parâme-	
	tro (d) utilizando 96 indivíduos, probabilidade de mutação 5% e tamanho	
	da perturbação de 40%. $\ldots$	36
4.24	Valores máximos da função aptidão em função do tamanho da população.	36

4.25	Valores máximos (a), mínimos (b) e médios (c) de aptidão em função do	
	número de gerações, e distribuição dos valores usados para cada parâme-	
	tro (d) utilizando 16 indivíduos e probabilidade de mutação 5%	38

4.26 Valores máximos (a), mínimos (b) e médios (c) de aptidão em função do número de gerações, e distribuição dos valores usados para cada parâmetro (d) utilizando 56 indivíduos e probabilidade de mutação 5%.

4.27 Valores máximos (a), mínimos (b) e médios (c) de aptidão em função do número de gerações, e distribuição dos valores usados para cada parâmetro (d) utilizando 96 indivíduos e probabilidade de mutação 5%.

4.28 Valores máximos da função aptidão em função do tamanho da população. 39

4.29 Valores máximos (a), mínimos (b) e médios (c) de aptidão em função do número de gerações, e distribuição dos valores usados para cada parâmetro (d) utilizando 16 indivíduos e probabilidade de mutação 20%.
40

4.30 Valores máximos (a), mínimos (b) e médios (c) de aptidão em função do número de gerações, e distribuição dos valores usados para cada parâmetro (d) utilizando 56 indivíduos e probabilidade de mutação 20%.

4.31 Valores máximos (a), mínimos (b) e médios (c) de aptidão em função do número de gerações, e distribuição dos valores usados para cada parâmetro (d) utilizando 96 indivíduos e probabilidade de mutação 20%.

 $4.32\,$ Valores máximos da função aptidão em função do tamanho da população. $\,42\,$ 

4.33 Valores máximos (a), mínimos (b) e médios (c) de aptidão em função do número de gerações, e distribuição dos valores usados para cada parâmetro (d) utilizando 16 indivíduos, probabilidade de mutação 5% e tamanho da perturbação de 10%.
43

4.34 Valores máximos (a), mínimos (b) e médios (c) de aptidão em função do número de gerações, e distribuição dos valores usados para cada parâmetro (d) utilizando 56 indivíduos, probabilidade de mutação 5% e tamanho da perturbação de 10%.
43

4.35 Valores máximos (a), mínimos (b) e médios (c) de aptidão em função do número de gerações, e distribuição dos valores usados para cada parâmetro (d) utilizando 96 indivíduos, probabilidade de mutação 5% e tamanho da perturbação de 10%.
44

4.38	Valores máximos (a), mínimos (b) e médios (c) de aptidão em função do	
	número de gerações, e distribuição dos valores usados para cada parâme-	
	tro (d) utilizando 56 indivíduos, probabilidade de mutação 5% e tamanho	
	da perturbação de 20%. $\ldots$	46
4.39	Valores máximos (a), mínimos (b) e médios (c) de aptidão em função do	
	número de gerações, e distribuição dos valores usados para cada parâme-	
	tro (d) utilizando 96 indivíduos, probabilidade de mutação 5% e tamanho	
	da perturbação de 20%. $\ldots$	46
4.40	Valores máximos da função aptidão em função do tamanho da população.	47
4.41	Valores de aceleração e energia das rodadas $R_1(a)$ a $R_{10}(j)$ em função do	
	peso $p_1$	50
4.42	Valores de aceleração e energia das rodadas $R_1(a)$ a $R_{10}(j)$ em função do	
	peso $p_1$	51
4.43	Diagrama de frente de pareto dos valores de todas as rodadas $R_1$ a $R_{10}$	
	da energia elétrica em função da aceleração vertical utilizando $p_1=0,5.$ .	51
4.44	Histórico de deslocamento (a), aceleração (b) e carga (c) utilizando os	
	parâmetros originais do sistema	55
4.45	Histórico de deslocamento (a), aceleração (b) e carga (c) utilizando os	
	parâmetros da otimização da aceleração do sistema	55
4.46	Histórico de deslocamento (a), aceleração (b) e carga (c) utilizando os	
	parâmetros da otimização da energia elétrica do sistema	56
4.47	Histórico de deslocamento (a), aceleração (b) e carga (c) utilizando os	
	parâmetros da otimização da função ponderada do sistema	56

# LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Descrição
b	Coeficiente de amortecimento viscoso do subsistema mecânico
В	Campo magnético
C	Capacitância do subsistema elétrico
$e_l$	Componente do subsistema elétrico
$E_d$	Energia dissipada
$E_e$	Energia elétrica
$E_m$	Energia magnética
F	Função aptidão
$F_b$	Força de Laplace
$F_e$	Tensão de Lenz
k	Coeficiente de rigidez do subsistema mecânico
l	Comprimento das espiras da bobina
L	Indutância do subsistema elétrico
$L_{elec}$	Lagrangeano do subsistema elétrico
$L_{mec}$	Lagrangeano do subsistema mecânico
m	Massa do subsistema mecânico
$O_1$	Função objetivo da mínima aceleração
$O_2$	Função objetivo da máxima energia elétrica
$ON_1$	Função objetivo da mínima aceleração normalizada
$ON_2$	Função objetivo da máxima energia elétrica normalizada
$p_1$	Peso da função objetivo da mínima aceleração
$p_2$	Peso da função objetivo da máxima energia elétrica
q	Carga do subsistema elétrico
$\dot{q}$	Corrente do subsistema elétrico
Q	Amplitude da carga elétrica
$Q_e$	Forças não conservativas do subsistema elétrico
$Q_m$	Forças não conservativas do subsistema mecânico

R	Resistência do subsistema elétrico
t	Tempo
T	Energia cinética
V	Energia potencial
$y_r$	Deslocamento vertical da base
$\dot{y}_r$	Velocidade vertical da base
$y_s$	Deslocamento vertical da massa suspensa
$\dot{y}_s$	Velocidade vertical da massa suspensa
$\ddot{y}_s$	Aceleração vertical da massa suspensa
Y	Amplitude de deslocamento da base
ω	Frequência de excitação do sistema

# Sumário

R	esum	10			
Abstract					
Li	sta d	le Figuras			
Li	sta d	le Símbolos			
1	1 Introdução 1				
	1.1	Revisão Bibliográfica	2		
		1.1.1 Suspensão Eletromecânica	3		
		1.1.2 Otimização por Algoritmo Genético	4		
	1.2	Objetivos	6		
<b>2</b>	Eqι	ações Dinâmicas da Suspensão Eletromecânica	7		
	2.1	Tipos de Energia	8		
	2.2	Método de Lagrange	8		
	2.3	Subsistema Mecânico	9		
	2.4	Subsistema Elétrico	10		
	2.5	Equações do Transdutor	10		
	2.6	Solução Analítica do Sistema	11		
3	Cor	nportamento Dinâmico	12		
	3.1	Sensibilidade à Variação da Massa e Coeficiente de Rigidez $\ .\ .\ .\ .$	15		
	3.2	Sensibilidade à Variação da Indutância e Capacitância	16		
	3.3	Sensibilidade à Variação da Resistência Elétrica	16		
	3.4	Sensibilidade à Variação do Campo Magnético e Comprimento de Bobina	16		
	3.5	Sensibilidade à Variação da Frequência de Excitação	18		

<b>4</b>	Oti	Otimização de Aceleração e Energia Elétrica Utilizando Algoritmo Ge-				
	néti	nético 2				
	4.1	1 Otimização da Aceleração				
		4.1.1	Operador de Mutação Uniforme, Probabilidade de Mutação $1\%$	22		
		4.1.2	Operador de Mutação Uniforme, Probabilidade de Mutação $5\%$	24		
		4.1.3	Operador de Mutação Uniforme, Probabilidade de Mutação $20\%$ .	26		
		4.1.4	Operador de Mutação Perturbação, Tamanho de Perturbação $10\%$	29		
		4.1.5	Operador de Mutação Perturbação, Tamanho de Perturbação $20\%$	31		
		4.1.6	Operador de Mutação Perturbação, Tamanho de Perturbação $40\%$	34		
	4.2	.2 Otimização da Energia Elétrica				
		4.2.1	Operador de Mutação Uniforme, Probabilidade de Mutação $5\%$ $$ .	37		
		4.2.2	Operador de Mutação Uniforme, Probabilidade de Mutação $20\%$ .	39		
		4.2.3	Operador de Mutação Perturbação, Tamanho de Perturbação $10\%$	42		
		4.2.4	Operador de Mutação Perturbação, Tamanho de Perturbação $20\%$	44		
	4.3 Otimização Utilizando Função Ponderada		zação Utilizando Função Ponderada	48		
_	C	. ~				
5	Cor	iclusão		57		
-				~ ~		

Referências Bibliográficas

# Capítulo 1

# Introdução

O sistema de suspensão de veículos automotivos tem grande importância no desempenho do automóvel, pois é responsável por atenuar vibrações causadas por desníveis ou imperfeições do pavimento, fazendo com que os passageiros do veículo tenham mais conforto e segurança. Atualmente os condutores permanecem muito tempo conduzindo seus veículos, potencializando-os a sofrer com problemas ao longo do tempo.

O nível de conforto dos passageiros depende de fatores como amplitude, frequência, direção, localização e tempo de exposição a vibrações as quais o passageiro está sujeito (BOILEAU; RAKHEJA, 1990). Vibrações severas, além de ser causa de desconforto, podem ser causa de distúrbios ocupacionais (BOUAZARA; RICHARD; RAKHEJA, 2006).

Os métodos mais comuns usados mundialmente para medicões de vibrações que afetam seres humanos são os descritos nas normas ISO 2631-1, BS 6841, VDI 2057 e o método da potência média absorvida (AAP) (ELS et al., 2007). Estes métodos se baseiam em geral nas acelerações percebidas pelo passageiro para atingir estes requisitos.

O projeto de suspensões veiculares pode ser resumido em selecionar as características dos elementos da suspensão para que o comportamento dinâmico atenda os requisitos de estabilidade e conforto. Em um sistema mecânico usual, as características de rigidez e amortecimento da suspensão são ajustados para atingir esses requisistos.

Neste estudo, propõe-se eliminar o amortecedor viscoso convencional utilizando um sistema eletromecânico. Uma vantagem é a possibilidade de reaproveitamento da energia vibratória em forma de energia elétrica em outros sistemas do veículo. No sistema mecânico, essa energia é desperdiçada. Outra vantagem é a relativa facilidade de ajuste e controle dos parâmetros do subsistema elétrico.

Para atender os requisitos de conforto e reaproveitamento de energia, é necessário um procedimento de otimização dos parâmetros do sistema. Neste trabalho, um algoritmo

genético é utilizado para essa otimização, pois trata-se de um algoritmo robusto que possibilita a utilização de vários objetivos, além de ser eficaz em sistemas com grande número de parâmetros, como neste caso.

Algoritmos genéticos são um método de otimização moderno originado no princípio da lei da evolução de Darwin, onde o indivíduo mais apto tem mais chance de sobreviver (RAO, 2009). Neste método, diversos conjuntos de parâmetros são recombinados através da aplicação de operadores genéticos iterativamente, até que se identifique o conjunto que proporciona a resposta ótima.

## 1.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os sistemas de suspensão veiculares são projetados visando garantir o isolamento dos passageiros quanto as perturbações externas geradas devido as imperfeições e saliências no pavimento, bem como permitir que o condutor tenha segurança e boa estabilidade do veículo.

Ao iniciar um projeto de suspensão, deve-se selecionar valores dos coeficientes de rigidez e amortecimento para que se obtenha um comportamento desejado. Sistemas de suspensão passiva possuem elementos com características constantes e não necessitam de uma fonte de energia externa (SILVEIRA; PONTES JUNIOR; BALTHAZAR, 2014). São os sistemas mais comuns utilizados em veículos de passageiros. A energia vibratória é dissipada na forma de calor nos amortecedores. O modelo físico descrito por Rao (2004) representa o sistema de suspensão de um veículo em movimento em uma estrada irregular (Fig. 1.1).



Figura 1.1: Sistema de suspensão veicular mecânica - fonte: Rao (2004).

Sistemas de suspensão semi-ativa possuem elementos com características que são ajustáveis com o tempo. Um exemplo são sistemas com fluido magnetoreológico, os quais podem ser controlados por meio da variação da intensidade de um campo magnético. Sistemas de suspensão ativa possuem atuadores que aplicam forças diretamente na estrutura.

#### 1.1.1 SUSPENSÃO ELETROMECÂNICA

O sistema de suspensão eletromecânica por assim ser chamado, consiste na união dos subsistemas mecânico e elétrico. Estes são compostos por um transdutor de energia, responsável por relacionar as energias mecânica e elétrica.

Em um sistema de amortecimento veicular comum, os amortecedores viscosos dissipam energia em forma de calor, ou seja, perde-se energia para o ambiente. A implementação de um sistema de recuperação de energia possibilita que parte desta energia seja reaproveitada.

Portanto, amortecedores de vibração, incluindo amortecedores automotivos e ferroviários, estão entre as várias possibilidades de aplicação de dispositivos eletromecânicos. Estes dispositivos apresentam vantagens em comparação ao amortecedor viscoso convencional, como maior facilidade de aplicação de um controle ativo e de ajuste de parâmetros, absorção em maior faixa de frequências, e possibilidade de recuperação de energia do sistema (AMATI; FESTINI; TONOLI, 2011; TONOLI et al., 2013). A quantidade de energia que pode ser recuperada é sempre menor do que a dissipada pelo sistema mecânico (STEPHEN, 2006). Além disso, quando o dispositivo encontra-se em ressonância, a recuperação de energia atinge seu grau máximo (RENNO; DAQAQ; INMAN, 2009).

Alguns sistemas de suspensão ativa e semi-ativa estão disponíveis comercialmente e são usados pela indústria automobilística. Considerações de peso, consumo, espaço e custo impedem que estes sistemas sejam amplamente utilizados em veículos de passageiros. O sistema eletromagnético pode também ser utilizado numa suspensão semi-ativa para um veículo, com o controle a ser realizado através dos componentes elétricos do dispositivo, facilitando sua implementação.

Alguns sistemas de suspensão eletromagnéticos experimentais já foram construídos. Sistemas utilizando motores rotativos e conversão de movimento linear em angular mostraram uma boa relação entre energia recuperada e peso (AMATI; FESTINI; TONOLI, 2011; TONOLI et al., 2013). O uso de controle ativo no sistema de suspensão mostra ser possível redução considerável de vibrações com balanço positivo de energia no sistema (KAWAMOTO et al., 2007). O compromisso entre energia recuperada, conforto aos passageiros e estabilidade do veículo depende do tipo de pavimento sobre o qual o veículo trafega, e algoritmos de controle devem ser desenvolvidos para otimizar o comportamento dinâmico em cada situação (ZUO; ZHANG, 2013).

Neste trabalho será estudado a viabilidade de aplicação de uma suspensão eletromecânica veicular. Para isso emprega-se um modelo de um quarto de carro convencional adicionado de um transdutor eletromagnético (Fig. 1.2).



Figura 1.2: Modelo físico (a) e detalhe do transdutor de energia mecânica em elétrica do sistema de suspensão eletromecânica (b).

O modelo apresentado na Fig. 1.2(a) é composto pelo subsistema mecânico, onde m e k representam os valores de massa e coeficiente de rigidez respectivamente. Na mesma figura, pode-se ver os deslocamentos de base  $y_r$  e da massa suspensa  $y_s$  e também o componente  $e_l$  que representa o transdutor de energia.

A Fig. 1.2(b) apresenta com maiores detalhes o transdutor, que consiste em uma bobina elétrica imersa em um campo eletromagnético. Os componentes R,  $C \in L$ , representam resistência, capacitância e indutância do subsistema elétrico (PREUMONT, 2006).

#### 1.1.2 Otimização por Algoritmo Genético

Baseado na teoria de evolução e sobrevivência de Darwin, os algoritmos genéticos são técnicas computacionais com o objetivo de encontrar soluções ótimas para um sistema. Algoritmos genéticos têm sido usados em diversas aplicações em engenharia (RAO, 2009). Eles posssibilitam encontrar soluções ótimas para problemas de elevada dimensão e com múltiplos objetivos (BAUMAL; MCPHEE; CALAMAI, 1998).

Os algoritmos genéticos recebem esse nome por serem baseados nos princípios da genética natural, como seleção, reprodução, cruzamento e mutação. A analogia geralmente usada é que um indivíduo representa uma solução, ou um conjunto de parâmetros de um sistema de engenharia. Os valores dos parâmetros constituem seu código genético. Dentro do processo de otimização por algoritmos genéticos, seleciona-se um grupo inicial de indivíduos. Cada indivíduo representa um conjunto de parâmetros, que por sua vez são uma possível solução para o problema. Os valores dos parâmetros são delimitados por um espaço de busca. Cada indivíduo tem sua aptidão avaliada. A função aptidão é definida segundo as funções objetivo do problema.

A partir da população inicial, um processo iterativo de recombinação dos indivíduos é feito seguindo ideias de genética natural, utilizando operadores de seleção, recombinação e mutação (COLEY, 1999). Em cada iteração, indivíduos são selecionados e passam por operações de recombinação e mutação, gerando novos indivíduos. Em cada nova geração da população, a aptidão dos indivíduos é avaliada, e eventualmente a população converge para o indivíduo ótimo.

O operador de seleção pode utilizar diferentes métodos, como roleta, torneio, ranking ou truncamento, dentre outros (GEN; CHENG, 2000; RAO, 2009). O método de roleta seleciona um indivíduo com probabilidade proporcional ao valor de sua aptidão, proporcionando a indivíduos mais aptos a terem maior probabilidade de reprodução. O método de torneio avalia indivíduos em grupos, e o vencedor de grupo passa à fase seguinte, até se obter o número desejado de indivíduos. Os métodos de ranking e truncamento selecionam os indivíduos deterministicamente a partir dos valores de aptidão da população. Deve-se levar em consideração que ao utilizar métodos probabilísticos para seleção, o algoritmo genético possibilita uma maior diversidade de características dos indivíduos das gerações seguintes.

Após o processo de seleção é feita a recombinação. Este processo é responsável pela exploração do espaço de busca, utilizando combinações diferentes dos valores dos parâmetros para encontrar a solução do sistema.

O operador de mutação é geralmente o último a ser aplicado em um algoritmo genético. O seu objetivo é fazer com que características dos indivíduos possam ser alteradas pontualmente, garantindo uma certa diversidade genética. Diversos métodos podem ser usados para mutação, com a seleção do gene a sofrer mutação sendo definida por distribuição uniforme, distribuição normal ou determinística, único ou vários pontos de mutação, mutação conjugada, dentre outros (COLEY, 1999).

### 1.2 Objetivos

O objetivo deste projeto é analisar o desempenho de um sistema de suspensão eletromecânica para veículos, com a finalidade de maximizar o conforto aos passageiros, e viabilizar a recuperação de energia elétrica armazenada no subsistema elétrico. Esse objetivo pode ser dividido em três partes:

- Analisar a resposta dinâmica de um sistema de suspensão eletromecânico utilizando um modelo de um quarto de carro e comparar com as respostas de sistemas de suspensão mecânica.
- Identificar a influência de todos os parâmetros mecânicos e elétricos na resposta do sistema.
- Aplicar um algoritmo de otimização multi-objetivo para encontrar parâmetros ótimos que garantam uma relação de compromisso de melhor conforto para os passageiros, ao mesmo tempo maiores valores da energia elétrica armazenada no subsistema elétrico.

# Capítulo 2

# Equações Dinâmicas da Suspensão Eletromecânica

Neste capítulo será mostrado como foram obtidas as equações dinâmicas do sistema utilizando o método de Lagrange conforme descrito por (PREUMONT, 2006). Como mencionado no capítulo 1, o sistema é composto por dois subsistemas: mecânico e elétrico. Os subsistemas são relacionados por meio de um transdutor, conforme visto na Fig. 2.1. Para a aplicação do método de Lagrange é necessário deduzir as equações de energia cinética, potencial, magnética, elétrica e dissipada conforme será visto nas próximas seções.



Figura 2.1: Modelo físico (a) e detalhe do transdutor de energia mecânica em elétrica do sistema de suspensão eletromecânica (b).

### 2.1 TIPOS DE ENERGIA

A energia cinética T está relacionada com a velocidade de deslocamento vertical da massa do sistema e pode ser calculada por:

$$T = \frac{m\dot{y}_s^2}{2} \tag{2.1}$$

A energia potencial V é referente a força elástica exercida pelo componente de rigidez do sistema. A equação pode ser escrita como:

$$V = \frac{ky_s^2}{2} \tag{2.2}$$

A energia elétrica  $E_e$  está relacionada com a carga elétrica e a capacitância do subsistema elétrico.

$$E_e = \frac{Cq^2}{2} \tag{2.3}$$

A energia magnética  $E_m$  é referente a corrente elétrica e a indutância do subsistema elétrico.

$$E_m = \frac{L\dot{q}^2}{2} \tag{2.4}$$

A energia dissipada  $E_d$  está relacionada com a energia elétrica transformada em energia térmica por efeito Joule devido a resistência elétrica do subsistema elétrico.

$$E_d = \frac{R\dot{q}^2}{2} \tag{2.5}$$

#### 2.2 MÉTODO DE LAGRANGE

Utilizando as equações dos tipos de energias, tem-se que o Lagrangeano dos subsistemas mecânico e elétrico são dados pela Eq. 2.6 (MEIROVITCH, 2010). As equações são obtidas utilizando como coordenadas generalizadas o deslocamento  $y_s$  e a carga elétrica q.

$$L_{mec} = T - V \qquad \qquad L_{elec} = E_m - E_e \qquad (2.6)$$

substituindo as equações dos tipos de energias Eq.2.1, Eq.2.2, Eq.2.4 e Eq.2.3 na Eq.2.6 tem-se:

$$L_{mec} = \frac{m\dot{y}_s^2}{2} - \frac{ky_s^2}{2} \qquad \qquad L_{elec} = \frac{L\dot{q}^2}{2} - \frac{Cq^2}{2} \qquad (2.7)$$

aplicando a equação de Euler-Lagrange define-se as equações dinâmicas do sistema, conforme a Eq.2.8.

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L_{mec}}{\partial \dot{y}_s} \right) - \frac{\partial L_{mec}}{\partial y_s} = Q_m \qquad \qquad \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L_{elec}}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial L_{elec}}{\partial q} = Q_e \qquad (2.8)$$

 $Q_m$  representa as forças não conservativas do subsistema mecânico e  $Q_e$  do subsistema elétrico. Substituindo as expressões dos tipos de energias e derivando os termos da equação, resultam em:

$$m\ddot{y}_s + ky_s = Q_m \qquad \qquad L\ddot{q} + R\dot{q} + \frac{q}{C} = Q_e \qquad (2.9)$$

## 2.3 Subsistema Mecânico

A equação do subsistema mecânico é escrita considerando o termo do deslocamento da base  $y_r$  e de  $F_b$  na Eq. 2.9.

$$m\ddot{y}_s + ky_s = ky_r + F_b \tag{2.10}$$

m é a massa, k o coeficiente de rigidez,  $y_s$  o deslocamento vertical do bloco,  $y_r$  o deslocamento da base,  $F_b$  é a força de Laplace e ponto denota derivada em relação ao tempo.

## 2.4 Subsistema Elétrico

Analogamente ao subsistema mecânico, o elétrico pode ser escrito alterando os parâmetros mecânicos por parâmetros elétricos equivalentes (PREUMONT, 2006). Considerando a massa equivalente à indutância, o coeficiente de amortecimento à resistência, o coeficiente de rigidez pelo inverso da capacitância e a força de excitação pela tensão elétrica. A força não conservativa do subsistema elétrico  $F_e$  é a tensão de Lenz:

$$L\ddot{q} + R\dot{q} + \frac{q}{C} + F_e = 0 \tag{2.11}$$

L é a indutância, R a resistência elétrica, e C a capacitância do subsistema, q é a carga elétrica,  $F_e$  é a tensão de Lenz e ponto denota a derivada em relação ao tempo.

#### 2.5 Equações do Transdutor

O transdutor neste estudo é uma bobina, responsável por relacionar o deslocamento do subsistema mecânico à corrente do subsistema elétrico. A força de Laplace  $(F_b)$  atua nas espiras conduzindo a corrente elétrica em uma região submetida ao campo magnético. A equação pode ser escrita por:

$$F_b = Bl\dot{q} \tag{2.12}$$

sendo  $F_b$  a força de Laplace, B o campo magnético, l o comprimento das espiras da bobina e  $\dot{q}$  a corrente elétrica.

A tensão de Lenz  $F_e$  é a diferença de potencial gerada ao aproximar o ímã da bobina das espiras submetidas a um campo magnético induzido. A equação pode ser definida por:

$$F_e = Bl(\dot{y}_s - \dot{y}_r) \tag{2.13}$$

utilizando as equações Eq. 2.12 e Eq. 2.13, as equações do sistema eletromecânico podem ser reescritas como:

$$m\ddot{y}_s + k(y_s - y_r) - Bl\dot{q} = 0 \tag{2.14}$$

$$L\ddot{q} + R\dot{q} + \frac{q}{C} + Bl(\dot{y}_s - \dot{y}_r) = 0$$
(2.15)

## 2.6 Solução Analítica do Sistema

A resposta analítica do sistema pode ser obtida assumindo a solução e o deslocamento de base como sendo funções harmônicas na forma:

$$y_s = Y e^{j\omega t}$$
  $q = Q e^{j\omega t}$   $y_r = X e^{j\omega t}$  (2.16)

Substituindo as Eq. 2.16 nas Eq. 2.14 e Eq. 2.15 resultam em:

$$-\omega^2 mY + kY - j\omega BlQ = kX \tag{2.17}$$

$$-\omega^2 LQ + j\omega RQ + \frac{1}{C} + j\omega BlY = j\omega BlX$$
(2.18)

Reescrevendo as equações na forma matricial, têm-se:

$$\begin{bmatrix} -\omega^2 m + k & -j\omega Bl \\ j\omega Bl & -\omega^2 L + j\omega R + \frac{1}{C} \end{bmatrix} \begin{cases} Y \\ Q \end{cases} = \begin{bmatrix} k \\ j\omega Bl \end{bmatrix} \begin{cases} X \\ 0 \end{cases}$$
(2.19)

Conforme demonstrado por Rao (2004), a solução para as amplitudes  $Y \in Q$  em regime estacionário pode ser obtida por:

$$\begin{cases} Y \\ Q \end{cases} = \begin{bmatrix} -\omega^2 m + k & -j\omega Bl \\ j\omega Bl & -\omega^2 L + j\omega R + \frac{1}{C} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} k \\ j\omega Bl \end{bmatrix} \begin{cases} X \\ 0 \end{cases}$$
(2.20)

No próximo capítulo é feita uma investigação do comportamento dinâmico do sistema, além disso, são analisadas as curvas de sensibilidade de cada parâmetro e como os mesmos influenciam em um sistema de suspensão eletromecânica.

# Capítulo 3

# Comportamento Dinâmico

Neste capítulo será analisada a resposta dinâmica do sistema de suspensão eletromecânica apresentado no capítulo 2, comparando com a resposta do sistema de suspensão mecânica. Além disso, será identificada a influência dos parâmetros mecânicos e elétricos na resposta do sistema.

Os parâmetros utilizados para a análise do sistema eletromecânico são: massa  $m = 1500 \ kg$ , coeficiente de rigidez  $k = 44000 \ N/m$ , coeficiente de amortecimento viscoso  $b = 0 \ Ns/m$ , indutância  $L = 0.76 \ H$ , capacitância  $C = 1500 \ \mu F$ , resistência  $R = 200 \ \Omega$ , campo magnético  $B = 2 \ T$ , comprimento das espiras da bobina  $l = 250 \ m$ , amplitude de deslocamento da base  $Y = 0.02 \ m$  e frequência de excitação  $\omega = 1 \ Hz$  (PONTES JUNIOR et al., 2015). Por se tratar de um sistema composto de equações lineares, qualquer não linearidade oriunda das características reais de uma suspensão eletromecânica, como rigidez assimétrica, temperatura e etc, são desprezadas. Essa condição tem o intuito de simplificar a abordagem ao estudo.

Para a comparação com um sistema mecânico, foi utilizado um sistema com b = 2000 Ns/m, sem a presença do subsistema elétrico, mantendo-se os valores de massa, rigidez, amplitude e frequência de excitação.

A Fig. 3.1 apresenta os históricos de deslocamento vertical e planos de fase dos dois sistemas. As partes da Fig. 3.1(a) e Fig. 3.1(c) apresentam os históricos de deslocamento vertical, e as partes 3.1(b) e 3.1(d) apresentam os planos de fase com respectivas seções de Poincaré em vermelho. Pode-se notar que a amplitude, frequência e periodicidade da resposta são semelhantes entre os sistemas, o que significa que o sistema eletromecânico pode substituir o amortecimento viscoso.

A visualização dos regimes estacionários dos históricos de deslocamento, velocidade e aceleração dos sistemas mecânico e eletromecânico são mostrados nas Figs. 3.2 e 3.3, respectivamente. Comparando os históricos apresentados, para o sistema mecânico os



Figura 3.1: Histórico de deslocamento (a) e plano de fase com seção de Poincaré (b) do subsistema mecânico. Histórico de deslocamento (c) e plano de fase com seção de Poincaré (d) do sistema eletromecânico.

máximos valores encontrados de deslocamento, velocidade e aceleração são: 0,0463 m, 0,291 m/s e 1,83  $m/s^2$  respectivamente. Para o sistema eletromecânico, o máximos valores vistos são: 0,0432 m, 0,271 m/s e 1,69  $m/s^2$ .



Figura 3.2: Regime estacionário dos históricos de deslocamento (a), velocidade (b) e aceleração (c) do sistema mecânico.

A Fig. 3.4 apresenta a carga e corrente elétrica no sistema em função do tempo. Tem-se o valor máximo de carga elétrica de 0,135 C e de corrente de 0,862 A.

A Fig. 3.5 mostra os históricos de energia cinética, potencial, magnética, elétrica e



Figura 3.3: Regime estacionário dos históricos de deslocamento (a), velocidade (b) e aceleração (c) do sistema eletromecânico.



Figura 3.4: Regime estacionário dos históricos de carga (a) e corrente (b) do sistema eletromecânico.

dissipada do sistema. As amplitudes encontradas são: cinética e potencial 54,3 J e 40,7 J, magnética e elétrica 0,277 J e 6,23 J e dissipada 72,6 J.



Figura 3.5: Históricos de energia cinética e potencial (a), magnética e elétrica (b) e energia dissipada (c).

Nas próximas seções, as curvas de sensibilidade são geradas com o objetivo de identificar a influência dos parâmetros mecânicos e elétricos na resposta do sistema. Cada parâmetro é variado em uma ampla faixa de valores, mantendo os demais parâmetros fixos nos valores utilizados na seção anterior. Vale ressaltar que esta variação visa apenas compreender o comportamento do sistema e que os valores encontrados podem não representar uma suspensão real. Os valores de aceleração e energia elétrica em regime permanente são mostrados em função de cada parâmetro.

## 3.1 Sensibilidade à Variação da Massa e Coeficiente de Rigidez

A Fig. 3.6(a) apresenta as curvas de sensibilidade em função da massa entre 50 e 3000 kg. A amplitude de energia elétrica, a qual é o principal foco deste estudo, aumenta com a variação da massa até um pico próximo de 29 J, quando  $m = 1050 \ kg$ . A máxima aceleração apresentada é de aproximadamente 5  $m/s^2$ , também com  $m = 1050 \ kg$ . As curvas de sensibilidade em função do coeficiente de rigidez (Fig. 3.6(b)) foram tomadas entre 10000 e 80000 N/m. Pode-se notar que as curvas têm formato semelhante, com um pico de energia elétrica de 60 J para  $k = 65000 \ N/m$ .



Figura 3.6: Variação da aceleração e energia elétrica em função da massa (a) e do coeficiente de rigidez (b) do sistema eletromecânico.

## 3.2 Sensibilidade à Variação da Indutância e Capacitância

As curvas de sensibilidade em função da indutância e capacitância são vistas na Fig. 3.7. Os intervalos de indutância e capacitância utilizados são 0,3 a 1,2 H e 600 a 2400 muF. Pode-se verificar que a aceleração e a energia elétrica em ambas as curvas apresentam pouca alteração. Verifica-se também que a energia elétrica tende a diminuir com o aumento da capacitância.



Figura 3.7: Variação da aceleração e energia elétrica em função da indutância (a) e da capacitância (b) do sistema eletromecânico.

## 3.3 Sensibilidade à Variação da Resistência Elétrica

A Fig. 3.8 apresenta as curvas de sensibilidade em função da resistência elétrica entre 80 e 320  $\Omega$ . A aceleração apresenta um valor mínimo 1,08  $m/s^2$  para  $R = 80 \Omega$ . A energia elétrica tende a diminuir com o aumento da resistência elétrica.

## 3.4 Sensibilidade à Variação do Campo Magnético e Comprimento de Bobina

As curvas de sensibilidade em função do campo magnético e do comprimento de bobina são vistas na Fig. 3.9. O intervalos utilizados de variação do campo magnético e do com-



Figura 3.8: Variação da aceleração e energia elétrica em função da resistência elétrica do sistema eletromecânico.

primento de bobina são de 0,8 a 3,2 T e 100 a 400 m. Os valores de aceleração de ambas as curvas diminuem com o aumento dos valores de campo magnético e comprimento de bobina. Já as curvas de energia tendem a crescer com o aumento dos parâmetros. As máximas amplitudes de energia nas curvas de campo magnético e comprimento de bobina são: 8,43 J e 8,52 J respectivamente.



Figura 3.9: Variação da aceleração e energia elétrica em função do campo magnético (a) e do comprimento de bobina do sistema eletromecânico (b).

## 3.5 Sensibilidade à Variação da Frequência de Excitação

A Fig. 3.10 apresenta as curvas de sensibilidade em função da frequência de excitação entre 1 e 10 Hz. A curva apresenta um pico de 4,78  $m/s^2$  e 45,3 J para frequência de 0,83 Hz. Verifica-se que a amplitude de energia elétrica na frequência em 10 Hz é de 0,82 J.



Figura 3.10: Variação da aceleração e energia elétrica em função frequência de excitação do sistema eletromecânico.

O subsistema mecânico evidencia maior sensibilidade dos parâmetros do que os do subsistema elétrico, destacando-se a massa e coeficiente de rigidez. Os valores de energia elétrica tendem a crescer com o aumento da massa até atingir um pico quando a m =1050 kg. Após este pico, a amplitude de energia tende a diminuir. O mesmo ocorre na curva de sensibilidade do coeficiente de rigidez, onde o pico é alcançado para k =65000 N/m. Além disso, as curvas do subsistema evidenciam que o aumento da energia elétrica acompanha o aumento da aceleração.

No subsistema elétrico, a sensibilidade é menor, visto a menor mudança das respostas em função da variação dos parâmetros. As curvas de sensibilidade deste subsistema apresentam picos de energia elétrica e aceleração em regiões opostas, exceto a curva da capacitância que apresenta os picos em uma mesma região. Pode-se afirmar que a máxima aceleração e a máxima energia elétrica ocorrem quando o sistema estiver em ressonância.

Percebe-se que, para diversos parâmetros, a aceleração e a energia no sistema elétrico não atingem seus valores ótimos no mesmo ponto e também possuem tendências diferentes. Desta forma, no capítulo seguinte será utilizado um algoritmo genético com o
objetivo de encontrar os valores ótimos dos parâmetros para se obter mínima aceleração no subsistema mecânico e máxima energia no subsistema elétrico.

### Capítulo 4

### Otimização de Aceleração e Energia Elétrica Utilizando Algoritmo Genético

Neste capítulo será utilizado um algoritmo genético para encontrar os valores ótimos dos parâmetros do sistema eletromecânico, de forma a obter mínima aceleração no subsistema mecânico e máxima energia no subsistema elétrico. Além disso, alguns aspectos do algoritmo genético serão investigados com o propósito de definir sua aplicabilidade ao uso de otimização de sistemas dinâmicos.

O algoritmo genético utilizado neste capítulo segue os princípios básicos apresentados no capítulo 1, com operadores de seleção, recombinação e mutação sendo aplicados a uma população de indivíduos, cada um representando uma possível solução para o problema. Foi escolhida codificação por valores reais, visto que este é um dos tipos de codificação mais utilizado em problemas aplicados a sistemas de engenharia (COLEY, 1999). Desta forma, cada indivíduo possui 8 genes, cada um sendo um número real para os valores de  $m, k, b, R, L, C, B \in l$ . Os valores de amplitude e frequência de excitação foram fixos em 1 Hz = 0.02 m, respectivamente. O operador de seleção utiliza distribuição de probabilidade uniforme. O operador de recombinação gera dois indivíduos filhos para cada par de indivíduos selecionados, com recombinação em um ponto do código genético.

Dois operadores de mutação foram utilizados. Nos dois casos, a probabilidade de mutação indica a probabilidade de que um gene de um indivíduo sofra mutação. Caso haja mutação, o primeiro operador seleciona um novo valor para o gene a partir de uma distribuição uniforme dentro da faixa de valores possíveis. O segundo operador seleciona um novo valor a partir de uma perturbação do valor atual, utilizando distribuição normal em torno do valor atual limitada a um tamanho de perturbação.

Variou-se o tamanho da população e probabilidade de mutação, a fim de verificar qual combinação fornece resultados menos sensíveis a variações e perturbações.

Os parâmetros que o algoritmo deve retornar são a massa m, coeficiente de rigidez k, coeficiente de amortecimento b, indutância L, capacitância C, resistência R, campo magnético B e comprimento das espiras da bobina l.

O desempenho do algoritmo foi avaliado em função do tamanho da população e da probabilidade de mutação. Para realizar essa análise, seis casos foram utilizados. Nos três primeiros, utilizou-se o operador de mutação com distribuição uniforme, com probabilidade de mutação igual a 1%, 5% e 20%. Nos três últimos, utilizou-se operador de mutação com perturbação, com tamanho de perturbação igual a 10%, 20% e 40%, e probabilidade de mutação fixa em 5%.

Em cada um dos seis casos, os tamanhos de população utilizados foram 16, 24, 32, 40, 48, 56, 64, 72, 80, 88 e 96. Por questão de brevidade, somente as figuras referentes a população com 16, 56 e 96 indivíduos são mostradas em mais detalhes. Em todos os casos utilizou-se o máximo de 100 gerações.

Para cada caso, o algoritmo foi utilizado várias vezes, devido a aleatoridade na geração da primeira população. O espaço de busca de cada um dos parâmetros é o intervalo de valores que pode ser usado na otimização. O espaço de busca foi definido à partir dos valores mostrados por PONTES JUNIOR et al. (2015), estipulando-se uma variação de 40%. Desta forma as faixas para cada parâmetro são: m = 600 a 2400 kg, k = 17600 a 70400 N/m, R = 80 a 320  $\Omega$ , L = 0.304 a 1.216 H, C = 600 a 2400  $\mu F$ , B = 0.8 a 3.2 T e l = 100 a 400 m. São apresentados histogramas com a distribuição de uso de cada um dos parâmetros dentro do espaço de busca estabelecido dos parâmetros mostrados na sequência: massa, coeficiente de rigidez, coeficiente de amortecimento, resistência, indutância, capacitância, campo magnético e comprimento das espiras da bobina. Esta distribuição indica a exploração do espaço de busca.

#### 4.1 Otimização da Aceleração

A função aptidão é utilizada para indicar quais indivíduos fornecem as melhores soluções para o problema de otimização, e está relacionada com a função objetivo. Com relação a otimização da aceleração, apenas um objetivo é utilizado. Portanto, a função objetivo  $O_1$  e a função aptidão F são iguais.

$$F = O_1 = -\ddot{y}_s \tag{4.1}$$

## 4.1.1 Operador de Mutação Uniforme, Probabilidade de Mutação 1%

As Figs. 4.1, 4.2 e 4.3 mostram as curvas de máximo, mínimo e médio da função aptidão com probabilidade de mutação 1%, e 16, 56 e 96 indivíduos, respectivamente. Os tempos médios de processamento são: 0,501 s, 3,21 s e 8,13 s. Os valores máximos da função aptidão encontrados são: -0,072; -0,048; -0,049.



Figura 4.1: Valores máximos (a), mínimos (b) e médios (c) de aptidão em função do número de gerações, e distribuição dos valores usados para cada parâmetro (d) utilizando 16 indivíduos e probabilidade de mutação 1%.



Figura 4.2: Valores máximos (a), mínimos (b) e médios (c) de aptidão em função do número de gerações, e distribuição dos valores usados para cada parâmetro (d) utilizando 56 indivíduos e probabilidade de mutação 1%.



Figura 4.3: Valores máximos (a), mínimos (b) e médios (c) de aptidão em função do número de gerações, e distribuição dos valores usados para cada parâmetro (d) utilizando 96 indivíduos e probabilidade de mutação 1%.

A Fig. 4.4 mostra a curva dos máximos valores da função aptidão encontrados em função do tamanho da população.



Figura 4.4: Valores máximos da função aptidão em função do tamanho da população.

## 4.1.2 Operador de Mutação Uniforme, Probabilidade de Mutação 5%

As Figs. 4.5, 4.6 e 4.7 mostram as curvas de máximo, mínimo e média da função aptidão com probabilidade de mutação 5%, 16, 56 e 96 indivíduos, respectivamente. Os tempos médios de processamento são:  $0,487 \ s, 3,12 \ s$  e 7,78 s. Os valores máximos da função aptidão encontrados são: -0,054; -0,044; -0,044.



Figura 4.5: Valores máximos (a), mínimos (b) e médios (c) de aptidão em função do número de gerações, e distribuição dos valores usados para cada parâmetro (d) utilizando 16 indivíduos e probabilidade de mutação 5%.



Figura 4.6: Valores máximos (a), mínimos (b) e médios (c) de aptidão em função do número de gerações, e distribuição dos valores usados para cada parâmetro (d) utilizando 56 indivíduos e probabilidade de mutação 5%.



Figura 4.7: Valores máximos (a), mínimos (b) e médios (c) de aptidão em função do número de gerações, e distribuição dos valores usados para cada parâmetro (d) utilizando 96 indivíduos e probabilidade de mutação 5%.

A Fig. 4.8 mostra a curva de máximos valores da função aptidão encontrados em função do tamanho da população.



Figura 4.8: Valores máximos da função aptidão em função do tamanho da população.

## 4.1.3 Operador de Mutação Uniforme, Probabilidade de Mutação 20%

As Figs. 4.9, 4.10 e 4.11 mostram as curvas de máximo, mínimo e médio da função aptidão com probabilidade de mutação 20%, e 16, 56 e 96 indivíduos, respectivamente.

Os tempos médios de processamento são:  $0,487 \ s, \ 3,08 \ s$  e 7,74 s. Os valores máximos da função aptidão encontrados são: -0,056; -0,051; -0,050.



Figura 4.9: Valores máximos (a), mínimos (b) e médios (c) de aptidão em função do número de gerações, e distribuição dos valores usados para cada parâmetro (d) utilizando 16 indivíduos e probabilidade de mutação 20%.



Figura 4.10: Valores máximos (a), mínimos (b) e médios (c) de aptidão em função do número de gerações, e distribuição dos valores usados para cada parâmetro (d) utilizando 56 indivíduos e probabilidade de mutação 20%.



Figura 4.11: Valores máximos (a), mínimos (b) e médios (c) de aptidão em função do número de gerações, e distribuição dos valores usados para cada parâmetro (d) utilizando 96 indivíduos e probabilidade de mutação 20%.

A Fig. 4.12 mostra a curva dos máximos valores da função aptidão encontrados em função do tamanho da população.



Figura 4.12: Valores máximos da função aptidão em função do tamanho da população.

Observando estes resultados, o tempo de processamento do algoritmo para os casos anteriores varia aproximadamente de 0,4 a 8 s. O valor máximo da função aptidão encontrada é de -0,044 para probabilidade de mutação de 5% e tamanho da população de 96 indivíduos. Os parâmetros encontrados para esta melhor condição da função aptidão são:  $m = 2388,9 \ kg, \ k = 17793 \ N/m, \ b = 0 \ Ns/m, \ L = 0.5982 \ H, \ C = 604,3 \ \mu F, \ R = 81,53 \ \Omega, \ B = 2,849 \ T \ e \ l = 231,87 \ m.$ 

#### 4.1.4 Operador de Mutação Perturbação, Tamanho de Perturbação 10%

As Figs. 4.13, 4.14 e 4.15 mostram as curvas de máximo, mínimo e médio da função aptidão com tamanho de perturbação 10%, e 16, 56 e 96 indivíduos, respectivamente. Os tempos médios de processamento são: 0,509 s, 3,21 s e 8,11 s. Os valores máximos da função aptidão encontrados são: -0,044; -0,044; -0,043.



Figura 4.13: Valores máximos (a), mínimos (b) e médios (c) de aptidão em função do número de gerações, e distribuição dos valores usados para cada parâmetro (d) utilizando 16 indivíduos, probabilidade de mutação 5% e tamanho da perturbação de 10%.



Figura 4.14: Valores máximos (a), mínimos (b) e médios (c) de aptidão em função do número de gerações, e distribuição dos valores usados para cada parâmetro (d) utilizando 56 indivíduos, probabilidade de mutação 5% e tamanho da perturbação de 10%.



Figura 4.15: Valores máximos (a), mínimos (b) e médios (c) de aptidão em função do número de gerações, e distribuição dos valores usados para cada parâmetro (d) utilizando 96 indivíduos, probabilidade de mutação 5% e tamanho da perturbação de 10%.

A Fig. 4.16 mostra a curva dos máximos valores da função aptidão encontrados em função do tamanho da população.



Figura 4.16: Valores máximos da função aptidão em função do tamanho da população.

## 4.1.5 Operador de Mutação Perturbação, Tamanho de Perturbação 20%

As Figs. 4.17, 4.18 e 4.19 mostram as curvas de máximo, mínimo e médio da função aptidão com tamanho de perturbação 20%, 16, 56 e 96 indivíduos, respectivamente. Os

tempos médios de processamento são:  $0,506 \ s, \ 3,21 \ s$  e 8,15 s. Os valores máximos da função aptidão encontrados são: -0,046; -0,043; -0,043.



Figura 4.17: Valores máximos (a), mínimos (b) e médios (c) de aptidão em função do número de gerações, e distribuição dos valores usados para cada parâmetro (d) utilizando 16 indivíduos, probabilidade de mutação 5% e tamanho da perturbação de 20%.



Figura 4.18: Valores máximos (a), mínimos (b) e médios (c) de aptidão em função do número de gerações, e distribuição dos valores usados para cada parâmetro (d) utilizando 56 indivíduos, probabilidade de mutação 5% e tamanho da perturbação de 20%.



Figura 4.19: Valores máximos (a), mínimos (b) e médios (c) de aptidão em função do número de gerações, e distribuição dos valores usados para cada parâmetro (d) utilizando 96 indivíduos, probabilidade de mutação 5% e tamanho da perturbação de 20%.

A Fig. 4.20 mostra a curva dos máximos valores da função aptidão encontrados em função do tamanho da população.



Figura 4.20: Valores máximos da função aptidão em função do tamanho da população.

# 4.1.6 Operador de Mutação Perturbação, Tamanho de Perturbação 40%

As Figs. 4.21, 4.22 e 4.23 mostra as curvas de máximo, mínimo e médio da função aptidão com tamanho de perturbação 40% e 16, 56 e 96 indivíduos, respectivamente. Os tempos médios de processamento são: 0,503 s, 3,23 s e 7,97 s. Os valores máximos da função aptidão encontrados são: -0,044; -0,044; -0,043.



Figura 4.21: Valores máximos (a), mínimos (b) e médios (c) de aptidão em função do número de gerações, e distribuição dos valores usados para cada parâmetro (d) utilizando 16 indivíduos, probabilidade de mutação 5% e tamanho da perturbação de 40%.



Figura 4.22: Valores máximos (a), mínimos (b) e médios (c) de aptidão em função do número de gerações, e distribuição dos valores usados para cada parâmetro (d) utilizando 56 indivíduos, probabilidade de mutação 5% e tamanho da perturbação de 40%.



Figura 4.23: Valores máximos (a), mínimos (b) e médios (c) de aptidão em função do número de gerações, e distribuição dos valores usados para cada parâmetro (d) utilizando 96 indivíduos, probabilidade de mutação 5% e tamanho da perturbação de 40%.

A Fig. 4.24 mostra a curva dos máximos valores da função aptidão encontrados em função do tamanho da população.



Figura 4.24: Valores máximos da função aptidão em função do tamanho da população.

Comparando as soluções de otimização utilizando os operadores de mutação uniforme e perturbação, verifica-se que são muito semelhantes, sobretudo quando o tamanho de população são os mesmos. O aumento do tamanho da população evidencia menores variações entre as buscas. Populações maiores que 24 indivíduos resulta em pouca variação.

Observando as curvas de aptidão máxima vistas nas seções anteriores, percebe-se a

tendência das buscas convergirem aos valores ótimos a partir da geração número 48. O aumento da probabilidade de mutação apresenta maiores oscilações dos valores de cada busca. Além disso, maiores probabilidades indicam maiores variações entre as buscas realizadas.

As distribuições dos valores usados para cada parâmetro, partes (d) das figuras, mostram que em geral a exploração do espaço de busca é baixa. Verifica-se que alguns dos parâmetros como o de massa e coeficiente de rigidez são os que menos foram explorados. Os parâmetros que aparentam ser mais explorados é o da resistência e do comprimento das bobinas. Os tempos de processamento não apresentam diferenças significativas com diferentes tamanhos de perturbação.

#### 4.2 Otimização da Energia Elétrica

Nesta seção a otimização da energia elétrica é realizada por meio de uma função que resulte na máxima energia elétrica. O objetivo é encontrar os valores da máxima energia que pode ser recuperada no subsistema elétrico. A função objetivo  $O_2$  e a função aptidão F também são iguais e são definidas por:

$$F = O_2 = \frac{q^2}{2C} \tag{4.2}$$

A exemplo da seção anterior, seis casos foram utilizados. Os tamanhos de população e o máximo de gerações são os mesmos. Por questão de brevidade, somente as figuras referentes aos casos com operador de mutação uniforme com probabilidade de mutação de 5% e 20% e operador de mutação perturbação de 10% e 20% foram apresentadas, utilizando população com 16, 56 e 96 indivíduos.

### 4.2.1 Operador de Mutação Uniforme, Probabilidade de Mutação 5%

As Figs. 4.25, 4.26 e 4.27 mostram as curvas de máximo, mínimo e média da função aptidão com probabilidade de mutação 5%, e 16, 56 e 96 indivíduos, respectivamente. Os tempos médios de processamento são: 0,520 s, 3,36 s e 8,20 s. Os valores máximos da função aptidão encontrados são: 15603; 9055; 32320.



Figura 4.25: Valores máximos (a), mínimos (b) e médios (c) de aptidão em função do número de gerações, e distribuição dos valores usados para cada parâmetro (d) utilizando 16 indivíduos e probabilidade de mutação 5%.



Figura 4.26: Valores máximos (a), mínimos (b) e médios (c) de aptidão em função do número de gerações, e distribuição dos valores usados para cada parâmetro (d) utilizando 56 indivíduos e probabilidade de mutação 5%.



Figura 4.27: Valores máximos (a), mínimos (b) e médios (c) de aptidão em função do número de gerações, e distribuição dos valores usados para cada parâmetro (d) utilizando 96 indivíduos e probabilidade de mutação 5%.

A Fig. 4.28 mostra a curva dos máximos valores da função aptidão encontrados em função do tamanho da população.



Figura 4.28: Valores máximos da função aptidão em função do tamanho da população.

## 4.2.2 Operador de Mutação Uniforme, Probabilidade de Mutação 20%

As Figs. 4.29, 4.30 e 4.31 mostram as curvas de máximo, mínimo e médio da função aptidão com probabilidade de mutação 20%, e 16, 56 e 96 indivíduos, respectivamente.

Os tempos médios de processamento são: 0,572 s, 3,60 s e 9,16 s. Os valores máximos da função aptidão encontrados são: 3586; 5267; 11591.



Figura 4.29: Valores máximos (a), mínimos (b) e médios (c) de aptidão em função do número de gerações, e distribuição dos valores usados para cada parâmetro (d) utilizando 16 indivíduos e probabilidade de mutação 20%.



Figura 4.30: Valores máximos (a), mínimos (b) e médios (c) de aptidão em função do número de gerações, e distribuição dos valores usados para cada parâmetro (d) utilizando 56 indivíduos e probabilidade de mutação 20%.



Figura 4.31: Valores máximos (a), mínimos (b) e médios (c) de aptidão em função do número de gerações, e distribuição dos valores usados para cada parâmetro (d) utilizando 96 indivíduos e probabilidade de mutação 20%.

A Fig. 4.32 mostra a curva dos máximos valores da função aptidão encontrados em função do tamanho da população.



Figura 4.32: Valores máximos da função aptidão em função do tamanho da população.

# 4.2.3 Operador de Mutação Perturbação, Tamanho de Perturbação 10%

As Figs. 4.33, 4.34 e 4.35 mostram as curvas de máximo, mínimo e médio da função aptidão com tamanho de perturbação 10%, e 16, 56 e 96 indivíduos, respectivamente. Os tempos médios de processamento são: 0,509 s, 3,23 s e 8,30 s. Os valores máximos da função aptidão encontrados são: 11645; 14460; 47840.



Figura 4.33: Valores máximos (a), mínimos (b) e médios (c) de aptidão em função do número de gerações, e distribuição dos valores usados para cada parâmetro (d) utilizando 16 indivíduos, probabilidade de mutação 5% e tamanho da perturbação de 10%.



Figura 4.34: Valores máximos (a), mínimos (b) e médios (c) de aptidão em função do número de gerações, e distribuição dos valores usados para cada parâmetro (d) utilizando 56 indivíduos, probabilidade de mutação 5% e tamanho da perturbação de 10%.



Figura 4.35: Valores máximos (a), mínimos (b) e médios (c) de aptidão em função do número de gerações, e distribuição dos valores usados para cada parâmetro (d) utilizando 96 indivíduos, probabilidade de mutação 5% e tamanho da perturbação de 10%.

A Fig. 4.36 mostra a curva dos máximos valores da função aptidão encontrados em função do tamanho da população.



Figura 4.36: Valores máximos da função aptidão em função do tamanho da população.

## 4.2.4 Operador de Mutação Perturbação, Tamanho de Perturbação 20%

As Figs. 4.37, 4.38 e 4.39 mostram as curvas de máximo, mínimo e médio da função aptidão com tamanho de perturbação 20%, 16, 56 e 96 indivíduos, respectivamente. Os

tempos médios de processamento são: 0,509 s, 3,30 s e 8,34 s. Os valores máximos da função aptidão encontrados são: 6818; 43091; 35774.



Figura 4.37: Valores máximos (a), mínimos (b) e médios (c) de aptidão em função do número de gerações, e distribuição dos valores usados para cada parâmetro (d) utilizando 16 indivíduos, probabilidade de mutação 5% e tamanho da perturbação de 20%.



Figura 4.38: Valores máximos (a), mínimos (b) e médios (c) de aptidão em função do número de gerações, e distribuição dos valores usados para cada parâmetro (d) utilizando 56 indivíduos, probabilidade de mutação 5% e tamanho da perturbação de 20%.



Figura 4.39: Valores máximos (a), mínimos (b) e médios (c) de aptidão em função do número de gerações, e distribuição dos valores usados para cada parâmetro (d) utilizando 96 indivíduos, probabilidade de mutação 5% e tamanho da perturbação de 20%.

A Fig. 4.40 mostra a curva dos máximos valores da função aptidão encontrados em função do tamanho da população.



Figura 4.40: Valores máximos da função aptidão em função do tamanho da população.

O algoritmo de otimização da energia elétrica apresenta comportamento semelhante ao da otimização do conforto (mínima aceleração). O aumento do tamanho da população faz com que a variação entre cada busca diminua, principalmente nas 20 primeiras gerações. Por outro lado, as variações entre as buscas aumentam em gerações maiores. As oscilações das curvas de cada busca do algoritmo tende a diminuir com o passar das gerações. Probabilidade de mutação maiores que 10% resultam em curvas com grandes oscilações. O mesmo acontece utilizando o operador de mutação perturbação.

Verifica-se que ao otimizar a energia elétrica, os maiores valores de energia farão com que o sistema oscile em comportamento indesejável, como altas amplitudes de aceleração. Essa condição indica a necessidade de otimizar o conforto e a máxima energia simultaneamente. Este estudo é feito na seção seguinte.

#### 4.3 Otimização Utilizando Função Ponderada

Duas funções objetivo serão investigadas nesta seção, uma em relação à aceleração vertical  $(\ddot{y}_s)$  e outra em relação à energia elétrica  $(E_e)$ . Lembrando que deseja-se minimizar a aceleração vertical e maximizar a energia elétrica, as funções objetivo são respectivamente:

$$O_1 = -\ddot{y}_s \qquad \qquad O_2 = \frac{q^2}{2C} \tag{4.3}$$

Ao utilizar a aceleração como função aptidão, consegue-se encontrar condições otimizadas de conforto. Por outro lado, essas condições não garantem que a energia elétrica está sendo maximizada. Faz-se uso de uma soma ponderada, onde busca-se obter otimização das duas funções ao mesmo tempo. Por se tratar de grandezas em escalas diferentes, aplica-se uma normalização para efetuar a soma ponderada conforme Eq. 4.4.

$$ON_{1} = \frac{\ddot{y}_{s,max} - \ddot{y}_{s}}{\ddot{y}_{s,max} - \ddot{y}_{s,min}} \qquad ON_{2} = \frac{E_{e} - E_{e,min}}{E_{e,max} - E_{e,min}}$$
(4.4)

sendo que  $\ddot{y}_{s,max}$ ,  $E_{e,max}$ ,  $\ddot{y}_{s,min}$  e  $E_{e,min}$  são os valores máximos e mínimos de aceleração e energia elétrica obtidos da população respectivamente.  $ON_1$  é a função objetivo  $O_1$ normalizada e  $ON_2$  é a função objetivo  $O_2$  normalizada. A função aptidão pode ser escrita definindo um peso para cada uma das funções objetivo que se deseja otimizar, conforme Eq. 4.5.

$$F = p_1 O N_1 + p_2 O N_2 \tag{4.5}$$

sendo que  $p_1$  e  $p_2$  são os pesos relacionados à aceleração e energia elétrica.

As buscas são realizadas por meio do operador de mutação uniformemente distribuída e probabilidade de mutação de 20%. O peso da função objetivo  $p_1$  é modificado de 0 a 1 para investigar o efeito que essa variação ocasiona nas soluções. O tamanho da população se mantém fixo em 100 indivíduos. A busca é feita em várias rodadas, pois a seleção dos valores da população da primeira geração é aleatória.

As combinações de valores de aceleração e energia foram tomadas como sendo os máximos da função aptidão da última geração da busca realizada. A Fig. 4.41 apresenta a variação destes valores em função dos pesos de 0 a 1. As partes (a) a (j) correspondem

a cada rodada  $R_1$  a  $R_{10}$  realizada na busca.

Verifica-se que para maiores valores do peso da aceleração  $p_1$  na função aptidão, resultam em menores amplitudes de energia. Os máximos valores de aceleração não aparecem nos maiores valores do peso  $p_1$ . A Fig. 4.42 apresenta a média dos valores de aceleração e energia elétrica entre as rodadas. Percebe-se que existem variações entre os valores de aceleração e energia elétrica entre as rodadas. Isso ocorre devido ao fato de existir várias soluções ótimas do sistema.

Faz-se uma análise utilizando o diagrama de frente de pareto para encontrar as diversas soluções ótimas do sistema. Os valores de todas as rodadas da energia elétrica em função da aceleração utilizando peso  $p_1 = 0.5$  podem ser vistos na Fig 4.43.

Visando demonstrar os demais valores encontrados utilizando pesos diferentes, um estudo variando os pesos  $p_1$  de 0 a 1 é realizado. As tabelas 4.1 a 4.4 listam a combinação dos valores de aceleração e energia em função dos pesos da função objetivo obtidas do algoritmo genético. Estão destacados alguns dos melhores valores encontrados utilizando o algoritmo de otimização com a função ponderada da aceleração e energia elétrica.

As Figs. 4.44, 4.45, 4.46 e 4.47 mostram os históricos de deslocamento, aceleração e carga para os parâmetros originais, de otimização de aceleração, da energia elétrica e da função ponderada do sistema.



Figura 4.41: Valores de aceleração e energia das rodadas  $R_1({\rm a})$  a  $R_{10}({\rm j})$  em função do peso $p_1.$ 



Figura 4.42: Valores de aceleração e energia das rodadas  $R_1(a)$  a  $R_{10}(j)$  em função do peso  $p_1$ .



Figura 4.43: Diagrama de frente de pareto dos valores de todas as rodadas  $R_1$  a  $R_{10}$  da energia elétrica em função da aceleração vertical utilizando  $p_1 = 0.5$ .

			1. 0011	iparaşa	o onoro	ob pob	ob dd 1	ingao (	Jour		
Aptidão	Peso	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	$R_5$	$R_6$	$R_7$	$R_8$	$R_9$	$R_{10}$
$\ddot{y}_s \ (m/s^2)$	0,00	14,21	18,40	47,94	$16,\!12$	$30,\!60$	20,35	$3,\!96$	$^{5,49}$	32,97	$17,\!44$
$E_e(J)$	1,00	37,88	152,29	145,77	$117,\!56$	301,72	$248,\!88$	$69,\!87$	78,16	$699,\!54$	166,70
$\ddot{y}_s \ (m/s^2)$	0,01	0,30	$0,\!46$	$^{3,28}$	2,11	10,82	$^{5,33}$	2,26	$17,\!47$	$16,\!47$	$^{3,57}$
$E_e(J)$	0,99	0,80	2,32	4,13	0,04	112,97	6,91	1,82	241,56	121,65	25,59
$\ddot{y}_s (m/s^2)$	0,02	0,29	9,20	5,58	3,09	3,74	2,93	0,55	1,99	1,49	2,57
$\frac{E_e(J)}{\ddot{u}(m/a^2)}$	0,98	1,37	33,00	2,30	20,11	1,02	3,94	0,00	2,41	1,08	160.02
$y_s (m/s)$ E (I)	0,03	12,95	0,79	2,12 0.71	0,40 0.21	0,10 3.50	27,09 187.52	0,09 5,60	$^{1,00}_{2.53}$	0,34 1 31	100,03 652,77
$\frac{L_e(J)}{\ddot{u}_e(m/s^2)}$	0.04	0.30	0,50	0.89	10.22	9.48	3.51	0.38	2,00	86.82	0.29
$E_e(J)$	0.96	1.16	0.70	7.80	312.98	48.76	8.83	2.75	0.30	576.49	5.09
$\frac{\ddot{y}_s}{\ddot{y}_s}$ $(m/s^2)$	0,05	19,53	0,44	0,38	7,10	0,88	14,89	0,44	2,46	8,24	4,68
$E_e(J)$	0,95	155,95	$0,\!59$	0,71	70,51	1,28	$74,\!93$	$^{8,54}$	$3,\!61$	18,23	66, 67
$\ddot{y}_s \ (m/s^2)$	0,06	4,76	1,16	$1,\!14$	$^{5,42}$	1,10	7,94	$4,\!57$	6,94	49,03	2,56
$E_e(J)$	0,94	1,17	10,94	$6,\!49$	8,46	3,30	$132,\!49$	$23,\!55$	101,02	$207,\!64$	$^{5,44}$
$\ddot{y}_s (m/s^2)$	0,07	0,91	46,45	0,43	16,33	3,42	1,02	1,00	0,75	6,33	$^{3,41}$
$E_e(J)$	0,93	1,12	123,52	0,05	372,86	8,95	3,63	1,15	1,02	0,98	67,83
$y_s (m/s^2)$	0,08	2,04	1,72	18,56	3,83	1,77	0,81	10,28	61,54	5,00	15,37
$\frac{E_e(J)}{\ddot{u}(m/a^2)}$	0,92	0,91	4,04	294,64	1,90	9,20	4,94	255,75	2 70	20,40	0.50
$y_s(m/s)$ E (I)	0,09	0,93	80.84	23,01 549.00	0,03 0.47	$^{1,30}_{7.08}$	4 69	0,47 0.55	2,19	12,33 59.26	2.46
$\frac{u_e(v)}{\ddot{u}_s(m/s^2)}$	0.10	4.63	7.97	2.99	0.38	2.04	1.19	0.55	10.68	21.33	5.25
$E_e(J)$	0.90	19.92	67.24	15.93	1.75	$\frac{2,01}{7.75}$	4.00	1.70	70.62	59.75	3.60
$\frac{\ddot{y}_s}{\ddot{y}_s}$ $(m/s^2)$	0,11	1,87	1,26	0,36	25,99	0,87	0,55	9,48	3,90	3,22	0,18
$E_e(J)$	0,89	0,89	0,78	$0,\!18$	195,08	0,38	6,31	112,77	$28,\!68$	$41,\!51$	$0,\!17$
$\ddot{y}_s \ (m/s^2)$	0,12	2,58	18,21	0,36	33, 19	$1,\!65$	$9,\!66$	0,34	$43,\!43$	$^{8,56}$	2,51
$E_e(J)$	0,88	3,10	$213,\!90$	$^{4,42}$	$919,\!82$	$1,\!00$	$52,\!87$	$1,\!07$	259,10	36,77	$23,\!68$
$\ddot{y}_s \ (m/s^2)$	$0,\!13$	0,90	$0,\!63$	1,78	$0,\!45$	$9,\!65$	2,38	$6,\!83$	$1,\!97$	$1,\!65$	0,98
$E_e(J)$	0,87	6,39	10,31	1,90	6,39	1,33	0,57	7,42	9,96	0,85	1,69
$\ddot{y}_s (m/s^2)$	0,14	1,63	2,15	0,58	0,46	1,88	7,39	0,55	0,48	0,13	3,27
$E_e(J)$	0,86	0,93	0,32	0,44	3,21	8,91	106,69	0,43	3,41	2,71	21,30
$y_s (m/s^2)$	0,15	5,90	32,66	1,01 0.27	6,21 0.18	4,17 50.21	5,38 51.41	2,30	8,88 64 20	14,70 55.07	99,11
$\frac{E_e(J)}{\ddot{u}(m/a^2)}$	0,65	0.80	5.08	0,27	3.43	3.07	0.55	4,92	3 38	1.20	3 72
$\frac{g_s(m/s)}{E_s(I)}$	0,10	6 55	15,98	3.00	34.27	5,07 54 34	0,33 0.42	56.33	12.45	1,20 5.86	3,72 4.62
$\ddot{u}_{e}(m/s^2)$	0.17	0.65	7.21	3.93	2.72	0.63	0.50	2.20	2.64	0.73	8.42
$E_e(J)$	0,83	1,69	16,06	26,46	44,40	2,36	4,86	34,30	1,70	2,58	78,90
$\ddot{y}_s \ (m/s^2)$	0,18	2,12	0,53	0,27	3,50	1,44	0,96	21,96	3,78	0,94	12,16
$E_e$ $(J)$	0,82	5,80	1,01	$3,\!81$	0,76	4,95	0,95	$183,\!83$	$1,\!62$	9,39	150,04
$\ddot{y}_s \ (m/s^2)$	0,19	1,56	$5,\!19$	2,34	7,94	0,77	$5,\!43$	$1,\!12$	2,29	0,52	4,74
$E_e(J)$	0,81	0,75	6,90	1,93	77,18	5,07	$7,\!39$	$5,\!15$	0,96	1,02	$54,\!12$
$\ddot{y}_s (m/s^2)$	0,20	3,15	4,61	9,39	55,55	1,02	0,10	2,52	1,63	4,10	5,83
$E_e(J)$	0,80	12,34	31,26	239,70	189,64	15,27	3,15	8,73	0,12	6,45	164,33
$\begin{array}{c} y_s (m/s^{-}) \\ E & (I) \end{array}$	0,21	2,92	2,41	2,23	0,30	1,35	0,61 5 11	U,55 1 29	8,19 18 29	0,32	0,40
$\ddot{u}_e(J)$	0,79	0.15	0.31	2.63	5 72	6 33	0.53	4,52	11.78	2.48	1.44
$E_e(J)$	0.78	1.90	2.25	55.47	124.34	114.24	6.46	12.88	48.64	0.49	0.81
$\frac{\ddot{u}_s}{\ddot{u}_s}$ $(m/s^2)$	0.23	8,30	1,20	0,92	0,50	0,72	2,98	7,34	0,52	0,90	8,73
$E_e(J)$	0,77	14,48	6,52	3,92	$1,\!43$	3,09	$2,\!43$	24,01	2,00	0,44	222,55
$\ddot{y}_s \ (m/s^2)$	0,24	5,33	4,84	1,62	$^{3,47}$	3,31	6,52	2,52	0,62	5,70	0,34
$E_e(J)$	0,76	9,71	26,75	2,85	15,96	20,06	$24,\!22$	$^{3,13}$	$0,\!83$	4,31	$0,\!61$
$\ddot{y}_s (m/s^2)$	0,25	2,68	$3,\!\overline{48}$	5,23	24,51	3,84	1,03	5,06	1,35	0,34	1,79
$E_e(J)$	0,75	5,96	23,35	111,37	106,92	72,57	3,15	29,45	11,00	0,33	0,21
$\ddot{y}_s (m/s^2)$	0,26	2,75	0,82	1,55	5,26	1,03	12,81	0,43	3,29	0,23	0,33
$\frac{E_e(J)}{\ddot{u}(m/c^2)}$	0,74	44,51	18,64	9,50	18,05	12.06	209,89	0,38	0,19	2,05	0,99
$\begin{array}{c} y_s (m/s^-) \\ E (I) \end{array}$	0,27	0,90 12.02	5,98 2 1 2	$^{1,01}_{0.11}$	1,13 115 86	13,90 200 50	1,0U 1,22	1,44 13.05	$^{1,32}_{1.87}$	0,00 2,61	0,47
$\frac{\omega_e(J)}{\ddot{u}_e(m/s^2)}$	0.28	0.43	1 11	5.69	1 46	4 94	2.18	1.57	1.63	0.53	2.35
$E_e(.I)$	0,20 0.72	0,45	1,11 1.01	162.34	5.84	10.62	0.84	22.36	0.57	4.70	10.09
$\frac{-c}{\ddot{y}_{s}}(m/s^{2})$	0,29	1,79	2,52	9,11	6,45	13.04	1,73	3,13	3,05	1,76	0,50
$E_e(J)$	0,71	0,15	2,73	115,41	140,05	68,88	1,23	17,68	8,72	0,75	1,70
$\ddot{y}_s \ (m/s^2)$	0,30	11,16	1,28	2,74	0,93	125,65	0,39	2,03	11,77	12,90	12,15
$E_{e}(J)$	0.70	79.29	13.40	3.50	5.89	466.49	3.10	1.08	289.08	59.33	143.23

Tabela 4.1: Comparação entre os pesos da função objetivo.

			- 1	5		1		3	J		
Aptidão	Peso	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	$R_5$	$R_6$	$R_7$	$R_8$	$R_9$	$R_{10}$
$\ddot{y}_s (m/s^2)$	0,31	1,39	8,27	7,86	2,70	2,03	$0,\!67$	0,94	1,31	0,87	1,58
$E_e(J)$	0,69	0,24	43,30	56,77	9,36	22,12	4,11	2,39	7,74	2,36	0,04
$\ddot{u}_{s}$ $(m/s^{2})$	0.32	1.34	2.33	1.48	4.54	1.33	0.82	1.30	4.41	3.24	2.81
$E_e(J)$	0.68	0.14	2.28	1.76	2.84	3.34	0.91	1.19	47.94	15.23	7.00
$\frac{u_c}{\ddot{u}_s} (m/s^2)$	0.33	0.53	0.52	0.49	2.24	0.44	4.72	0.47	6.27	3.69	2.35
$E_{e}(J)$	0.67	5.23	7.39	1.37	0.47	0.81	23.05	2.46	31.05	16.42	9.62
$\frac{u_e(s)}{\ddot{u}_e(m/s^2)}$	0.34	0.90	0.36	8.26	1.63	1.91	6.04	0.90	22.05	0.43	0.45
$E_{\alpha}(I)$	0.66	1.75	2.83	52.10	3.17	0.81	68.97	0.73	651.47	4.91	0.88
$\frac{-e^{-(s)}}{\ddot{u}_{s}}(m/s^2)$	0.35	10.66	1.83	2.22	1.28	6.98	4.85	8.15	0.66	7.04	9.65
$E_{\alpha}(I)$	0.65	14 03	2.01	20.38	4.38	156.80	0.37	6 69	1.73	15.07	10758
$\frac{\overline{u_e(0)}}{\overline{u_e(m/s^2)}}$	0.36	1.03	1.32	0.44	9.71	2 51	2 49	1.96	2 25	5.02	2.09
$E_{-}(I)$	0.64	8.03	1,02 1 27	2,39	55 45	$\frac{2,01}{3,01}$	353	0.57	16.06	103 99	30.41
$\frac{Le(v)}{\ddot{u}(m/e^2)}$	0.37	0.38	0.30	1.14	5 59	2 50	0.78	3 50	7.60	0.08	2 57
$\frac{gs}{E}(I)$	0.63	101.05	6.40	0.73	46.78	0.37	2.86	20.79	54 75	6.81	5.17
$\frac{L_e(s)}{\ddot{u}(m/s^2)}$	0,00	0.80	6.56	1.50	1.01	2 10	0.79	8 18	0.40	1 31	3.17
$g_s(m/3)$ E (I)	0,50	0,60	2750	13.25	1.62	0.30	0,10	53.64	3.80	1 36	2.08
$\frac{L_e(J)}{\ddot{u}(m/e^2)}$	0,02	2 20	4 74	0.76	1,02	1.85	0,33	7.61	0.57	6.16	2,30
$g_s(m/s)$ E (I)	0,55	19.65	3 10	1.03	5.96	9.56	7.60	32 44	26.03	86.37	4.83
$\frac{L_e(J)}{\ddot{u}(m/c^2)}$	0,01	3 50	2 72	1,00	0.51	0.66	6.26	1 76	0.80	0.37	2.26
$y_s(m/s)$ F(I)	0,40	40.75	2,12	1,94 2.07	14 52	7 32	0,20 86 73	12.08	2 28	1.00	2,20
$\frac{L_e(J)}{\ddot{u}(m/a^2)}$	0,00	40,15	1.02	2,07	0.10	1,52	11.02	12,90	2,00	1.99	0,39
$\frac{g_s(m/s)}{E(I)}$	0,41	9,00 80.60	6.40	2,47	2 45	4.50	26.05	10.46	0,20 4.66	10.26	2,24 50.25
$\frac{L_e(J)}{\ddot{u}(m/c^2)}$	0,39	10.20	0,49	1,90	2 40	2.04	20,00	1.80	6.99	19,20	09,20
$g_s(m/s)$ E (I)	0,42 0.58	29.76	2,30	11.67	3,40 3.56	$\frac{2,94}{5,02}$	1.29	16 38	47.73	8.43	17.61
$\frac{L_e(J)}{\ddot{u}(m/c^2)}$	0,00	0.35	1.56	2.17	2.63	0.02	1.53	6.64	1 19	1.85	1.97
$g_s(m/s)$ E (I)	0,43 0.57	3.46	17.00	$\frac{2}{14}$	2,05	15.88	0.04	1758	1,12 1.34	0.50	$^{1,27}_{0,14}$
$\frac{L_e(J)}{\ddot{u}(m/e^2)}$	0.44	5.46	6.83	2 58	1 32	0.13	1.45	10.05	7.04	3 76	18/11
$y_s(m/s)$ F(I)	0,44	52.67	24.77	$^{2,00}$	3 60	2.80	2,40	10,95	7,34 73.75	20.10	23.02
$\frac{L_e(J)}{\ddot{u}(m/c^2)}$	0,30	0.52	4.94	2.11	1.26	1.99	2,38	5 20	1 1 2	20,10	25,02
$y_s(m/s)$	0,45	4.06	4,24	$\frac{2}{10}$	1,20	1,30	0,17 1.77	0,09 07 22	1,13 17.48	0,70	1.74
$\frac{L_e(J)}{\ddot{u}(m/c^2)}$	0,00	4,30	14,20	4.20	4,00	0,50	1,11	21,55	17,40	0,33	19.49
$y_s(m/s)$	0,40	0,30	2,50	4,20	0,39	0,09	1,40	0,47	1,00	0,37	12,40
$\frac{E_e(J)}{\ddot{u}(m/c^2)}$	0.34	0,31	3,50	14,00	0.64	2,40	1,00	0,00	4,01	1.62	0.50
$y_s (m/s^-)$	0,47	0,25	1,04	0,05	1.65	1.24	2,24	2,37	0,55	1,05	0,59
$\frac{E_e(J)}{(m/s^2)}$	0,05	1,05	0,14	2,20	1,00	1,24	12,21		4,11	1,40	0,20
$y_s (m/s^2)$	0,48	0,50	20,93	1,10	2,89	1,74	0,79	0,49	2,57	1,03	0,93
$\frac{E_e(J)}{(m/2)}$	0,52	9,24	246,32	1,51	0,41	2,02	21,64	2,07	1,95	12,05	1,40
$y_s (m/s^-)$	0,49	1,01	1,12	2,54	1,07	3,13	0,47	25,30	0,32	0,53	0,20
$\frac{E_e(J)}{(J)}$	0,51	0,55	10,81	20,55	0,38	7.20	2,10	00,02	2,00	0,98	1,04
$y_s (m/s^2)$	0,50	1,70	0,35	2,04	0,71	7,32	0,39	0,35	8,41	2,12	3,11
$\frac{E_e(J)}{(J)}$	0,50	3,39	0,03	11,24	9,58	33,41	2,10	2,85	32,00	31,44	15,70
$y_s (m/s^2)$	0,51	0,35	0,34	0,48	1,81 2.71	0,44 0.74	0,09	3,18	1,08	20,10	0,10 67 49
$\frac{L_e(J)}{\ddot{u}(m/c^2)}$	0,49	4,21	4,20	1,09	2,71	12.02	23,39	10,00	2.01	2 50	2.67
$y_s(m/s^-)$	0,52	5 1 4	0,41 1.04	1,29 2,19	3,19 1.04	12,03 262 70	U,23 8 96	11.90	2,01	3,32 6 91	3,07 12.27
$\frac{E_e(J)}{\ddot{u}(m/c^2)}$	0,48	0.06	1,04	0.25	1,94	202,70	0,20	0.24	3,21	0,31	12,27
$y_s(m/s^-)$	0,03	0,90	2,48	0,30	2,12	2,89 2.20	$^{1,80}_{1,70}$	0,24	1,18	2,20 5 17	10.94
$\frac{E_e(J)}{\ddot{u}(m(a^2))}$	0,47	11,07	0,04	3,01	3,81	2,20	1,12	3,33	11,89	0.40	10,84
$y_s (m/s^2)$	0,54	1,73	4,09	0,03	0,49	0,69	2,21	0,25	1.08	0,40	1,70
$\frac{E_e(J)}{(m/c^2)}$	0,40	1,45	110,07	0.20	152,72	2,37	0,05	0,00	1,08	4,51	0,29
$y_s(m/s^-)$	0,55	2,05	0,84	0,30	∠,15 0.20	0,62	3,70 66.06	0,48	0,40 47 69	0.51	2,92
$\frac{E_e(J)}{\cdots}$	0,45	19,22	0,59	2,10	2,32	0,40	4.91	8,89	41,03	0,24	11,00
$y_s (m/s^-)$	0,50	3,33	1,22	0,39	0,44	0,42	4,81	0,57	2,00	1,07	0,98
$E_e(J)$	0,44	11,00	0,06	0,16	19,94	2,36	14,24	0,73	0,93	1,15	3,97
$y_s(m/s^2)$	0,57	3,71	0,40	2,64	0,58	0,27	0,29	1,10	1,61	4,27	0,54
$E_e(J)$	0,43	3,94	0,18	33,02	0,80	0,97	1,98	4,20	0,63	10,71	2,80
$y_s (m/s^2)$	0,58	2,22	3,37	6,93	3,03	2,80	1,31	0,76	2,27	0,65	0,27
$E_e(J)$	0,42	6,02	15,45	90,29	14,41	19,71	23,32	0,42	7,64	1,10	4,25
$y_s (m/s^2)$	0,59	1,90	1,26	1,92	0,46	0,57	3,91	0,28	0,47	8,33	2,20
$E_e(J)$	0,41	0,77	0,37	0,45	1,53	1,33	2,08	10,75	4,03	102,95	2,66
$\ddot{y}_s (m/s^2)$	0,60	3,13	0,21	0,57	0,78	1,06	2,27	0,48	2,50	0,34	2,25
$E_e(J)$	0,40	4,81	1,18	4,25	4,04	6,22	17,71	0,16	2,96	2,28	1,18

Tabela 4.2: Comparação entre os pesos da função objetivo.

			• • • • • • • •			- P			J		
Aptidão	Peso	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	$R_5$	$R_6$	$R_7$	$R_8$	$R_9$	$R_{10}$
$\ddot{y}_s \ (m/s^2)$	0,61	$5,\!45$	$^{5,33}$	1,77	0,20	5,26	8,03	0,46	8,31	1,62	40,44
$E_e(J)$	0,39	62,37	37,77	$^{8,26}$	5,34	22,02	168,00	5,72	74,16	6,51	173,22
$\ddot{y}_s \ (m/s^2)$	0,62	0,61	1,76	3,44	4,79	0,55	0,53	0,50	$0,\!15$	1,19	0,76
$E_e(J)$	0,38	$3,\!63$	0,57	34,17	9,35	1,02	$13,\!88$	2,34	4,23	3,16	0,32
$\ddot{y}_s (m/s^2)$	0,63	46,97	2,96	3,18	0,44	1,68	0,27	1,81	0,23	0,28	0,49
$E_e(J)$	0,37	207,10	3,78	3,41	1,49	12,81	3,78	0,70	2,21	1,49	0,27
$\ddot{u}_s (m/s^2)$	0,64	2,82	0,89	0,39	2,61	5,95	0,29	0,58	0,75	1,49	2,10
$E_e(J)$	0.36	17.58	10,24	7,51	56,27	32,84	1.61	0.45	2,61	28.07	0,93
$\ddot{y}_s (m/s^2)$	0.65	1,16	0,62	0,75	1.04	1,29	0.21	0.38	1.04	2,19	0,39
$E_e(J)$	0,35	6,79	1,05	0,90	3,83	5,81	3,40	0,80	18,96	28,72	1,20
$\ddot{u}_{s}$ $(m/s^{2})$	0.66	1.17	1.81	1.74	2.08	0.26	0.92	1.02	0.94	0.32	2.09
$E_e(J)$	0,34	15.67	4,91	3.61	5,20	1,24	6,60	3,34	11,38	3,77	13,42
$\frac{\ddot{u}_{s}}{\ddot{u}_{s}}$ $(m/s^{2})$	0.67	1.47	8.14	5.46	1.23	2.86	0.80	1.34	0.25	0.92	3.08
$E_e(J)$	0.33	9.59	158.01	88.30	4.99	34.38	1.06	0.74	0.37	4.20	3.30
$\frac{\ddot{u}_{s}}{\ddot{u}_{s}}$ $(m/s^{2})$	0.68	0.37	0.30	2.92	0.49	1.03	1.56	11.84	0.39	0.18	2.69
$E_e(J)$	0.32	2.59	1.43	3.12	0.47	13.46	1.89	12.25	0.97	6.33	4.44
$\frac{\ddot{u}_{s}}{(m/s^2)}$	0.69	1.49	0.76	0.53	7.99	6.07	1.95	0.24	0.47	0.45	0.36
$E_e(J)$	0.31	3.04	15.25	1.56	148.16	121.79	5.77	5.36	2.49	0.66	4.52
$\frac{-e^{-(s)}}{\ddot{u}_s (m/s^2)}$	0.70	0.53	0.72	1.18	1.31	0.25	1.03	0.20	0.29	1.76	0.33
$E_{e}(J)$	0.30	3.77	1.81	1.75	5.15	0.09	14.93	1.76	1.58	4.42	7.63
$\frac{-c}{\ddot{u}_{s}}(m/s^{2})$	0.71	2.03	0.12	1.32	1.57	28.06	2.77	0.57	1.92	1.97	0.37
$E_e(J)$	0.29	0.34	4.71	24.45	0.40	73.75	7.79	12.80	0.18	29.77	1.16
$\ddot{u}_{s}$ $(m/s^{2})$	0.72	3.46	0.67	3.21	0.75	3.94	1.57	0.92	0.34	0.29	0.22
$E_e(J)$	0.28	15.56	9,06	0,79	3,32	2,17	0.23	2,51	3,66	2,80	0,36
$\overline{\ddot{u}_s (m/s^2)}$	0.73	0.66	0.40	7.67	1.63	1.47	1.35	0.45	1.43	0.30	0.50
$E_e(J)$	0.27	11,11	3.27	25.33	7,38	0.81	5,38	0.86	2.07	7,48	5,53
$\ddot{y}_s (m/s^2)$	0,74	1,18	0,16	0,88	0,50	0,77	1,88	0,76	0,59	2,66	3,03
$E_e(J)$	0,26	$2,\!45$	1,86	$0,\!68$	1,83	2,49	35,08	14,00	3,26	$4,\!42$	$8,\!58$
$\ddot{y}_s \ (m/s^2)$	0,75	0,38	0,40	3,34	1,27	0,13	3,01	$0,\!87$	0,95	0,21	0,36
$E_e$ (J)	0,25	1,76	4,00	44,16	2,96	2,60	21,56	$0,\!13$	4,89	2,83	$0,\!43$
$\ddot{y}_s \ (m/s^2)$	0,76	0,17	0,73	0,75	0,59	2,31	0,36	5,04	0,18	0,80	0,29
$E_e(J)$	0,24	$3,\!48$	$^{8,37}$	10,93	1,47	$25,\!53$	0,31	26,86	5,00	$3,\!59$	0,16
$\ddot{y}_s \ (m/s^2)$	0,77	1,40	$^{3,45}$	0,21	5,22	1,36	0,40	0,37	0,42	$0,\!15$	1,69
$E_e(J)$	0,23	$^{3,50}$	19,90	$0,\!68$	7,00	$^{8,87}$	$3,\!86$	$1,\!00$	$9,\!59$	$1,\!38$	$2,\!62$
$\ddot{y}_s \ (m/s^2)$	0,78	2,63	0,85	1,83	$^{3,33}$	0,54	1,07	0,08	9,96	0,33	4,73
$E_e(J)$	0,22	1,75	1,30	$38,\!81$	$29,\!84$	$^{3,18}$	$^{4,57}$	$^{4,20}$	$17,\!39$	$1,\!29$	$67,\!45$
$\ddot{y}_s \ (m/s^2)$	0,79	1,16	$0,\!14$	$0,\!10$	1,08	1,16	0,20	0,92	1,70	0,31	1,80
$E_e(J)$	0,21	$7,\!18$	2,70	$2,\!82$	6,35	$^{3,89}$	0,87	$13,\!58$	$4,\!29$	1,52	$11,\!14$
$\ddot{y}_s \ (m/s^2)$	0,80	$^{8,48}$	$0,\!58$	0,79	2,96	2,06	0,47	2,28	1,88	$1,\!04$	2,05
$E_e(J)$	0,20	31,21	$1,\!15$	3,95	1,09	10,02	3,77	$36,\!94$	$6,\!14$	0,93	4,93
$\ddot{y}_s \ (m/s^2)$	0,81	0,29	0,30	$^{3,55}$	$^{5,02}$	$^{3,26}$	2,54	$0,\!80$	$0,\!61$	$2,\!47$	0,82
$E_e(J)$	0,19	1,42	$0,\!47$	$23,\!13$	$34,\!43$	$7,\!99$	1,75	0,73	$5,\!91$	$1,\!82$	6,09
$\ddot{y}_s \ (m/s^2)$	0,82	3,37	0,59	0,20	1,34	2,80	0,25	0,35	$1,\!98$	0,24	1,85
$E_e(J)$	0,18	6,69	1,08	1,95	6,54	10,02	$4,\!49$	$7,\!65$	7,50	2,56	5,99
$\ddot{y}_s$ $(m/s^2)$	0,83	0,30	0,98	$4,\!14$	0,94	0,29	0,46	$0,\!56$	0,39	1,55	$0,\!13$
$E_e(J)$	0,17	1,04	2,50	27,03	1,31	0,56	$2,\!14$	$1,\!43$	$0,\!17$	$2,\!48$	1,94
$\ddot{y}_s(m/s^2)$	0,84	$1,\!44$	1,77	0,36	0,29	0,24	0,73	0,21	0,30	$1,\!69$	$1,\!16$
$E_e(J)$	0,16	2,04	1,92	0,81	1,18	$0,\!15$	0,88	2,59	2,75	$3,\!45$	1,98
$\ddot{y}_s (m/s^2)$	0,85	1,87	1,87	0,54	0,25	$1,\!68$	$0,\!69$	1,71	0,73	$3,\!24$	3,78
$E_e(J)$	0,15	10,44	1,03	5,01	2,14	16,76	0,16	0,78	7,96	18,03	2,33
$\ddot{y}_s (m/s^2)$	0,86	1,27	2,44	3,20	0,70	0,28	0,72	0,20	1,07	0,73	0,58
$E_e(J)$	0,14	12,59	20,96	1,27	5,72	4,38	1,75	2,97	1,45	3,47	5,63
$y_s(m/s^2)$	0,87	1,43	0,22	1,51	0,24	0,98	0,36	0,19	0,71	0,45	0,24
$E_e(J)$	0,13	6,15	1,28	2,53	1,07	12,67	3,33	0,55	10,28	0,32	2,11
$y_s (m/s^2)$	0,88	3,25	0,33	0,29	0,71	3,87	0,50	0,33	0,36	2,85	1,50
$E_e(J)$	0,12	16,29	3,66	0,48	5,03	19,56	3,84	1,09	3,44	4,12	14,48
$y_s (m/s^2)$	0,89	0,11	1,35	0,51	0,26	0,16	3,43	2,42	1,67	1,45	0,52
$E_e(J)$	0,11	3,54	2,38	7,73	2,60	$_{3,10}$	17,74	14,87	$_{32,42}$	$^{1,06}$	3,60

Tabela 4.3: Comparação entre os pesos da função objetivo.
	Aptidão	Peso	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	$R_5$	$R_6$	$R_7$	$R_8$	$R_9$	$R_{10}$
_	$\ddot{y}_s \ (m/s^2)$	0,90	1,15	$0,\!18$	0,21	2,00	3,88	1,06	$0,\!17$	$0,\!65$	1,57	0,22
	$E_e(J)$	0,10	5,42	$^{3,37}$	1,26	$1,\!94$	$^{2,25}$	$1,\!00$	$0,\!56$	$2,\!62$	$13,\!82$	$0,\!19$
_	$\ddot{y}_s \ (m/s^2)$	0,91	2,28	0,15	0,12	0,35	0,22	2,83	6,90	1,88	0,30	0,53
	$E_e(J)$	0,09	22,30	4,18	$^{3,25}$	$0,\!56$	1,01	$4,\!40$	$9,\!64$	6,76	$^{4,10}$	3,74
	$\ddot{y}_s \ (m/s^2)$	0,92	0,16	0,30	0,58	0,47	1,86	0,30	0,20	0,94	1,87	3,41
	$E_e(J)$	0,08	$^{2,03}$	$2,\!64$	$^{2,28}$	2,94	$0,\!13$	$0,\!44$	0,38	13,26	$^{5,09}$	18,98
	$\ddot{y}_s \ (m/s^2)$	0,93	0,54	$16,\!27$	0,19	2,30	0,22	0,20	$0,\!64$	3,70	$1,\!62$	0,24
	$E_e(J)$	0,07	6,86	$25,\!93$	0,23	7,09	$^{3,15}$	2,73	$2,\!44$	12,09	$^{8,06}$	3,02
_	$\ddot{y}_s \ (m/s^2)$	0,94	0,33	0,62	0,16	0,64	1,32	0,26	0,29	0,06	1,84	3,47
	$E_e(J)$	0,06	1,88	9,30	1,05	$^{6,13}$	$1,\!40$	$4,\!62$	1,21	$^{3,80}$	1,56	$0,\!82$
_	$\ddot{y}_s \ (m/s^2)$	0,95	1,00	3,17	0,40	0,45	0,08	0,86	0,40	0,30	0,89	0,70
	$E_e(J)$	0,05	2,27	2,56	$1,\!48$	$^{5,09}$	$^{3,16}$	$4,\!13$	7,52	0,98	$^{5,60}$	$0,\!50$
	$\ddot{y}_s \ (m/s^2)$	0,96	1,81	0,32	$1,\!49$	0,58	0,54	2,72	0,79	$0,\!49$	0,38	2,56
	$E_e(J)$	0,04	9,62	$0,\!46$	$6,\!38$	2,18	$2,\!64$	17,16	$^{5,27}$	$^{8,38}$	0,79	13,22
_	$\ddot{y}_s \ (m/s^2)$	0,97	0,31	0,46	2,63	1,12	0,54	$0,\!15$	$1,\!17$	0,13	0,39	1,19
	$E_e(J)$	0,03	2,42	1,08	$4,\!84$	$^{5,62}$	2,72	$2,\!62$	$^{3,40}$	1,72	3,97	$19,\!54$
_	$\ddot{y}_s \ (m/s^2)$	0,98	0,77	1,70	0,46	0,28	0,36	2,05	$0,\!65$	0,20	0,29	0,38
	$E_e(J)$	0,02	8,37	6,78	$^{8,41}$	$^{2,35}$	0,83	$9,\!44$	13,08	3,92	$0,\!12$	$^{3,40}$
	$\ddot{y}_s \ (m/s^2)$	0,99	1,97	$0,\!64$	0,22	0,31	2,79	0,38	0,46	0,09	2,27	$0,\!17$
	$E_e(J)$	0,01	16,43	0,63	1,54	$0,\!64$	5,27	3,71	4,93	3,06	23,22	1,21

Tabela 4.4: Comparação entre os pesos da função objetivo.



Figura 4.44: Histórico de deslocamento (a), aceleração (b) e carga (c) utilizando os parâmetros originais do sistema.



Figura 4.45: Histórico de deslocamento (a), aceleração (b) e carga (c) utilizando os parâmetros da otimização da aceleração do sistema.



Figura 4.46: Histórico de deslocamento (a), aceleração (b) e carga (c) utilizando os parâmetros da otimização da energia elétrica do sistema.



Figura 4.47: Histórico de deslocamento (a), aceleração (b) e carga (c) utilizando os parâmetros da otimização da função ponderada do sistema.

## Capítulo 5

## Conclusão

Após a análise feita no capítulo 3, pode-se concluir que é possível substituir o componente de amortecimento viscoso de uma suspensão mecânica por um amortecimento eletromecânico. As Figs. 3.1 a 3.5 evidenciam que o comportamento de ambos sistemas são semelhantes. A investigação de aproveitamento de energia elétrica no sistema eletromecânico é realizado no capítulo 4.

As Figs. da seção 4.1 apresentam algumas variações entre as curvas das cinco rodadas, no entanto elas apresentam a mesma tendência em maximizar o valor da função aptidão. Pode-se notar que as discrepâncias entre as curvas aumentam significativamente quando a probabilidade de mutação é maior. As análises feitas com maiores populações em geral apresentaram os melhores valores de aceleração máxima, visto que o objetivo deste estudo é encontrar a menor aceleração vertical para o sistema de suspensão eletromecânica. Em geral, as curvas de valores mínimos e médios indicam a tendência de convergir aos valores máximos da curva a partir da geração número 48.

Os histogramas, partes (d) das figuras, mostram que em geral a exploração do espaço de busca é pequena. No entanto esta exploração é maior ao utilizar maiores valores de probabilidade de mutação. Comportamento semelhante pode ser visto utilizando o operador de mutação perturbação. Verifica-se que alguns dos parâmetros como o de massa e coeficiente de rigidez são os menos explorados. Os parâmetros que aparentam ser mais explorados são o da resistência e do comprimento das bobinas. Os tempos de processamento não apresentam diferenças significativas, inclusive utilizando diferentes tamanhos de perturbação. Desta forma, apenas o tamanho da população tem influência no tempo de processamento.

O algoritmo de otimização da energia elétrica da seção 4.2 apresenta comportamento semelhante ao da otimização do conforto (mínima aceleração). O aumento do tamanho da população faz com que a variação entre cada busca diminua, principalmete nas 20 primeiras gerações. A variação das curvas de cada busca do algoritmo tende a diminuir com o passar das gerações, sobretudo gerações maiores que 48. O mesmo acontece utilizando o operador de perturbação de mutação. Verifica-se que ao otimizar a energia elétrica, os maiores valores de energia faz com que o sistema oscile em comportamento indesejável, como altas amplitudes de aceleração. Essa condição indica a necessidade de otimizar o conforto e a máxima energia simultaneamente.

A otimização multi-objetivo da aleleração (conforto) e da energia elétrica apresenta grande variação dos valores de aceleração e energia em função dos pesos. Os maiores valores encontrados de energia se encontram quando o peso  $p_1$  está abaixo de 50%. A Fig. 4.41 apresenta grandes variações entre os valores das rodadas. Desta forma, o algoritmo proporciona grandes variações de combinações dos valores de energia e aceleração utilizando os mesmos valores de peso  $p_1$  na busca.

A Fig. 4.42 evidencia o que acontece com a combinação dos valores de energia e aceleração em função da variação dos pesos. Os maiores valores encontrados de energia não estão necessariamente presentes quando se tem o maior peso de energia. O mesmo acontece com os menores valores da aceleração.

O diagrama de frente de pareto apresentada na Fig.4.43, mostra os valores otimizados, ou seja, de maior energia elétrica e menor aceleração vertical utilizando um peso estabelecido. Neste caso, o diagrama é mostrado utilizando o peso  $p_1 = 0.5$ .

Valores otimizados também são encontrados utilizando valores de pesos distintos do mencionado anteriormente. Portanto os resultados da otimização utilizando diversos valores de pesos são mostrados nas tabelas 4.1 a 4.4.

Algumas das melhores combinações dos valores de aceleração e energia podem ser destacadas, como:  $p_1 = 0,17$ ;  $\ddot{y}_s = 2,72 \ m/s^2$ ;  $E_e = 44,44 \ J, p_1 = 0,22$ ;  $\ddot{y}_s = 2,63 \ m/s^2$ ;  $E_e = 55,47 \ J, p_1 = 0,26$ ;  $\ddot{y}_s = 2,75 \ m/s^2$ ;  $E_e = 44,51 \ J, p_1 = 0,41$ ;  $\ddot{y}_s = 2,24 \ m/s^2$ ;  $E_e = 59,25 \ J, p_1 = 0,64$ ;  $\ddot{y}_s = 2,61 \ m/s^2$ ;  $E_e = 56,27 \ J$ . Um exemplo de uma das melhores condições encontradas,  $p_1 = 0,41$ ;  $\ddot{y}_s = 2,24 \ m/s^2$ ; e  $E_e = 59,25 \ J$ , resulta no seguinte grupo de parâmetros:  $m = 1565,0 \ kg$ ;  $k = 68513 \ N/m$ ;  $b = 0 \ Ns/m$ ;  $R = 82,92 \ \Omega$ ;  $L = 0,325 \ H$ ;  $C = 676,1 \ \mu F$ ;  $B = 2,541 \ T$ ;  $l = 373,9 \ m$ .

## Referências Bibliográficas

AMATI, N.; FESTINI, A.; TONOLI, A. Design of electromagnetic shock absorbers for automotive suspensions. *Vehicle System Dynamics*, v. 49, p. 1913–1928, 2011.

BAUMAL, A. E.; MCPHEE, J. J.; CALAMAI, P. H. Application of genetic algorithms to the design optimization of an active vehicle suspension system. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, Elsevier, v. 163, n. 1, p. 87–94, 1998.

BOILEAU, P. E.; RAKHEJA, S. Vibration attenuation performance of suspension seats for off-road forestry vehicles. *International Journal of Industrial Ergonomics*, v. 5, n. 3, p. 275–291, 1990. ISSN 0169-8141. Disponível em: <a href="http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0169814190900638">http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0169814190900638</a>>.

BOUAZARA, M.; RICHARD, M. J.; RAKHEJA, S. Safety and comfort analysis of a 3-d vehicle model with optimal non-linear active seat suspension. *Journal of Terramechanics*, v. 43, n. 2, p. 97–118, 2006. ISSN 0022-4898. Disponível em: <a href="http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022489804001132">http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022489804001132</a>>.

COLEY, D. A. An introduction to genetic algorithms for scientists and engineers. [S.l.]: World Scientific, 1999.

ELS, P. S. et al. The ride comfort vs. handling compromise for off-road vehicles. *Journal of Terramechanics*, v. 44, n. 4, p. 303–317, 2007. ISSN 0022-4898. Disponível em: <a href="http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022489807000213">http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022489807000213</a>>.

GEN, M.; CHENG, R. Genetic Algorithms & Engineering Optimization. [S.l.]: Wiley, 2000.

KAWAMOTO, Y. et al. Modeling of electromagnetic damper for automobile suspension. J System Design and Dynamics, v. 1, p. 524–535, 2007.

MEIROVITCH, L. Methods of analytical dynamics. [S.l.]: Dover Publications, 2010.

PONTES JUNIOR, B. R. et al. Contribution of electrical parameters on the dynamical behaviour of a nonlinear electromagnetic damper. *Nonlinear Dynamics*, Springer, v. 79, n. 3, p. 1957–1969, 2015.

PREUMONT, A. Mechatronics. [S.l.]: Springer, 2006.

RAO, S. S. Mechanical Vibrations. 4. ed. [S.l.]: Pearson Prentice Hall, 2004.

RAO, S. S. Engineering optimization: theory and practice. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2009.

RENNO, J. M.; DAQAQ, M. F.; INMAN, D. J. On the optimal energy harvesting from a vibration source. *J Sound and Vibration*, v. 320, p. 386–405, 2009.

SILVEIRA, M.; PONTES JUNIOR, B. R.; BALTHAZAR, J. M. Use of nonlinear asymmetrical shock absorber to improve comfort on passenger vehicles. *Journal of Sound and Vibration*, v. 333, n. 7, p. 2114–2129, 2014. ISSN 0022-460X. Disponível em: <a href="http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022460X13010195">http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022460X13010195</a>>.

STEPHEN, N. G. On energy harvesting from ambient vibration. J Sound and Vibration, v. 293, p. 409–425, 2006.

TONOLI, A. et al. Modelling and validation of electromechanical shock absorbers. *Vehicle System Dynamics*, v. 51, p. 1186–1199, 2013.

ZUO, L.; ZHANG, P. S. Energy harvesting, ride comfort, and road handling of regenerative vehicle suspensions. *J Vibration and Acoustics*, v. 135, 2013.