

# **Estudo da viabilidade energética de amortecedores regenerativos de relutância magnética comutados em veículos elétricos**

**Joaquim Armando Chamare**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
**Engenharia Eletrotécnica e de Computadores**  
(2<sup>o</sup> ciclo de estudos)

Orientador: Prof<sup>a</sup>. Doutora Maria do Rosário Alves Calado

Coorientador: Doutor Rui Pedro Gouveia Mendes

**Covilhã, outubro de 2021**



# **Dedicatória**

À Natália Ngueve Dakaiesunga, Paulo Chamare, Lavoisier Chamare e Arquimedes Chamare.

# Agradecimentos

Quero agradecer à minha orientadora, Prof.<sup>a</sup> Doutora Maria do Rosário Alves Calado, por toda a ajuda e aconselhamento que me foram prestados ao longo da realização desta dissertação.

Agradecer a DEUS, por conceder-me a oportunidade, saúde para a realização deste trabalho, e pela concretização de mais um dos meus objetivos.

Quero deixar um especial agradecimento ao meu coorientador Doutor Rui Pedro Gouveia Mendes, por ter partilhado o todo seu conhecimento e experiência que foram necessários e fundamentais para a realização desta dissertação, apoiando-me e orientando-me em todos os momentos e circunstâncias.

Agradeço ao Prof. Doutor Sílvio Mariano e ao Prof. Doutor José Pombo por toda a disponibilidade e ajuda.

Agradeço carinhosamente aos meus pais Armando Kauenha Chamare e Avelina Nduva (em memória).

Aos meus irmãos Pedro, Adelino, Ana, Julieta, Ndombuela, Ester, Laurinda, Cesaltina, Viegas, Chiumba e Julião pela companhia, apesar da distância.

Agradeço aos meus filhos, Paulo, Lavoisier e Arquimedes, pela alegria, e carinho.

A minha esposa, Natália Ngueve Dakaiesunga, agradeço principalmente a paciência, disponibilidade e apoio incondicional ao longo de todo o meu percurso académico e a preencher o papel que me era destinado.

Agradeço também a alguém muito especial na minha vida a minha Tia Ermelinda Ungomba, em tudo que tem feito em prol da minha família.

Por fim quero agradecer a todos os meus amigos que estiveram presentes durante todo o meu percurso académico e que contribuíram para a realização desta dissertação.



# **Prefácio**

*Treine a sua mente para buscar soluções e não problemas*

*Bill Gates*



# Resumo

Esta dissertação centra-se no estudo da viabilidade energética de amortecedores regenerativos de relutância magnética em veículos elétricos.

Neste trabalho procura-se contribuir para investigação e desenvolvimento de geradores lineares de relutância variável comutados de topologia tubular com aplicação em sistemas de suspensão regenerativa para conversão de energia de vibração. É descrito o sistema de suspensão, é definido o modelo matemático que rege o seu comportamento e os diferentes tipos de suspensão.

Os veículos elétricos têm ganho muito interesse, como alternativa aos veículos movidos por combustíveis fósseis, por serem mais ecológicos.

É feita a descrição da evolução dos veículos elétricos desde a primeira geração até à quarta geração.

Entretanto, aborda-se o princípio de conversão de energia da máquina linear de relutância variável comutada, estuda-se o modelo dinâmico do gerador, e referem-se os conversores eletrónicos de potência para o seu controlo.

Por fim, é feita a análise energética da suspensão regenerativa com o gerador linear de relutância variável comutado, e todo processo de cálculo computacional é implementado em linguagem própria do *software* Matlab e do software gratuito Finite Element Method Magnetics (FEMM).

## Palavras-chave

Veículo elétrico, Sistema de suspensão regenerativa, Gerador Linear de Relutância Variável Comutado, Gerador Tubular, Conversão de Energia da vibração.



# **Abstract**

This Dissertation focuses on the study of the energetic feasibility of magnetic switched reluctance regenerative dampers in electric vehicles.

In this work, it is intended to contribute to research and development of linear switched reluctance generators with tubular topology for application in regenerative suspension systems for vibration energy conversion. The suspension system is described, the mathematical model that governs its behavior and the different type of suspensions are defined.

Electric vehicles have gained a lot of interest, as an alternative to fossil-powered vehicles, because they are more ecological.

Furthermore, the principle of energy conversion in linear switched reluctance machine is discussed, the dynamic model of the generator is studied, and the electronic power converters for its control are presented.

Lastly, there is an energy analysis of the regenerative suspension based on linear switched reluctance generator. The computational calculation process is implemented using Matlab and Finite Element Method Magnetics (FEMM) software.

## **Keywords**

Electric Vehicles; Regenerative Suspension System; Linear Switched Reluctance Generators; Tubular Generator; Vibration Energy Conversion.



## Índice

1	Capítulo 1. Introdução .....	1
1.1	Revisão Bibliográfica .....	2
1.2	Motivação e objetivos .....	3
1.3	Organização do trabalho .....	3
2	Capítulo 2. Os Veículos Elétricos.....	5
2.1	Introdução.....	5
2.2	História dos Veículos Elétricos .....	5
2.3	Tipos de Veículos elétricos.....	8
2.3.1	Veículo elétrico puro .....	9
2.3.2	Veículo elétrico híbrido .....	9
2.3.3	Veículo elétrico híbrido plug-in .....	10
2.4	Vantagens e Desvantagens dos veículos elétricos.....	10
2.4.1	Vantagens dos veículos elétricos .....	11
2.4.2	Desvantagens dos Veículos elétricos .....	11
2.5	Comparação entre o veículo elétrico e o veículo convencional .....	12
3	Capítulo 3. Caracterização dos diferentes tipos de suspensão .....	14
3.1	Introdução.....	14
3.2	Tipos de suspensão .....	15
3.2.1	Sistemas de suspensão passiva .....	15
3.2.2	Sistema de suspensão semi-ativa .....	16
3.2.3	Sistema de suspensão ativa .....	17
4	Capítulo 4. A Máquina Linear de Relutância Variável Comutada .....	22
4.1	Introdução.....	22
4.2	Princípio de conversão eletromagética de energia.....	23
4.2.1	Posição de alinhamento .....	23
4.2.2	Posição de não alinhamento.....	24
4.2.3	Nas posições intermédias .....	24

4.3	Características Magnéticas do MRVC. ....	25
4.4	Máquina linear .....	28
4.5	Gerador linear de relutância variável comutado (GLRVC) .....	30
5	Capítulo 5. Análise de uma Suspensão Eletromagnética Ativa .....	35
5.1	Introdução .....	35
5.2	Modelação de um sistema de suspensão eletromagnética ativa com gerador linear de relutância variável comutado. ....	35
5.3	Excitação da Estrada .....	38
5.3.1	Geração de um perfil de estrada artificial.....	39
5.4	Estrutura do GLRVC adoptado .....	41
5.4.1	Modelo dinâmico GLRVC.....	42
5.4.2	Conversor de potência .....	45
5.5	Controlo .....	46
5.5.1	Controlo por histerese. ....	46
5.5.2	Controlador PI .....	47
6	Capítulo 6. Análise Experimental de uma Suspensão Eletromagnética Ativa .....	48
6.1	Simulação e análise energética de uma suspensão regenerativa com um GLRVC.....	48
7	Capítulo 7. Conclusão .....	63
	Referências Bibliográficas .....	65
	Anexos. Implementação computacional do modelo do GLRVC Tubular.....	77
A.1	Modelo dinâmico do gerador .....	77
A.2	Modelo dinâmico do sistema completo .....	81
A.3	Perfis de estrada considerados na simulação do modelo dinâmico.....	87

# Lista de Figuras

Figura 2.1 Jenatzy a bordo do seu “La Jamais Contente” [31] .....	6
Figura 2.2 Veículo elétrico "Henney Kilowatt" [30], [31].....	7
Figura 2.3 Jipe Lunar da NASA [31].....	7
Figura 2.4 GM EV1 [30], [31] .....	8
Figura 3.1 Suspensão Passiva [69].....	16
Figura 3.2 Modelo do sistema de suspensão semi-ativa [72].....	17
Figura 3.3 Sistema de suspensão ativa [72].....	18
Figura 3.4 Suspensão activa hidráulica/pneumática [78].....	19
Figura 3.5 Suspensão eletromagnética ativa proposta por Bose Corporation Inc [80] .	20
Figura 3.6 Suspensão regenerativa com um gerador trifásico de relutância variável tubular.....	21
Figura 4.1 Posição de alinhamento [88].....	24
Figura 4.2 Posição de não alinhamento [88].....	24
Figura 4.3 Posições intermédias [88].....	25
Figura 4.4 Representação das curvas magnéticas, em termos qualitativos, da máquina de relutância variável comutada [88], [92].....	26
Figura 4.5 Ilustração do conceito de energia e de co-energia [88], [99].....	27
Figura 4.6 Variação da indutância com a posição do rotor [92] .....	28
Figura 4.7 Conversão de motor rotativo para linear [91] .....	29
Figura 4.8 Configuração linear tubular no secundário [91] .....	29
Figura 4.9 Circuito clássico de controlo para o gerador elétrico de relutância variável comutado trifásico [88] .....	31
Figura 4.10 Formas de onda típicas para a corrente, fluxo e indutância ideal por fase [88] .....	32
Figura 4.11 Formas ideais de onda para a corrente gerada [88] .....	33
Figura 4.12 Percurso da corrente durante o a) Período de excitação e b) período de geração [88].....	34
Figura 5.1 Sistema de suspensão activa de um quarto de carro. ....	36
Figura 5.2 Diagrama de corpo livre .....	36
Figura 5.3 Caracterização geométrica do GLRVC: (a) secção longitudinal da versão com o primário no interior, (b) secção longitudinal da versão com o primário localizado no exterior, (c) ilustração 3D da versão com o primário localizado no interior, (d) ilustração 3D da versão com o primário localizado no exterior e (e) forma geométrica adoptada para as saliências [110] .....	42
Figura 5.4 Circuito elétrico para uma fase [111] .....	43

Figura 5.5 Configuração do circuito e trajetória de corrente elétrica durante o: (a) período de excitação, (b) período de geração e (c) período de roda livre [112] .....	43
Figura 5.6 Sistema de geração com estágio de conversão DC/DC [112] .....	45
Figura 5.7 Controle por histerese: (a) Perfil da corrente elétrica na fase e (b) lógica de controle [115] .....	47
Figura 6.1 Características eletromagnéticas do gerador: (a) Força e (b) Indutância.....	49
Figura 6.2 Valores médios da potência elétrica gerada para o perfil de estrada: (a) A, (b) B, (c) C, (d) D, (e) E, (f) F, (g) G e (h) H. ....	52
Figura 6.3 Deslocamento máximo da oscilação do veículo para perfil de estrada: (a) A, (b)B, (c) C, (d) D, (e) E, (f) F, (g) G e (h) H. ....	53
Figura 6.4 Deslocamento da massa $M_s$ do veículo calculada para as várias velocidades para o perfil de estrada: (a) A, (b) B, (c) C, (d) D (e) E, (f) F, (g) G e (h) H. ....	54
Figura 6.5 Deslocamento do gerador correspondente à simulação com maior valor médio de potência elétrica para o perfil de estrada: (a) A, (b) B, (c) C, (d) D, (e) E, (f) F, (g) G e (h) H.....	55
Figura 6.6 Perfis de oscilação da massa $MS$ a uma velocidade de 20 km/h para as várias intensidades de amortecimento para o perfil de estrada: (a) A, (b) B, (c) C, (d) D, (e) E, (f) F, (g) G e (h) H. ....	56
Figura 6.7 Perfis de oscilação da massa $MS$ a uma velocidade de 40 km/h para as várias intensidades de amortecimento para o perfil de estrada: (a) A, (b) B, (c) C, (d) D, (e) E, (f) F, (g) G e (h) H. ....	57
Figura 6.8 Perfis de oscilação da massa $MS$ a uma velocidade de 60 km/h para as várias intensidades de amortecimento para o perfil de estrada: (a) A, (b) B, (c) C, (d) D, (e) E, (f) F, (g) G e (h) H. ....	58
Figura 6.9 Perfis de oscilação da massa $MS$ a uma velocidade de 80 km/h para as várias intensidades de amortecimento para o perfil de estrada: (a) A, (b) B, (c) C, (d) D, (e) E, (f) F, (g) G e (h) H. ....	59
Figura 6.10 Perfis de oscilação da massa $MS$ a uma velocidade de 90 km/h para as várias intensidades de amortecimento para o perfil de estrada: (a) A, (b) B, (c) C, (d) D, (e) E, (f) F, (g) G e (h) H. ....	60
Figura 6.11 Perfis de oscilação da massa $MS$ a uma velocidade de 100 km/h para as várias intensidades de amortecimento para o perfil de estrada: (a) A, (b) B, (c) C, (d) D, (e) E, (f) F, (g) G e (h) H. ....	61
Figura A. 1 Modelo dinâmico do gerador para calcular os valores ótimos.....	77
Figura A. 2 Bloco do controlador do gerador .....	77
Figura A. 3 Bloco do conversor do gerador .....	78

Figura A. 4 Bloco do GLRVC.....	78
Figura A. 5 Bloco elétrico-mecânico .....	79
Figura A. 6 Blocos: (a) Fase A, (b) Fase B e (c) Fase C .....	79
Figura A. 7 Bloco da Fase A .....	80
Figura A. 8 Bloco da Fase B .....	80
Figura A. 9 Bloco da Fase C .....	80
Figura A. 10 Modelo do sistema completo.....	81
Figura A. 11 Bloco do conversor do gerador .....	81
Figura A. 12 Bloco do GLRVC.....	82
Figura A. 13 Bloco elétrico-mecânico .....	82
Figura A. 14 Blocos da Fase: (a) A, (b) B e (c) C .....	83
Figura A. 15 Bloco da Fase A.....	83
Figura A. 16 Bloco da Fase B.....	84
Figura A. 17 Bloco da Fase C.....	84
Figura A. 18 Bloco do controlador do gerador.....	85
Figura A. 19 Bloco do conversor DC/DC Buck .....	85
Figura A. 20 Bloco do controlador PI.....	86
Figura A. 21 Bloco da suspensão regenerativa .....	86
Figura A. 22 Deslocamento da roda definido pelo perfil de estrada percorrido pelo veículo: (a) A, (b) B, (c) C, (d) D, (e) E, (f) F, (g) G e (h) H. ....	87

# Lista de Tabelas

Tabela 2-1 Características de Veículos Elétricos e Convencionais [64] .....	13
Tabela 5-1 Diâmetro, largura e deslocamento da suspensão [85], [104] .....	35
Tabela 5-2 Parâmetros dos Veículos [108] .....	37
Tabela 5-3 Valores ISO 8608 de perfil de Estrada $G_d(n0)$ e $G_d(\Omega0)$ [108], [109] .....	38
Tabela 5-4 Valores do $k$ [109] .....	41
Tabela 6-1 Parâmetros dimensionais do modelo da máquina .....	48
Tabela 6-2 Valores ótimos obtidos na simulação do modelo do gerador .....	49
Tabela 6-3 Valores ótimos obtidos na simulação do modelo do gerador .....	50



# Nomenclatura

Parâmetro	Designação	Unidades SI
$B$	Intervalo de amostragem	
$b_p$	Largura da saliência do primário	[m]
$b_{p2}$	Largura do polo do primário com maior dimensão	[m]
$b_s$	Largura da saliência do secundário	[m]
$B_s, C_s$	Coefficiente de amortecimento	[N s/m]
$B_{sim}$	Coefficiente de amortecimento semi-ativa	[N s/m]
$C$	Capacidade	[F]
CD	Modo de esgotamento de carga	
$c_p$	Largura da cava do primário	[m]
$c_{p2}$	Largura da cava de alojamento do fio condutor	[m]
$c_s$	Largura da cava do secundário	[m]
CS	Modo de sustentação de carga	
$D$	Duty-cycle	
$D_{init}$	Duty-cycle inicial	
$D_{sft}$	Diâmetro do espaço destinado à estrutura suporte	[m]
$d_{wire}$	Diâmetro do fio condutor	[m]
$e_u$	Erro normalizado entre o valor da tensão no barramento DC e o respetivo valor de referência	
$F_{gen}$	Força eletromagnética do gerador	[N]
$F_z$	Força das fases do gerador	[N]
$G_a$	Acelerações em termo da variação da inclinação da superfície da estrada	
$G_d$	Rugosidade da superfície da estrada	
$H$	Altura	[m]
$h_b$	Banda de histerese da corrente elétrica	[A]
$h_{coil}$	Altura da secção transversal do enrolamento do fio condutor	[m]
$h_p$	Altura da saliência do primário	[m]
$h_{p2}$	Altura do polo do primário com maior dimensão	[m]
$h_s$	Altura da saliência do secundário	[m]
$I$	Corrente	[A]
$I_{DC/DC}$	Intensidade da corrente à saída do conversor DC/DC	[A]

$I_L$	Intensidade da corrente à entrada do conversor eletrônico de potência do gerador	[A]
$I_{ref}$	Intensidade da corrente elétrica de referência	[A]
$I_{carga}$	Corrente elétrica na carga	[A]
$I_{max}$	Intensidade de corrente elétrica máxima	[A]
$k$	Constante dependente da classificação ISO	
$K_i$	Ganho integral	
$K_{offset}$	Distância entre as posições de alinhamento de duas fases consecutivas	
$K_p$	Ganho proporcional	
$K_s$	Rigidez da mola (suspensão)	[N/m]
$K_t, K_u$	Constante de rigidez (pneu)	[N/m]
$L_{an}$	Valor da indutância na posição de alinhamento	
$L_{coil}$	Largura da secção transversal do enrolamento do fio condutor	[m]
$l_g$	Espessura do entreferro	[m]
$L_{max}$	Valor máximo de indutância	[H]
$L_{min}$	Valor mínimo de indutância	[H]
$L_{na}$	Valor da indutância na posição de não alinhamento	
$l_p$	Largura do corte das saliências do primário	[m]
$l_{p2}$	Largura do corte das saliências do secundário com maior dimensão	[m]
$L_r$	Comprimento do perfil da estrada	[m]
$l_s$	Largura do corte das saliências do secundário	[m]
$M_s$	Massa suspensa	[kg]
$M_u$	Massa do conjunto pneu-roda	[kg]
$N$	Frequência espacial	[m <sup>-1</sup> ]
$n_0$	Frequência especial de referência	[m <sup>-1</sup> ]
$N_1$	Número de enrolamentos do primário do transformador	
$N_2$	Número de enrolamentos do secundário do transformador do conversor DC/DC isolado	
$N_f$	Número de espiras por fase	
$n_p$	Espessura do núcleo de ligação do primário	[m]

$n_{p2}$	Espessura do núcleo de ligação dos polos do primário com maior dimensão	[m]
$N_r$	Número de polos do rotor	
$n_s$	Espessura do núcleo de ligação do secundário	[m]
$N_s$	Número de polos do estator	
$N_t$	Número de espiras por enrolamento	
$R_a$	Resistência elétrica da fase	[ $\Omega$ ]
$R_L$	Carga resistiva	[ $\Omega$ ]
$s$	Variável de controlador PI	
$S_1$	Interruptor eletrônico do membro superior do conversor	
$S_2$	Interruptor eletrônico do membro inferior do conversor	
$S_{pc}$	Espessura dos separadores não-magnéticos	[m]
$S_t$	Distância entre a posição de alinhamento e a posição de não-alinhamento	[m]
$T_m$	Binário	[N]
$t_p$	Altura do corte das saliências do primário	[m]
$t_{p2}$	Altura do corte das saliências do secundário com maior dimensão	[m]
$t_s$	Altura do corte das saliências do secundário	[m]
$U_{bus}$	Tensão no barramento DC	[V]
$U_c$	Tensão aos terminais do condensador do conversor eletrônico de potência assimétrico	[V]
$U_{carga}$	Tensão de saída do conversor DC/DC	[V]
$U_D$	Tensão aos terminais do diodo	[V]
$u_k$	Tensão aos terminais da fase elétrica	[V]
$U_S$	Tensão aos terminais do interruptor eletrônico	[V]
$V_S$	Velocidade vertical da carroceria do veículo	
$V_u$	Velocidade vertical do eixo	
$w_c$	Co-energia magnética	[J]
$w_h$	Espaçamento horizontal entre o enrolamento e a estrutura magnética do gerador	[m]
$w_m$	Energia magnética	[J]
$w_y$	Espaçamento vertical entre o enrolamento e a estrutura magnética do gerador	[m]

$Z_{ext}$	Posição de fim do período de geração	[m]
$Z_k$	Posição aos terminais da fase elétrica	[m]
$Z_{max}$	Deslocamento máximo da massa	[mm]
$Z_{mech}$	Posição mecânica	[m]
$Z_{off}$	Posição de fim do período de excitação	[m]
$Z_{on}$	Posição de início do período de excitação	[m]
$Z_r$	Deslocamento da roda definido pelo perfil de estrada percorrido pelo veículo	[mm]
$Z_s$	Deslocamento de massa suspensa	[mm]
$Z_u$	Deslocamento de massa não suspensa	[mm]
$\beta_r$	Arcos polares do rotor	
$\beta_s$	Arcos polares do estator	
$\Phi$	Fluxo	[Wb]
$\Omega$	Frequência espacial angular	[rad/m]

## Lista de Acrónimos e Siglas

BEV	Veículo elétrico a bateria
CATS	Sistema de suspensão de tecnologia activa de computador
EUA	Estados Unidos da América
FCEV	Veículo elétrico a célula de combustível
FEM	Método de elementos finitos
GEE	Gases de efeito estufa
GLRVC	Gerador linear de relutância variável comutado
GM	General Motor
HEV	Veículo elétrico híbrido
ISO	Organização Internacional de Padronização
LSRA	Atuador linear de relutância variável comutado
MCC	Modelo de Carro Completo
MCI	Motor de combustão interna
MMC	Modelo de Meio Carro
MQC	Modelo de Quarto de Carro
MRCV	Máquina de relutância variável comutada
NASA	Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço
PHEV	Veículo elétrico híbrido plug-in
PI	Proporcional Integral
PSD	Densidade espectral de potência
SRM	Motor rotativo de relutância
TPMA	Motor de magnetos permanentes tubular sem escovas
VE	Veículo Elétrico
VMCI	Veículo com motor de combustão interna



# 1 Capítulo 1. Introdução

Com o aumento das temperaturas globais, a emissão de gases de efeito estufa que influenciam o clima no planeta é uma grande preocupação da política global. Em muitos países desenvolvidos, o sector de transporte é o principal contribuinte para as emissões de gases de efeito estufa [1], [2]. Com a integração dos veículos elétricos (VE) tornou-se importante a redução do dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), em relação ao veículo de motor de combustão interna (MCI) [2], [3].

Existem ainda muitos entraves à adoção significativa de veículos elétricos, uma das quais a dependência do petróleo [4], [5].

A criação e desenvolvimento de amortecedores regenerativos é um tema muito analisado e um tema de investigação alvo de muito interesse. O objetivo principal é a tentativa de aproveitamento da energia dissipada nos amortecedores para conversão em energia elétrica. Desde então, muitos tipos diferentes de amortecedores, baseados na recolha de energia, foram conceptualizados e projetados. Ao contrário dos sistemas de suspensão tradicionais, que suprimem as vibrações dissipando a energia da vibração em calor residual, a suspensão regenerativa com amortecedores de captação de energia pode converter a energia tradicionalmente desperdiçada em eletricidade [6], [7].

A energia e a sua utilização são consideradas questões essenciais em todo o mundo. A energia pode ser encontrada sob várias formas, tais como energia elétrica, química, térmica, mecânica (potencial e cinética). Quando algo é capaz de produzir energia é chamado de energia potencial, como por exemplo a água. Já a energia cinética é definida quando a energia é produzida através do movimento, tal como num veículo a percorrer uma estrada, onde a energia de vibração através da suspensão é gerada a partir da energia potencial e cinética. Apesar da disseminação da recolha de energia vibracional em pequenas aplicações eletrónicas, os mecanismos de captação de energia na suspensão de automóveis atraíram grande atenção recentemente. Nas suspensões dos automóveis, o mecanismo de recolha de vibração é implementado como um subsistema, no qual o aproveitamento de energia não é o único propósito, mas também o da garantia de um comportamento dinâmico satisfatório. A pesquisa sobre a recolha da energia desperdiçada como fonte de energia verde tornou-se um tema importante de investigação em diferentes países, instituições de I&D e empresas [6], [8], [9], [10].

No presente trabalho pretende-se desenvolver um sistema de recuperação de energia das vibrações, baseado num gerador de relutância variável comutado, criando desta forma uma suspensão ativa para implementar em veículos elétricos.

## **1.1 Revisão Bibliográfica**

O veículo elétrico (VE) tem uma história muito mais longa do que a maioria das pessoas imaginam. Os VEs foram vistos logo após Joseph Henry apresentar o primeiro motor em 1830. O primeiro VE foi construído em 1834 por Thomas Davenport nos EUA, seguido por Moses Farmer, que construiu o primeiro VE para dois passageiros em 1847. Naquela época, não existiam células elétricas recarregáveis (baterias). Um VE não era uma opção viável, até que os franceses Gaston Plante e Camille Faure, respetivamente, inventaram (1865) e melhoraram (1881) a bateria de armazenamento [11], [12], [13], [14].

Os amortecedores hidráulicos passaram a ser amplamente utilizados em suspensões de veículos desde décadas passadas, para reduzir eficazmente a aceleração das carrocerias dos veículos e manter um bom contacto entre os pneus e o solo, em condições de irregularidades da estrada. Embora a eficiência energética tenha sido uma grande preocupação na indústria automóvel desde a produção de veículos em massa nos anos 1900, os investigadores só em meados da década de 1990 se perceberam que a energia dissipada nos amortecedores hidráulicos pode ser recuperada [6].

O sistema de suspensão é uma parte importante do chassi do veículo, que desempenha um papel fundamental no suporte da carroceria e na absorção da vibração causada pela irregularidade da estrada, e tem, um impacto direto no conforto de direção e na segurança de condução. O sistema de suspensão passiva tradicional tem os seguintes problemas: as suas características de amortecimento fixas tornam difícil atender aos diferentes requisitos das condições de condução variáveis; uma quantidade substancial de energia vibratória é dissipada sob a forma de calor, o que reduz a eficiência do veículo, o sério aumento de temperatura do óleo de amortecimento levará à atenuação da força de amortecimento e à aceleração das falhas no sistema de suspensão. Desta feita, torna-se importante estudar os mecanismos de conversão de energia na suspensão activa, com o intuito de analisar o potencial do aproveitamento da energia vibracional e explorar a redução das emissões de gases de efeito estufa, através da obtenção de energia verde [6], [8], [15], [16].

Um sistema de suspensão eletromagnético compreende um atuador eletromagnético, um mecânico e molas [17]. O sistema de suspensão activa eletromagnética é cada vez mais

considerado devido aos recentes avanços em projecto de motores, em circuitos eletrónicos de potência e em métodos de controlo moderno. Em comparação com o sistema de suspensão ativa hidráulica, é mais eficiente em termos de energia e tem uma resposta dinâmica mais rápida [18].

## **1.2 Motivação e objetivos**

A motivação para abordar o tema do estudo da viabilidade energética de amortecedores regenerativos de relutância magnética comutados em veículos elétricos consistiu no facto do setor dos veículos elétricos estar em constante crescimento e desenvolvimento, na busca de energia limpa para o planeta, bem como no facto de que é possível aproveitar a energia vibracional da estrada para geração de energia elétrica.

O objetivo principal desta dissertação é a proposta de uma suspensão ativa, onde se utiliza o princípio da relutância magnética, para a produção de energia verde para os veículos elétricos

Concretamente, outros objetivos inerentes à presente dissertação são:

- Analisar a possível transformação dos amortecedores tradicionais para incluir a possibilidade de geração de energia elétrica;
- Analisar as potencialidades energéticas dos aproveitamentos de energia vibracional transmitida pela estrada em energia elétrica;
- Estudar os benefícios para o meio ambiente decorrentes do aproveitamento energético dos amortecedores dos veículos elétricos;
- Propor uma solução tecnológica, baseada na relutância magnética, para a produção de energia elétrica num sistema de suspensão activa.

## **1.3 Organização do trabalho**

A dissertação está organizada em sete capítulos, sendo no presente Capítulo 1 realizada a introdução geral e apresentado o principal propósito deste trabalho. O Capítulo 2 apresenta uma visão geral acerca dos veículos elétricos. O Capítulo 3 destina-se a caracterizar os diferentes tipos de suspensão. O Capítulo 4 apresenta a caracterização dos geradores de relutância magnética comutados. O Capítulo 5 refere-se à análise de uma suspensão eletromagnética ativa. O Capítulo 6 apresenta a análise experimental de uma suspensão eletromagnética ativa. O Capítulo 7 conclui a dissertação e indica possíveis trabalhos e desenvolvimentos futuros em torno deste tema.



## **2 Capítulo 2. Os Veículos Elétricos**

### **2.1 Introdução**

Um veículo elétrico (VE) é um veículo movido por um motor elétrico, em vez um motor de combustão interna (MCI), e o motor funciona usando a energia armazenada nas baterias. As baterias devem ser carregadas frequentemente, ligando-se a qualquer fonte de alimentação [11], [13], [19], [20], [21].

No início de 1839, o VE era preferido face aos motores a vapor e a gasolina devido ao seu conforto e facilidade de operação. Naquela época, para iniciar um motor a gasolina o torque de rotação mecânica tinha de ser imposto externamente por uma manivela, o que era manifestamente difícil e incómodo. Os VEs eram os veículos mais rápidos no início de 1900 até ao advento dos carros MCI potentes e leves. Em 1900, cerca de um terço dos carros vendidos eram VEs. Em pouco tempo, porém, os VEs foram sendo substituídos por carros MCI devido a alguns eventos históricos, como por exemplo a segunda guerra mundial [22], [23], [24].

Atualmente, os veículos elétricos estão em franco crescimento, crescimento esse explicado por muitas razões, sendo o primeiro e o mais importante argumento o seu fraco impacto ambiental [25].

O setor de transportes é responsável globalmente por aproximadamente um quarto do total de emissões de gases de efeito estufa relacionadas com a energia primária utilizada, com mais de 70% dessas emissões atribuídas ao transporte rodoviário. Para reduzir as emissões relacionadas com o transporte, os planos de mobilidade sustentável de muitos governos em todo o mundo incluem a necessidade de uma mudança substancial em direcção ao uso de veículos com emissão ultrabaixa de carbono. Os VEs puros a bateria e os VEs a célula de combustível de hidrogénio emitem zero gases de efeito estufa e zero poluentes durante a condução, enquanto os veículos elétricos híbridos plug-in (PHEVs) têm emissões zero ao operar com eletricidade [25], [26], [27], [28], [29].

### **2.2 História dos Veículos Elétricos**

A história dos veículos elétricos pode ser dividida em quatro fases, e as mesmas fases diferem entre si pela tecnologia e pela sua inserção no contexto socioeconómico de cada época, sendo [30], [31]:

- Primeira fase - 1837-1912

Segundo [30], [31], em 1837, na Inglaterra, foi criada a primeira carruagem elétrica. Portanto, aproximadamente 40 anos antes do primeiro automóvel a motor de combustão interna, o “*Patent motorwagen*”, desenvolvido pelo conceituado engenheiro “*Karl Benz*”, em 1886. Ainda de acordo com [30], [31], em 1897, surge a primeira frota de táxis elétricos em Londres, mas o ponto alto da produção e venda dos veículos elétricos ocorreu entre os anos de 1890 e 1910. Estes veículos tiveram um impacto positivo, por não levarem às contrariedades que os veículos de combustão interna e externa (veículos a vapor) impunham, tais como: barulho, poluição, arranque à manivela, contragolpes do motor de combustão interna, além da demora e do risco de incêndios, no caso dos motores de combustão externa.

Em 1899, foi quebrado o recorde de velocidade pelo belga Jenatzy, a bordo de um veículo elétrico, o “*La Jamais Contente*”, Figura 2.1, que atingiu 106 km/h [30], [31].

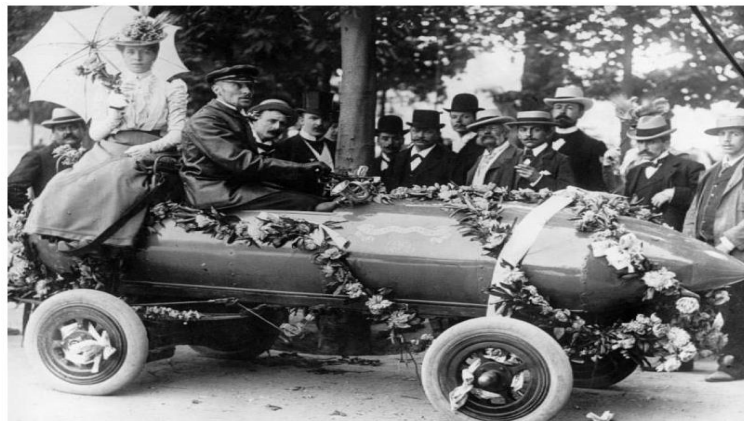


Figura 2.1 Jenatzy a bordo do seu “*La Jamais Contente*” [31]

- Segunda Fase - 1912 a 1973

A partir de 1920, um grande número de veículos já possuía arranque elétrico. Mais precisamente em finais de 1950 e princípios de 1960, as indústrias automóveis começaram por criar alternativas, devido às preocupações com a poluição e seus efeitos no ambiente humano, que visavam o aperfeiçoamento dos veículos, fazendo com que o veículo “*Henney Kilowatt*” fosse lançado em 1959, para responder ao paradigma da poluição, Figura 2.2. O veículo era movido a baterias de chumbo-ácido, fazendo dele também o primeiro veículo elétrico transistorizado [30], [31], [32].



Figura 2.2 Veículo elétrico "Henney Kilowatt" [30], [31]

Nesta fase, surgiu ainda o veículo elétrico mais famoso, projetado para missões espaciais: o Jipe Lunar da NASA, Figura 2.3. Com a exceção destes exemplos, o desenvolvimento da tração elétrica neste período ficou concentrado nos veículos de transporte de massa, como autocarros [23].

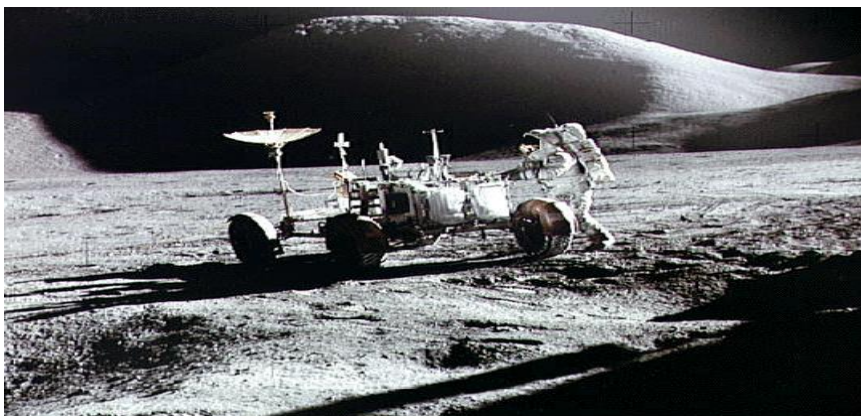


Figura 2.3 Jipe Lunar da NASA [31]

Uma das particularidades que se verificava durante esta fase é que os veículos funcionavam com a tecnologia de armazenamento de energia semelhante à tecnologia da primeira fase do veículo elétrico, quer dizer, utilizando baterias de chumbo-ácido [30].

Como a autonomia dos veículos era relativamente baixa, faziam-se esforços para se produzir veículos com maior autonomia, mas durante a primeira metade dos anos 80, quando foi superada a crise do petróleo e os preços no mercado internacional começaram a cair, os veículos convencionais tiveram uma maior procura. Nesta mesma época, os estudos nas áreas de eletrónica começam a dar resultados significativos, o que possibilitou o aumento na eficiência dos motores de combustão [30], [31].

- Quarta fase – 1996 em diante

Durante esta fase, procurou-se idealizar a produção de um veículo, que fosse completamente livre de emissões, e quase não poluente, como o exemplo do etanol, que chegasse a dar contribuição para a redução dos níveis de poluição atmosférica e sonora nos centros urbanos, e que de certa maneira viesse a complementar a oferta com transportes autônomos [30], [31].

O lançamento do GM EV1 pela *General Motor* em 1996, Figura 2.4, foi uma amostra da evolução do veículo elétrico, pioneiro pela forma como o veículo elétrico era encarado. Neste modelo, o veículo já vinha equipado com baterias de melhor tecnologia e apresentava uma grande inovação no sistema de propulsão, no caso um motor de corrente alternada com um inversor de frequência [30], [31].

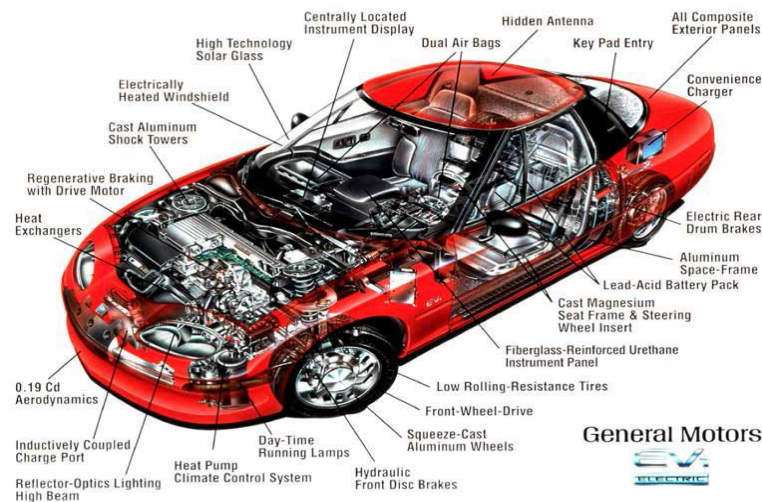


Figura 2.4 GM EV1 [30], [31]

A tecnologia empregada no GM EV1, com inversor de frequência e motor AC, é até hoje uma das alternativas utilizadas pela maioria dos fabricantes de veículos elétricos e híbridos [30], [31].

### 2.3 Tipos de Veículos elétricos

Atualmente, existem três tipos de veículos elétricos [30], [33], [34]: veículo elétrico a bateria ou elétrico puro (BEV), veículo elétrico híbrido (HEV) e veículo elétrico híbrido plug-in (PHEV).

### **2.3.1 Veículo elétrico puro**

Nesta categoria de veículos, incluem-se os totalmente elétricos a bateria (BEVs) e os veículos elétricos a célula de combustível (FCEV).

Os veículos elétricos a bateria (BEVs) têm a sua unidade motriz alimentada a partir de uma bateria, e representam um desenvolvimento tecnológico promissor com potencial para reduzir significativamente as emissões de CO<sub>2</sub> emitidas pelos automóveis [35], [36], [37], [38]. Além disso, a eficiência de transição energética dos BEVs é maior do que a dos automóveis tradicionais e a eletricidade para os carregar pode ser obtida a partir do vento, do sol, da água e de outras fontes de energia limpa [39]. Os veículos 100% elétricos, ou simplesmente BEVs, aproveitam a energia armazenada num banco de baterias como a principal fonte de alimentação do motor elétrico [30], [34]. Os BEVs são o tipo mais simples de VE, de uma perspetiva conceptual, usando energia elétrica de uma única fonte - a bateria electroquímica - para alimentar um ou mais motores elétricos. Normalmente, um único motor elétrico é ligado ao eixo dianteiro de uma ou duas caixas de velocidades, mas existem várias outras variações possíveis nas arquiteturas de transmissão. Uma variação significativa é usar quatro “*motores in-wheel*” acoplados a cada roda, em vez de um único motor de acionamento [33], [40], [41].

Os veículos elétricos a célula de combustível (FCEV) utilizam o gás hidrogénio como principal fonte de energia. A conversão de gás hidrogénio em eletricidade produz apenas água e calor, ou seja, nesta conversão não há produção de gases poluentes. A produção do gás hidrogénio em si pode poluir, mas mesmo com o combustível vindo de fontes menos limpas como o carvão mineral, no total, os carros a célula de combustível produzem 30% menos poluentes se comparados aos veículos convencionais [41], [42], [43], [44].

O hidrogénio é o elemento mais abundante no universo e produz apenas vapor de água como resultado da reação química ocorrida nas células a combustível. Com isso, os veículos elétricos a células a combustível, que utilizam hidrogénio como combustível, continuam com a sua tendência de crescimento no sector automóvel [42].

### **2.3.2 Veículo elétrico híbrido**

Em resposta aos desafios ambientais e energéticos actuais e futuros, devido à economia de combustível aprimorada e às emissões reduzidas de veículos elétricos híbridos (HEVs), sem sacrificar a segurança e a confiabilidade, um número crescente de fabricantes de automóveis dedica esforços de investigação e desenvolvimento em HEVs

[45], [46], [47]. Um HEV adiciona energia elétrica à propulsão convencional para melhorar o seu desempenho e economia de combustível. Com o auxílio da energia elétrica, o motor de um HEV pode ser melhor dimensionado e funcionar de maneira mais eficiente, já que a potência necessária pode ser compensada por um motor elétrico (MGs). Além disso, quando o veículo está em travagem, os MGs podem aproveitar parte da energia cinética do veículo para recarregar a bateria [48], [49]. A tecnologia de veículos elétricos híbridos é muito mais complexa do que a dos veículos convencionais. Basicamente, os veículos elétricos híbridos podem ser divididos em veículos híbridos série e veículos híbridos paralelo [50], [51]. No híbrido série, apenas o motor elétrico aciona o módulo propulsor e um MCI de menor potência funciona como gerador para alimentar o motor elétrico ou recarregar as baterias. No híbrido paralelo, o MCI e o motor elétrico estão ambos ligados à transmissão mecânica e podem transmitir simultaneamente potência para movimentar o veículo [52], [53].

### **2.3.3 Veículo elétrico híbrido plug-in**

Um veículo elétrico híbrido plug-in (PHEV) é um veículo que usa energia elétrica externa e combustíveis fósseis como fontes de energia. Um PHEV opera inicialmente no modo de esgotamento de carga (modo CD), no qual o veículo é alimentado principalmente pela bateria até que um nível de carga mínima predefinida seja alcançado. O veículo então muda para o modo de sustentação de carga (modo CS), no qual o veículo consome apenas combustível [54], [55].

Assim como o HEV, os veículos híbridos plug-in são equipados com um motor elétrico e um motor de combustão. A grande diferença é a forma de carregamento, onde para além da energia da travagem regenerativa e da energia proveniente do motor de combustão, as baterias podem ser carregadas a partir da rede elétrica através da tomada do veículo. Por esse motivo, as baterias do veículo são significativamente maiores e podem fornecer uma propulsão puramente elétrica durante vários quilómetros. Após a descarga das baterias, o motor de combustão é colocado em serviço. Este facto torna o PHEV particularmente útil para viagens mais longas, sem a necessidade de recarregar as baterias [30], [33], [34].

## **2.4 Vantagens e Desvantagens dos veículos elétricos**

Existem diversas vantagens e desvantagens relativas aos veículos elétricos, pelo que se enunciam aqui algumas delas, de forma breve.

### **2.4.1 Vantagens dos veículos elétricos**

Das vantagens a apontar aos VEs, as seguintes podem ser consideradas as de maior importância:

**Emissões de GEE:** Na verdade, esta é uma das grandes vantagens dos veículos elétricos (VEs), pois permitem que todo o consumo seja feito a partir de energia elétrica, produzindo emissões nulas na fase de utilização [20], [56], [57].

**Eficiência:** A eficiência dos motores elétricos é talvez umas das maiores vantagens em relação aos motores de combustão. Nos VEs essa eficiência ronda os 75%, enquanto nos MCI a taxa de energia útil retirada da energia fornecida pelo combustível se situa na faixa de 15-20%. [58], [59].

**Ausência do ruído:** O veículo elétrico é a alternativa mais bem posicionada face ao veículo convencional MCI no que diz respeito ao ruído e ao impacto sonoro no meio ambiente, já que motor elétrico é silencioso, podendo ser uma boa ferramenta para diminuir a poluição sonora nas cidades [60], [61].

### **2.4.2 Desvantagens dos Veículos elétricos**

Das desvantagens a apontar aos VEs, as seguintes podem ser consideradas as de maior importância:

**Custos de aquisição:** a adesão aos veículos elétricos é dificultada por inúmeras barreiras, e uma das principais razões por trás dos baixos níveis de aceitação dos VEs por parte do consumidor é a percepção de estes custam mais do que o seu equivalente com motor de combustão interna (VMCI) [62], [63].

**Custo de aluguer ou troca da bateria:** A modalidade de aluguer da bateria apesar de à primeira vista parecer uma vantagem, pois reduz o custo de aquisição da viatura, a médio prazo resulta num custo mensal ou anual extra. As baterias são ainda uma tecnologia em desenvolvimento, visando as investigações nesta matéria a tentativa de diminuição do seu peso e do seu custo. Mas, por enquanto, incluem-se ainda no quadro das desvantagens, por representarem uma fatia considerável do preço final do carro elétrico [30], [58].

**Autonomia:** Os veículos elétricos ainda são conhecidos como veículos com baixa autonomia, o que não lhes permite atingir mais que 200 Km na maioria de seus modelos, mesmo tendo as baterias completamente carregadas. Esta situação é vista como

preocupante por parte de novos utilizadores. Faz-se referência a que 75% dos utilizadores dos VEs apontam a baixa autonomia como a grande barreira à sua utilização, sendo este um aspeto bastante crítico que é analisado no momento de compra do veículo [30], [58].

Postos e tempos de carregamento: Atualmente, os tempos de carregamento dos veículos já são menores, mas a maioria das pessoas ainda não quer perder 20 a 30 minutos a carregar um automóvel em modo rápido. Quanto ao número de postos de carregamento disponíveis, atualmente assiste-se a um aumento significativo, podendo dizer-se que se está a chegar a um número razoável [34].

## **2.5 Comparação entre o veículo elétrico e o veículo convencional**

Ao longo dos anos, o veículo elétrico foi encurtando as distâncias para o veículo convencional, mantendo os seus próprios pontos fortes (emissões zero, menor ruído, melhor rendimento do motor, etc.) e atenuando os seus pontos fracos (autonomia, tempos de carregamento, etc.), sempre tendo como referência o veículo convencional. Exemplo disso foi o aparecimento dos PHEV, que permitem aos utilizadores a alternância entre o funcionamento do automóvel em modo convencional e o veículo elétrico puro, de forma gradual, já que os PHEVs incluem ambas as motorizações (combustão e elétrico) numa só viatura. Aspectos como a segurança, robustez, desempenho, conforto e fiabilidade tiveram que ser garantidos por parte dos veículos elétricos, dado que essas eram as bases de aceitação dos automóveis convencionais ao longo dos tempos. Para que isso fosse possível, foram importantes os avanços nas áreas da eletrónica de potência (novas arquiteturas de conversores), das máquinas elétricas (origem de novos motores e evolução dos materiais), dos sistemas de armazenamento de energia (baterias) e nos sistemas de controlo (gestão melhorada dos fluxos de energia, com bons desempenhos na tracção) [34]. Para melhor compreender a comparação entre os dois tipos de veículos, mostram-se na Tabela 2.1, algumas características distintivas.

Tabela 2-1 Características de Veículos Elétricos e Convencionais [64]

	<b>Veículos Elétricos</b>	<b>Veículos Convencionais</b>
<b>Tipo de Motor</b>	Motor elétrico	Motor de combustão interna
<b>Fonte de Energia</b>	Baterias, super condensadores, células de combustível	Gasolina e gásóleo
<b>Peso Próprio</b>	Elevado (fundamentalmente, devido às baterias)	Baixo, em termos comparativos
<b>Transmissão de Potência</b>	Pode prescindir de caixa de velocidades	Sistema de engrenagens (caixa de velocidades)
<b>Travagem</b>	Regenerativa	Dissipativa
<b>Rendimento</b>	Elevado	Baixo
<b>Impactos Ambientais</b>	Reduzidos	Elevados
<b>Custo Inicial</b>	Elevado	Médio
<b>Custos de Manutenção</b>	Reduzidos	Muito elevados

## **3 Capítulo 3. Caracterização dos diferentes tipos de suspensão**

### **3.1 Introdução**

Os veículos elétricos movidos por motores nas rodas têm potencial para ter uma maior eficiência energética e menor impacto ambiental. Nas últimas décadas, o controlo de movimento do veículo, a otimização de energia e os benefícios de desempenho ganharam a atenção dos investigadores [65].

A utilização de sistemas de suspensão em veículos automóveis teve início antes do final do século XIX, sendo estes constituídos, a princípio, por molas e, posteriormente, aprimorados com a adição de elementos dissipativos, que garantiam aos passageiros uma considerável sensação de conforto. Com o desenvolvimento de veículos mais potentes e rápidos, os sistemas de suspensão passaram a ser utilizados não apenas para absorver vibrações ou irregularidades da superfície do solo, mas para se tornarem cruciais para alcançar um equilíbrio entre conforto e segurança e estabilidade do veículo. Os sistemas de suspensão tradicionais são compostos basicamente por elementos passivos, que não utilizam fontes de energia externas para balancear quanta energia é transferida para a carroceria. As molas têm a função de armazenar a energia e os amortecedores têm a função de dissipá-la. Além disso, as massas da carroceria e da roda também compõem o sistema de suspensão tradicional, uma vez que o objetivo principal é impedir que a energia absorvida pelas molas, a partir das rodas, seja transferida para a carroceria do veículo. O desempenho do sistema pode ser aumentado com a utilização de elementos capazes de introduzir força a partir de uma fonte de energia externa, alterando a classificação de tal sistema de passivo para ativo [66].

Na indústria automóvel atual, é muito importante garantir a segurança e o conforto do passageiro. Isso pode ser conseguido controlando o conforto de direcção e o manuseio do veículo. O conforto de direcção e o manuseio seguro do veículo podem ser obtidos minimizando a vibração, o movimento de rolamento e o movimento vertical da carroceria do veículo através de um contacto ideal dos pneus com a estrada. O sistema responsável por tal tarefa no veículo é o sistema de suspensão [67].

O sistema de suspensão é um componente essencial num veículo. Ele mantém o contacto dos pneus do veículo com a superfície da estrada, garantindo a estabilidade e proporcionando conforto de condução para o motorista e passageiros [67], [68].

## **3.2 Tipos de suspensão**

A suspensão é o sistema de molas, amortecedores e, no caso da ativa, atuadores pelos quais um veículo é sustentado na sua roda. O objetivo fundamental de um sistema de suspensão é fornecer um controle de direção adequado e de qualidade do percurso, minimizando as vibrações devido à irregularidade do perfil da estrada e, ao mesmo tempo, maximizar o contato pneu-estrada. Uma suspensão muito "macia" melhora o conforto, pois deforma-se muito absorvendo rapidamente a irregularidade da estrada, mas pode reduzir a aderência à estrada, devido à grande oscilação da força vertical de contacto entre os pneus e a estrada. Por outro lado, uma suspensão muito "rígida" garante melhor aderência, mas causa um aumento nas tensões verticais na carroceria do veículo, que se traduz em desconforto para os passageiros. Além disso, quando o carro acelera ou desacelera, ou faz uma curva, a carroceria do veículo está sujeita a movimentos de inclinação e rotação, que também precisam ser compensados pela suspensão. Basicamente, uma suspensão pode ser vista como um filtro passa-baixo mecânico que atenua os efeitos de uma perturbação na variável de saída. Os sistemas de suspensão podem ser agrupados em três categorias: passivos, semi-ativos e ativos [69], [70].

### **3.2.1 Sistemas de suspensão passiva**

A suspensão passiva tem sido amplamente utilizada em veículos comerciais devido ao seu baixo custo e estrutura simples, à sua capacidade de absorver excitações provocadas pelas condições da estrada e é restringida pela dinâmica da mola fixa e do amortecedor [71].

O sistema de suspensão mais utilizado atualmente é o sistema de suspensão passiva, que também inclui todos os sistemas de suspensão convencionais ou tradicionais. A principal característica destes sistemas é que, uma vez instalados no automóvel, os parâmetros desta suspensão (rigidez, altura) não podem ser controlados externamente. Todas as molas e amortecedores tradicionais são considerados suspensões passivas [72].

Muitos veículos comuns hoje usam sistemas de suspensão passiva para controlar a sua dinâmica, tanto o movimento vertical como a rotação e a inclinação, Figura 3.1. Ser um sistema passivo significa que os seus elementos não podem fornecer energia ao sistema de suspensão. O sistema de suspensão passiva limita o movimento do corpo, limitando também a variação das suas velocidades relativas a uma taxa que ofereça o necessário conforto de condução. Isso é alcançado usando algum tipo de elemento de amortecimento, colocado entre a carroceria e as rodas do veículo, como seja o

amortecedor hidráulico. Os amortecedores reduzem a aceleração vertical do corpo e fornecem uma boa força de contato pneu-estrada. Ou seja, para um trajeto confortável, é desejável limitar a aceleração do corpo usando um absorvedor macio, mas isso permite mais variação na força de contacto pneu-estrada que, por sua vez, reduz o desempenho de condução. Além disso, o curso da suspensão, comumente chamado de massa suspensa (a massa do corpo e outras componentes suportados pelo sistema de suspensão), limita a deflexão permitida, o que por sua vez limita a quantidade de velocidade relativa do amortecedor que pode ser permitida. Por comparação, é desejável reduzir a velocidade relativa para melhorar o manuseio, projetando um amortecedor de choque mais rígido ou de taxa mais alta. Esta rigidez diminui o desempenho da qualidade da viagem ao mesmo tempo que aumenta a aceleração do corpo, prejudicando o que é considerado uma boa condição de condução [70], [73].

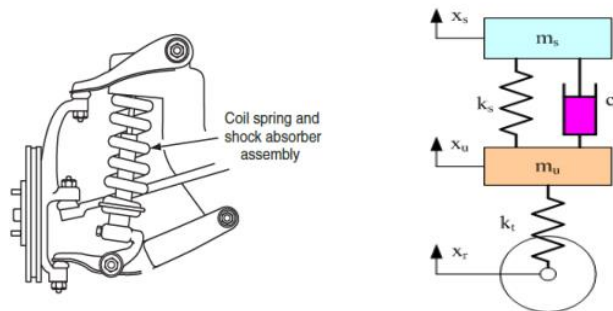


Figura 3.1 Suspensão Passiva [69]

### 3.2.2 Sistema de suspensão semi-ativa

O aumento das exigências do mercado por um maior conforto de condução e manuseio na estrada em várias condições levaram aos recentes desenvolvimentos na tecnologia automóvel. Os sistemas de suspensão semi-ativa surgiram como uma opção viável e foram instalados com sucesso em veículos produzidos em massa. Uma vez que o perfil da estrada é a principal fonte de excitação para o sistema de suspensão do veículo, o conhecimento preciso da irregularidade da estrada pode ser utilizado para ajustar, de forma adaptativa, os parâmetros de controlo e melhorar ainda mais o desempenho dos sistemas de suspensão semi-ativa [70], [74].

O sistema de suspensão semi-ativa é basicamente constituído por molas e amortecedores variáveis onde é possível atuar através de um controlo externo, ajustando o fator de amortecimento, Figura 3.2. O conceito deste sistema é basicamente implementar um controlo da taxa de energia dissipada nos amortecedores e armazenada no sistema, que

realiza uma atuação indireta sobre o veículo. As forças dissipativas geradas são constantemente variáveis dentro do sistema. Apesar de incluir esta possibilidade de controlo eletrónico, o sistema de suspensão semi-ativa ainda não conseguiu substituir o sistema de suspensão passiva, que é um sistema mais utilizado nos veículos atuais e comercialmente disponíveis, pois é mais fiável, com custos baixos, e simples [72].

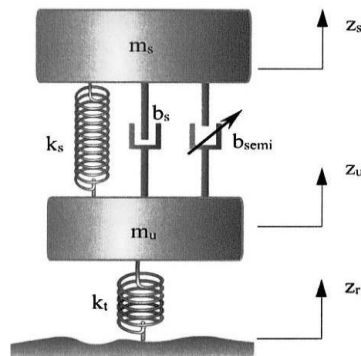


Figura 3.2 Modelo do sistema de suspensão semi-ativa [72]

### 3.2.3 Sistema de suspensão ativa

Os sistemas de suspensão ativas são alvo de investigação desde há mais de 20 anos, devido às suas características promissoras. Esses sistemas apresentam potencialidades de resposta consideravelmente boas para mudanças ascendentes e descendentes causadas por perfis de estradas irregulares, uma vez que os amortecedores, bem como as molas, são mediados por uma força de atuação [70], [75].

Geralmente, um sistema de suspensão ativa inclui um atuador alimentado a energia elétrica e uma mola a gás que, cooperativamente, fornecem suporte entre as massas suspensas e não suspensas de um veículo, Figura 3.3. O sistema de suspensão ativa pode reduzir o movimento da massa suspensa, reagindo às entradas de força para melhorar significativamente a estabilidade. Portanto, o sistema de suspensão ativa é usado em veículos mais modernos [68].

A suspensão ativa utiliza sensores para a recolha de dados que identificam as condições da via e do veículo, e que são utilizados para ajustar os tipos de movimento que devem ser empregues pelo conjunto de suspensão do veículo. Uma suspensão ativa tem a habilidade de armazenar, dissipar e introduzir energia no sistema, e os seus parâmetros variam conforme as condições de operação. O modelo de sistema da Figura 3.3 foi o primeiro a utilizar um conjunto de atuadores separados que podem exercer movimentos independentes e aguentar cargas de força variável [72]. Dessa maneira, os atuadores são capazes de fazer subir ou fazer baixar o chassi de forma independente para cada uma das

rodas, minimizando a sensação de impacto no interior do veículo. Ou seja, a suspensão ativa é capaz de corrigir a movimentação do veículo de acordo com as imperfeições da pista com maior eficiência, melhorando a possibilidade de fazer manobras em segurança, a aceleração e a travagem do veículo [72].

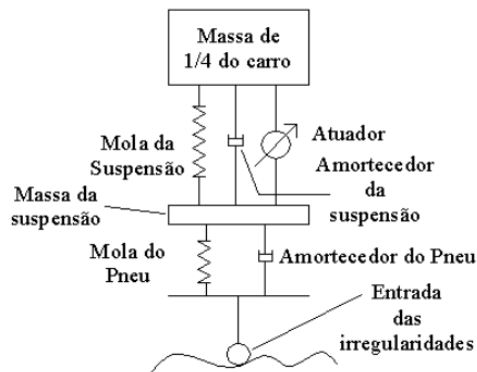


Figura 3.3 Sistema de suspensão ativa [72]

Um sistema de suspensão ativa pode ser do tipo hidráulica/pneumática ou do tipo eletromagnética [76]. No primeiro tipo de suspensão ter-se-ão atuadores pneumáticos ou hidráulicos, amortecedor e mola. Já nas suspensões ativas eletromagnéticas, encontramos o atuador eletromagnético e a mola.

A primeira suspensão ativa conhecida como suspensão hidropneumática foi realizada pela Citroen Company e foi aplicada pela primeira vez, em 1954, no Citroen Traction Avant 15CVH [77].

O sistema de suspensão ativa com atuador pneumático ou hidráulico é gerido através de acionamentos elétricos e a energia é fornecida a partir de uma bateria ou do próprio MCI convencional. Normalmente, os sistemas hidráulicos são mais amplamente usados nos sistemas de controlo devido à sua simplicidade de design, alta densidade de força, maturidade da tecnologia, fiabilidade, bem como a disponibilidade comercial de componentes [75].

As suspensões com atuador hidráulico/pneumático são controladas através de servomecanismos hidráulicos/pneumáticos. A pressão nos servomecanismos é fornecida por uma bomba de pistão radial de alta pressão. Os sensores monitorizam continuamente o movimento do corpo e o nível de vibração do veículo, fornecendo constantemente novos dados ao processador, o qual opera os servomecanismos posicionados junto de cada roda. Quase que instantaneamente, a suspensão regulada pelo servomecanismo gera forças contrárias aos estados de inclinação, mergulho e

abaixamento do veículo [72]. Ainda segundo [72], Colin Chapman, fundador da Lotus Cars e da equipa Lotus da Fórmula 1, desenvolveu o conceito original de gestão computadorizada da suspensão hidráulica nos anos 80, como forma de melhorar o comportamento dos carros de corrida nas curvas. O sistema Computer Active Technology Suspension (CATS) coordena o balanço entre a vibração vertical e a manobrabilidade, analisando as condições da pista e fazendo até 3000 ajustes por segundo na configuração da suspensão, através de amortecedores controlados eletronicamente.

A Figura 3.4 mostra uma suspensão ativa hidráulica/pneumática.



Figura 3.4 Suspensão activa hidráulica/pneumática [78]

Após décadas de investigação, o Dr. Amar BOSE desenvolveu uma suspensão eletromagnética ativa, Figura 3.5, denominada de "*sistema de chassi digital*" com comportamento dinâmico melhorado (manuseio), grande estabilidade, controlo preciso de força, operando numa grande largura de banda para controlar massas suspensas e não suspensas de modo flexível, com um sistema livre de óleo e, devido ao funcionamento reversível do atuador eletromagnético, com regeneração de energia [77].

A suspensão eletromagnética é a alternativa ao sistema de suspensão convencional que utiliza um sistema de suspensão passiva. Geralmente, o motor linear é usado no projeto da suspensão, já que o motor pode exercer força linear diretamente na carga anexada. Além disso, a sua força linear é controlável [79].

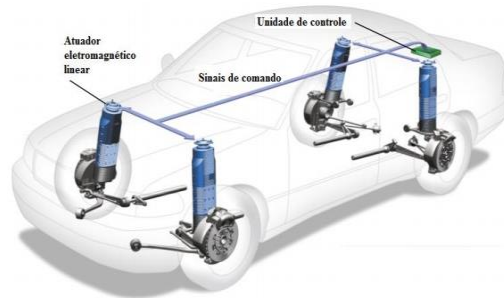


Figura 3.5 Suspensão eletromagnética ativa proposta por Bose Corporation Inc [80]

Podem encontrar-se vários trabalhos com propostas de suspensões eletromagnéticas baseadas em atuadores lineares de magnetos permanentes. Os atuadores lineares de magnetos permanentes são o tipo mais popular de atuador elétrico para sistemas de suspensão activa. Martins *et al.* mostrou o potencial do atuador de magnetos permanentes para a implementação de um sistema de suspensão activa [81]. O deslocamento relativo entre o magneto permanente e a bobina varia à medida que o veículo vibra, gerando energia elétrica. A estrutura converte a energia mecânica do movimento linear diretamente em energia elétrica, sendo que a conversão intermédia de energia e mecanismos de transmissão não são necessários.

Nos trabalhos [82], [83], [84], [85] projetaram-se suspensões eletromagnéticas baseadas em motores de magnetos permanentes tubulares, de magnetos permanentes tubular sem escovas (TPMA) e síncronos de magnetos permanentes para forças de 1000 N a 2100 N.

Os sistemas de suspensão activa apresentam várias vantagens e desvantagens. Como vantagens podemos referir a possibilidade de controlar de forma precisa e independente o sistema em cada roda, a possibilidade de melhor conforto, a maior dirigibilidade e a maior estabilidade [72]. Como desvantagens, referem-se o custo elevado, a quantidade de peças necessárias, a complexidade do sistema e a necessidade de constante manutenção [72], [86].

Neste trabalho será proposta uma suspensão regenerativa constituída por um gerador trifásico tubular de relutância variável comutado com base no conceito ilustrado na Figura 3.6.

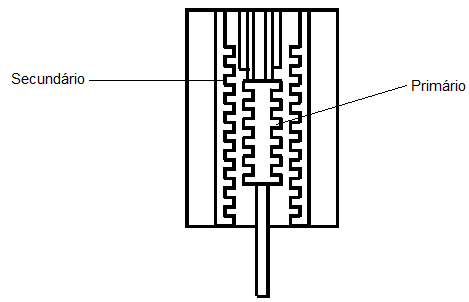


Figura 3.6 Suspensão regenerativa com um gerador trifásico de relutância variável tubular.

# 4 Capítulo 4. A Máquina Linear de Relutância Variável Comutada

## 4.1 Introdução

O gerador linear de relutância variável comutado possui a mesma configuração estrutural e eletrônica de potência que o atuador linear de relutância variável comutado. Na verdade, o conceito de gerador e o conceito de atuador são dois modos de funcionamento da mesma máquina, a máquina de relutância variável comutada, que diferem entre si na estratégia de controlo. Como atuador, a máquina de relutância desenvolve uma força linear em consequência da sua parte móvel ocupar sequencialmente as posições de mínima relutância, que se trata de um fenómeno subjacente aos circuitos magnéticos que tendem a reestruturar-se de modo a reduzir a sua relutância. Em regime gerador, ao ser aplicada uma força externa à parte móvel da máquina, esta tenderá a deslocar-se para posições de máxima relutância, reduzindo assim o fluxo magnético. Como consequência, em oposição à diminuição do fluxo magnético é gerada uma corrente elétrica nos enrolamentos de excitação, a qual é entregue a uma carga. Este tipo de máquinas é caracterizado por apresentar saliências em ambas as partes, móvel e fixa, e pela ausência de magnetos permanentes, existindo apenas enrolamentos de excitação numa das partes. São também caracterizadas por operarem dentro de uma vasta gama de valores para a densidade de fluxo magnético atingindo, em algumas posições relativas, a saturação do núcleo ferromagnético. Por esta razão, apresentam características altamente não lineares que se manifestam através das curvas de magnetização da máquina [87], [88], [89], [90].

Os atuadores lineares de relutância comutados (LSRA) são contrapartes dos motores rotativos de relutância comutados (SRM). Exceto para a determinação das forças normais, a teoria desenvolvida para o SRM é quase inteiramente aplicável ao LSRA. Assim como o SRM, o LSRA produz impulso e movimento pela tendência de um secundário ferromagnético assumir uma posição onde a indutância do primário excitado é maximizada. O que quer dizer, o LSRA é um dispositivo de força eletromagnética. Porém, é um dispositivo multifásico, geralmente com apenas uma fase energizada. O ligar e desligar de cada fase é acionado por um sensor de posição linear ou um estimador. Os LSRA são uma escolha única onde a confiabilidade é uma grande preocupação,

porque eles são capazes de operar mesmo se uma fase entrar em curto-circuito ou for desligada [91], [92].

## 4.2 Princípio de conversão eletromagnética de energia

A máquina de relutância variável comutada (MRVC) além de motor, pode também funcionar como gerador alterando apenas os ângulos de disparo na sua estratégia de controlo. Deste modo, como os modos de operação da máquina não dependem da sua estrutura física, os princípios de conversão eletromagnética da máquina são os mesmos para ambos [88], [93], [94].

O MRVC é constituído por um número par de saliências estatóricas ( $N_s$ ), em torno das quais são colocados os enrolamentos das fases. Normalmente, estes são constituídos por duas bobinas iguais colocadas em torno de saliências polares diametralmente opostas e ligadas entre si de modo a criarem fluxos aditivos. Por esta razão, o número de fases de um MRVC ( $N_f$ ) é, em geral, metade do número de saliências polares do estator [92], [95].

Para que seja possível o arranque da máquina, ou seja, a produção de binário qualquer que seja a posição relativa entre o estator e o rotor, tem de existir sempre pelo menos um circuito magnético no motor que, ao ser excitado, promova uma diminuição da relutância com o movimento do rotor. Por esta razão, os números de pólos/saliências polares do estator ( $N_s$ ) e do rotor ( $N_r$ ) devem ser sempre diferentes. Habitualmente, o número de saliências polares do rotor é menor e não múltiplo do número de saliências do estator. Os arcos polares do estator e do rotor ( $\beta_s$  e  $\beta_r$ ) devem ser aproximadamente iguais [96].

Na análise ao MRVC que se apresenta seguidamente, considerar-se-á que o arco polar do estator é maior que o do rotor, surgindo assim uma zona de indutância máxima constante (idealmente) durante o alinhamento. A existência, ou não, desta zona de indutância constante terá implicações ao nível do controlo do motor, bem como na produção de binário [96].

### 4.2.1 Posição de alinhamento

Na posição de alinhamento, Figura 4.1, a fase 1 encontra-se excitada, estando um qualquer par de pólos do rotor alinhado com os dois pólos, diametralmente opostos, do estator, que correspondem à fase 1. Neste caso, o rotor adota a posição, relativamente ao estator, que corresponde ao valor máximo da indutância do circuito magnético, por ser mínima a respetiva relutância nessa posição. Um deslocamento do rotor num sentido ou no outro, afastando-se do alinhamento provocará o desenvolvimento de uma força,



em sentido contrário, da variação da relutância do circuito magnético, para as diferentes posições relativas. Esta constatação resulta do facto da indutância variar inversamente com a relutância magnética [88], [92], [96], [97].

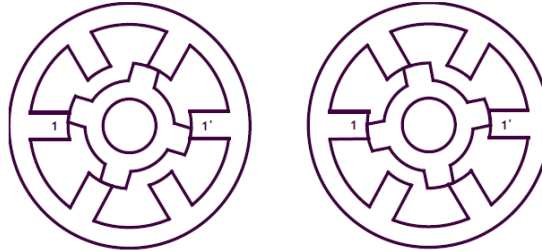


Figura 4.3 Posições intermédias [88]

### 4.3 Características Magnéticas do MRVC.

Uma máquina a relutância é uma máquina elétrica em que o binário é produzido pela tendência do rotor de se alinhar com a onda de fluxo produzida pelo estator, de modo a maximizar os fluxos estabelecidos que resultam da aplicação de uma dada corrente de estator. As principais características do MRVC consistem na existência de um rotor sem enrolamentos ou magnetos permanentes e um estator com enrolamentos de excitação, o que implica que todas as perdas resistivas de enrolamento do MRVC ocorram no estator [98].

Como se referiu anteriormente, na posição de alinhamento de um qualquer par de polos do rotor com o par de polos do estator que corresponde à fase excitada, a indutância de fase é máxima, já que a relutância do circuito magnético equivalente é mínima. Se considerarmos níveis de intensidade da corrente de excitação reduzidos, a maior parte da relutância do circuito magnético encontra-se concentrada no entreferro, podendo, contudo, o percurso ao longo do estator ser sede de perdas magnéticas consideráveis, reduzindo por isso apreciavelmente a indutância correspondente à posição de alinhamento. Esta posição é, mesmo para intensidades de corrente relativamente reduzidas, propícia à ocorrência de saturação do seu circuito magnético. A tendência de saturação do circuito magnético da máquina de relutância variável é, contudo, muito reduzida para a posição de não alinhamento, onde a indutância é mínima, sendo a relutância do circuito magnético máxima. A relutância é máxima devido ao grande trajeto de entreferro entre o estator e o rotor, sendo, por isso, o fluxo de dispersão considerável. Na análise destas máquinas supõe-se a não existência de saturação nestas posições e admite-se que a saturação só é possível para valores de intensidade de corrente elevados [92].

Assim, as curvas de magnetização da máquina, que representam, qualitativamente, a variação do fluxo ligado  $\Psi$  em função da corrente de excitação das bobinas do estator  $i$ , para um determinado valor do ângulo  $\theta$  de deslocamento relativo entre o estator e o rotor, têm o andamento, aproximado, mostrado na Figura 4.4 [92].

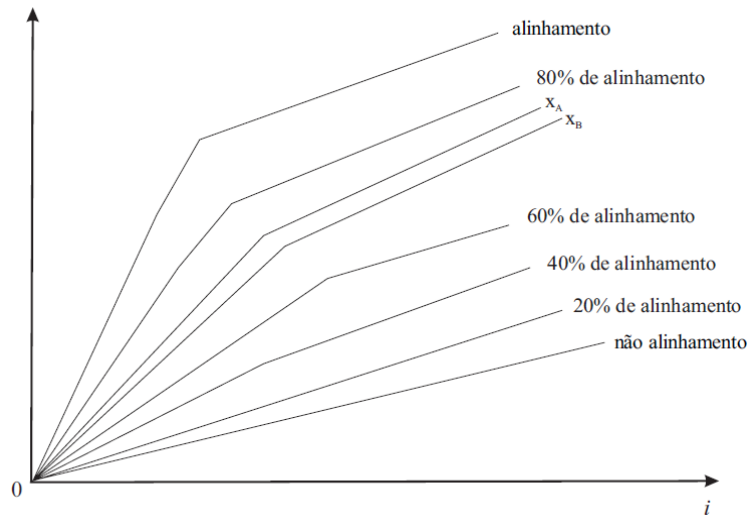


Figura 4.4 Representação das curvas magnéticas, em termos qualitativos, da máquina de relutância variável comutada [88], [92]

Na Figura 4.4, a característica inferior corresponde à posição de não alinhamento, correspondendo a característica superior, por sua vez, à posição de alinhamento. As posições de alinhamento parcial apresentam curvas de magnetização intermédias, entre as curvas limite, da posição de não alinhamento e da posição de alinhamento. O caráter não linear do comportamento magnético da máquina é, nestas características, suposto ser linear por troços, e é este o comportamento adotado na grande maioria das análises destas máquinas. A análise destas características é importante, já que, sendo determinantes na variação da indutância magnética com a posição relativa do rotor e com a corrente de excitação, permitem avaliar o binário desenvolvido pela máquina. A obtenção de características de magnetização quantitativas pode ser feita através de uma análise numérica da máquina, onde se pode verificar a influência da posição relativa entre as duas partes constituintes, e da intensidade da corrente de excitação das bobinas. Essas características assim obtidas permitem quantificar o comportamento magnético da máquina na presença de saturação. Como se afirmou previamente, a posição de não alinhamento é praticamente livre do efeito da saturação, ao contrário da posição de alinhamento, que apresenta uma grande apetência para a ocorrência de saturação. As posições intermédias, situadas entre estas duas posições limite referidas, conduzem a

curvas de magnetização de natureza diversa, dependendo da percentagem do alinhamento parcial, entre seções dos polos do primário e do secundário, por serem, nestas posições, os efeitos de saturação local, nas extremidades das saliências, igualmente dependentes da percentagem de alinhamento [92], [99].

Através das curvas de magnetização é possível saber a energia armazenada no campo magnético da máquina. As curvas indicam dois tipos de energia magnética distintos, a energia e a co-energia, Figura 4.5. A primeira associa-se à situação em que a máquina opera a fluxo constante, sendo a co-energia magnética correspondente ao processo de conversão feito a corrente constante. No caso ideal, de não saturação, a quantidade de ambas as energias são iguais.

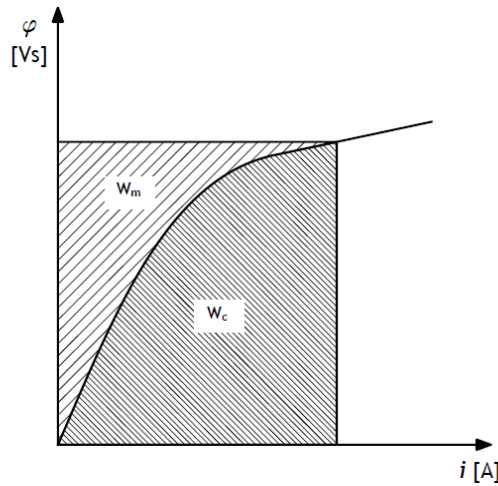


Figura 4.5 Ilustração do conceito de energia e de co-energia [88], [99]

Com o fenómeno de saturação, a energia tende a ser inferior à co-energia [88], [92], [99]. A co-energia  $w_c$  é dada então por:

$$w_c(i, \theta) = \int_0^i \varphi(i, \theta) di \quad (4.1)$$

Sendo função da corrente  $i$  que gera o fluxo ligado  $\varphi$  e da posição do rotor  $\theta$  que determina a relutância do circuito magnético. A determinação do binário que tende a restituir a máquina para a configuração de alinhamento é usualmente determinado pela variação da co-energia armazenada no circuito magnético, o qual ocorre devido à variação da posição relativa do rotor. Durante o processo de conversão, em que esse binário é desenvolvido, a variação da co-energia associada ao processo é dada pela área entre as curvas de magnetização correspondentes às posições em que o rotor se desloca [88], [92], [99]. Assim, o binário  $T_m$  é expresso por:

$$T_m(i, \theta) = \frac{\partial w_c(i, \theta)}{\partial \theta} \quad (4.2)$$

Caso se adote um modelo linear para o MRVC, ou seja, o caso ideal, a linha de magnetização torna-se numa recta, podendo escrever-se a expressão (4.2) da seguinte forma:

$$T_m(i, \theta) = \frac{dL(\theta)}{2 d\theta} i^2 \quad (4.3)$$

Segundo a Figura 4.6, a indutância varia apenas com o ângulo de posição do rotor. A indutância varia entre o seu valor na posição de não alinhamento ( $L_{na}$ ) e o valor na posição de alinhamento ( $L_{an}$ ). Enquanto se encontra nas posições referidas, o seu valor mantém-se constante [92].

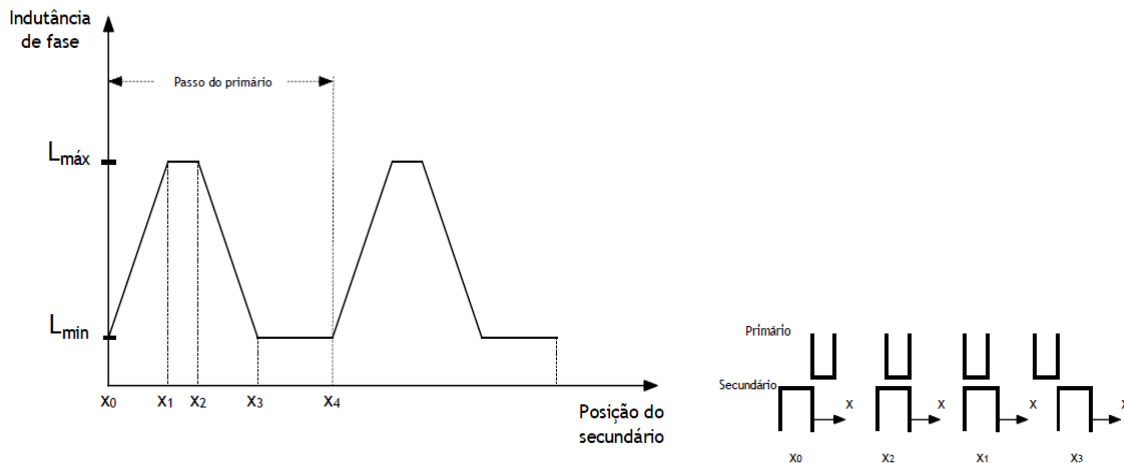


Figura 4.6 Variação da indutância com a posição do rotor [92]

A Figura 4.6 mostra ainda a variação do binário em função do andamento linear da indutância, considerando a intensidade da corrente de excitação da fase constante. A simples excitação das fases, em posições adequadas do ciclo da indutância, permite controlar o binário desenvolvido pela máquina [92].

## 4.4 Máquina linear

A história da máquina linear remonta até pelos menos ao início de 1840, apontando-se a Carles Wheatstone, na Grã-Betanha, a invenção do primeiro esboço de protótipo de motor linear de indução. Em 1889, os norte-Americanos Shuyler S. Wheeler e Charles S. Bradley apresentam um pedido de patente para motores lineares síncronos e assíncronos para o sistema ferroviário. Foram atribuídas patentes ao inventor alemão Alfred Zehden em 1902 e 1907. Uma série de patentes alemãs para comboios de levitação magnética e

movidos por motores lineares foram atribuídas a Hermann Kemper entre 1935 e 1941. No final de 1940, o Professor Eric Laithwaite do Imperial College, em Londres, desenvolveu o primeiro modelo em tamanho real [100].

As máquinas lineares são dispositivos que convertem energia elétrica em energia mecânica, que empregam movimentos lineares unidirecionais ou bidirecionais.

Estas máquinas podem ser utilizadas como motores ou como geradores. A funcionar como motor, a energia elétrica é convertida em energia mecânica linear e, como gerador, a energia fornecida por um movimento linear forçado é convertida em energia elétrica.

A Figura 4.7 ilustra a forma como se pode obter uma máquina linear a partir da estrutura de uma máquina rotativa. Ao cortar o estator ao longo da linha média da máquina, e ao abrir cada uma das partes, obtêm-se os dois lados de um motor linear [91]. Ao enrolar outra vez as partes planificadas, de acordo com a Figura 4.8, obtêm-se a máquina linear tubular.

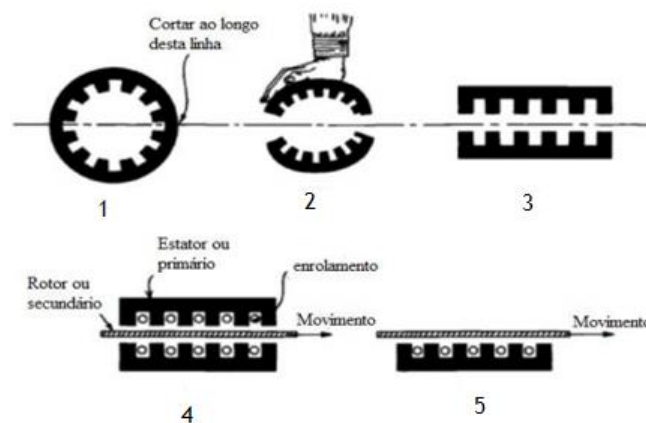


Figura 4.7 Conversão de motor rotativo para linear [91]

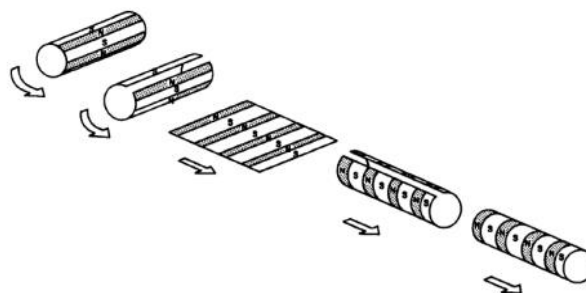


Figura 4.8 Configuração linear tubular no secundário [91]

As partes fixa e móvel resultantes da abordagem às máquinas lineares pela manipulação geométrica das máquinas rotativas, deixam de adotar a nomenclatura de estator e rotor.

Uma vez que a parte móvel não sofre rotação, mas sim translação, o uso da designação rotor deixa de ter sentido. Deste modo, tendo em conta a norma corrente na literatura técnica de expressão portuguesa, será denominada de primário a parte que contém os enrolamentos de excitação e por secundário a outra parte. Do mesmo modo que as máquinas rotativas, o princípio de conversão de energia também é recíproco, ou seja, a máquina linear poderá funcionar em regime motor ou em regime gerador. Para o primeiro caso as máquinas lineares designam-se por atuadores, as quais desenvolvem uma força linear quando os enrolamentos são percorridos por uma corrente elétrica e forçam o secundário a ocupar a posição de mínima relutância. Funcionam como geradores quando é aplicada uma força mecânica linear ao secundário, produzindo corrente elétrica nos enrolamentos devido à variação forçada do fluxo magnético. Com a evolução dos sistemas de controlo de potência, a utilização de máquinas elétricas lineares na indústria tem vindo a crescer, uma vez que estas apresentam determinadas vantagens relativamente às máquinas rotativas convencionais [92].

Como vantagens destas máquinas, destacam-se as seguintes: construção mais simples e robusta com menores custos de produção (principalmente em máquinas de relutância variável, pois estas não possuem magnetos permanentes), transformam diretamente a energia elétrica em mecânica, e vice-versa, sem sistemas mecânicos intermédios, apresentam uma dissipação de calor mais eficaz, possibilitando o seu dimensionamento para correntes mais elevadas, são de instalação mais simples e têm uma necessidade de manutenção reduzida, apresentando maior fiabilidade.

## **4.5 Gerador linear de relutância variável comutado (GLRVC)**

A máquina linear de relutância variável pode funcionar como atuador ou como gerador. Apesar de existirem mais referências relativas a geradores de relutância variável rotativos, os princípios de operação também se aplicam aos geradores lineares. O funcionamento da máquina é controlado através de um circuito conversor de potência, o qual possui dois interruptores eletrónicos por fase que permitem regular o fluxo de energia elétrica. Para funcionar como atuador, os ângulos de disparo dos interruptores eletrónicos são definidos de modo a que a corrente de excitação circule pela fase apenas quando o valor da indutância aumenta com o deslocamento do secundário ( $dL/d\theta > 0$ ), enquanto que no funcionamento como gerador os ângulos de disparo para excitação da fase devem ser efetuados quando a indutância decresce com o deslocamento do secundário ( $dL/d\theta < 0$ ) [88].

A Figura 4.9 mostra o circuito clássico de controlo do GLRVC. Cada indutância representa os enrolamentos de uma fase. Para que possa entrar em operação, o sistema necessita de uma fonte externa para fornecer a energia ao condensador, de modo a que o campo magnético seja excitado. Durante a operação do gerador, o condensador é recarregado a cada ciclo de operação, não sendo necessário recorrer à fonte externa. Assim, a energia de excitação proveniente da fonte externa só é necessária na fase inicial de funcionamento do gerador [88], [101], [102], [103].

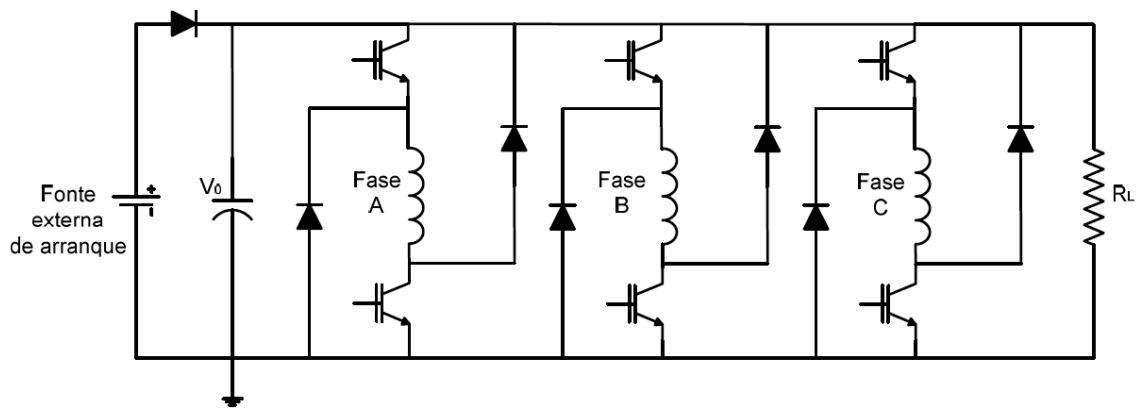


Figura 4.9 Circuito clássico de controlo para o gerador elétrico de relutância variável comutado trifásico [88]

Os fenómenos físicos associados à conversão de energia mecânica em energia elétrica são iguais para todas as fases, ou seja, todas apresentam os mesmos valores de tensão e de corrente, desde que se mantenham os períodos de comutação. A única particularidade que difere para as diferentes fases é o instante em que são excitadas, o qual ocorre sequencialmente de acordo com a posição do secundário relativamente ao primário. Considerando uma única fase, cada ciclo de conversão é caracterizado por dois períodos distintos, o período de excitação e o período de geração. Na Figura 4.10 encontram-se as formas de onda simplificadas para a corrente, fluxo e indutância ideal em cada fase durante cada ciclo de conversão. No entanto, estas formas de onda não são garantidas na realidade, uma vez que variam consoante a estratégia de controlo adoptada, ou seja, consoante os instantes escolhidos para a comutação dos interruptores eletrónicos, para além do facto de se ter considerado um perfil aproximado para a indutância [88], [103].

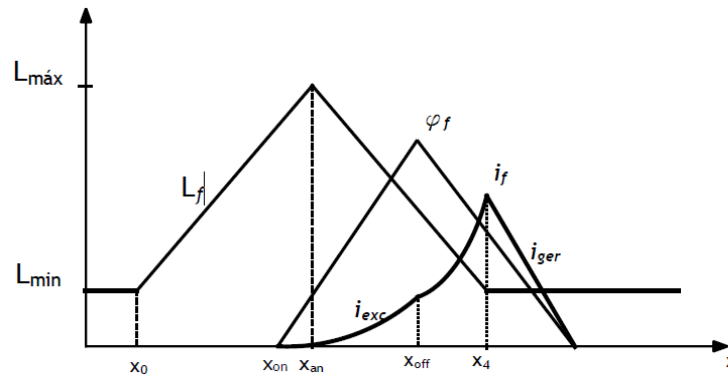


Figura 4.10 Formas de onda típicas para a corrente, fluxo e indutância ideal por fase [88]

No período de excitação, as características são definidas pela excitação do campo magnético, sendo a energia fornecida pelo condensador, ou pela fonte externa caso o gerador se encontre na fase inicial de operação. O período de excitação inicia-se quando os interruptores eletrônicos são fechados pelo ângulo de disparo na posição  $X_{on}$ . Com os interruptores fechados, a corrente proveniente da fonte de excitação percorre o enrolamento da fase gerando um fluxo magnético ligado. Os díodos de roda livre encontram-se inversamente polarizados e nenhuma corrente circula por eles. Deste modo a energia elétrica fornecida é armazenada sob a forma de energia magnética na zona do entreferro. Neste período, como a máquina funciona como motor, os interruptores devem ser fechados na posição de máxima indutância. Alguns autores indicam que os interruptores sejam fechados imediatamente antes de o secundário ocupar essa posição, sendo aconselhado por outros autores que  $X_{on}$  ocorra após a posição de máxima indutância, quando o valor desta decresce com o deslocamento do secundário. O período de excitação termina quando os interruptores eletrônicos são desligados [88].

Quando os interruptores eletrônicos são desligados, entramos no período de geração, onde o secundário começa a afastar-se da posição de alinhamento, forçado pela carga mecânica a ele aplicada. Devido a esta força externa o fluxo magnético começa a diminuir e por consequência surge uma força contraelectromotriz nos enrolamentos, que tende a contrariar sua variação. Como consequência desta força contraelectromotriz, a corrente na fase continua a circular pelos díodos de roda livre que se encontram agora diretamente polarizados. A corrente que resulta deste processo poderá adotar diferentes formas de onda consoante o valor do módulo da força contraelectromotriz. A Figura 4.11 mostra os possíveis perfis de corrente. A forma onda a) corresponde à variação ideal da corrente para o caso de o módulo da força eletromotriz ser superior ao valor da tensão do condensador (tensão de excitação). A forma de onda em b) corresponde à situação em

que o módulo da força contraelectromotriz é igual ao valor da tensão de excitação e a onda em c) corresponde à situação de esta última adotar um valor superior. Tendo em conta que ambas possuem o mesmo valor máximo, a forma de onda a) é preferível uma vez que necessita de menor energia de excitação. Nesta forma de onda, o valor de corrente aumenta durante o período de geração, enquanto nas restantes o seu valor mantém-se constante (b)) ou sofre um decaimento gradual (c)). Para estas duas formas de onda é necessária maior energia durante a excitação uma vez que é neste período que a corrente atinge o seu valor máximo. No entanto, em b) é gerada mais energia, que será entregue à carga [88].

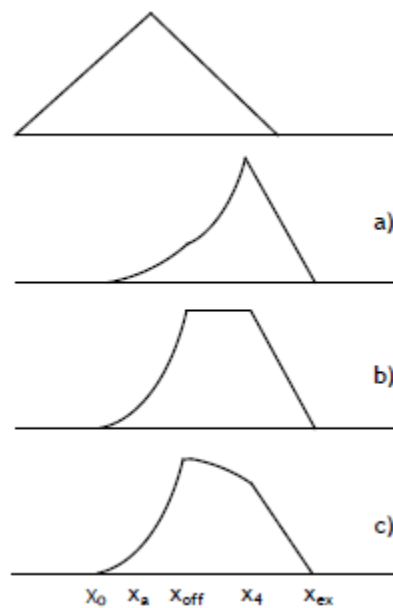


Figura 4.11 Formas ideais de onda para a corrente gerada [88]

A corrente flui para a carga e para o condensador que é recarregado. Neste período dá-se a conversão da energia magnética armazenada e da energia mecânica, introduzida no sistema pelo secundário, em energia elétrica. A potência elétrica gerada é sempre superior à potência elétrica introduzida no sistema durante o período de excitação se os instantes de comutação dos interruptores forem adequadamente especificados. O período de geração termina quando a corrente na fase se extingue. Devido à operação sequencial das três fases, a corrente média fornecida à carga pode ser considerada contínua [88].

A Figura 4.12 mostra os percursos da corrente para os períodos de excitação e de geração.

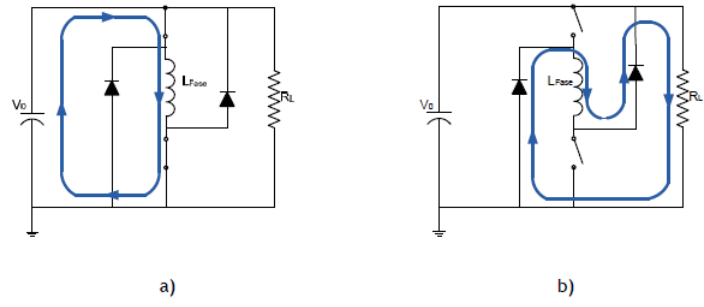


Figura 4.12 Percurso da corrente durante o a) Período de excitação e b) período de geração [88]

# 5 Capítulo 5. Análise de uma Suspensão Eletromagnética Ativa

## 5.1 Introdução

Para modelar uma suspensão regenerativa com um gerador linear de relutância variável comutado, é necessário ter em conta três fatores fundamentais: o curso máximo, o diâmetro e a largura máxima da suspensão. Esses parâmetros estão listados na Tabela 5.1 [85], [104].

Tabela 5-1 Diâmetro, largura e deslocamento da suspensão [85], [104]

Curso máximo	160 mm
Diâmetro máximo	110/150 mm
Largura máxima	270/600 mm

## 5.2 Modelação de um sistema de suspensão eletromagnética ativa com gerador linear de relutância variável comutado.

Geralmente, para análise de sistemas de suspensão de veículos, vários modelos de veículos foram adotados pelos investigadores. Os modelos mais utilizados são o Modelo de um Quarto de Carro (MQC), o Modelo de Meio Carro (MMC) e o Modelo de Carro Completo (MCC) [105].

Neste trabalho considera-se apenas o Modelo de um Quarto de Carro para desenvolver um controlador para a suspensão de veículo. Este modelo é bidimensional porque apenas se tem em consideração o movimento na direção  $z$ . A representação geral deste modelo consiste basicamente numa única roda que é representada na forma de uma mola. No entanto, em alguns casos, a roda pode ser considerada como equivalente a uma combinação paralela de uma mola e um amortecedor. O amortecedor real é assumido para suportar apenas um quarto do peso da massa corporal total do carro, incluindo o peso do passageiro [105], [106].

Ao contrário do MQC, onde apenas uma roda é analisada, o MMC considera duas rodas, uma roda dianteira e uma roda traseira. Neste tipo de modelos, metade do peso de todo o carro, incluindo os dos passageiros, são considerados para fins de análise [105], [107].

No MCC, os pesos totais do corpo do carro, bem como os dos passageiros são consideradas e tem-se em consideração na análise as quatro rodas [105],[107].

Para a modelação matemática do problema em análise neste trabalho, considera-se um quarto de carro e um sistema linear da suspensão de veículo com base no atuador linear de relutância variável comutado, Figura 5.1.

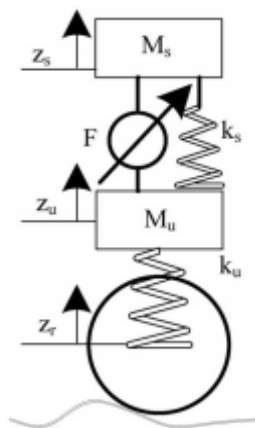


Figura 5.1 Sistema de suspensão activa de um quarto de carro.

Considere-se o diagrama de corpo livre, conforme a Figura 5.2, considerando como ponto de referência de coordenadas a posição da massa suspensa e da massa não suspensa.

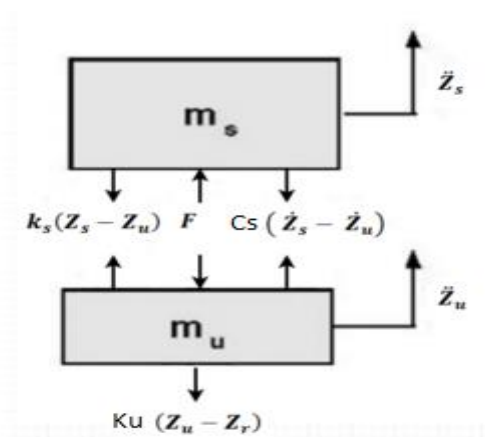


Figura 5.2 Diagrama de corpo livre

O modelo dinâmico do sistema de suspensão ativa é obtido pelo princípio fundamental da Dinâmica conhecida por segunda Lei de Newton aplicada a cada uma das massas. De acordo com este princípio, o somatório das forças que atuam num determinado corpo é igual ao produto da massa pela aceleração:

$$\sum F = m * a \quad (5.1)$$

Sendo assim, o modelo de um quarto de carro do sistema de suspensão ativa, mostrado na Figura 5.1, pode ser descrito a partir das equações diferenciais do movimento dadas pelas equações referentes ao somatório de forças da massa suspensa  $M_s$  e da massa não suspensa  $M_u$ , respetivamente.

Pela Figura 5.2, o comportamento dinâmico do sistema ativo é dada por equações diferenciais de segunda ordem:

$$M_s \ddot{Z}_s - K_s(Z_s - Z_u) - C_s(\dot{Z}_s - \dot{Z}_u) - F = 0 \quad (5.2)$$

$$M_u \ddot{Z}_u + K_s(Z_s - Z_u) + C_s(\dot{Z}_s - \dot{Z}_u) - K_u(Z_u - Z_r) + F = 0 \quad (5.3)$$

Onde  $M_s$  é a massa suspensa,  $M_u$  a massa não suspensa,  $Z_s$  o deslocamento da massa suspensa,  $Z_u$  o deslocamento da massa não suspensa,  $Z_r$  deslocamento da roda definido pelo perfil de estrada percorrido pelo veículo,  $K_s$  a rigidez da mola,  $C_s$  o coeficiente de amortecimento e  $F$  a força.

A Tabela 5.2 mostra os valores típicos dos parâmetros para diferentes tipos de veículos.

Tabela 5-2 Parâmetros dos Veículos [108]

	$M_s$	$M_u$	$K_s$	$K_u$	$C_s$
	Kg	Kg	kN/m	kN/m	kN s/m
Carro	240	36	16	160	0,98
Autocarro	2250	250	150	800	10
Camião 1	4450	550	622,18	1705,45	26,582
Camião 2	4500	500	400	2000	10

### 5.3 Excitação da Estrada

De acordo com norma ISO 8608, as estradas são representadas por diferentes perfis, listados de A a H. A caracterização desses perfis pode ser feita a partir da rugosidade da estrada, calculando a densidade espectral de potência (PSD) dos deslocamentos verticais  $G_d$ , tanto em função da frequência espacial  $n_0$  como da frequência espacial angular  $\Omega_0$ . Na Tabela 5.3 mostram-se os valores típicos para diferentes tipos de veículos, e para os diferentes tipos de perfis de estrada. Os limites inferiores e superiores são os que mantêm as suas variações dentro dos parâmetros de cada classe segundo a referida norma [108], [109].

Outra forma de caracterização é calcular o PSD das acelerações dos perfis  $G_a$ , também em função da frequência espacial  $n_0$  e da frequência espacial angular  $\Omega_0$ , em termos em termos da variação da inclinação da superfície da estrada por unidade de distância percorrida.

Estes dois métodos são facilmente correlacionados, já que o PSD dos deslocamentos verticais e o PSD das acelerações são relacionados pelas seguintes equações:

$$\begin{cases} G_a(n) = (2\pi n)^4 G_d(n) \\ G_a(\Omega) = (\Omega)^4 G_d(\Omega) \end{cases} \quad (5.4)$$

Tabela 5-3 Valores ISO 8608 de perfil de Estrada  $G_d(n_0)$  e  $G_d(\Omega_0)$  [108], [109]

Perfil de estrada	$G_d(n_0)$ $10^{-6} \text{ m}^3$		$G_d(\Omega_0)$ $10^{-6} \text{ m}^3$	
	Limite inferior	Limite superior	Limite inferior	Limite superior
A (Muito boa)	-	32	-	2
B (Boa)	32	128	2	8
C (Média)	128	512	8	32
D (Deteriorada)	512	2048	32	128
E (Deteriorada)	2048	8192	128	512
F (Deteriorada)	8192	32768	512	2048
G (Deteriorada)	32768	131072	2048	8192
H (Deteriorada)	131072	-	8192	-
	$n_0 = 0.1 \text{ ciclos/m}$		$\Omega_0 = 1 \text{ rad/m}$	

O perfil de rugosidade da superfície da estrada pode ser definido usando as equações:

$$\begin{cases} G_d = G_d(n_0) \left(\frac{n}{n_0}\right)^{-2} \\ G_d = G_d(\Omega_0) \left(\frac{\Omega}{\Omega_0}\right)^{-2} \end{cases} \quad (5.5)$$

Onde os valores de  $G_d(n_0)$  e de  $G_d(\Omega_0)$  são os da Tabela 1, com base na classe de estrada considerada.

### 5.3.1 Geração de um perfil de estrada artificial

Para aplicações práticas, de acordo com a classificação da rugosidade de superfícies dada na norma ISO, é possível gerar um perfil de estrada artificial a partir de uma representação estocástica, em termos da função do PSD de deslocamentos verticais obtidos através da transformada de Fourier da função de autocorrelação do processo estocástico que descreve o perfil da estrada [108], [109].

Partindo de um perfil de estrada contínuo, para um valor definido de frequência espacial, dentro de uma determinada banda, o valor da função de densidade espectral de potência, para um valor de frequência, é definida através da seguinte expressão:

$$G_d(n) = \lim_{\Delta n \rightarrow 0} \frac{\psi_x^2}{\Delta n} \quad (5.6)$$

Onde  $\psi_x^2$  é o valor médio quadrático do componente do sinal para a frequência espacial  $n$ , dentro da banda de frequência  $\Delta n$ .

O sinal do perfil de estrada é convenientemente discretizado, e é descrito como uma sequência de pontos de elevação espaçados uniformemente. Se o comprimento do perfil da estrada for  $L_r$  e o intervalo de amostragem  $B$ , a amostragem teórica máxima da frequência espacial é  $n_{max} = \frac{1}{B}$  e a máxima frequência espacial de amostragem efetiva é  $n_{eff} = \frac{n_{max}}{2}$  e, dentro do domínio de frequência, os valores de frequência espacial discretizada  $n_i$  estão igualmente espaçados com um intervalo de  $\Delta n = \frac{1}{L}$ . A frequência espacial genérica  $n_i$  pode ser vista como  $n_i \Delta n$ , e pode ser escrita na forma discreta por:

$$G_d(n_i) = \frac{\psi_x^2(n_i, \Delta n)}{\Delta n} = \frac{\psi_x^2(i\Delta n, \Delta n)}{\Delta n} \quad (5.7)$$

Com  $i$  a variar entre 0 e  $\frac{n_{max}}{\Delta n}$

Se o perfil de estrada puder ser descrito através de uma função harmónica do tipo:

$$h(x) = A_i \cos(2\pi n_i x + \varphi) = A_i \cos(2\pi i \Delta n x + \varphi) \quad (5.8)$$

Onde  $A$  é a amplitude,  $n_i$  a frequência espacial e  $\varphi$  o ângulo de fase, é possível demonstrar que o valor eficaz deste sinal é:

$$\psi_x^2 = \frac{A_i^2}{2} \quad (5.9)$$

Das equações (5.7) e (5.9), tem-se:

$$G_d(n_i) = \frac{\psi_x^2(n_i)}{\Delta n} = \frac{A_i^2}{2\Delta n} \quad (5.10)$$

Alguns autores demonstraram que se a função PSD de deslocamentos verticais for conhecida, é possível gerar um perfil de estrada artificial usando (5.10) e assumindo um ângulo de fase aleatório  $\varphi_i$  que segue uma distribuição probabilística uniforme no intervalo  $0 - 2\pi$ . O perfil artificial pode ser descrito através de:

$$h(x) = \sum_{i=0}^N A_i \cos(2\pi n_i x + \varphi_i) = \sum_{i=0}^N \sqrt{2 \Delta n G_d(i\Delta n)} \cos(2\pi i \Delta n x + \varphi_i) \quad (5.11)$$

Por substituição da primeira expressão de (5.5) em (5.11), o perfil vem definido através de:

$$h(x) = \sum_{i=0}^N \sqrt{\Delta n} 2^k \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{n_0}{i\Delta n}\right) \cdot \cos(2\pi i \Delta n x + \varphi_i) \quad (5.12)$$

Onde  $x$  é o valor da abscissa variável entre 0 e  $L_r$ ,  $\Delta n = \frac{1}{L_r}$ ,  $n_{max} = \frac{1}{B}$ ,  $n_0 = 0.1$  ciclos/m,  $\varphi_i$  o ângulo no intervalo  $0 - 2\pi$ ,  $N = \frac{n_{max}}{\Delta n}$  e  $k$  uma constante de valor dependente da classificação do perfil da estrada, segundo a Tabela 5.4.

Tabela 5-4 Valores do  $k$  [109]

Perfil de Estrada	$k$
A	3
B	4
C	5
D	6
E	7
F	8
G	9
H	9

## 5.4 Estrutura do GLRVC adoptado

A estrutura da máquina para o gerador linear de relutância variável comutado, a incluir na suspensão ativa está ilustrada na Figura 5.3. O modelo é caracterizado por um fluxo magnético longitudinal e uma forma cilíndrica, onde todos os elementos estruturais compartilham o mesmo eixo de simetria. Possui três fases elétricas e duas partes principais identificadas como primária e secundária. A primeira é definida como a parte estática onde as bobinas da fase elétrica são instaladas e a última pode se mover no sentido axial quando submetida a uma carga eletromagnética ou mecânica.

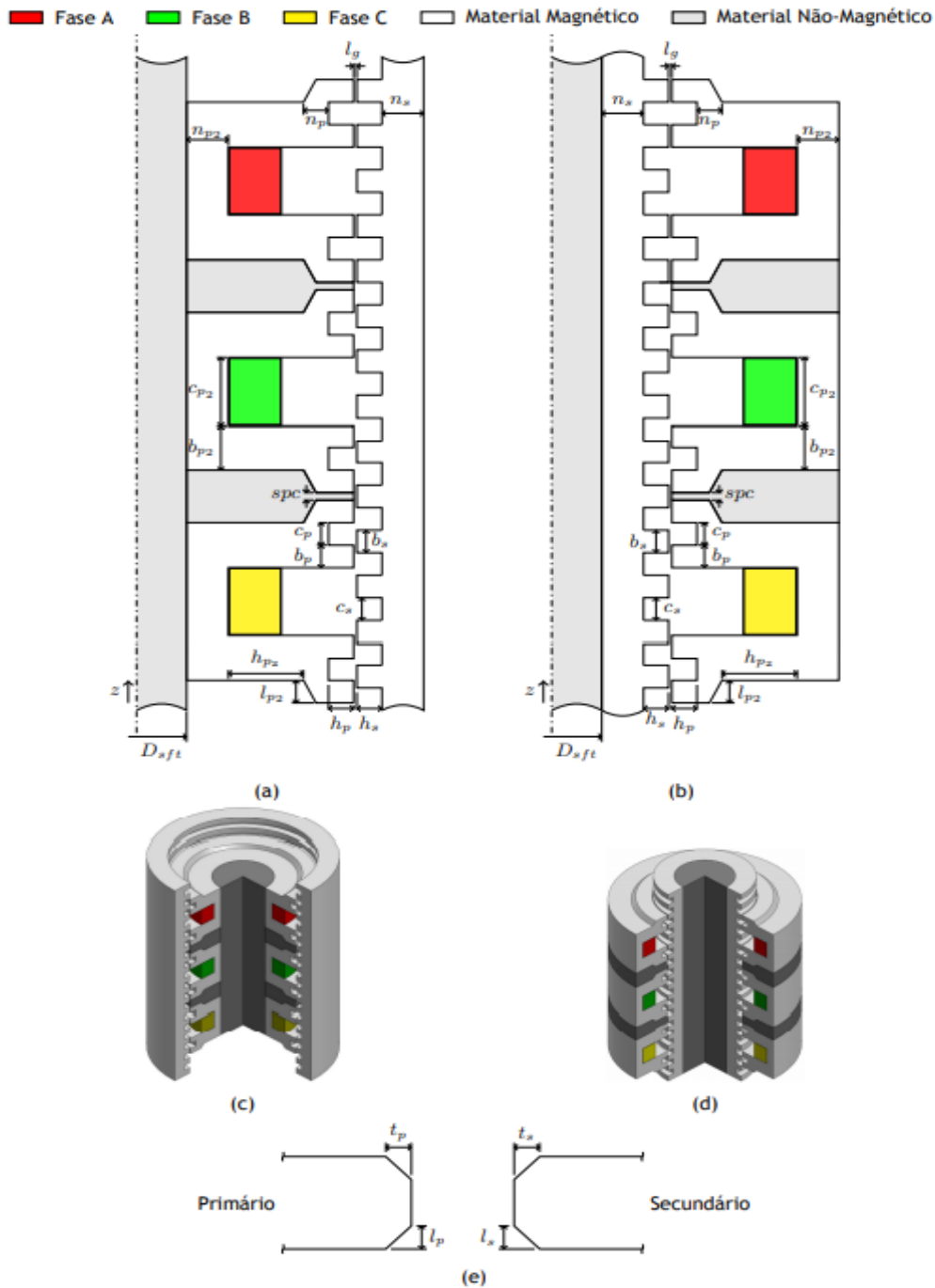


Figura 5.3 Caracterização geométrica do GLRVC: (a) secção longitudinal da versão com o primário no interior, (b) secção longitudinal da versão com o primário localizado no exterior, (c) ilustração 3D da versão com o primário localizado no interior, (d) ilustração 3D da versão com o primário localizado no exterior e (e) forma geométrica adoptada para as saliências [110]

#### 5.4.1 Modelo dinâmico GLRVC

O modelo matemático do gerador de relutância variável comutado é obtido pela análise do modelo matemático conversor eletrónico de potência. São identificados vários conversores eletrónicos para a geração elétrica com GRVCs. O conversor assimétrico de

ponte H é a escolha típica. Esta topologia do conversor está mostrada na Figura 5.4, para uma fase. A análise é feita para uma só fase, pelo facto de as fases elétricas do gerador apresentarem circuitos magnéticos idênticos e por partilharem os mesmos princípios de conversão [111].

Este conversor é uma solução prática e simples, mas caracteriza-se por uma tensão de saída variável devido ao processo de autoexcitação. No entanto, esta desvantagem pode ser minimizada com uma fonte de tensão externa. Este conversor é classificado como uma solução económica. O ciclo de conversão pode ser definido pelo período de excitação, período de geração e período de roda livre, e por uma fase intermédia entre os dois primeiros. As configurações do circuito, para os diferentes períodos são ilustradas na Figura 5.5. Assumindo que o condensador já está à sua tensão nominal de funcionamento, o período de excitação é iniciado quando os interruptores S1 e S2 estão fechados [111], [112], [113], [114], [115].

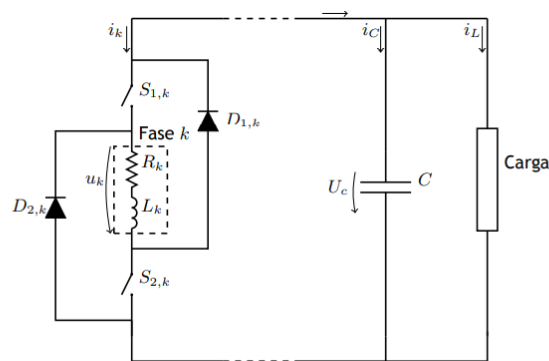


Figura 5.4 Circuito elétrico para uma fase [111]

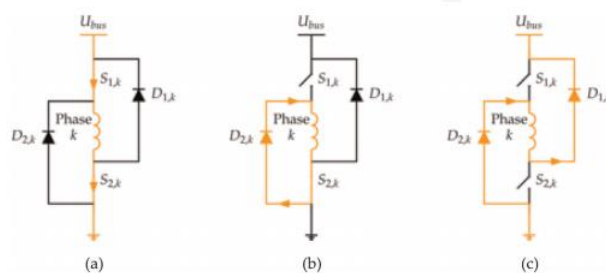


Figura 5.5 Configuração do circuito e trajetória de corrente elétrica durante o: (a) período de excitação, (b) período de geração e (c) período de roda livre [112]

Normalmente, isto ocorre quando a fase está perto da posição que corresponde à sua indução máxima. Quando a intensidade actual atinge um determinado valor, os interruptores são abertos e o período de geração começa. Durante este período, a força contraeletromotriz aumenta a corrente elétrica como consequência da redução do fluxo magnético. Assim, a corrente elétrica é mantida através dos díodos  $D_{1,k}$  e  $D_{2,k}$ , entregando

a energia elétrica gerada ao condensador e à carga. A transição entre estes dois períodos de conversão caracteriza-se por uma comutação dura porque a tensão é invertida. Durante o período de roda livre, apenas um interruptor é fechado para proporcionar uma tensão zero através da fase elétrica do gerador [111], [112], [113], [114], [115].

Os modos de condução do circuito podem ser descritos matematicamente através de:

$$u_k = \begin{cases} U_{bus} - 2U_S & \text{(a) } S_{1,k} \text{ e } S_{2,k} \text{ estão fechados} \\ -U_D - U_S & \text{(b) } S_{1,k} \text{ aberto e } S_{2,k} \text{ fechado} \\ -U_{bus} - 2U_D & \text{(c) } S_{1,k} \text{ e } S_{2,k} \text{ estão abertos} \end{cases} \quad (5.15)$$

Onde  $U_D$  e  $U_S$  são as quedas de tensão aos terminais de cada interruptor eletrônico e do diodo,  $U_{bus}$  é tensão do barramento DC imposta pela tensão  $U_C$  aos terminais do condensador do conversor eletrônico de potência com capacidade  $C$ . Sendo

$$U_{bus} = U_C \quad (5.16)$$

Pela análise do conversor eletrônico de potência do gerador de relutância variável comutado a tensão aos seus terminais em cada fase  $k$ , é dada por:

$$u_k = R_{ak}i_k + (L_k(z_k, i_k) + i_k \frac{dL_k(z_k, i_k)}{di_k}) \frac{di_k}{dt} + vi_k \frac{dL_k(z_k, i_k)}{dz_k} \quad (5.17)$$

onde  $u_k$  é a tensão aplicada aos terminais de cada fase  $k$ ,  $R_{ak}$  a resistência interna dos seus enrolamentos,  $i_k$  a corrente elétrica,  $L_k$  a indutância própria de cada fase,  $v$  a velocidade linear do secundário e  $z_k$  a posição elétrica da fase.

Pela equação (5.17), podemos determinar a derivada da corrente de cada fase

$$\frac{di_k}{dt} = \frac{u_k - vi_k \frac{dL_k(z_k, i_k)}{dz_k} - R_{ak}i_k}{L_k(z_k, i_k) + i_k \frac{dL_k(z_k, i_k)}{di_k}} \quad (5.18)$$

A relação entre a posição elétrica de uma fase  $z_k$  e a posição mecânica do secundário  $z_{mech}$  é estabelecida a partir da seguinte expressão [111]:

$$z_k = -S_t + \left( \frac{z_{mech} - k_{offset} - S_t}{2S_t} - \left[ \frac{z_{mech} - k_{offset} - S_t}{2S_t} \right] \right) 2S_t \quad (5.19)$$

Onde  $k_{offset}$  representa o desfasamento entre as posições elétricas de duas fases consecutivas e  $2S_t$  o desfasamento entre as posições de alinhamento e de não alinhamento da mesma fase.

### 5.4.2 Conversor de potência

Para o bom funcionamento da máquina de relutância variável comutada é necessário um conversor eletrônico de potência adequado e devidamente controlado, Figura 5.6 [112].

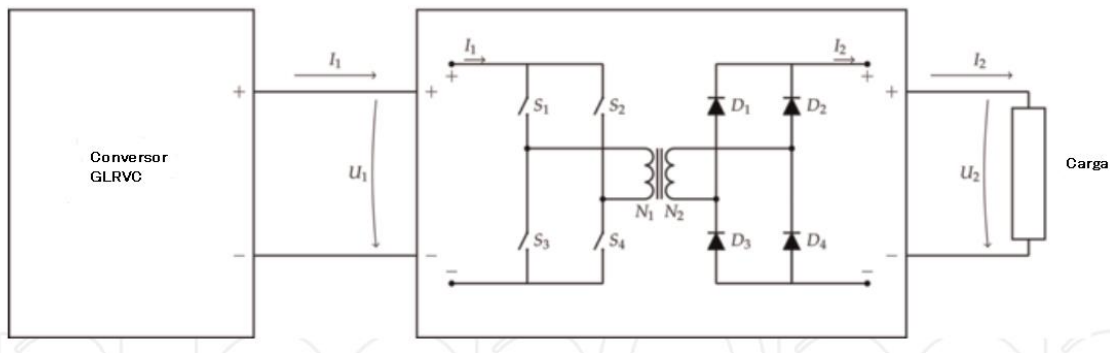


Figura 5.6 Sistema de geração com estágio de conversão DC/DC [112]

O conversor DC/DC permite o isolamento elétrico entre o conversor de potência do gerador elétrico e a carga, através de um transformador, que é definido pela razão de transformação, ou seja o quociente entre o valor da tensão do conversor de potência e a tensão a ser transformada, que permite que o fluxo de energia seja entregue à carga de forma regulada [112]. Para o modelo ideal do conversor DC/DC em ponte H isolada, é possível estabelecer relações entre os valores médios das tensões e das correntes na entrada e saída:

$$U_2 = 2 U_1 D \frac{N_2}{N_1} \quad (5.20)$$

$$I_2 = \frac{U_2}{R_L} \quad (5.21)$$

$$I_1 = 2 I_2 D \frac{N_2}{N_1} \quad (5.22)$$

Onde  $U_2$  é o valor médio da tensão na saída (na carga),  $U_1$  o valor médio da tensão de entrada (ou do barramento),  $I_2$  o valor médio da corrente na saída,  $I_1$  o valor médio da corrente na entrada,  $R_L$  a resistência da carga, e  $N_1$  e  $N_2$  os números de espiras do primário e do secundário do transformador, respetivamente.

## 5.5 Controle

A operação da máquina de relutância magnética comutada depende da comutação das posições elétricas. Valores fixos para essas posições podem causar instabilidade do sistema, especialmente quando operando a velocidades elevadas. Ao operar como gerador, o controle da máquina deve ser aplicado para preservar a tensão de saída do conversor, condicionada pelo fluxo de corrente nas fases elétricas e na carga elétrica. A quantidade de energia extraída para a conversão depende da força eletromecânica exercida pelo gerador que também é afetada pela corrente elétrica da fase. Assim, com uma estratégia de comutação adequada, é possível controlar a intensidade corrente elétrica para atingir um nível de tensão desejável, bem como para melhorar a conversão do sistema e a sua eficiência. Com o conversor DC / DC adicional, a tensão do barramento também pode ser mantido perto de um valor nominal, modificando o fluxo de energia entre o conversor GLRVC e a carga [112], [113], [114].

Existem muitos métodos de regulação para operação em baixa velocidade. Os métodos mais populares de controle de corrente incluem o controle por modulação de largura de pulso (PWM), por histerese de corrente, por modulação delta, etc. [116], [117].

### 5.5.1 Controle por histerese.

O controle por histerese é usado para manter a corrente numa banda desejada em torno de um valor de corrente de referência. A intensidade da corrente elétrica oscila perto de um valor de referência  $i_{ref}$ , sendo a amplitude de oscilação definida pela largura da banda de histerese. No controle por histerese, os estados dos interruptores eletrônicos são estabelecidos em função do erro da corrente de fase  $e_i$  de acordo com a lógica previamente definida. Se o valor do erro for menor que o limite inferior da banda de histerese ( $-h_b/2$ ), os interruptores eletrônicos são fechados de modo excitar a fase e, conseqüentemente, a aumentar a intensidade de corrente. Quando o valor desta última grandeza ultrapassar o limite superior da banda de histerese ( $h_b/2$ ), os interruptores são abertos e uma tensão negativa é aplicada aos terminais da fase. Neste instante, inicia-se o período de geração, no qual a intensidade da corrente diminui progressivamente até atingir, novamente, o valor referente ao limite inferior da banda de histerese [112], [115], [118]. A Figura 5.7 ilustra o funcionamento do controle por histerese.

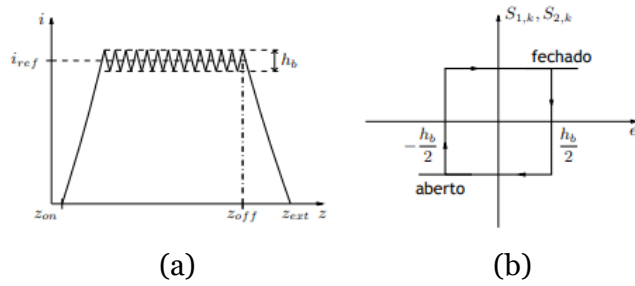


Figura 5.7 Controle por histerese: (a) Perfil da corrente elétrica na fase e (b) lógica de controle [115]

O ciclo de conversão é caracterizado por vários períodos de geração e de excitação consecutivos, que ocorrem enquanto a posição elétrica da fase está compreendida entre  $z_{on}$  e  $z_{off}$  e a parte móvel do gerador se encontra em movimento. Quando a velocidade é nula, não é possível realizar geração elétrica [112], [115].

### 5.5.2 Controlador PI

Para controlar o conversor DC/DC Buck será utilizada um controlador PI, cuja equação que o define se mostra de seguida [112]:

$$s(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (5.23)$$

Onde  $s(t)$  é a variável de controlo, função do erro  $e(t)$  entre a variável a controlar e o respetivo valor de referência, com  $K_p$  e  $K_i$  os ganhos proporcional e integral do controlador, respetivamente. O duty-cycle  $D(t)$  é dado por:

$$D(t) = D_{init} + \Delta D(t) \quad (5.24)$$

Onde  $D_{init}$  é o valor do duty-cycle inicial e  $\Delta D(t)$  o valor incremental do duty-cycle dado pelo controlador e que é:

$$\Delta D(t) = K_p e_u(t) + K_i \int_0^t e_u(\tau) d\tau \quad (5.25)$$

Com  $e_u(t)$  o erro normalizado entre o valor da tensão no barramento e o respetivo valor de referência  $U_{ref}$ :

$$e_u(t) = \frac{U_{ref} - U_{bus}(t)}{U_{ref}} \quad (5.26)$$

# 6 Capítulo 6. Análise Experimental de uma Suspensão Eletromagnética Ativa

## 6.1 Simulação e análise energética de uma suspensão regenerativa com um GLRVC

Nas simulações foram utilizados características do carro presente na Tabela 5-2. As dimensões do GLRVC utilizado como elemento de amortecimento regenerativo estão apresentadas na Tabela 6-1.

Tabela 6-1 Parâmetros dimensionais do modelo da máquina

$l_g$	$N_t$	$D_{sft}$	$w_h$	$w_v$	$b_p$	$c_p$	$n_p$	$h_p$	$l_p$	$t_p$
[mm]		[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
0.54	98	12	0.1	0.27	13	14	11	11	2.9	2.7
$b_{p2}$	$c_{p2}$	$n_{p2}$	$h_{p2}$	$l_{p2}$	$t_{p2}$	$s_{pc}$	$b_s$	$c_s$	$n_s$	$h_s$
[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
35	41	64.5	21.4	5	3.5	5	13	14	24	13
$l_s$	$t_s$	$h_{coil}$	$d_{wire}$	$l_{coil}$	$S_t$	$k_{offset}$				
[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]				
3	3	40.46	2.38	14.28	13.5	9				

As características de eletromagnéticas do GLRVC utilizadas foram determinadas pelo método de elementos finitos (FEM) através do software gratuito *Finite Element Method Magnetics* (FEMM). Para cada simulação foi adotado o modelo axi-simétrico da máquina e a solução foi calculada para uma tolerância relativa de  $1 \times 10^{-8}$ .

Como as características eletromagnéticas das três fases são idênticas, as simulações foram executadas apenas para fase A. Como resultado das simulações FEM, obtiveram-se as características apresentadas na Figura 6.1. Nela, mostram-se as características de variação da força e da indutância em função da posição, para diferentes correntes. O GLRVC é caracterizado por uma corrente elétrica de 20 A, uma força linear máxima de 2.42 kN e um valor máximo de indutância de 0.18 H.

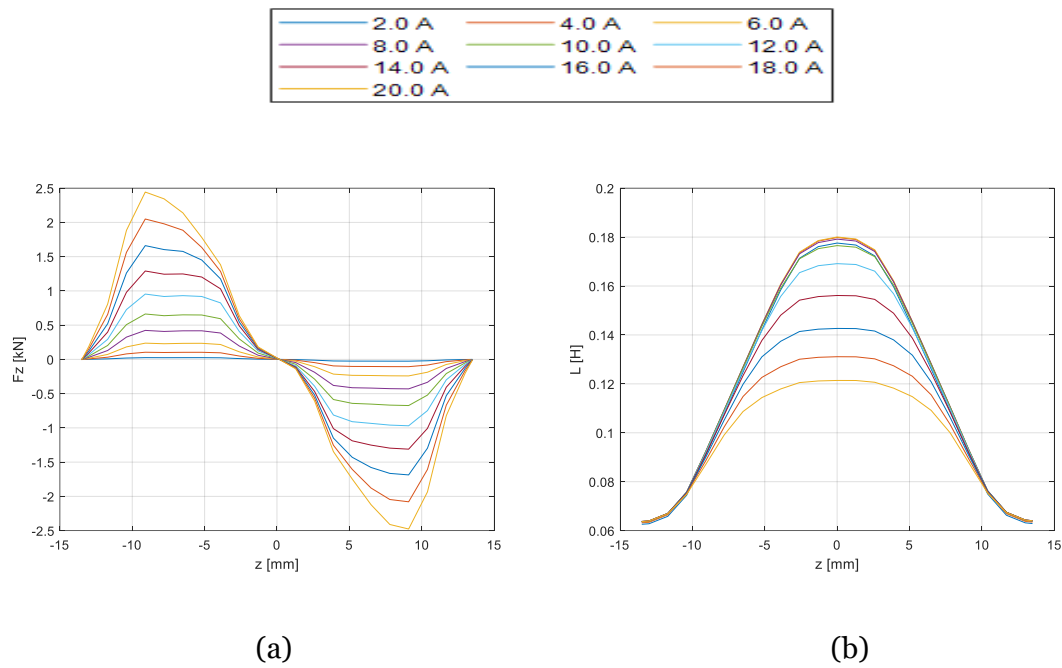


Figura 6.1 Características eletromagnéticas do gerador: (a) Força e (b) Indutância.

Na Tabela 6-2 podem observar-se os resultados obtidos dos valores ótimos, sendo que para o  $h_b$  foi sempre obtido o valor máximo, 2 A, que corresponde a 10% da corrente máxima de 20 A, com o tempo de simulação de 0.2 segundos. O modelo dinâmico do gerador utilizado na simulação para calcular os valores ótimos está descrito no Anexo A.1 (Figuras A.1 a A.9).

Tabela 6-2 Valores ótimos obtidos na simulação do modelo do gerador

$v$ [m/s]	$I_{ref}$ [A]	$h_b$ [%]	$z_{on}$ [mm]	$z_{off}$ [mm]
0.1	2	2	-6.75	10.57
0.1	6.5	2	-6.75	1.80
0.1	11	2	2.25	10.80
0.1	15.5	2	-6.75	10.57
0.1	20	2	-6.75	10.57
0.92	2	2	-2.25	12.15
0.92	6.5	2	4.50	10.12
0.92	11	2	2.25	10.80
0.92	15.5	2	-6.75	10.57
0.92	20	2	-6.75	10.57
1.73	2	2	-4.5	12.82
1.73	6.5	2	-4.5	9.90
1.73	11	2	2.25	10.80
1.73	15.5	2	-6.75	10.57
1.73	20	2	-6.75	10.57
2.55	2	2	-2.25	12.15
2.55	6.5	2	-2.25	12.82
2.55	11	2	-4.5	9.90
2.55	15.5	2	-6.75	10.57
2.55	20	2	4.5	10.12
3.36	2	2	-2.25	12.15
3.36	6.5	2	-2.25	12.15

Tabela 6-3 Valores ótimos obtidos na simulação do modelo do gerador

$v$	$I_{ref}$	$h_b$	$z_{on}$	$z_{off}$
[m/s]	[A]	[%]	[mm]	[mm]
3.36	11	2	-4.5	12.82
3.36	15.5	2	-6.75	10.57
3.36	20	2	-4.5	4.05
4.18	2	2	-2.25	12.82
4.18	6.5	2	-4.5	6.97
4.18	11	2	-4.5	9.90
4.18	15.5	2	-2.25	6.30
4.18	20	2	-2.25	6.30
5	2	2	-2.25	12.15
5	6.5	2	-4.5	6.97
5	11	2	-4.5	12.82
5	15.5	2	-2.25	6.3
5	20	2	-2.25	6.3

Tendo em conta os valores ótimos obtidos, foram realizadas as simulações do desempenho do gerador como suspensão do veículo. As simulações foram feitas como o modelo dinâmico do sistema completo mostrado no Anexo A.2 (Figuras A.10 a A.21).

No conversor DC/DC foram considerados os valores de 4089.3 e 639.3 para os parâmetros de controlo  $K_p$  e  $K_i$ , respetivamente.

Os parâmetros de controlo  $h_b$ ,  $z_{on}$  e  $z_{off}$  foram calculados de acordo com os valores ótimos presentes na Tabela 6-2, foram introduzidos no modelo através de uma tabela de observação e assumidos pelo conversor.

As simulações foram feitas para vários valores de corrente de referência, o que implica várias intensidades de amortecimentos e para várias velocidades.

Na simulação usou-se o método de *Dormand-prince* para resolver as equações diferenciais ordinárias, com uma tolerância de relativa de  $1 \times 10^{-3}$ , para o intervalo máximo de tempo admissível de  $1 \times 10^{-4}$ .

O desempenho do sistema regenerativo foi avaliado para todas as classes da estrada identificadas na Tabela 5-3 e na Tabela 5-4.

Nas simulações realizadas foram considerados para a velocidade do veículo os valores de 20, 40, 60, 80, 90 e 100 km/h, e para a corrente de referência os valores de 5, 10, 12, 16, 18 e 20 A.

Os perfis de estrada admitidos em cada simulação foram obtidos para o maior valor médio da potência elétrica, para a velocidade máxima de 100 km/h, podem-se encontrar em Anexo A.3 (Figura A.22).

Os valores médios da potência elétrica gerada, calculada para as várias velocidades em função da corrente de referência, encontram-se, para cada perfil de estrada, na Figura 6.2.

Os valores do deslocamento máximo da oscilação do veículo, calculados para as várias velocidades, em função da corrente de referência, encontram-se, para cada perfil de estrada, na Figura 6.3.

Os valores do deslocamento da massa  $M_S$  do veículo, calculados para as várias velocidades, em função da corrente de referência, encontram-se, para cada perfil de estrada, na Figura 6.4.

Os valores do deslocamento do gerador, correspondentes à simulação com maior valor médio de potência elétrica gerada, podem ser observados, para cada perfil de estrada, na Figura 6.5.

Os perfis de oscilação da massa  $M_S$ , para as várias intensidades de amortecimento consideradas, encontram-se na Figura 6.6, na Figura 6.7, na Figura 6.8, na Figura 6.9, Figura 6.10, na Figura 6.11, para as velocidades de 20 km/h, 40 km/h, 60 km/h, 80 km/h, 90 km/h e 100 km/h, respetivamente.

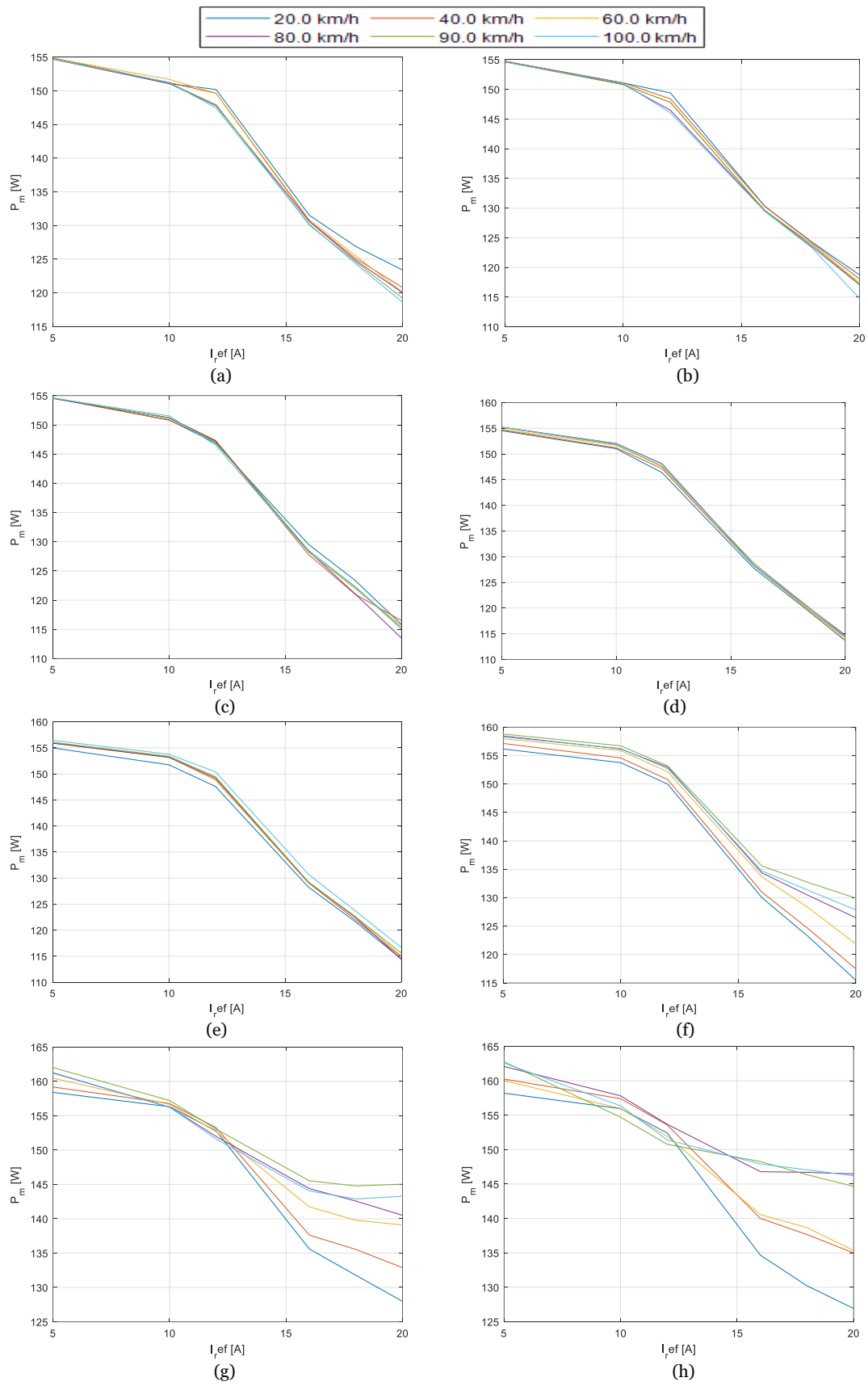


Figura 6.2 Valores médios da potência elétrica gerada para o perfil de estrada: (a) A, (b) B, (c) C, (d) D, (e) E, (f) F, (g) G e (h) H.

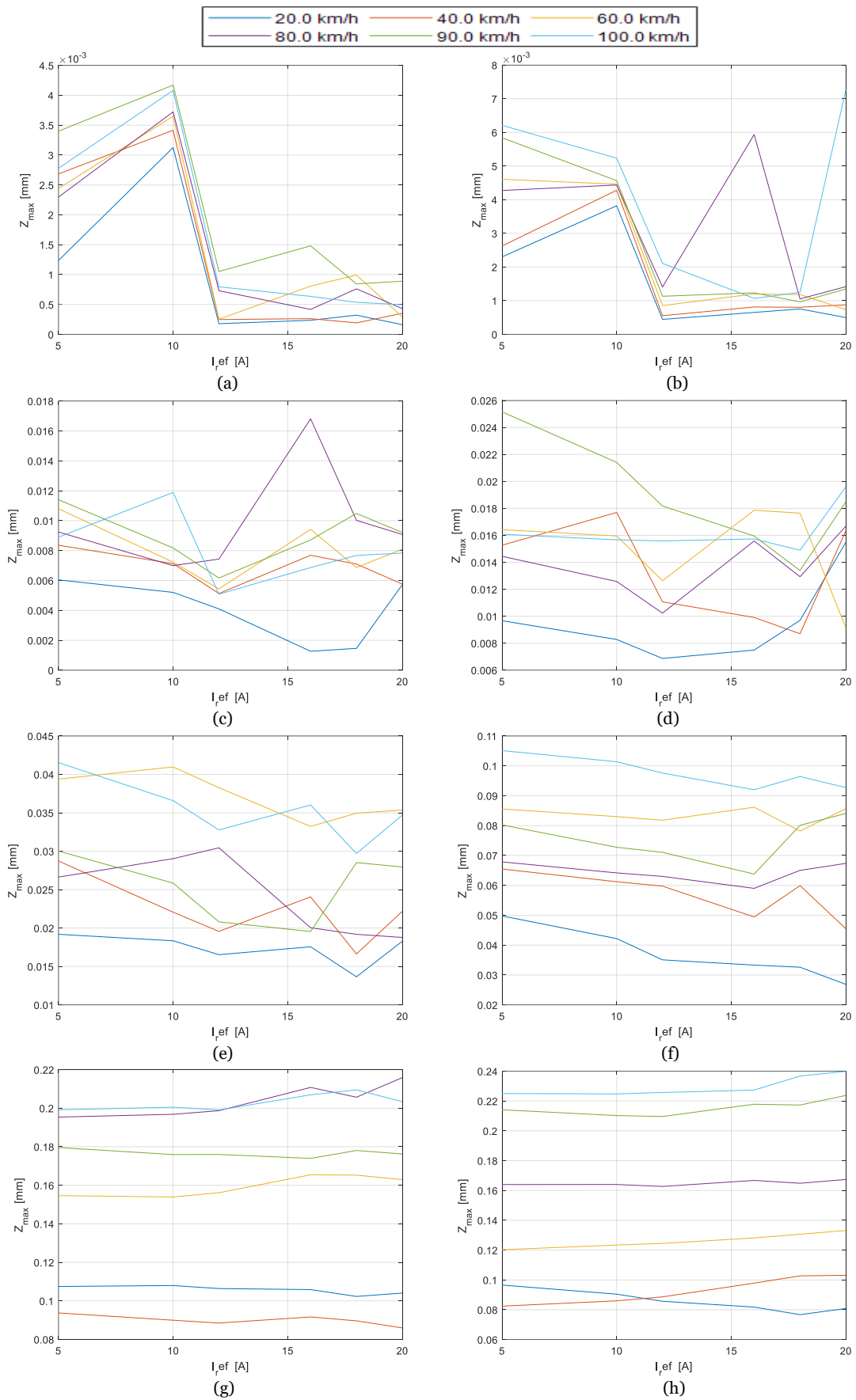


Figura 6.3 Deslocamento máximo da oscilação do veículo para perfil de estrada: (a) A, (b) B, (c) C, (d) D, (e) E, (f) F, (g) G e (h) H.

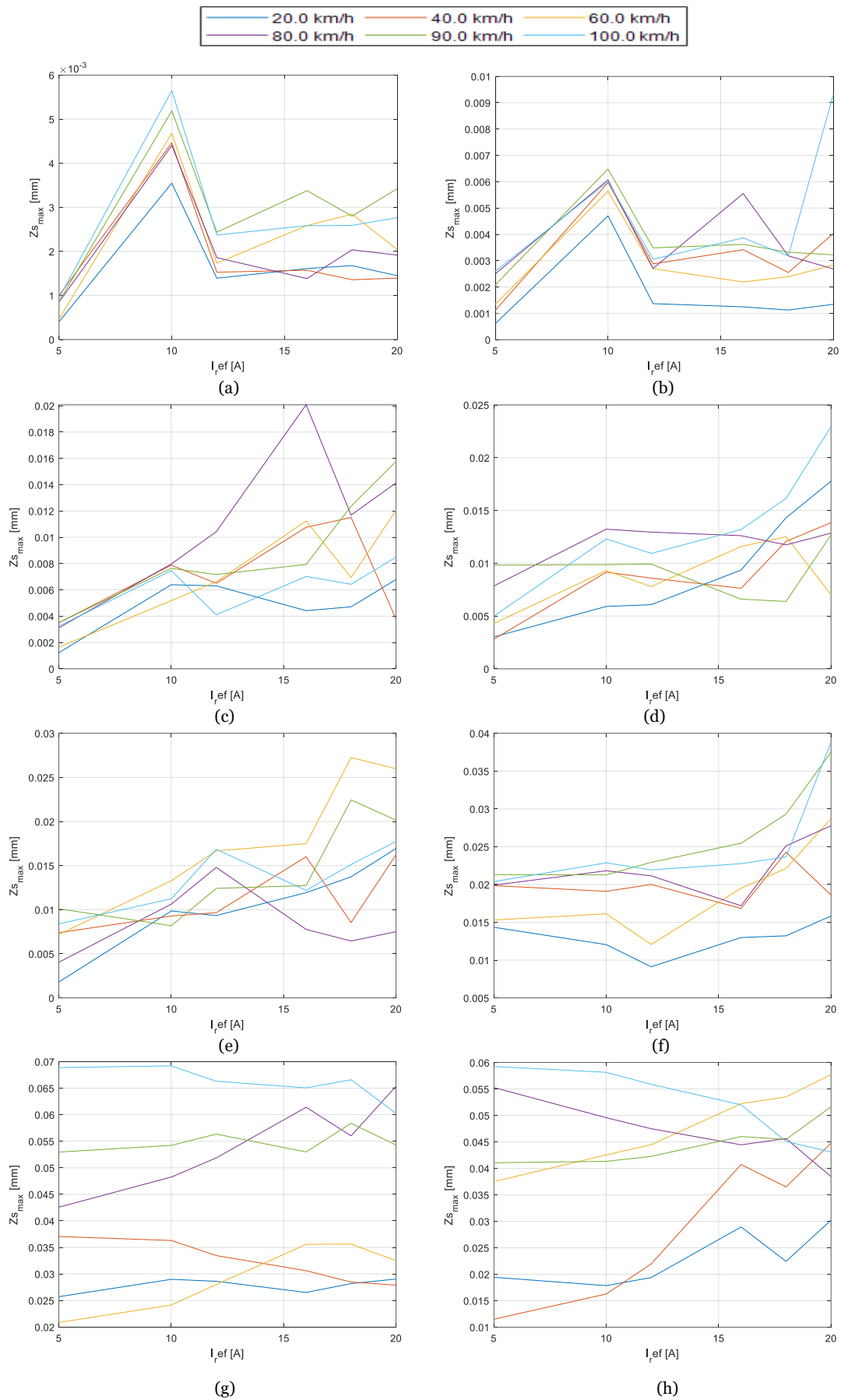


Figura 6.4 Deslocamento da massa  $M_s$  do veículo calculada para as várias velocidades para o perfil de estrada: (a) A, (b) B, (c) C, (d) D (e) E, (f) F, (g) G e (h) H.

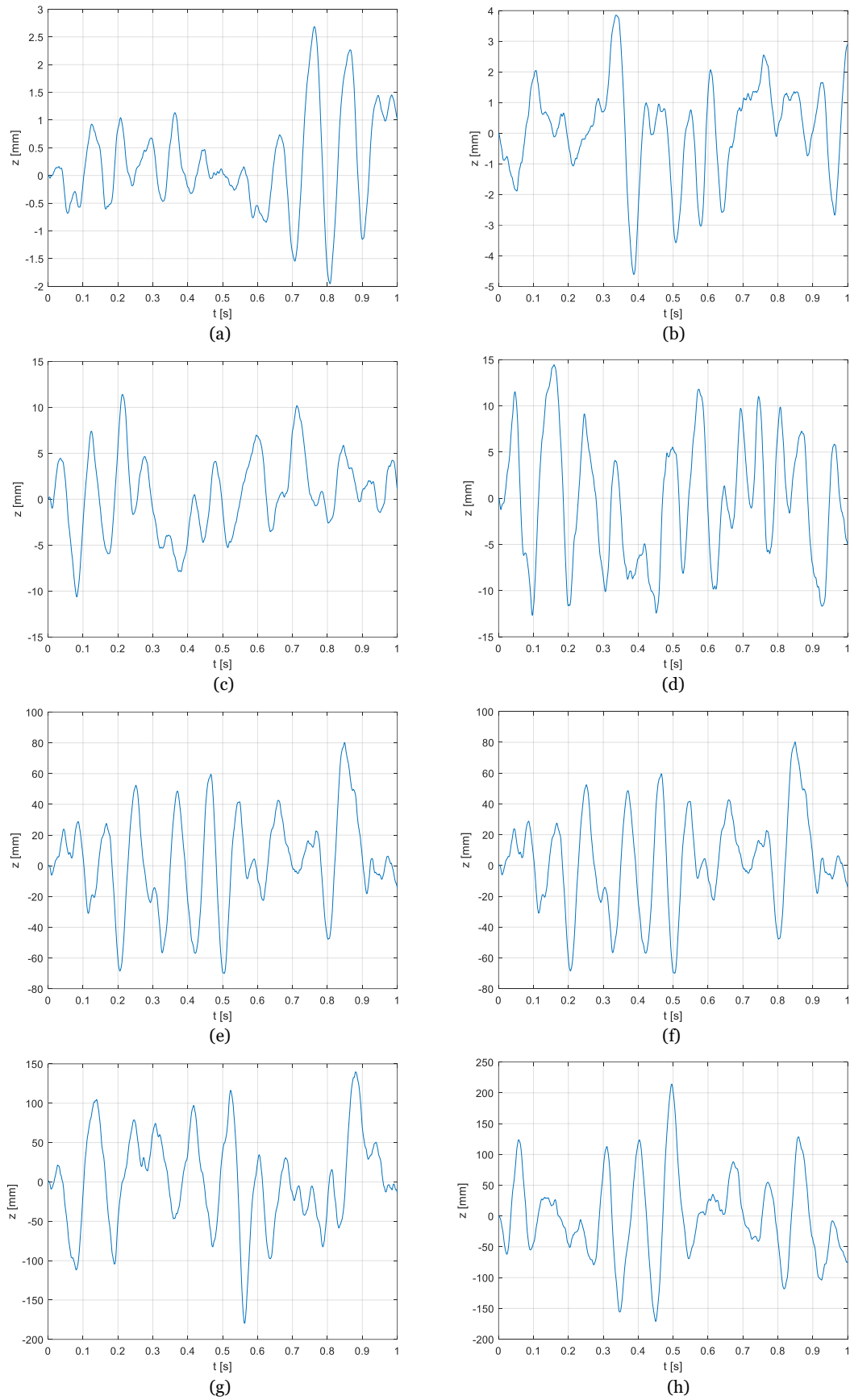


Figura 6.5 Deslocamento do gerador correspondente à simulação com maior valor médio de potência elétrica para o perfil de estrada: (a) A, (b) B, (c) C, (d) D, (e) E, (f) F, (g) G e (h) H.

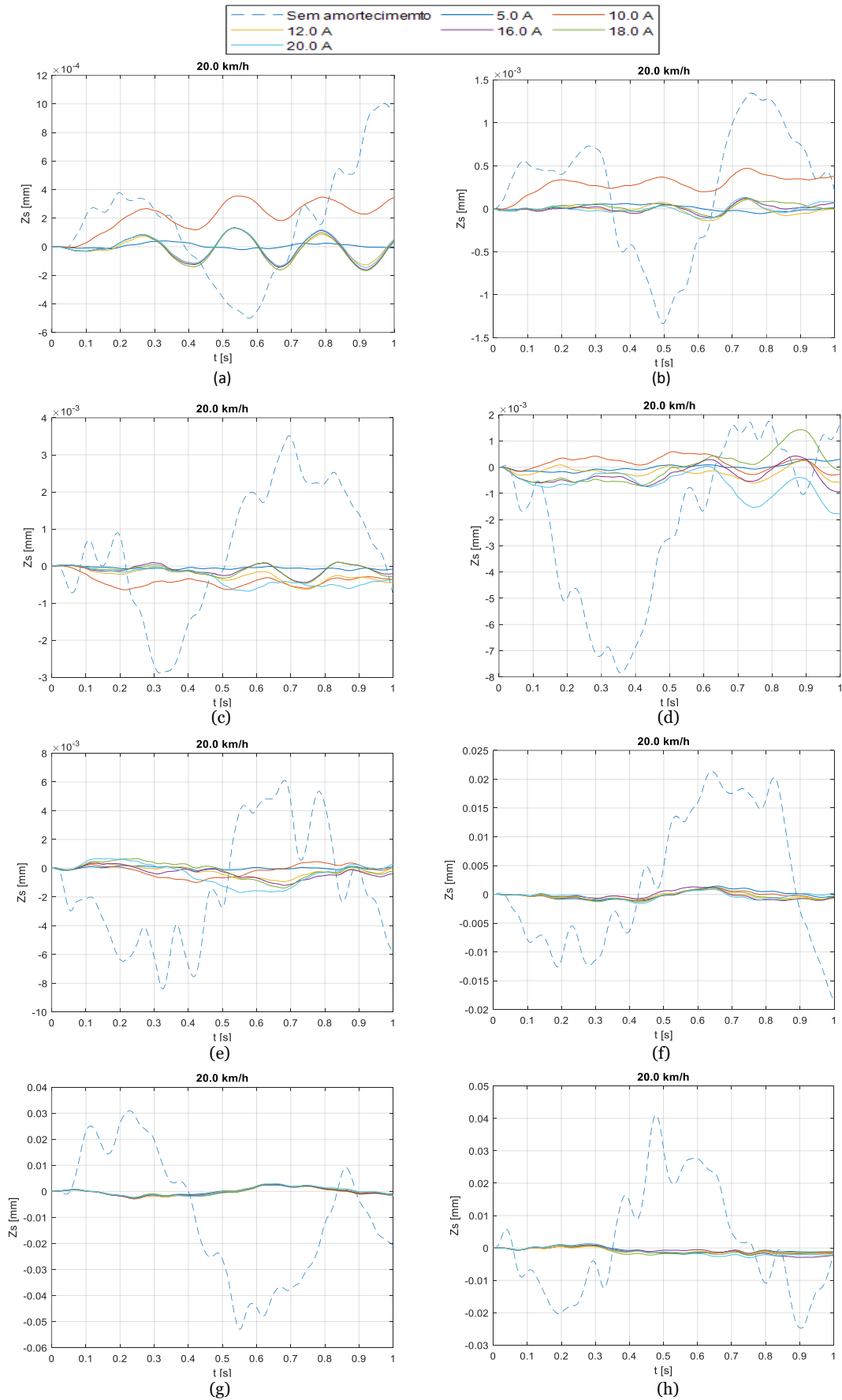


Figura 6.6 Perfis de oscilação da massa  $M_5$  a uma velocidade de 20 km/h para as várias intensidades de amortecimento para o perfil de estrada: (a) A, (b) B, (c) C, (d) D, (e) E, (f) F, (g) G e (h) H.

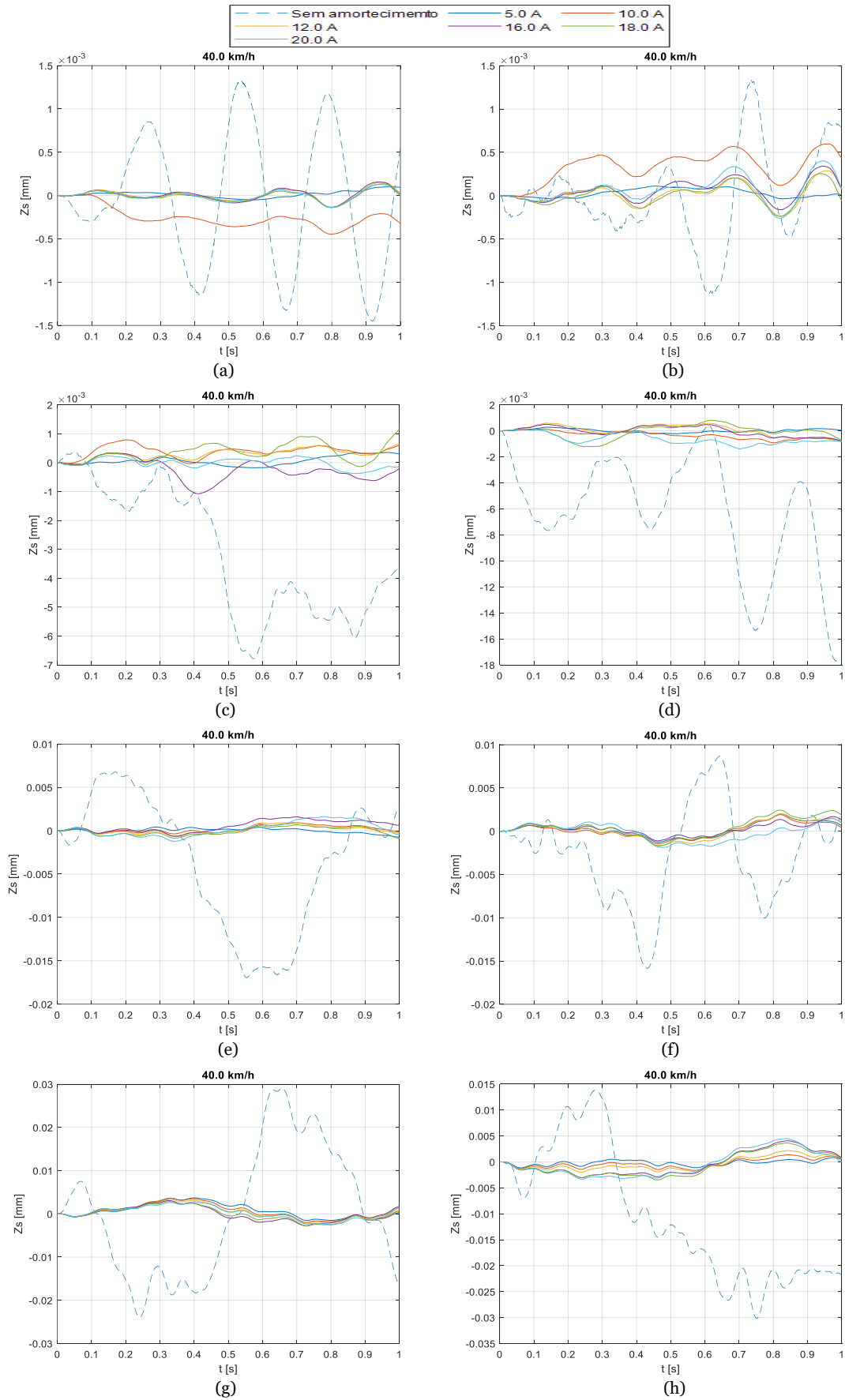


Figura 6.7 Perfis de oscilação da massa  $M_5$  a uma velocidade de 40 km/h para as várias intensidades de amortecimento para o perfil de estrada: (a) A, (b) B, (c) C, (d) D, (e) E, (f) F, (g) G e (h) H.

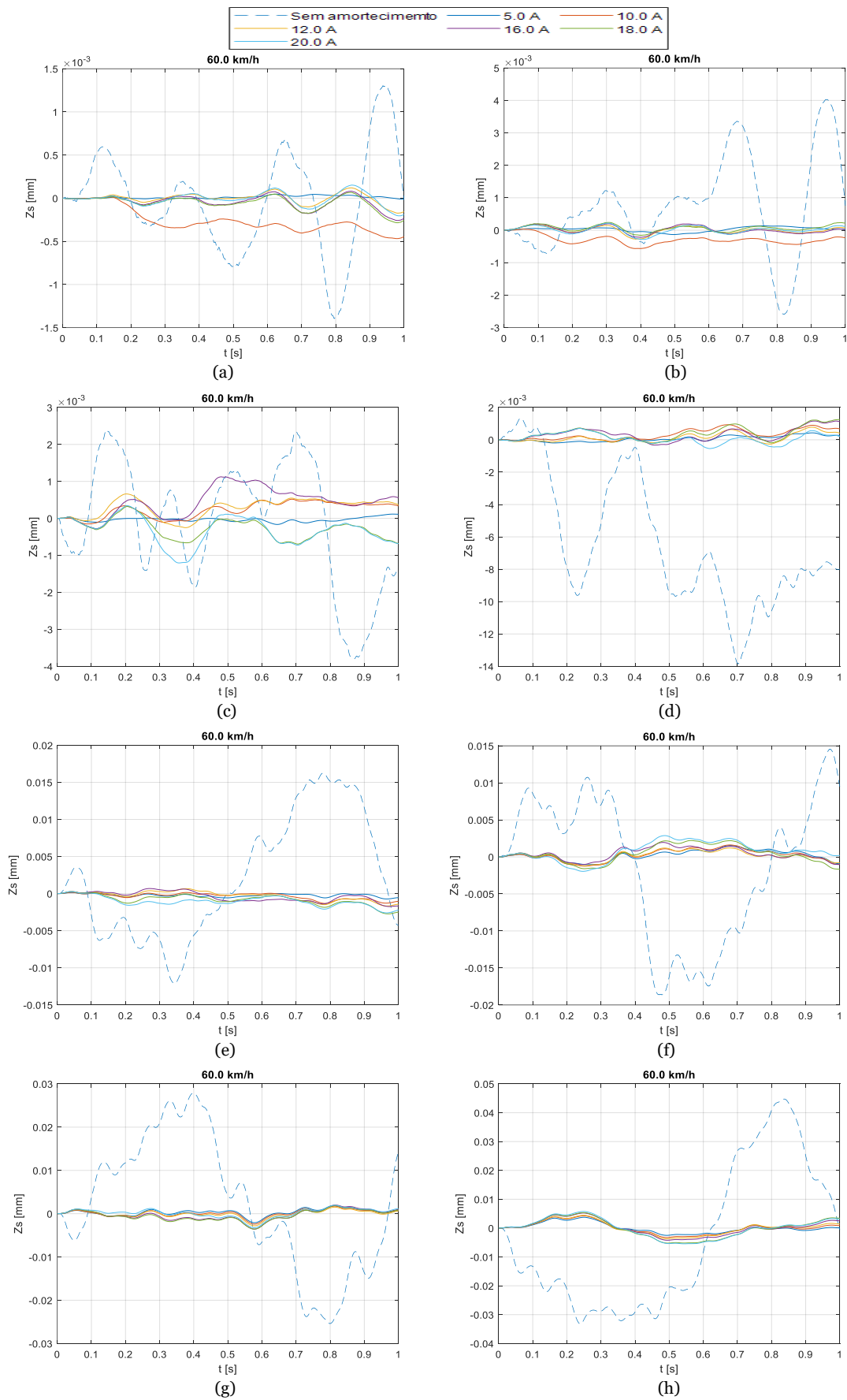


Figura 6.8 Perfis de oscilação da massa  $M_5$  a uma velocidade de 60 km/h para as várias intensidades de amortecimento para o perfil de estrada: (a) A, (b) B, (c) C, (d) D, (e) E, (f) F, (g) G e (h) H.

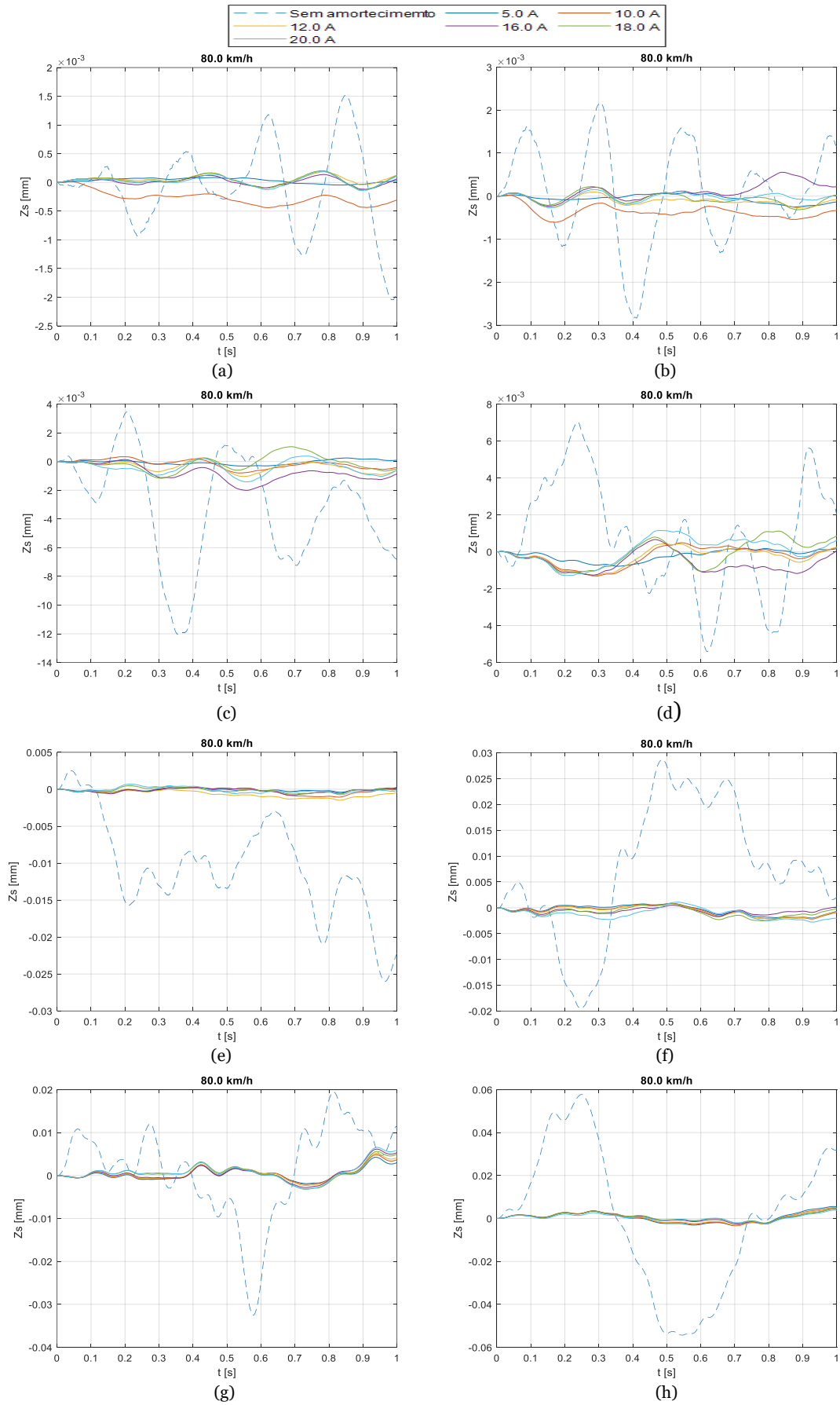


Figura 6.9 Perfis de oscilação da massa  $M_S$  a uma velocidade de 80 km/h para as várias intensidades de amortecimento para o perfil de estrada: (a) A, (b) B, (c) C, (d) D, (e) E, (f) F, (g) G e (h) H.

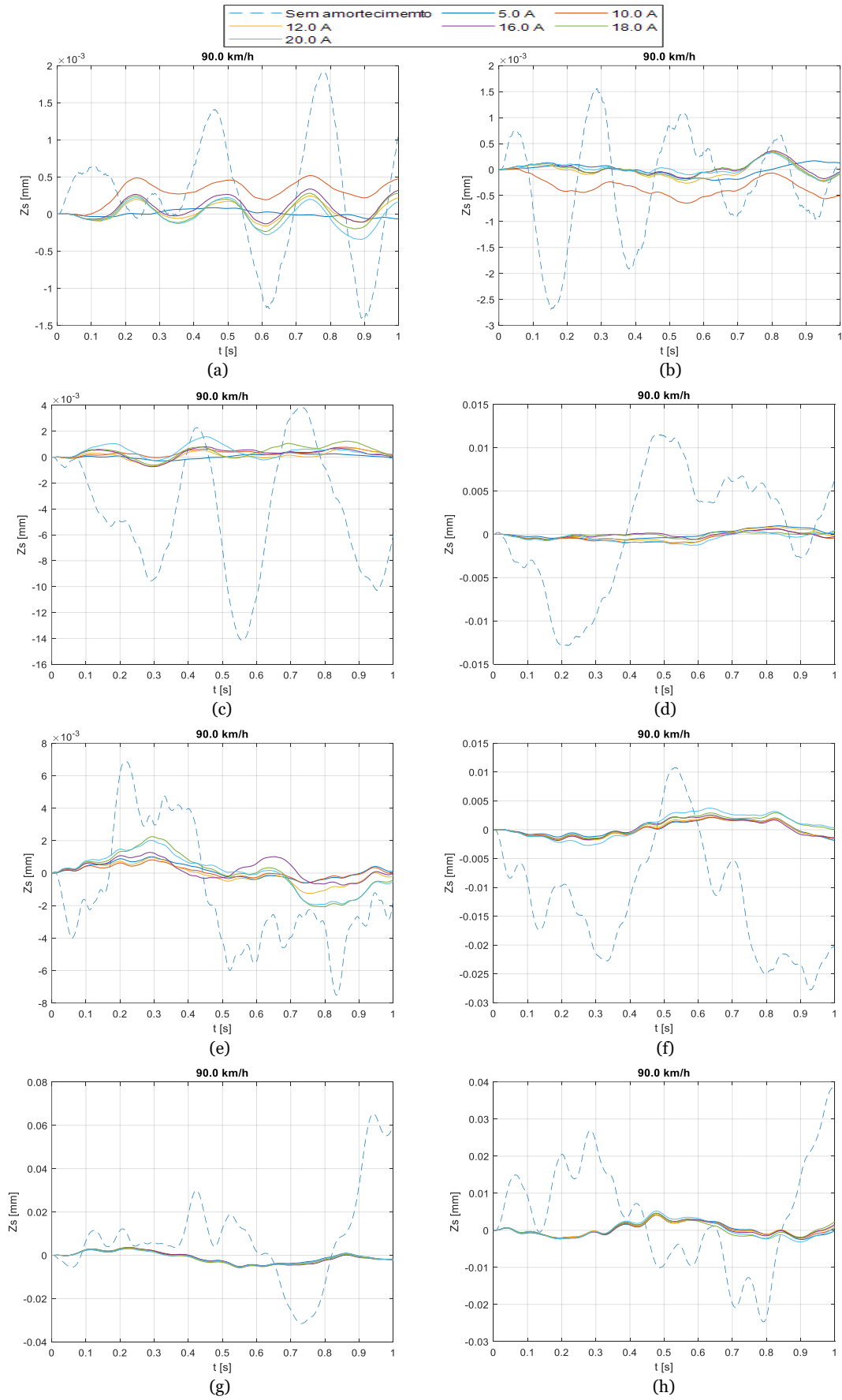


Figura 6.10 Perfis de oscilação da massa  $M_5$  a uma velocidade de 90 km/h para as várias intensidades de amortecimento para o perfil de estrada: (a) A, (b) B, (c) C, (d) D, (e) E, (f) F, (g) G e (h) H.

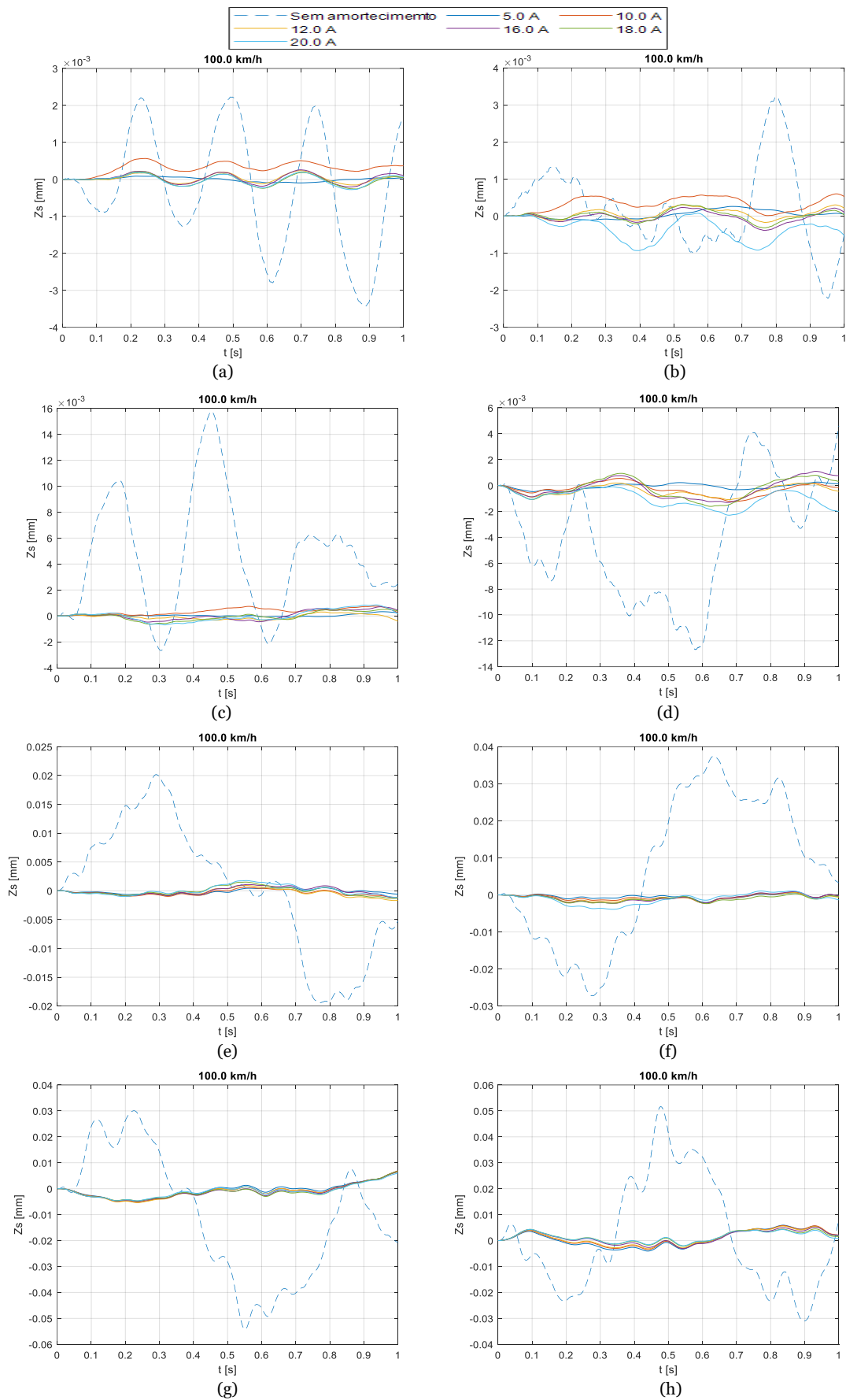


Figura 6.11 Perfis de oscilação da massa  $M_s$  a uma velocidade de 100 km/h para as várias intensidades de amortecimento para o perfil de estrada: (a) A, (b) B, (c) C, (d) D, (e) E, (f) F, (g) G e (h) H.

Tendo em conta os resultados obtidos, verificou-se um maior valor médio de potência elétrica gerada para o perfil de estrada H, com um valor de 162.77 W a uma velocidade de 90 km/h e corrente de referência de 5 A. E o menor valor médio de potência elétrica gerada foi para o perfil de estrada C, com um valor de 113.53 W a uma velocidade de 80 km/h e corrente de referência de 20 A.

Relativamente ao deslocamento máximo do gerador, verificou-se o maior valor para o perfil de estrada H, com uma amplitude de 0.24 mm, para uma velocidade de 100 km/h e corrente de referência de 20 A. Observou-se o menor deslocamento máximo para o perfil de estrada A com um valor de 0.0001 mm para uma velocidade de 20 km/h e uma corrente de referência de 20 A. Verifica-se que o veículo é sujeito a oscilações de maior amplitude em perfis de estrada de pior qualidade.

Tendo em conta os resultados obtidos a partir da maior potência média simulada, verificou-se o maior valor para o perfil de estrada H, como uma amplitude de 212.12 mm e para uma velocidade de 100 km/h. A menor amplitude obteve-se para o perfil de estrada A, com um valor de 2.68 mm a uma velocidade de 100 km/h.

Em todas as simulações efetuadas, verificou-se um cenário positivo de geração elétrica, assim como um amortecimento significativo das oscilações induzidas no veículo pelas irregularidades do pavimento.

## 7 Capítulo 7. Conclusão

Os veículos de combustão interna são um dos principais contribuintes para emissões de gases de efeito de estufa e poluentes para atmosfera. Este facto tem influenciado o surgimento dos veículos elétricos com o objetivo principal de reduzir o índice de emissões de gases de efeito estufa para a atmosfera, no sentido da existência de veículos com zero emissões.

Esta dissertação teve como objetivo a proposta de uma suspensão ativa baseada num gerador linear de relutância variável comutado, capaz de produzir energia elétrica a partir da energia das vibrações, para aplicar em veículos elétricos.

Foi definido o modelo dinâmico que regula o comportamento do sistema de suspensão considerado neste estudo e as expressões analíticas para o cálculo das equações diferenciais.

Foram abordados os princípios de conversão de energia, o conceito da máquina linear de relutância variável comutada e o seu funcionamento como gerador e explicados os princípios de conversão eletromagnética para esse gerador de topologia tubular.

O método de elementos finitos foi utilizado para determinar as características eletromagnéticas do gerador.

O conversor eletrónico de potência assimétrico com ponte H foi considerado para a operação e controlo do gerador. Por intermédio de um conversor DC/DC Buck, a energia elétrica gerada é entregue a uma carga resistiva, sendo o conversor controlado através de um controlador PI, que vai manter constante a tensão do barramento DC.

Foram analisados diferentes perfis de estradas, tendo os mesmos apresentado bons resultados no que diz respeito ao valor médio da potência elétrica, sendo os perfis de estradas consideradas de pior qualidade as que apresentaram melhores resultados.

O gerador escolhido revelou-se ser eficaz quer no amortecimento do veículo, ao reduzir a oscilação do veículo e promovendo por isso o conforto do condutor, quer do ponto de vista da geração eletromagnética de energia para recarregar a bateria do veículo elétrico.

O GLRVC analisado revelou-se um forte candidato para suspensões eletromagnéticas regenerativas de veículos elétricos.

Para trabalhos futuros, sugere-se o desenvolvimento de um controlo ótimo e o desenvolvimento de um protótipo com dimensões otimizadas e adaptadas a uma suspensão regenerativa ativa com melhores capacidades de geração e que promova um melhor conforto.

## Referências Bibliográficas

- [1] Y. Fang, F. Asche, and K. Novan, “The costs of charging Plug-in Electric Vehicles (PEVs): Within day variation in emissions and electricity prices,” *Energy Econ.*, vol. 69, pp. 196–203, 2018, doi: 10.1016/j.eneco.2017.11.011.
- [2] A. Mohammad, R. Zamora, and T. T. Lie, “Integration of electric vehicles in the distribution network: A review of PV based electric vehicle modelling,” *Energies*, vol. 13, no. 17, 2020, doi: 10.3390/en13174541.
- [3] A. R. Daanish and B. K. Naick, “Implementation of charging station based electric vehicle routing problem using nearest neighbour search algorithm,” *2017 2nd IEEE Int. Conf. Intell. Transp. Eng. ICITE 2017*, pp. 52–56, 2017, doi: 10.1109/ICITE.2017.8056880.
- [4] X. Sun, Z. Li, X. Wang, and C. Li, “Technology development of electric vehicles: A review,” *Energies*, vol. 13, no. 1, pp. 1–29, 2019, doi: 10.3390/en13010090.
- [5] M. Raugei, A. Hutchinson, and D. Morrey, “Can electric vehicles significantly reduce our dependence on non-renewable energy? Scenarios of compact vehicles in the UK as a case in point,” *J. Clean. Prod.*, vol. 201, pp. 1043–1051, 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.08.107.
- [6] M. A. A. Abdelkareem *et al.*, “Vibration energy harvesting in automotive suspension system: A detailed review,” *Appl. Energy*, vol. 229, no. August, pp. 672–699, 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.08.030.
- [7] L. Xie, S. Cai, G. Huang, L. Huang, J. Li, and X. Li, “On Energy Harvesting from a Vehicle Damper,” *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 25, no. 1, pp. 108–117, 2020, doi: 10.1109/TMECH.2019.2950952.
- [8] Y. Zhang, K. Guo, D. Wang, C. Chen, and X. Li, “Energy conversion mechanism and regenerative potential of vehicle suspensions,” *Energy*, vol. 119, pp. 961–970, 2017, doi: 10.1016/j.energy.2016.11.045.
- [9] J. Zou, X. Guo, L. Xu, G. Tan, C. Zhang, and J. Zhang, “Design, Modeling, and Analysis of a Novel Hydraulic Energy-Regenerative Shock Absorber for Vehicle Suspension,” *Shock Vib.*, vol. 2017, 2017, doi: 10.1155/2017/3186584.
- [10] H. L. Guntur, W. Hendrowati, and S. N. H. Syuhri, “Designing hydro-magneto-electric regenerative shock absorber for vehicle suspension considering conventional-viscous shock absorber performance,” *J. Mech. Sci. Technol.*, vol. 34, no. 1, pp. 55–67, 2020, doi: 10.1007/s12206-019-1205-1.
- [11] G. Giordano, “Electric vehicles,” *Manuf. Eng.*, vol. 161, no. 3, pp. 50–58, 2018.
- [12] K. T. Chau and W. Li, “Overview of electric machines for electric and hybrid vehicles,” *Int. J. Veh. Des.*, vol. 64, no. 1, pp. 46–71, 2014, doi:

- 10.1504/IJVD.2014.057775.
- [13] R. Bansal, "Electric Vehicles," Chapter of the Book Handbook of Automotive Power Electronics and Motor Drives, CRC Press, March, 2014.
- [14] XU, Yijun, "Design and Characterization of Regenerative Shock Absorbers based on Electrohydrostatic Actuation.", Doctoral Dissertation, Politecnico di Torino, Italy, 2018.
- [15] A. C. R. Teixeira and J. R. Sodré, "Impacts of replacement of engine powered vehicles by electric vehicles on energy consumption and CO<sub>2</sub> emissions," *Transp. Res. Part D Transp. Environ.*, vol. 59, pp. 375–384, 2018, doi: 10.1016/j.trd.2018.01.004.
- [16] X. Lv, Y. Ji, H. Zhao, J. Zhang, G. Zhang, and L. Zhang, "Research review of a vehicle energy-regenerative suspension system," *Energies*, vol. 13, no. 2, pp. 1–14, 2020, doi: 10.3390/en13020441.
- [17] Z. Zhu, N. C. Cheung, and K. W. E. Cheng, "Application of linear switched reluctance motor for active suspension system in electric vehicle," *EVS 2010 - Sustain. Mobil. Revolut. 25th World Batter. Hybrid Fuel Cell Electr. Veh. Symp. Exhib.*, vol. 4, pp. 14–21, 2010.
- [18] J.H. Blom, P.W. Hemker, "To the design of a novel electromagnetic actuator for active suspension proefschrift", Eindhoven Universiteit, november 2008.
- [19] A. Manjunath and G. Gross, "Towards a meaningful metric for the quantification of GHG emissions of electric vehicles (EVs)," *Energy Policy*, vol. 102, no. March 2016, pp. 423–429, 2017, doi: 10.1016/j.enpol.2016.12.003.
- [20] S. Baskar, V.Vijayan, I. J. Isaac Premkumar, D. Arunkumar, and D. Thamaran, "Design and material characteristics of hybrid electric vehicle," *Mater. Today Proc.*, no. xxxx, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2020.05.352.
- [21] P. Bhatt, H. Mehar, and M. Sahajwani, "Electrical Motors for Electric Vehicle – A Comparative Study," *SSRN Electron. J.*, 2019, doi: 10.2139/ssrn.3364887.
- [22] C. T. Rim and C. Mi, "Introduction to Electric Vehicles (EVs)," *Wirel. Power Transf. Electr. Veh. Mob. Devices*, pp. 43–49, 2017, doi: 10.1002/9781119329084.ch3.
- [23] Ching Chuen Chan, "the Rise & Fall of Electric," *Proc. IEEE*, vol. 101, no. 1, pp. 206–212, 2013.
- [24] J. Martínez-Lao, F. G. Montoya, M. G. Montoya, and F. Manzano-Agugliaro, "Electric vehicles in Spain: An overview of charging systems," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 77, no. November 2015, pp. 970–983, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2016.11.239.
- [25] D. Sperling, *Veículos elétricos : se aproximando o ponto de inflexão*, 10.5822 /

978-1-61091-906-7 \_ 2 , © 2018.

- [26] N. Berkeley, D. Bailey, A. Jones, and D. Jarvis, “Assessing the transition towards Battery Electric Vehicles: A Multi-Level Perspective on drivers of, and barriers to, take up,” *Transp. Res. Part A Policy Pract.*, vol. 106, no. June 2016, pp. 320–332, 2017, doi: 10.1016/j.tra.2017.10.004.
- [27] Z. Y. She, Qing Sun, J. J. Ma, and B. C. Xie, “What are the barriers to widespread adoption of battery electric vehicles? A survey of public perception in Tianjin, China,” *Transp. Policy*, vol. 56, no. July 2016, pp. 29–40, 2017, doi: 10.1016/j.tranpol.2017.03.001.
- [28] Mohammad S. Alam, Khondaker Nazib Murshed, Tonmoy Roy, “Electric Vehicles (EV): A Study on Its Many Principles, Interior Functioning and Modeling Through Software Simulation,” *Computer Science*, 2018.
- [29] M. Neaimeh, S. D. Salisbury, G. A. Hill, P. T. Blythe, D. R. Scoffield, and J. E. Francfort, “Analysing the usage and evidencing the importance of fast chargers for the adoption of battery electric vehicles,” *Energy Policy*, vol. 108, no. June, pp. 474–486, 2017, doi: 10.1016/j.enpol.2017.06.033.
- [30] P. Matias and T. Patrício, “Programação e controlo de um posto de carregamento de veículos elétricos,” Dissertação para obtenção do Grau de Mestre, Universidade da Beira interior 2018.
- [31] P. F. Duarte, “Otimização de trajetória de um veículo de competição em eficiência energética através de um vetor otimizado.,” Trabalho de Conclusão de Curso para obtenção do título de Tecnólogo, Faculdade De Tecnologia De Santo André Tecnologia Em Eletrônica Automotiva 2015.
- [32] Ismo Pusula, Antti Vento “Henney Kilowatt -sähköauton lataus- ja sähköjärjestelmän kunnostus,” Bachelor’s Thesis of Engineering, Institute of Ammattikorkeakoulu, Metropolia 2017.
- [33] M. Palinski, “A Comparison of Electric Vehicles and Conventional Automobiles : Costs and Quality Perspective,” Bachelor’s Thesis, University of Applied *Novia*, p. 60, 2017.
- [34] F. Batista Riscado , “Desenvolvimento e implementação de uma aplicação Android para carregamento de veículos elétricos,” Dissertação para obtenção do Grau de Mestre, Universidade da Beira interior p. 98, 2017.
- [35] F. Schmalfuß, K. Mühl, and J. F. Krems, “Direct experience with battery electric vehicles (BEVs) matters when evaluating vehicle attributes, attitude and purchase intention,” *Transp. Res. Part F Traffic Psychol. Behav.*, vol. 46, pp. 47–69, 2017, doi: 10.1016/j.trf.2017.01.004.
- [36] A. Hoekstra, “The Underestimated Potential of Battery Electric Vehicles to Reduce

- Emissions,” *Joule*, vol. 3, no. 6, pp. 1412–1414, 2019, doi: 10.1016/j.joule.2019.06.002.
- [37] Y. Kwon, S. Son, and K. Jang, “User satisfaction with battery electric vehicles in South Korea,” *Transp. Res. Part D Transp. Environ.*, vol. 82, p. 102306, 2020, doi: 10.1016/j.trd.2020.102306.
- [38] H. Helms, C. Kämper, and U. Lambrecht, “Carbon dioxide and consumption reduction through electric vehicles”. *Advances in Battery Technologies for Electric Vehicles*, pp. 17-34 2015.
- [39] W. Li, R. Long, H. Chen, and J. Geng, “A review of factors influencing consumer intentions to adopt battery electric vehicles,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 78, no. May 2016, pp. 318–328, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.04.076.
- [40] M. A. Delucchi and T. E. Lipman, *Lifetime Cost of Battery, Fuel-Cell, and Plug-in Hybrid Electric Vehicles*. Electric and Hybrid Vehicles, pp. 19-60, 2010.
- [41] G. Morrison, J. Stevens, and F. Joseck, “Relative economic competitiveness of light-duty battery electric and fuel cell electric vehicles,” *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.*, vol. 87, no. June 2017, pp. 183–196, 2018, doi: 10.1016/j.trc.2018.01.005.
- [42] B. Tanç, H. T. Arat, Ç. Conker, E. Baltacıoğlu, and K. Aydın, “Energy distribution analyses of an additional traction battery on hydrogen fuel cell hybrid electric vehicle,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 49, pp. 26344–26356, 2020, doi: 10.1016/j.ijhydene.2019.09.241.
- [43] C. B. Robledo, V. Oldenbroek, F. Abbruzzese, and A. J. M. van Wijk, “Integrating a hydrogen fuel cell electric vehicle with vehicle-to-grid technology, photovoltaic power and a residential building,” *Appl. Energy*, vol. 215, no. February, pp. 615–629, 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.02.038.
- [44] B. Tanç, H. T. Arat, E. Baltacıoğlu, and K. Aydın, “Overview of the next quarter century vision of hydrogen fuel cell electric vehicles,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 44, no. 20, pp. 10120–10128, 2019, doi: 10.1016/j.ijhydene.2018.10.112.
- [45] X. Tang, X. Hu, W. Yang, and H. Yu, “Novel Torsional Vibration Modeling and Assessment of a Power-Split Hybrid Electric Vehicle Equipped with a Dual-Mass Flywheel,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 67, no. 3, pp. 1990–2000, 2018, doi: 10.1109/TVT.2017.2769084.
- [46] Y. Wang, X. Wang, Y. Sun, and S. You, “Model predictive control strategy for energy optimization of series-parallel hybrid electric vehicle,” *J. Clean. Prod.*, vol. 199, pp. 348–358, 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.07.191.
- [47] L. Li, X. Wang, and J. Song, “Fuel consumption optimization for smart hybrid electric vehicle during a car-following process,” *Mech. Syst. Signal Process.*, vol.

- 87, pp. 17–29, 2017, doi: 10.1016/j.ymsp.2016.03.002.
- [48] C. Xiang, F. Ding, W. Wang, and W. He, “Energy management of a dual-mode power-split hybrid electric vehicle based on velocity prediction and nonlinear model predictive control,” *Appl. Energy*, vol. 189, pp. 640–653, 2017, doi: 10.1016/j.apenergy.2016.12.056.
- [49] G. Du, Y. Zou, X. Zhang, T. Liu, J. Wu, and D. He, “Deep reinforcement learning based energy management for a hybrid electric vehicle,” *Energy*, vol. 201, p. 117591, 2020, doi: 10.1016/j.energy.2020.117591.
- [50] G. Canbolat and H. Yaşar, “Performance Comparison for Series and Parallel Modes of a Hybrid Electric Vehicle,” *Sak. Univ. J. Sci.*, vol. 23, no. 38708, pp. 1–1, 2019, doi: 10.16984/saufenbilder.369149.
- [51] H. He and X. Guo, “Multi-objective optimization research on the start condition for a parallel hybrid electric vehicle,” *Appl. Energy*, vol. 227, no. July, pp. 294–303, 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.07.082.
- [52] M. U. Karaođlan, N. S. Kuralay, and C. O. Colpan, “The effect of gear ratios on the exhaust emissions and fuel consumption of a parallel hybrid vehicle powertrain,” *J. Clean. Prod.*, vol. 210, pp. 1033–1041, 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.11.065.
- [53] P. Van den Bossche, J. Matheys, and J. Van Mierlo, “*Battery Environmental Analysis*”, *Electric and Hybrid Vehicles*, pp 347-374, 2010.
- [54] W. H. Yang, T. Suzuki, Y. Kamiya, and Y. Daisho, “Dependence of environmental performance of plug-in hybrid vehicles on distance traveled,” *2017 IEEE Veh. Power Propuls. Conf. VPPC 2017 - Proc.*, vol. 2018-Janua, pp. 1–6, 2018, doi: 10.1109/VPPC.2017.8330917.
- [55] C. Yang, S. Du, L. Li, S. You, Y. Yang, and Y. Zhao, “Adaptive real-time optimal energy management strategy based on equivalent factors optimization for plug-in hybrid electric vehicle,” *Appl. Energy*, vol. 203, pp. 883–896, 2017, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.06.106.
- [56] C. Thiel, A. Tsakalidis, and A. Jäger-Waldau, “Will electric vehicles be killed (again) or are they the next mobility killer app?,” *Energies*, vol. 13, no. 7, 2020, doi: 10.3390/en13071828.
- [57] E. Ruffini and M. Wei, “Future costs of fuel cell electric vehicles in California using a learning rate approach,” *Energy*, vol. 150, no. 2018, pp. 329–341, 2018, doi: 10.1016/j.energy.2018.02.071.
- [58] A. Ana Carolina Abreu Rodrigues Domingos “Avaliação da viabilidade económica da introdução de veículos elétricos na frota do SUCH,” Dissertação para a obtenção do grau de Mestre, Universidade de Coimbra, 2018,
- [59] I. Safdar, A. Raza, A. Z. Khan, and E. Ali, “Feasibility, emission and fuel

- requirement analysis of hybrid car versus solar electric car: a comparative study: Hybrid versus solar electric car comparison,” *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, vol. 14, no. 8, pp. 1807–1818, 2017, doi: 10.1007/s13762-017-1332-0.
- [60] H. Campello-Vicente, R. Peral-Orts, N. Campillo-Davo, and E. Velasco-Sanchez, “The effect of electric vehicles on urban noise maps,” *Appl. Acoust.*, vol. 116, pp. 59–64, 2017, doi: 10.1016/j.apacoust.2016.09.018.
- [61] H. B. Huang, J. H. Wu, X. R. Huang, M. L. Yang, and W. P. Ding, “The development of a deep neural network and its application to evaluating the interior sound quality of pure electric vehicles,” *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 120, pp. 98–116, 2019, doi: 10.1016/j.ymssp.2018.09.035.
- [62] P. Weldon, P. Morrissey, and M. O’Mahony, “Long-term cost of ownership comparative analysis between electric vehicles and internal combustion engine vehicles,” *Sustain. Cities Soc.*, vol. 39, pp. 578–591, 2018, doi: 10.1016/j.scs.2018.02.024.
- [63] B. K. Sovacool, W. Abrahamse, L. Zhang, and J. Ren, “Pleasure or profit? Surveying the purchasing intentions of potential electric vehicle adopters in China,” *Transp. Res. Part A Policy Pract.*, vol. 124, no. February, pp. 69–81, 2019, doi: 10.1016/j.tra.2019.03.002.
- [64] P. Melo, “Veículos Elétricos Características e Tipo de Motores,” *Neutro à Terra*, Instituto Politécnico do Porto, vol. 4, pp. 13–17, 2009.
- [65] Q. Meng, C. Qian, and R. Liu, “Dual-rate sampled-data stabilization for active suspension system of electric vehicle,” *Int. J. Robust Nonlinear Control*, vol. 28, no. 5, pp. 1610–1623, 2018, doi: 10.1002/rnc.3974.
- [66] A. F. de Sousa, “Modelagem , Simulação e Análise de Desempenho do Modelagem , Simulação e Análise de Desempenho Do”, Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Itajubá, Itajubá 2017.
- [67] M. Ghoniem, T. Awad, and O. Mokhiamar, “Control of a new low-cost semi-active vehicle suspension system using artificial neural network,” *Alexandria Eng. J.*, vol. 59, no. 5, pp. 4013–4025, 2020, doi: 10.1016/j.aej.2020.07.007.
- [68] Q. Meng, C. C. Chen, P. Wang, Z. Y. Sun, and B. Li, “Study on vehicle active suspension system control method based on homogeneous domination approach,” *Asian J. Control*, no. June, pp. 1–11, 2019, doi: 10.1002/asjc.2242.
- [69] Gianluca Sodano, “Self-powered Active Suspension,” Dissertation for obtaining a Master's Degree, Politecnico Di Torino, 2020.
- [70] S. Patil and S. Patil, “Advanced Control System for a Vibration Control for a Road Vehicle,” *Lambert Int. Publ. Deutschland, Ger.*, vol. 1, no. 5, p. 79, 2012.
- [71] J. Na, Y. Huang, Q. Pei, X. Wu, G. Gao, and G. Li, “Active Suspension Control of

- Full-Car Systems without Function Approximation,” *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 25, no. 2, pp. 779–791, 2020, doi: 10.1109/TMECH.2019.2962602.
- [72] C. P. Souza, G. Henrique, S. André, S. Paulo, and G. Henrique, “Estudo do Controle e Sistema da Suspensão Ativa” Monografia apresentada ao Curso de Tecnologia em Eletrônica Automotiva da, Centro Paula Souza Faculdade De Tecnologia Fatec Santo André, 2015.
- [73] A. R. Bhise, R. G. Desai, M. R. N. Yerrawar, A. C. Mitra, and D. R. R. Arakerimath, “Comparison Between Passive And Semi-Active Suspension System Using Matlab/Simulink,” *IOSR J. Mech. Civ. Eng.*, vol. 13, no. 04, pp. 01–06, 2016, doi: 10.9790/1684-1304010106.
- [74] Y. Qin, R. Langari, Z. Wang, C. Xiang, and M. Dong, “Road profile estimation for semi-active suspension using an adaptive Kalman filter and an adaptive super-twisting observer,” *Proc. Am. Control Conf.*, pp. 973–978, 2017, doi: 10.23919/ACC.2017.7963079.
- [75] A. F. Mohd Riduan, N. Tamaldin, A. Sudrajat, and F. Ahmad, “Review on active suspension system,” *SHS Web Conf.*, vol. 49, p. 02008, 2018, doi: 10.1051/shsconf/20184902008.
- [76] S. A. Chen, J. C. Wang, M. Yao, and Y. B. Kim, “Improved optimal sliding mode control for a non-linear vehicle active suspension system,” *J. Sound Vib.*, vol. 395, pp. 1–25, 2017, doi: 10.1016/j.jsv.2017.02.017.
- [77] A. I. Niculescu, A. Jankowski, M. Kowalski, and T. Sireteanu, “Solutions in the Vehicle Suspension,” *J. KONES*, vol. 26, no. 4, pp. 185–196, 2020, doi: 10.2478/kones-2019-0107.
- [78] Robson Iezzo, “Desenvolvimento de um Sistema de Suspensão com Amortecimento Semi-ativo ‘ Slow-active ’ com Custo Competitivo  
Desenvolvimento de um Sistema de Suspensão com Amortecimento Semi-ativo ‘ Slow-active ’ com Custo Competitivo,” Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual De Campinas p. 284, 2010.
- [79] H. M. Isa and W. N. Liza, “For Passenger Vehicle”, International conference on electrical, control and computer engineering, pp. 399–403, 2011.
- [80] P. R. ECKERT, “Metodologia de projeto de atuador eletromagnético linear para sistemas de suspensão semiativa e ativa,” Tese de Doutorado, Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul, 2016.
- [81] I. Martins, J. Esteves, G. D. Marques, and F. P. da Silva, “Permanent-magnets linear actuators applicability in automobile active suspensions,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 55, no. 1, pp. 86–94, 2006, doi: 10.1109/TVT.2005.861167.

- [82] M. Duong and Y. Chun, "Optimal Design of a Novel Exterior Permanent Magnet Tubular Machine for Energy Harvesting from Vehicle Suspension System," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 35, Iss: 4, Dec. 2020, doi: 10.1109/TEC.2020.2993211.
- [83] B. L. J. Gysen, T. P. J. Van Der Sande, J. J. H. Paulides, and E. A. Lomonova, "Efficiency of a regenerative direct-drive electromagnetic active suspension," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 60, no. 4, pp. 1384–1393, 2011, doi: 10.1109/TVT.2011.2131160.
- [84] S. Li, J. Xu, X. Pu, T. Tao, H. Gao, and X. Mei, "Energy-harvesting variable/constant damping suspension system with motor based electromagnetic damper", *Energy*, vol. 189, p. 116199, 2019, doi: 10.1016/j.energy.2019.116199.
- [85] I. Martins, J. Esteves, G. D. Marques, and F. Pina, "Permanent-Magnets Linear Actuators Applicability in Automobile Active Suspensions," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 55(1), 86–94, 2006. doi:10.1109/tvt.2005.861167.
- [86] P. A. Domingos and R. Makiyama, "Sistemas de Recuperação de Energia," Trabalho de conclusão para obtenção do título de Tecnólogo, Faculdade de Tecnologia de Santo André p. 81, 2015.
- [87] A. Kushwaha and R. Kanagaraj, "Peak-current estimation using simplified current-rise model of switched reluctance generator operating in single-pulse mode," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 120, no. December 2019, p. 105971, 2020, doi: 10.1016/j.ijepes.2020.105971.
- [88] R. Mendes, "Energia das Ondas Desenvolvimento de uma tecnologia de geração (gerador tubular)," Dissertação para obtenção do Grau de Mestre, Universidade da Beira Interior p. 127, 2011.
- [89] R. J. Dias, B. A. Oliveira, K. A. Silva, C. P. Alves, F. A. Ferreira, and R. R. Aguiar, "Modelling, simulation and comparative study between switched reluctance generator 8x6 and switched reluctance generator 12x8," *Renew. Energy Power Qual. J.*, vol. 18, no. 18, pp. 386–390, 2020, doi: 10.24084/repqj18.340.
- [90] Y. Zhu, H. Wu, and J. Zhang, "Regenerative braking control strategy for electric vehicles based on optimization of switched reluctance generator drive system," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 76671–76682, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2990349.
- [91] I. B. and S. A. Nasar, "Linear electric actuators and generators [.,]" *New York Cambridge Univ. Press*, vol. 14, no. 3, pp. 712–717, 1997.
- [92] M. D. R. A. Calado, "Actuador linear de relutância variável comutado. modelização, dimensionamento, construção e ensaio.," Tese para obtenção do Grau de Doutor, Universidade da Beira Interior, 2001.

- [93] H. Chen, “Electromagnetic design of switched reluctance generator,” *Proc. Int. Conf. Power Electron. Drive Syst.*, vol. 1, pp. 777–780, 2003, doi: 10.1109/PEDS.2003.1283001.
- [94] D. A. Torrey, “Switched reluctance generators and their control,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 49, no. 1, pp. 3–14, 2002, doi: 10.1109/41.982243.
- [95] W. A. Aljaism, “Switched reluctance motor: Design, simulation and control,” *researchdirect.uws.edu.au/islandora/object/uws:3650/datastream/PDF/view*, pp. 1–193, 2007.
- [96] D. S. B. da Fonseca, “Accionamento Linear de Relutância Variável Comutado para Tracção Elétrica Ligeira,” Tese para obtenção do Grau de Doutor, Universidade da Beira Interior 2008.
- [97] J. Alexandre *et al.*, “Eliminação De Sensor Mecânico no Acionamento De Máquina De Relutância Variável. Dissertação para obtenção do grau de mestre, Universidade Federal do Rio de Janeiro”, 2007.
- [98] F. Rocha, D. A. Silva, B. Alvarenga, W. Pacheco, and M. Ieee, “Modelo do Motor a Relutância Variável com Base na Energia Magnética Armazenada,” *IV Simpósio Brasileiro De Sistemas Elétricos - SBSE*, pp. 1–5, 2012.
- [99] C. Ruviaro and D. Osório, “Contribuição ao Estudo de Técnicas de Acionamento e Controle Aplicadas ao Gerador de Relutância Variável,” Dissertação para obtenção do grau de Mestre, Universidade Federal de Santa Maria, 2017.
- [100] B. R. Hellinger and P. Mnich, “Linear Motor-Powered Transportation: History, Present Status, and Future Outlook,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 97, no. 11, pp. 1892–1900, 2009.
- [101] B. Li, X. Ling, Y. Huang, L. Gong, and C. Liu, “An Improved Model Predictive Current Controller of Switched Reluctance Machines Using Time-Multiplexed Current Sensor,” *Sensors (Basel)*, vol. 17, no. 5, 2017, doi: 10.3390/s17051146.
- [102] G. A. Abdel Aziz and M. Amin, “High-precision speed control of four-phase switched reluctance motor fed from asymmetric power converter,” *J. Electr. Syst. Inf. Technol.*, vol. 5, no. 3, pp. 300–311, 2018, doi: 10.1016/j.jesit.2018.03.006.
- [103] Y. Mollet, M. Sarrazin, H. Van Der Auweraer, and J. Gyselinck, “Investigation of the influence of open-phase faults on noise and vibrations of switched reluctance machines,” *Proc. IEEE Int. Conf. Ind. Technol.*, vol. 2018-Febru, no. March, pp. 451–456, 2018, doi: 10.1109/ICIT.2018.8352219.
- [104] J. H. Kim, Y. J. Shin, Y. Do Chun, and J. H. Kim, “Design of 100W Regenerative Vehicle Suspension to Harvest Energy from Road Surfaces,” *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, vol. 19, no. 7, pp. 1089–1096, 2018, doi: 10.1007/s12541-018-0129-5.

- [105] Bhanu Chander V, "Modelling and Analysis of Half Car Vehicle Suspension System Using Fuzzy Logic.," B.Tech Thesis, Univeristy College of Engineering, Tirupati, May, pp. 1–101, 2009.
- [106] A. Kruczek and A. Stribrsky, "A full-car model for active suspension - Some practical aspects," *Proc. IEEE Int. Conf. Mechatronics 2004, ICM'04*, pp. 41–45, 2004, doi: 10.1109/icmech.2004.1364409.
- [107] M. Rababah and A. Bhuyan, "Passive Suspension Modelling and Analysis of a Full -Car Model," *Int. J. Adv. Sci. Eng. Technol.*, vol. 3, no. 2, pp. 250–261, 2013.
- [108] S. Guo, Y. Liu, L. Xu, X. Guo, and L. Zuo, "Performance evaluation and parameter sensitivity of energy-harvesting shock absorbers on different vehicles," *Veh. Syst. Dyn.*, vol. 54, no. 7, pp. 918–942, 2016, doi: 10.1080/00423114.2016.1174276.
- [109] M. Agostinacchio, D. Ciampa, and S. Olita, "The vibrations induced by surface irregularities in road pavements – a Matlab ® approach," *European Transport Research Review*, Vol. 6, pp. 267–275, 2014, doi: 10.1007/s12544-013-0127-8.
- [110] R. P. G. Mendes, "Desenvolvimento de tecnologias de relutância variável comutada para geração de energia elétrica a partir da energia das ondas," Tese de Doutorado, Universidade da Beira Interior, 2018, [Online]. Available: <http://widgets.ebscohost.com/prod/customerspecific/ns000290/authentication/index.php?url=https%253A%252F%252Fsearch.ebscohost.com%252Flogin.aspx%253Fdirect%253Dtrue%2526AuthType%253Dip%252Ccookie%252Cshib%252Cuid%2526db%253Dedsrca%2526AN%253Drcaap.com.ubi>.
- [111] R. P. G. Mendes, M. R. A. Calado, and S. J. P. S. Mariano, "Electromagnetic design method for a TLSRG with application in ocean wave energy conversion," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 121, no. April, p. 106097, 2020, doi: 10.1016/j.ijepes.2020.106097.
- [112] R. P. G. Mendes, M. do R. A. Calado, and S. J. P. S. Mariano, "Control and Dynamic Simulation of Linear Switched Reluctance Generators for Direct Drive Conversion Systems," *Intech*, no. tourism, p. 13, 2016, [Online]. Available: <https://www.intechopen.com/books/advanced-biometric-technologies/liveness-detection-in-biometrics>.
- [113] T. A. Ahmed, E. E. M. Mohamed, A. R. Youssef, A. A. Ibrahim, M. S. R. Saeed, and A. I. M. Ali, "Three phase modular multilevel inverter-based multi-terminal asymmetrical DC inputs for renewable energy applications," *Eng. Sci. Technol. an Int. J.*, vol. 23, no. 4, pp. 831–839, 2020, doi: 10.1016/j.jestch.2019.11.003.
- [114] P. A. Salodkar, P. S. Kulkarni, M. A. Waghmare, P. C. Chaturvedi, and N. Sandeep, "Asymmetric H-Bridge Single-Phase Seven-Level Inverter Topology with Proportional Resonant Controller," *IETE J. Res.*, vol. 65, no. 1, pp. 19–32, 2019,

- doi: 10.1080/03772063.2017.1396934.
- [115] R. Mendes, M. do R. Calado, and S. Mariano, "Maximum power point tracking for a point absorber device with a tubular linear switched reluctance generator," *Energies*, vol. 11, no. 9, 2018, doi: 10.3390/en11092192.
- [116] T. J. E. Miller, "Electronic Control of Switched Reluctance Machines," *Newnes Power Eng. Ser.*, vol. 136, no. 1, pp. 23–42, 1998, [Online]. Available: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780750650731500122>.
- [117] J. Ye, H. Li, and J. W. Jiang, "Control of Switched Reluctance Machines," *Switch. Reluctance Mot. Drives*, no. August, pp. 371–423, 2019, doi: 10.1201/9780203729991-9.
- [118] Suryakant, M. Sreejeth, and M. Singh, "Performance Analysis of PMSM Drive using Hysteresis Current Controller and PWM Current Controller," *2018 IEEE Int. Students' Conf. Electr. Electron. Comput. Sci. SCEECS 2018*, no. 1, 2018, doi: 10.1109/SCEECS.2018.8546862.

## ANEXOS

# Anexos. Implementação computacional do modelo do GLRVC Tubular

## A.1 Modelo dinâmico do gerador

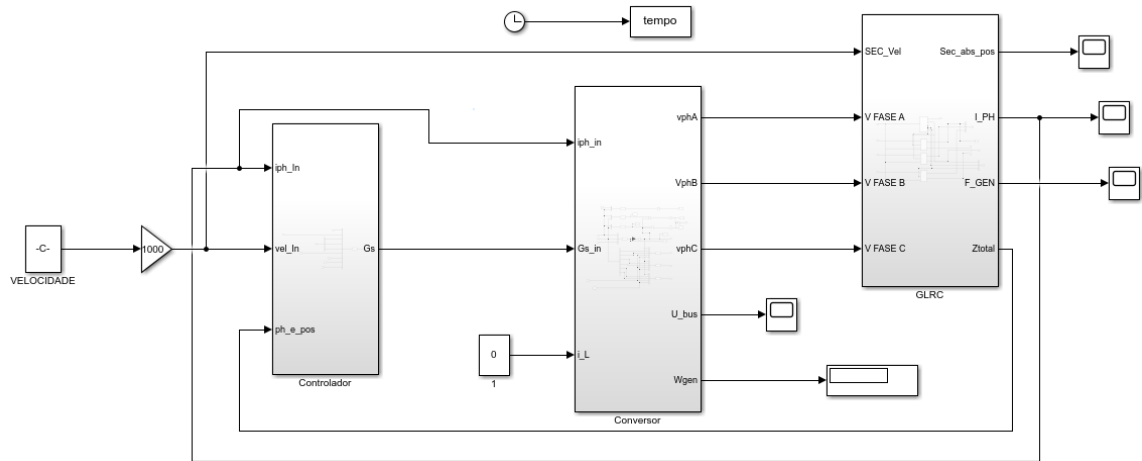


Figura A. 1 Modelo dinâmico do gerador para calcular os valores ótimos

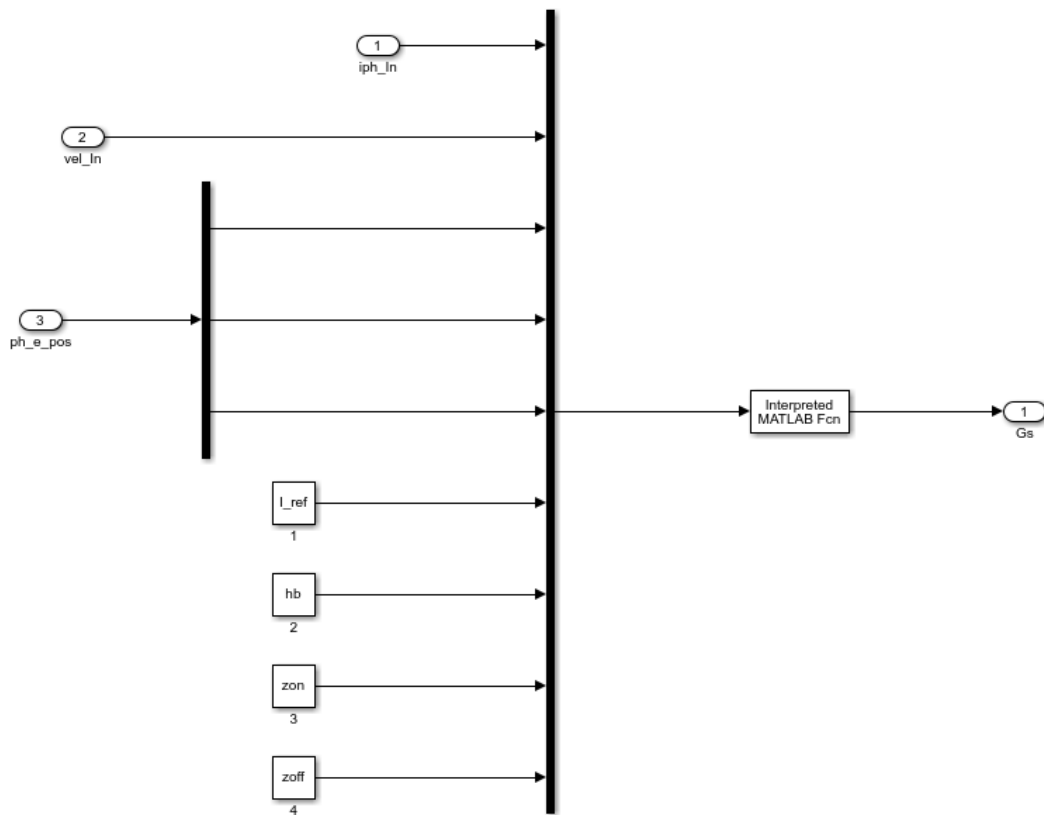


Figura A. 2 Bloco do controlador do gerador

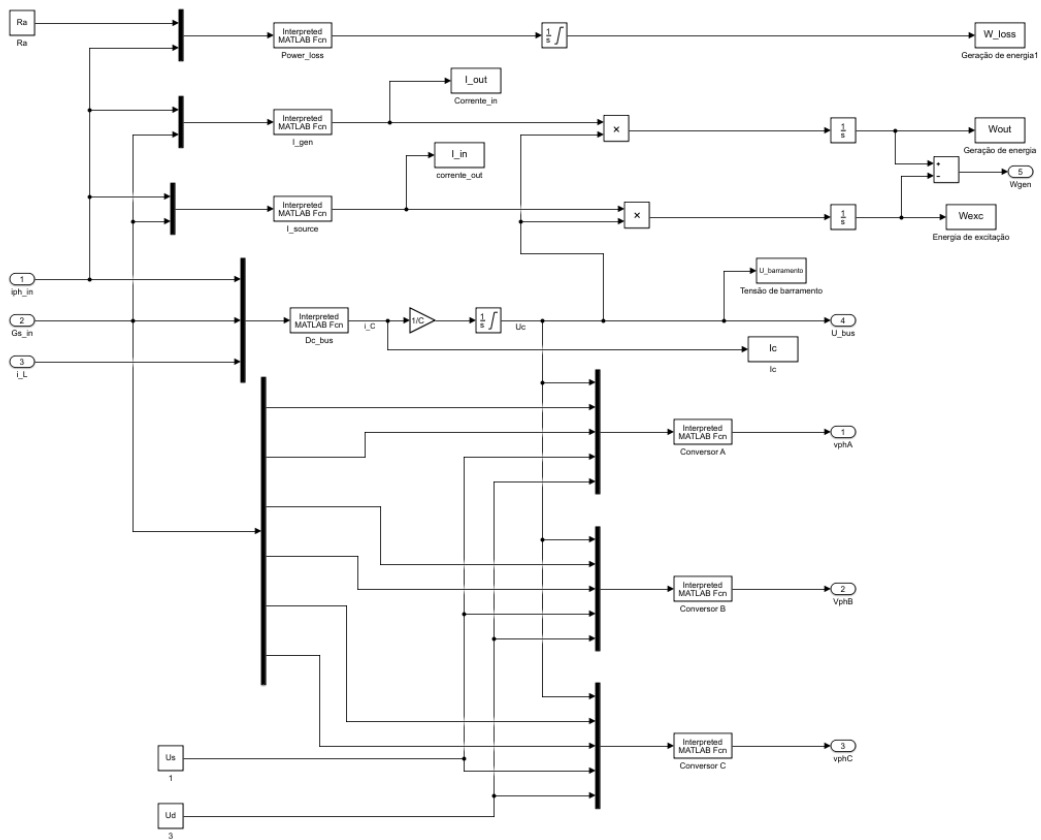


Figura A. 3 Bloco do conversor do gerador

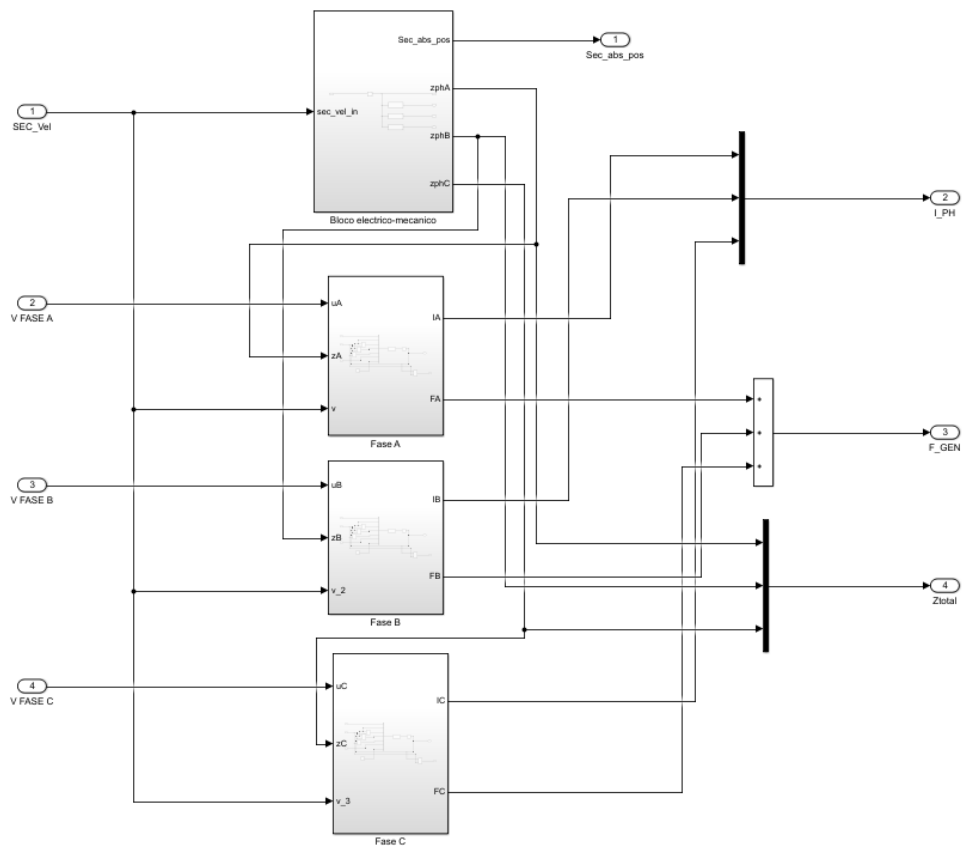


Figura A. 4 Bloco do GLRVC

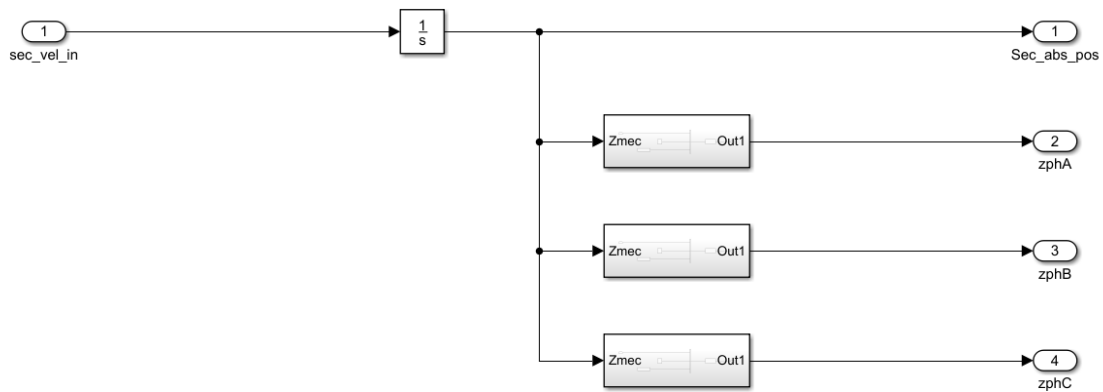
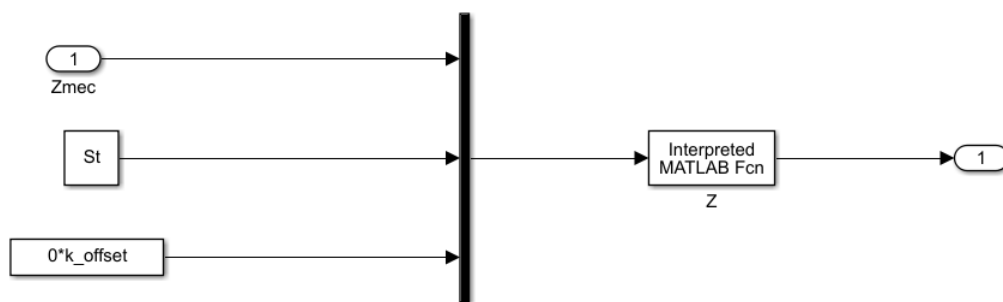
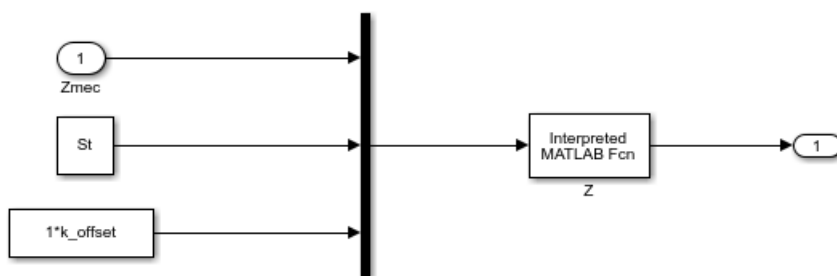


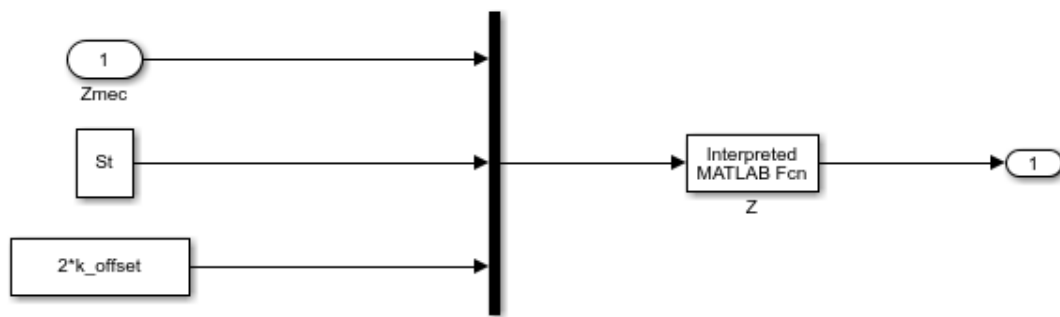
Figura A. 5 Bloco elétrico-mecânico



(a)



(b)



(c)

Figura A. 6 Blocos: (a) Fase A, (b) Fase B e (c) Fase C

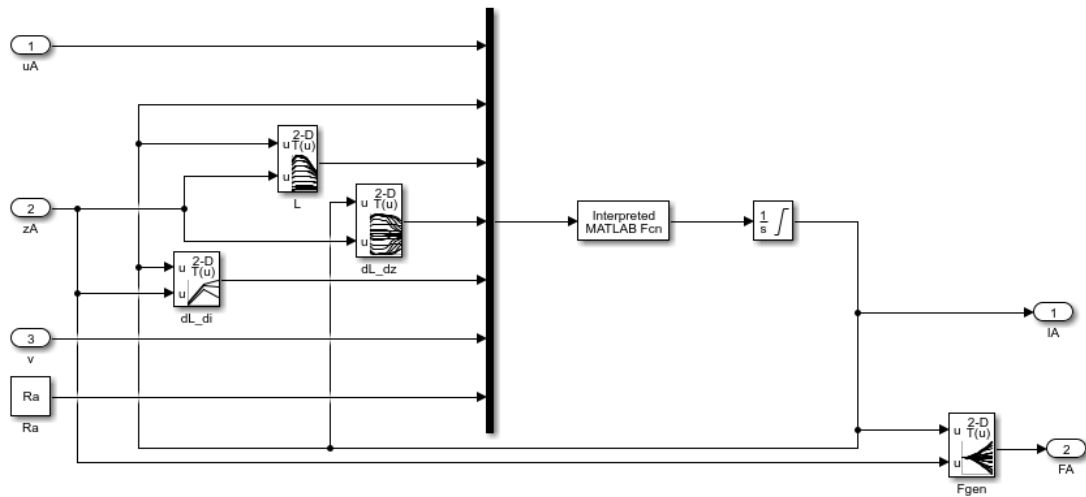


Figura A. 7 Bloco da Fase A

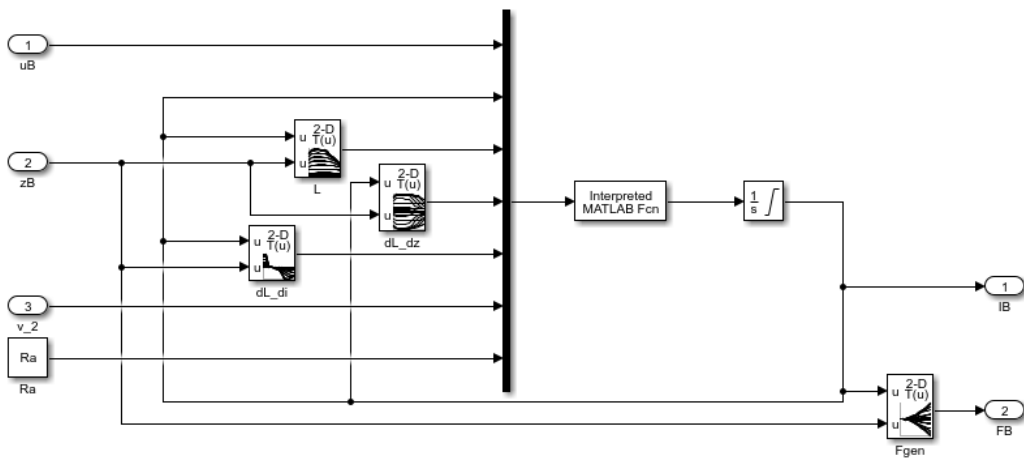


Figura A. 8 Bloco da Fase B

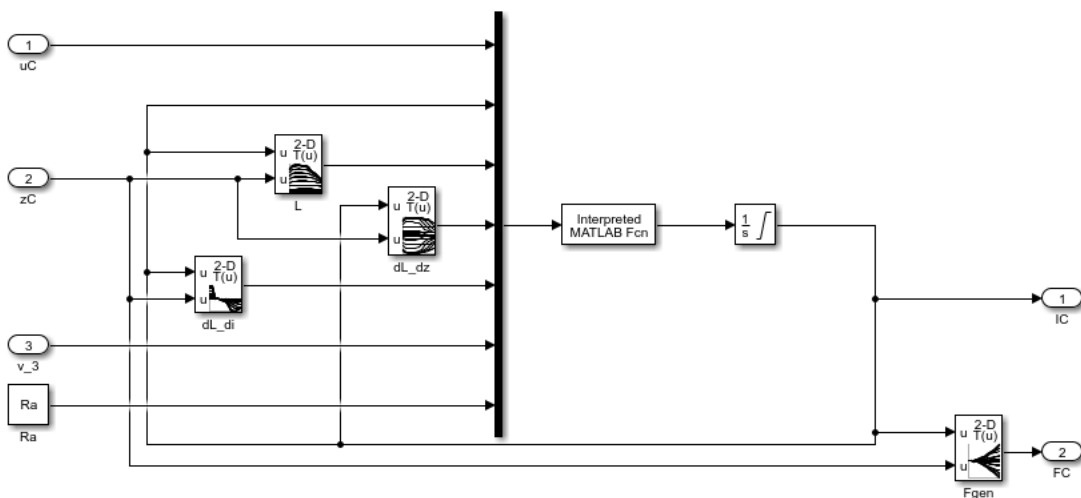


Figura A. 9 Bloco da Fase C

## A.2 Modelo dinâmico do sistema completo

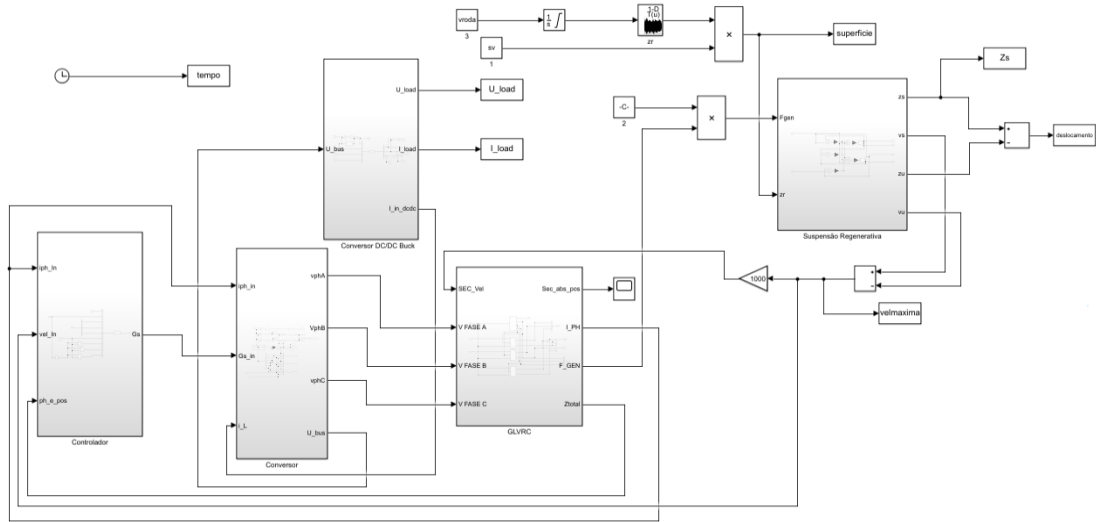


Figura A. 10 Modelo do sistema completo

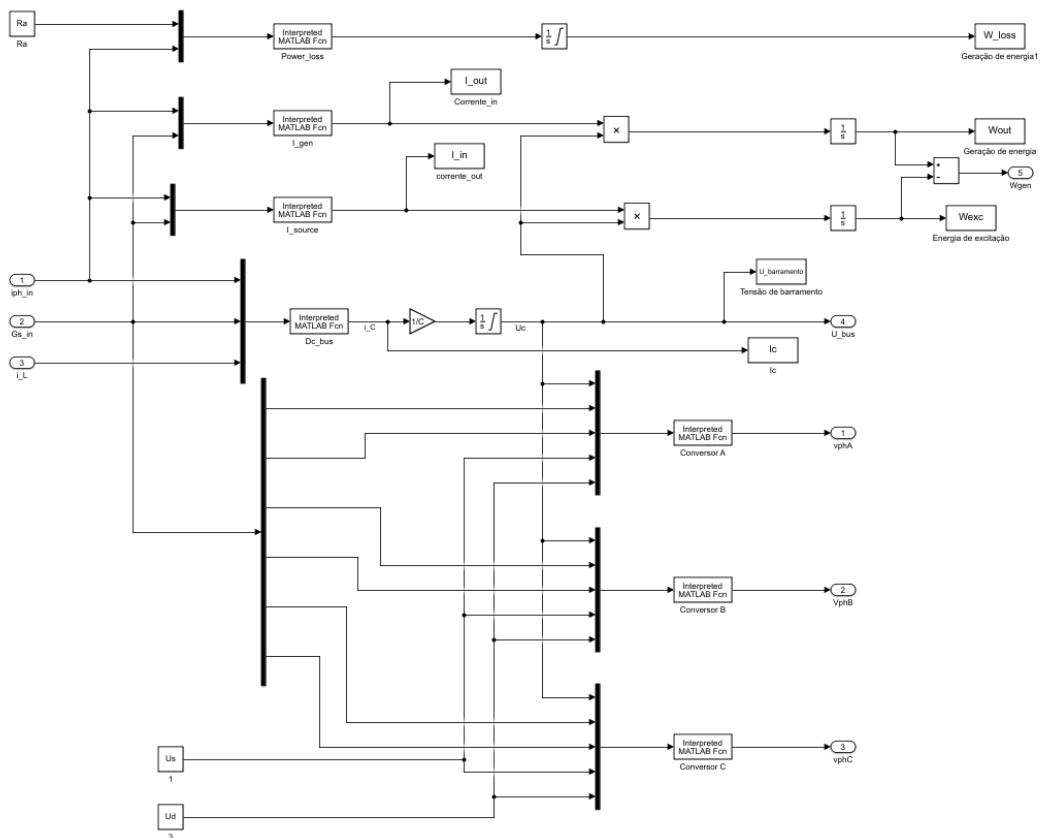


Figura A. 11 Bloco do conversor do gerador

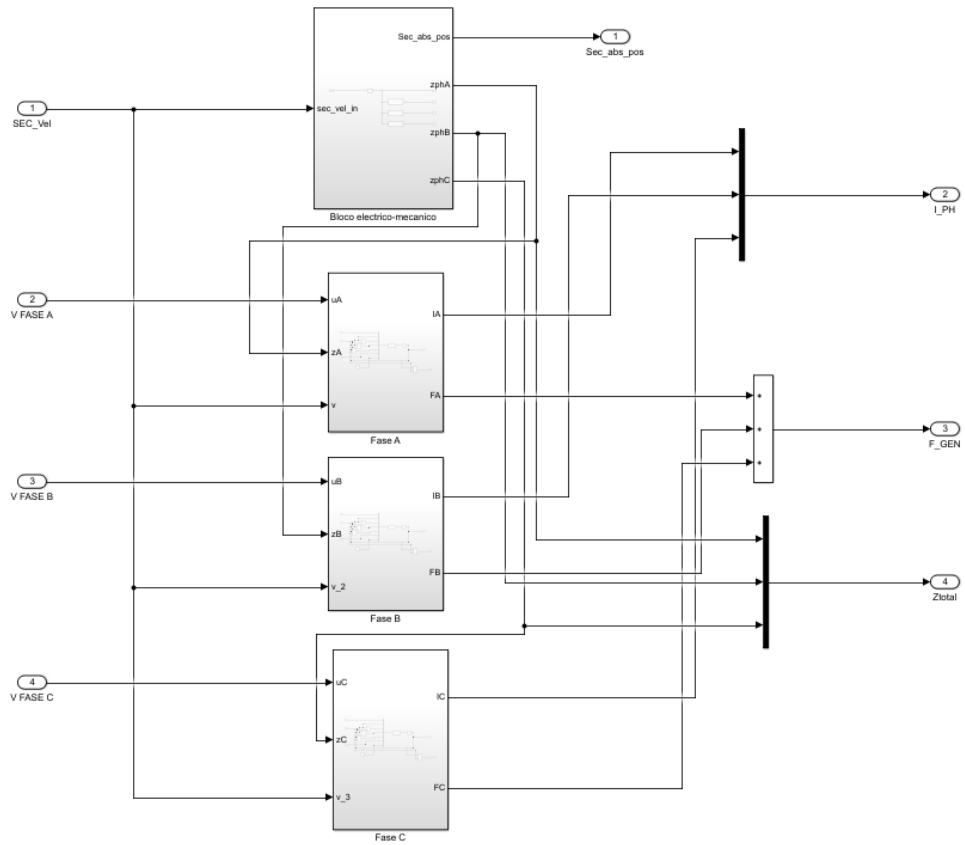


Figura A. 12 Bloco do GLRVC

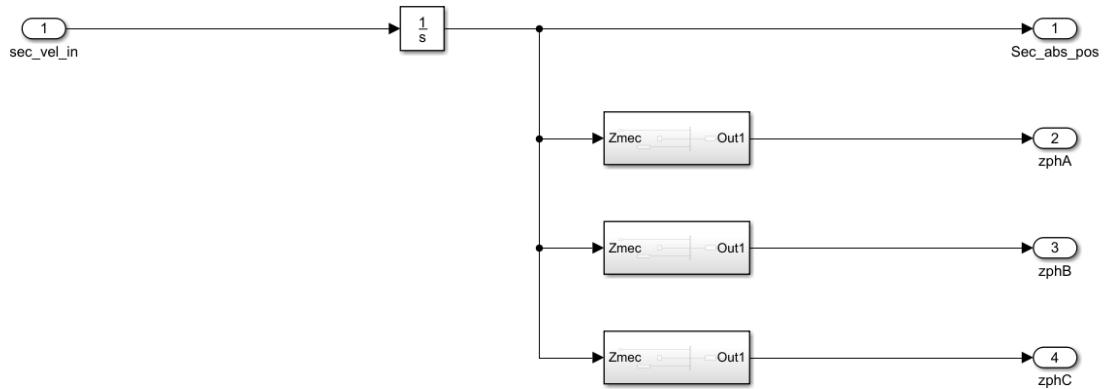
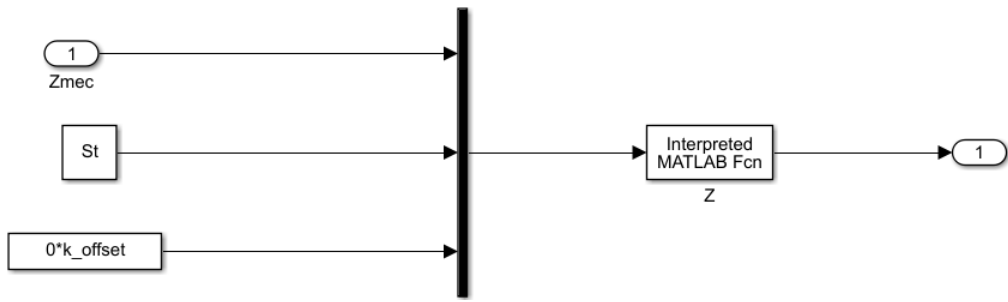
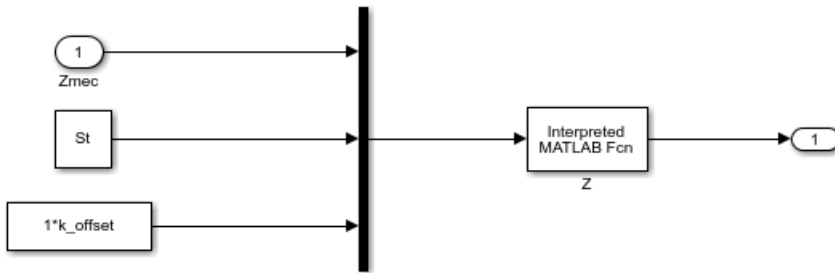


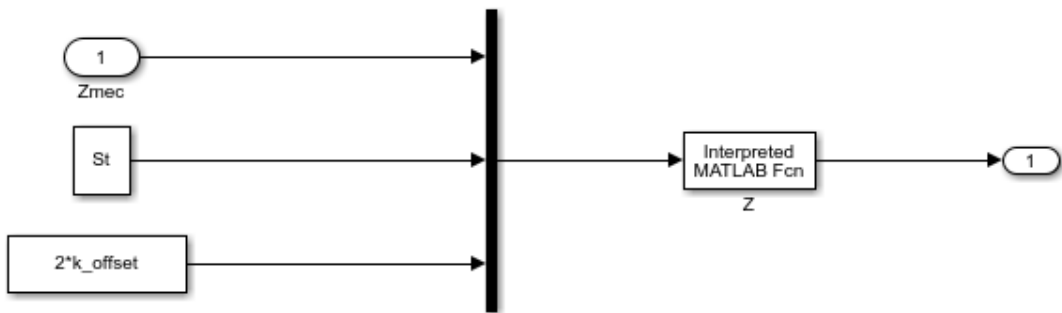
Figura A. 13 Bloco elétrico-mecânico



(a)



(b)



(c)

Figura A. 14 Blocos da Fase: (a) A, (b) B e (c) C

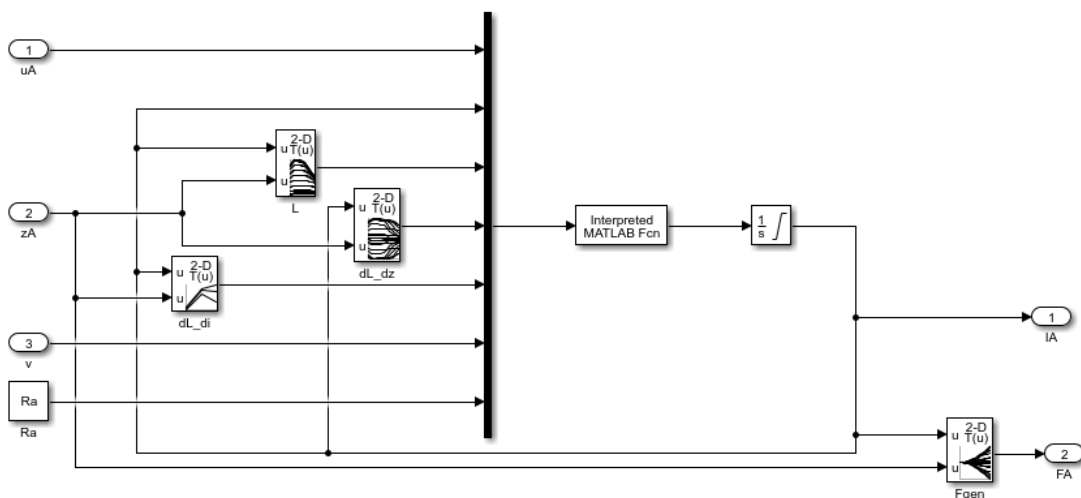


Figura A. 15 Bloco da Fase A

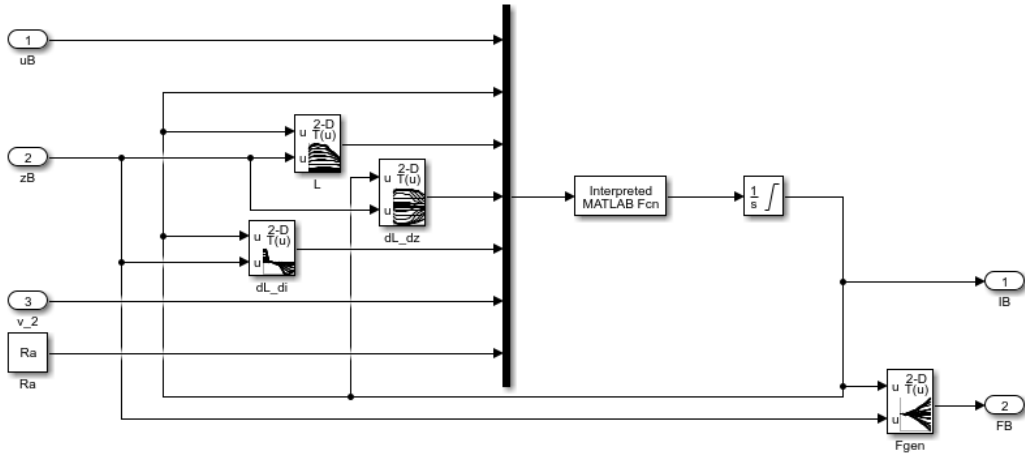


Figura A. 16 Bloco da Fase B

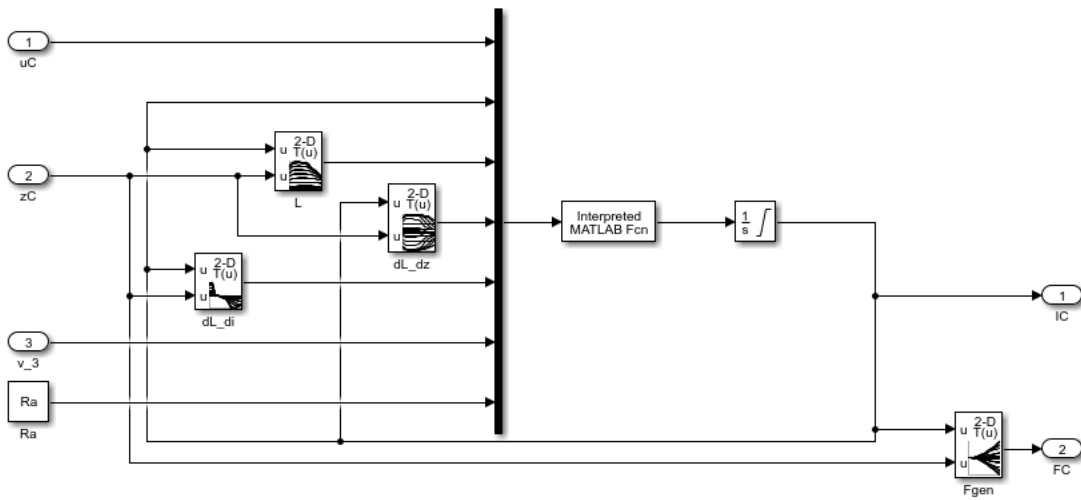


Figura A. 17 Bloco da Fase C

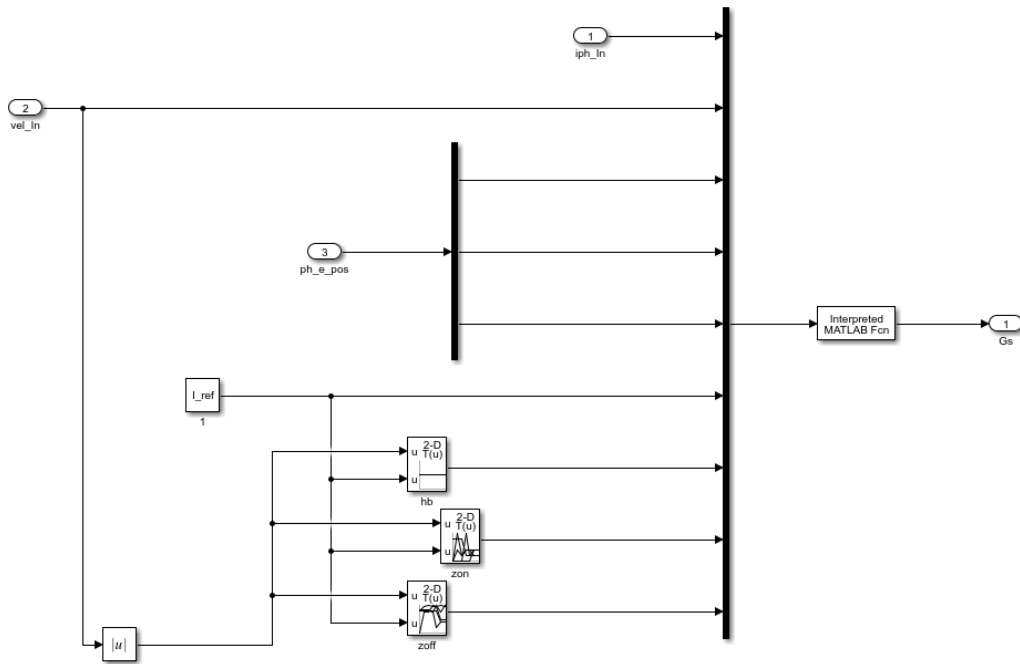


Figura A. 18 Bloco do controlador do gerador

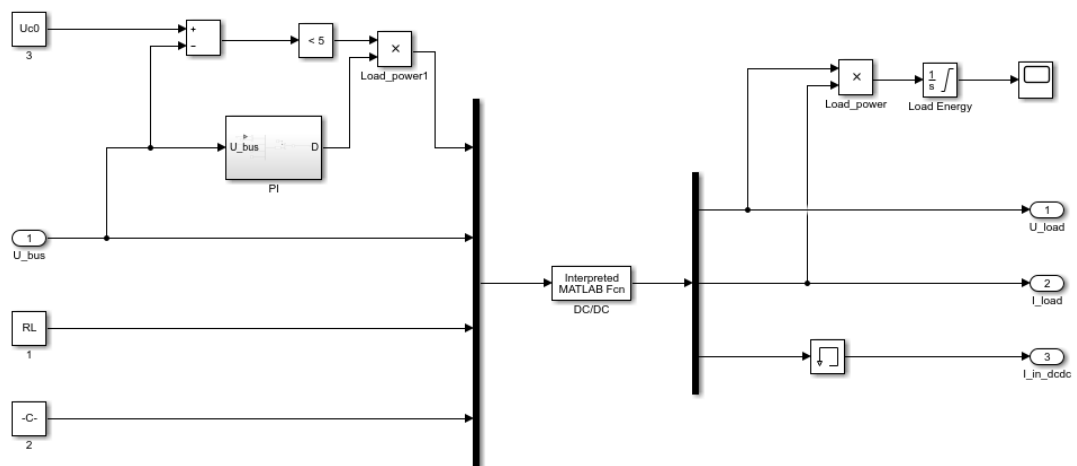


Figura A. 19 Bloco do conversor DC/DC Buck

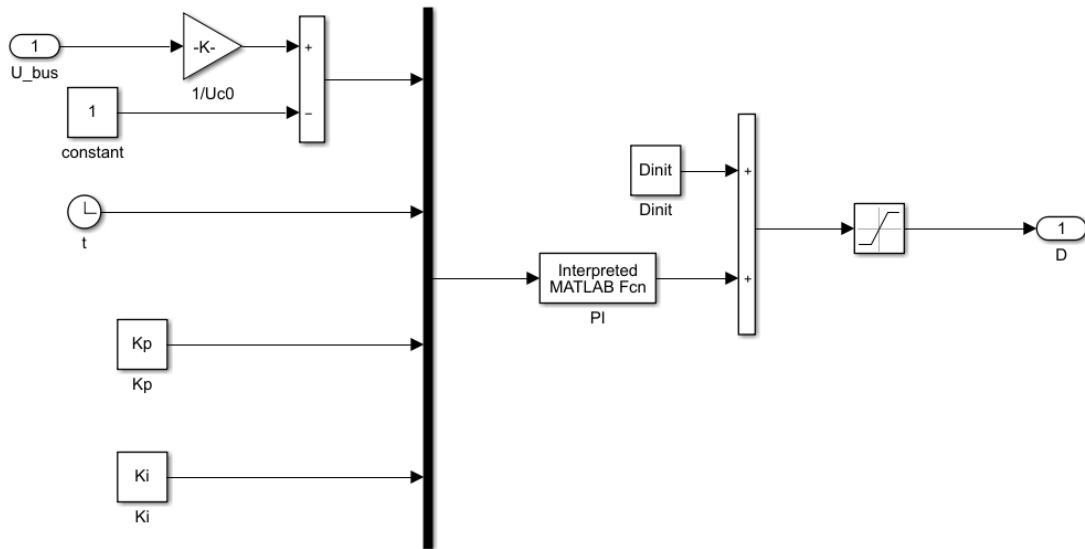


Figura A. 20 Bloco do controlador PI

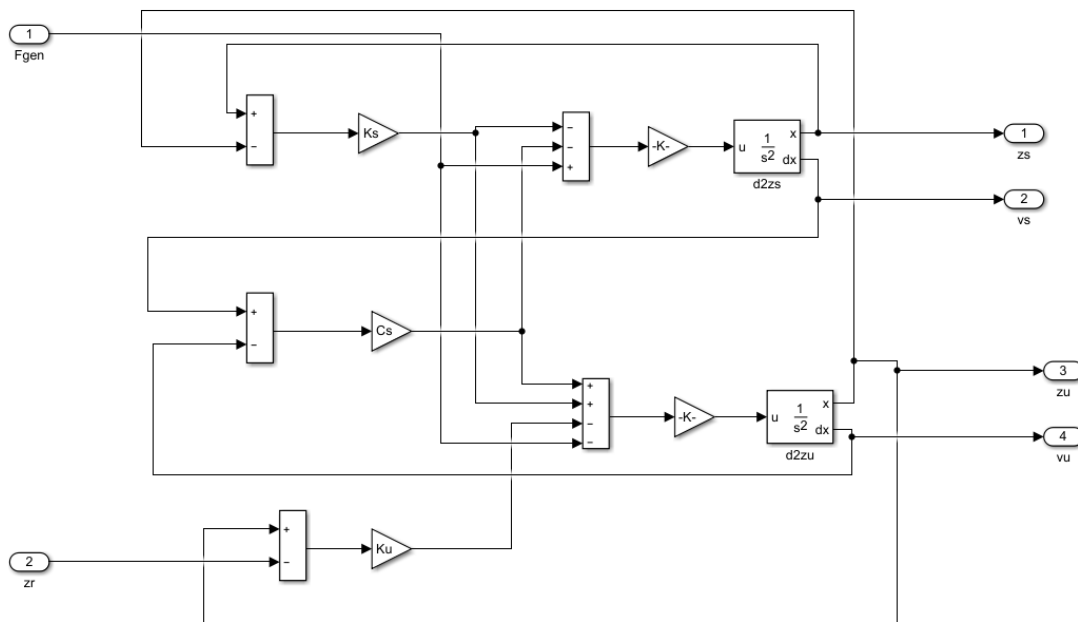


Figura A. 21 Bloco da suspensão regenerativa

### A.3 Perfis de estrada considerados na simulação do modelo dinâmico

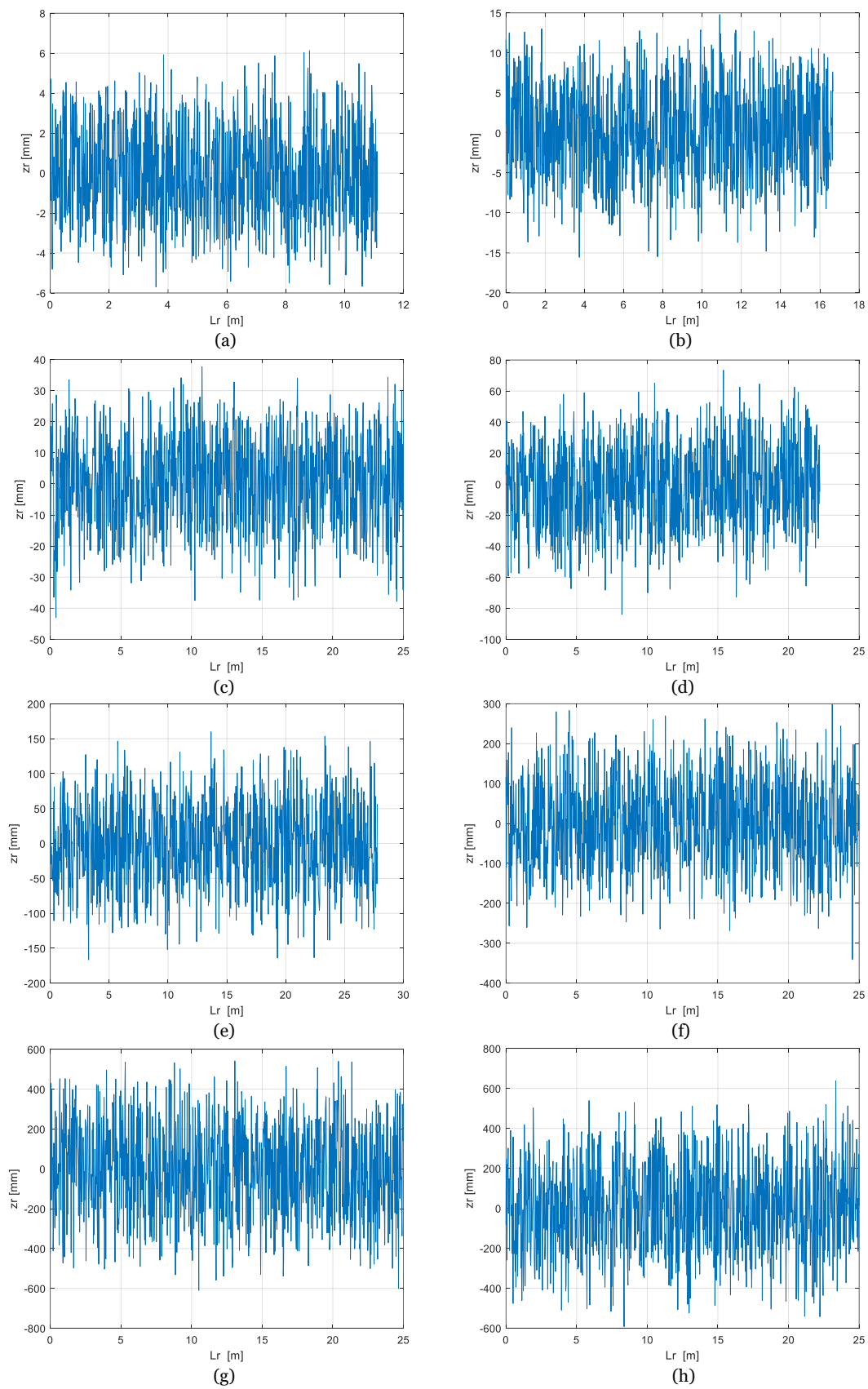


Figura A. 22 Deslocamento da roda definido pelo perfil de estrada percorrido pelo veículo: (a) A, (b) B, (c) C, (d) D, (e) E, (f) F, (g) G e (h) H.