

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**Investigação do potencial energético de
dispositivos coletores de energia de estradas
pavimentadas**

Autor: Leonardo Gabriel Carvalho da Costa Conceição

Orientador: Prof. Dr. Sidney Bruce Shiki



SÃO CARLOS-SP

2019

Leonardo Gabriel Carvalho da Costa Conceição

Investigação do potencial energético de dispositivos coletores de energia de estradas pavimentadas

Trabalho de Conclusão de curso apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de São Carlos para obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Orientador: Prof. Dr. Sidney Bruce Shiki

SÃO CARLOS-SP

2019



Ata de Defesa Pública de Trabalho de Conclusão de Curso

Aos dias 20 de dezembro de 2019, às 08:00 horas, em sessão pública no(a) Auditório do LEEM deste campus universitário, na presença da Banca Examinadora presidida pelo(a) Professor(a) **Prof. Dr.** Sidney Bruce Shiki e membros, **Prof. MSc.** Carlos Marlon Silva Santos (UFSCar - São Carlos) e **Prof. Dr.** Osmar Ogashawara (UFSCar - São Carlos), e do aluno **Leonardo Gabriel** Carvalho da Costa Conceição apresentou o Trabalho de conclusão de Curso intitulado: **Investigação do potencial** energético de dispositivos coletores de energia de estradas pavimentadas como requisito curricular obrigatório.

Após a reunião em sessão reservada, a Banca examinadora deliberou atribuiu o referido trabalho com média final 9,0, divulgando o resultado formalmente ao aluno e demais presentes e eu, na condição de Presidente da Banca, lavrei a presente ata.

A minha família e amigos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família, em especial a minha mãe e a minha vó por todo suporte dado, tornando isso possível.

Ao professor Sidney Bruce Shiki, pela orientação e atenção, que foram fundamentais para elaboração deste trabalho.

A Universidade Federal de São Carlos, pela formação de qualidade.

RESUMO

A busca de fontes alternativas de energia é um tema recorrente em pesquisa devido ao crescimento da demanda energética mundial. Faz-se necessário o desenvolvimento de técnicas e dispositivos de coleta de energia. Esse trabalho focou em estudar dois dispositivos coletores de energia aplicado em estradas pavimentadas. Especificamente, focou-se em estudar um dispositivo baseado em elementos hidráulicos e o outro baseado em elementos eletromecânicos, de naturezas completamente distintas. Para estes foram desenvolvidas sua modelagem matemática e computacional (no software MATLAB/SIMULINK) a fim de coletar resultados que permitissem investigar e comparar seus potenciais energéticos. Foi chegada a conclusão de que o dispositivo coletor de estradas pavimentadas eletromecânico tem maior potencial energético, através da análise dos resultados das simulações dos modelos computacionais.

Palavras-chave: Coletores de energia. Veículos. Estradas. Sistemas hidráulicos. Sistemas eletromecânicos.

ABSTRACT

The search for alternative sources of energy is a recurring theme in research due to the growth of world energy demand. The development of energy harvesting techniques and devices is required. This work focused on studying two energy harvesting devices applied on paved roads. Specifically, it was focused on studying one device based on hydraulic elements and the other based on electromechanical elements, of completely different natures. For these were developed their mathematical and computational modeling (in the software MATLAB/SIMULINK) in order to collect results that would allow to investigate and compare their energy potentials. It was concluded that the electromechanical road pavement energy harvesting device has higher energy potential, through the analysis of the simulation results of the computational models.

Key-words: Energy harvesting. Vehicles. Roads. Hydraulic systems. Electromechanical systems.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Classificação dos dispositivos coletores de energia mecânica da passagem de veículos em estradas.	21
Figura 2 – Fluxograma dos sistemas hidráulicos de coleta de energia proveniente da passagem de veículos.	23
Figura 3 – Fluxograma dos sistemas eletromecânicos de coleta de energia proveniente da passagem de veículos (Lin-Lin).	25
Figura 4 – Esquemático do sistema RPEH hidráulico.	27
Figura 5 – Esquemático adaptado do sistema <i>RPEH</i> hidráulico proposto por (DUARTE; FERREIRA; FAEL, 2017)	28
Figura 6 – Representação da Manobra 1 do dispositivo <i>RPEH</i> hidráulico.	29
Figura 7 – Representação da Manobra 2 do dispositivo <i>RPEH</i> hidráulico.	30
Figura 8 – Representação da Manobra 3 do dispositivo <i>RPEH</i> hidráulico.	30
Figura 9 – Representação da Manobra 4 do dispositivo <i>RPEH</i> hidráulico.	31
Figura 10 – <i>DCL</i> do <i>RPEHDS</i> durante a manobra 1	34
Figura 11 – Esquemático do circuito hidráulico 1 durante a manobra 1	35
Figura 12 – Esquemático do conjunto pistão/cremalheira durante a manobra 1.	37
Figura 13 – Esquemático do circuito hidráulico 2 durante a manobra 1	38
Figura 14 – <i>DCL</i> do pinhão durante a Manobra 1.	39
Figura 15 – Circuito elétrico do Gerador do sistema <i>RPEH</i> hidráulico	41
Figura 16 – Fluxograma da simulação do modelo computacional do dispositivo <i>RPEH</i> hidráulico.	47
Figura 17 – <i>DCL</i> do pinhão durante a Manobra 1.	48
Figura 18 – <i>DCL</i> da massa móvel do sistema <i>RPEH</i> eletromecânico.	50
Figura 19 – Parte elétrica do sistema <i>RPEH</i> eletromecânico.	51
Figura 20 – Fluxograma da simulação do modelo computacional do dispositivo <i>RPEH</i> eletromecânico.	53
Figura 21 – Força de interação entre o veículo e o coletor de energia <i>RPEH</i> hidráulico.	55
Figura 22 – Deslocamento do coletor de energia.	56
Figura 23 – Deslocamento do pistão do cilindro de dupla ação.	57
Figura 24 – Corrente elétrica induzida no gerador.	58
Figura 25 – Tensão elétrica induzida no gerador.	58
Figura 26 – Potência de saída do gerador.	59
Figura 27 – Força de entrada: Força de contato do veículo no coletor.	60
Figura 28 – Deslocamento do coletor.	61
Figura 29 – Corrente de carga.	62

Figura 30 – Tensão induzida no gerador.	63
Figura 31 – Potência de saída do gerador.	64
Figura 32 – Comparação das curvas de deslocamento dos coletores.	65
Figura 33 – Comparação das curvas de tensão induzida.	66
Figura 34 – Comparação das curvas de corrente elétrica.	66
Figura 35 – Comparação das curvas de potência elétrica.	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros da simulação do sistema <i>RPEH</i> hidráulico.	33
Tabela 2 – Parâmetros da simulação do sistema <i>RPEH</i> eletromecânico.	50
Tabela 3 – Comparação dos resultados das simulações dos dispositivos <i>RPEH</i> hidráulico e eletromecânico.	64
Tabela 4 – Comparação das principais características dos sistemas <i>RPEH</i> . . .	68

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<i>CV</i>	Control valve (Essa válvula direciona o pistão para direita (posição 1) ou esquerda (posição 2)).
<i>DAC</i>	Double acting cylinder.
<i>DC</i>	Direct current.
<i>DCL</i>	Diagrama de Corpo Livre.
<i>AC</i>	Alternating current.
<i>PV</i>	Pressure valve (hydraulic).
<i>RES</i>	Hydraulic fluid reservoir.
<i>RPEH</i>	Road Pavement Energy Harvesting.
<i>RPEHDS</i>	Road Pavement Energy Harvesting Device Surface.
<i>A</i>	Área.
<i>DS</i>	Device surface .
<i>ET</i>	Electric torque.
<i>IW</i>	Inertia wheel.
<i>RAP</i>	Rack and pinion mechanical system.
<i>RES</i>	Hydraulic fluid reservoir.
<i>TUB</i>	Hydraulic Tubing.
<i>MEMS</i>	Microelectromechanical systems .

LISTA DE SÍMBOLOS

t_a	Instante de tempo em que o modelo do pistão para direita está sendo executado e $\dot{x}_h \geq 0$.
t_b	Instante de tempo em que o modelo do pistão para esquerda está sendo executado e $\dot{x}_h \geq 0$.
t_c	Instante de tempo em que <i>RPEHDS</i> está retornando para cima está sendo executado e $\dot{x}_h < 0$ com a válvula <i>CV</i> na posição 2.
t_d	Instante de tempo em que <i>RPEHDS</i> está retornando para cima e $\dot{x}_h < 0$ com a válvula <i>CV</i> na posição 1.
t_1	Instante de tempo em que o pistão chega no fim de seu curso no movimento para direita (valor máximo), mudando a válvula <i>CV</i> para a posição 2.
t_2	Instante de tempo em que o pistão chega ao fim de seu curso no movimento para esquerda (valor mínimo), mudando a válvula <i>CV</i> para a posição 1.
E_a	Tensão induzida na armadura do gerador elétrico.
g	Aceleração da gravidade.
i	Corrente de carga.
k_a	Constante do gerador.
K_h	Constante de rigidez da Mola do <i>RPEHDS</i> .
k_p	Constante elástica do coletor.
m_h	Massa do dispositivo <i>RPEHDS</i> .
m_{cp}	Massa do conjunto pistão/cremalheira.
r_p	Raio do pinhão.
A_h	Área de <i>RPEHDS</i> que faz contato com o fluido de trabalho do sistema.
A_{cp}	Área do lado esquerdo do pistão do cilindro <i>DAC</i> que faz contato com o fluido de trabalho do sistema.

A_{rod}	Área do lado direito do pistão do cilindro <i>DAC</i> que faz contato com o fluido de trabalho do sistema.
x_{cp}	Deslocamento do pistão e da cremalheira.
x_h	Deslocamento do dispositivo <i>RPEHDS</i> .
b_T	Constante de amortecimento total no eixo do gerador
b_p	Constante de amortecimento no pinhão.
b_{gen}	Constante de amortecimento do gerador elétrico.
F_{K_h}	Força da mola de retorno aplicada em <i>RPEHDS</i> .
F_p	Força no pistão devido as pressões P_1 e P_2 .
F_{SH1_s}	Força de reação do circuito hidráulico 1 no dispositivo <i>RPEHDS</i> .
F_{SH1}	Força exercida pelo dispositivo <i>RPEHDS</i> no circuito hidráulico 1.
F_{SM}	Força que o conjunto pistão/cremalheira exerce sobre o pinhão.
F_{SM_s}	Força de reação do pinhão no conjunto pistão/cremalheira.
F_V	Força aplicada no <i>RPEHDS</i> pelo pneu do veículo.
J_T	Momento de inércia Total dos elementos rotacionais do sistema <i>RPEH</i> hidráulico.
J_p	Momento de inércia do pinhão.
J_{sh}	Momento de inércia do eixo.
J_{IW}	Momento de inércia do disco de inércia.
J_{gen}	Momento de inércia do gerador.
J_{T2}	Momento de inércia Total dos elementos rotacionais no eixo do gerador, quando o mesmo está desacoplado do restante do sistema <i>RPEH</i> hidráulico.
K_h	Constante de rigidez da mola.
L_a	Indutância de armadura do gerador.
P_1	Pressão no circuito hidráulico 1 devido a força F_{SH1} .
P_2	Pressão no lado esquerdo do pistão <i>DAC</i> .

P_3	Pressão no lado direito do pistão <i>DAC</i> .
P_4	Pressão no reservatório.
R_a	Resistência de armadura.
R_L	Resistência de carga.
V_h	Volume de fluido deslocado pelo <i>RPEHDS</i> .
V_{cp}	Volume de fluido deslocado no lado esquerdo do pistão <i>DAC</i> .
Δ_P	Queda de pressão no circuito hidráulico 1.
Δ_{P_2}	Queda de pressão no circuito hidráulico 2.
θ_p	Deslocamento angular do pinhão.
θ_{IW}	Deslocamento angular da roda de inércia <i>IW</i> .
L	Comprimento da tubulação dos circuitos hidráulicos 1 e 2.
D	Diâmetro da tubulação dos circuitos hidráulicos 1 e 2.
K_{loc}	Coefficiente de perda de carga resultante dos circuitos hidráulicos 1.
μ	Viscosidade dinâmica do fluido.
ρ	Densidade do fluido.
B_e	Constante de amortecimento do sistema RPEH com gerador eletromagnético linear.
F_{B_e}	Força de amortecimento do sistema RPEH com gerador eletromagnético linear.
F_M	força de reação magnética proveniente do gerador linear.
e_{gl}	Tensão induzida no gerador eletromagnético linear.
P_{R_L}	Potência dissipada pela carga.
u	Tensão de carga.
w_p	Largura de um par de polos do conjunto de ímãs permanentes do gerador eletromagnético linear.
B_t	Campo magnético em um tooth do conjunto de ímãs permanentes do gerador eletromagnético linear.

w_t	Largura de um tooth do estator do gerador eletromagnético linear.
d	Largura do stack do estator do gerador eletromagnético linear.
p	Número de polos do conjunto de ímãs permanentes do gerador eletromagnético linear.
q	Número de slots por polo do gerador eletromagnético linear.
c	Número de cabos em um slot do gerador eletromagnético linear.
ϕ_t	Fluxo magnético máximo do conjunto de ímãs permanentes do gerador eletromagnético linear.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Objetivos	18
1.2	Organização da Monografia	19
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1	<i>Energy harvesting</i>	20
2.2	Coletores de energia de passagem de veículos	20
2.3	Coletores de energia hidráulicos	22
2.4	Coletores de energia eletromecânicos	24
3	MODELAGEM DINÂMICA DOS SISTEMAS DE APROVEITAMENTO DE ENERGIA	26
3.1	Sistema <i>RPEH</i> hidráulico	26
3.1.1	RPEH DS (Movimento para baixo)	33
3.1.2	CIRCUITO HIDRÁULICO 1	34
3.1.3	PISTÃO <i>DAC</i> E CREMALHEIRA (Movimento para direita)	36
3.1.4	CIRCUITO HIDRÁULICO 2	37
3.1.5	EIXO DO GERADOR ELÉTRICO (Pinhão no sentido anti-horário)	38
3.1.6	GERADOR ELÉTRICO	40
3.1.7	INTERAÇÃO ENTRE OS COMPONENTES DO SISTEMA <i>RPEH</i> HIDRÁULICO (Movimento do pistão para direita)	41
3.1.8	Movimento livre do gerador/ Movimento do pistão para esquerda/ Retorno do <i>RPEH DS</i> para cima	43
3.1.9	Modelo computacional	46
3.2	Sistema <i>RPEH</i> Eletromecânico	48
3.2.1	Modelo Matemático do sistema	49
3.2.2	Modelo computacional	53
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	54
4.1	Simulação do sistema <i>RPEH</i> hidráulico	54
4.2	Simulação do sistema <i>RPEH</i> eletromecânico	59
4.3	Comparação entre o sistema coletor hidráulico e o sistema coletor eletromecânico	64
5	CONCLUSÃO	69
5.1	Sugestões para trabalhos futuros	70
	REFERÊNCIAS	71
	APÊNDICE A – APÊNDICE A	73

APÊNDICE B – APÊNDICE B	101
--------------------------------	------------

1 INTRODUÇÃO

O crescimento acelerado da economia e sociedade dos países em desenvolvimento tem causado a escassez dos combustíveis fósseis e destruição do meio ambiente, gerando problemas críticos e que devem ser tratados com urgência. O uso de energias renováveis e sustentáveis aparecem como possíveis soluções para tais problemas, podendo ajudar a reduzir a pressão no uso de recursos naturais e evitar a degradação ambiental (PAN et al., 2015).

Apesar de as fontes de energias renováveis mais comuns serem a energia solar, eólica, hidráulica e oceânica, fontes de energia alternativas como vibrações, ondas acústicas, movimento do corpo humano entre outras podem ser exploradas (DUARTE; FERREIRA, 2016).

Energy harvesting (coleta de energia) se apresenta como uma técnica promissora e que pode produzir energia limpa e renovável, aumentando a sustentabilidade da infraestrutura que a utiliza (WANG; JASIM; CHEN, 2018). Essa técnica busca reaproveitar parcelas da energia do ambiente que seriam desperdiçadas na forma de calor (ANTON; SODANO, 2007).

Segundo Duarte (2018) há um grande potencial de fontes energéticas devido à passagem de veículos em estradas pavimentadas. Enquanto veículos consomem combustíveis ou utilizam de baterias elétricas para manter sua locomoção, parte de sua energia é liberada para o asfalto durante seu movimento (DUARTE; FERREIRA; FAEL, 2017). A vasta circulação de automóveis em grandes cidades e a constante exposição de cargas veiculares na superfície do pavimento faz com que esse tipo de energia tenha grande potencial para tecnologias de *energy harvesting* (ANDRIOPOULOU, 2012; DUARTE; FERREIRA, 2016).

As estradas pavimentadas podem fazer uso de parte dessa energia que seria desperdiçada através de tecnologias específicas que podem coletar e converter a energia mecânica dos veículos em energia elétrica. Estes dispositivos são chamados de coletores de energia de estradas pavimentadas (do inglês *Road Pavement Energy Harvesting (RPEH)*).

Atualmente novos dispositivos têm sido projetados com a finalidade de aproveitar essa energia não aproveitada, utilizando para isso sistemas mecânicos, hidráulicos, magnéticos, materiais piezelétricos ou ainda arranjos dos mesmos. Entretanto, muitos desses dispositivos foram somente validados em ambiente de laboratório, sem comprovação real num ambiente com tráfego normal de veículos (DUARTE; FERREIRA, 2016). Além disso, os mesmos autores afirmam que faltam resultados de simulações computacionais para entender a capacidade energética desses dispositivos.

Seguindo essa linha, essa monografia busca produzir simulações computacionais no software MATLAB/SIMULINK de dois dispositivos RPEH. O primeiro deles é baseado em um sistema com transmissão hidráulica de movimento, o qual é proposto, por Duarte e Ferreira (2016). O segundo dispositivo estudado é de natureza eletromecânica, sendo explorado na pesquisa de Thorburn e Leijon (2007). Essas simulações ajudarão a entender o real comportamento desses dispositivos e poderão vir a contribuir no desenvolvimento das pesquisas dos dispositivos coletores de energia de estradas pavimentadas.

1.1 Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é investigar o potencial energético de dois dispositivos coletores de energia de estradas pavimentadas, sendo um deles classificado como hidráulico e outro como eletromecânico. Para isso, foram necessários concluir as seguintes etapas abaixo, que podem ser consideradas como objetivos parciais, necessários para atingir o objetivo principal.

- Realizar a modelagem matemática dos dispositivos coletores de energia de estradas pavimentadas hidráulico e eletromecânico;
- Criar os modelos computacionais desses sistemas no software MATLAB/SIMULINK;
- Simular os modelos computacionais obtidos para conseguir dados que permitem a análise energética dos dispositivos;
- Analisar e comparar os resultados das grandezas físicas obtidas, a fim de estimar a capacidade energética de ambos os dispositivos.

1.2 Organização da Monografia

Este trabalho está dividido 5 seções, estruturados como a seguir:

1. Introdução: Contextualiza o tema a ser abordado e descreve os objetivos e organização da monografia.
2. Revisão Bibliográfica: Breve apresentação de conceitos que serão abordados nesse trabalho.
3. Modelagem dinâmica dos sistemas de aproveitamento de energia: Descreve detalhadamente os dois sistemas propostos e é onde se desenvolve seus modelos matemáticos e computacionais.
4. Resultados e Discussões: Apresenta os resultados obtidos das simulações computacionais. Inclui sua apresentação, análise e discussão.
5. Conclusão: Apresenta as conclusões obtidas para esse trabalho, bem como sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção são apresentados os conceitos que serão abordados durante esse trabalho. Serão vistos os princípios básicos sobre *Energy harvesting* em 2.1, Coletores de energia de passagem de veículos em 2.2, Coletores de energia hidráulicos em 2.3 e Coletores de energia eletromecânicos em 2.4.

2.1 *Energy harvesting*

Energy harvesting é um conceito no qual a energia é capturada, convertida, armazenada e utilizada, usando diferentes fontes e dispositivos (KIM et al., 2011).

Dispositivos de *energy harvesting* podem ser separados em duas categorias, de acordo com as fontes de energia que estão sendo aplicadas :

- Fontes de macro-energia: são associadas a energias em grande escala, na faixa de KJ (quilo Joules). Incluem fontes de energia solar, eólica, hidráulica e oceânica;
- Fontes de micro-energia: são fontes de energia em pequena escala, geralmente eletromagnéticas, eletrostáticas, calor, variações térmicas, vibrações mecânicas, fontes sonoras e movimento do corpo humano.

No contexto dos Coletores de energia de passagem de veículos a energia mecânica a ser coletada pelos dispositivos coletores se enquadra no grupo das fontes de micro-energia, por também serem de pequena escala.

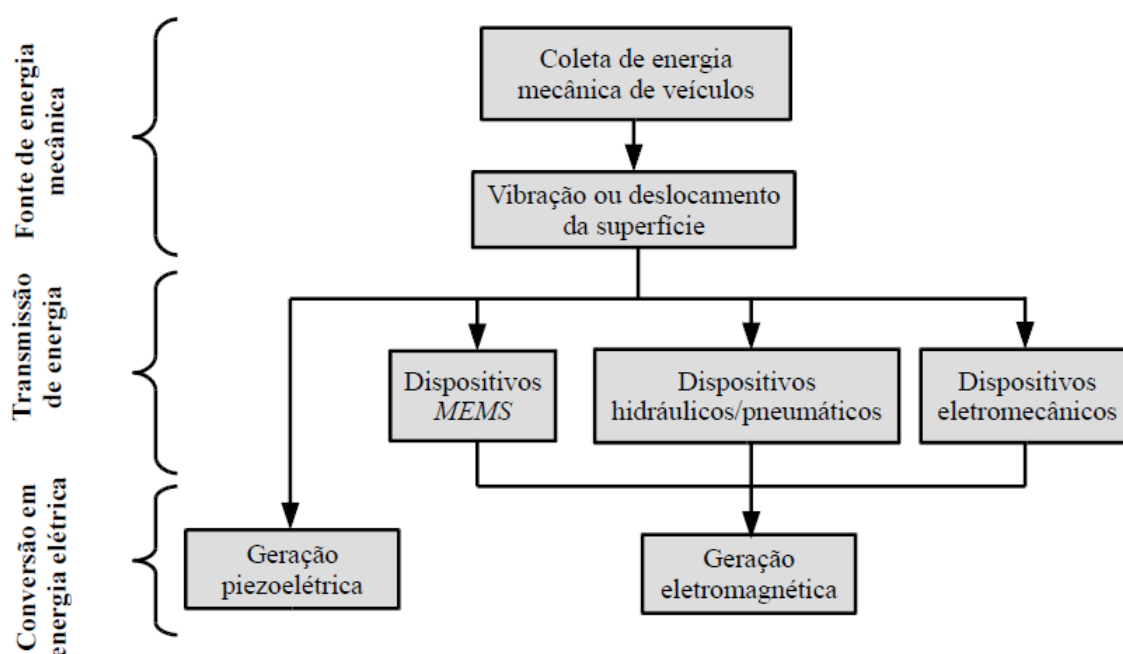
2.2 Coletores de energia de passagem de veículos

As rodas dos veículos transferem energia mecânica para a superfície da estrada e causam dois tipos diferentes de efeito no pavimento: podem induzir vibrações e/ou causar o deslocamento do mesmo. Essa energia pode ser capturada por diferentes métodos e tecnologias (DUARTE, 2018).

Há duas classes de tecnologias que se sobressaem no aproveitamento de energia durante sua aplicação em coletores de energia de passagem de veículos, de acordo com Harb (2011). O primeiro grupo é relacionado às técnicas que capturam a própria radiação solar incidente nas estradas. Apesar das tecnologias de painéis fotovoltaicos serem maduras atualmente, as mesmas possuem limitações para instalação nas estradas. O segundo grupo mencionado por este autor reside nas tecnologias que procuram coletar a energia mecânica que é transferida dos veículos durante sua locomoção para a superfície da estrada. A Figura 1 ilustra as principais classes de

tecnologias encontradas na literatura que usam essa abordagem. Nesses casos, os dispositivos utilizam como fonte de energia mecânica o deslocamento de uma superfície móvel (como um redutor de velocidade com mola de retorno) ou então as vibrações causadas pela passagem do veículo na estrada. Uma forma de se capturar essa energia é utilizando materiais com propriedade piezoeétrica os quais tem a propriedade de converter diretamente a energia mecânica de deformação em energia elétrica. A limitação dessas técnicas está na baixa quantidade de energia gerada e o funcionamento apenas em condições muito específicas, sendo mais exploradas para alimentação de sensores e dispositivos eletrônicos de baixa potência (ANTON; SODANO, 2007).

Figura 1 – Classificação dos dispositivos coletores de energia mecânica da passagem de veículos em estradas.



Fonte: Adaptado de (DUARTE; FERREIRA, 2016)

A utilização de dispositivos intermediários é uma nova maneira de coletar a energia mecânica liberada nas estradas. Sistemas micro eletromecânicos (*MEMS* do inglês *microelectromechanical systems*), dispositivos hidráulicos/pneumáticos, ou ainda sistemas eletromecânicos são exemplos desses equipamentos. Segundo Duarte e Ferreira (2016) os dispositivos *MEMS* produzem pouca quantidade de energia, apesar de ainda apresentarem potencial de melhora conforme novas pesquisas sejam realizadas. Nesses equipamentos pequenas estruturas mecânicas extraem a energia vindas de vibrações do pavimento. Possibilidades mais interessantes de dispositivos intermediários para coleta de energia são sistemas hidráulicos/pneumáticos ou ainda eletromecânicos. Nos sistemas hidráulicos/pneumáticos um fluido é usado transmitir força e atuar componentes mecânicos. Já em sistemas eletromecânicos, a transmissão do movimento do veículo é feita de forma mecânica. Em ambos os sistemas,

o movimento mecânico gerado pelo sistema de transmissão é convertido em eletricidade através de um gerador elétrico baseado no princípio de indução eletromagnética, podendo ser esse gerador rotativo ou linear.

O princípio da indução eletromagnética que o gerador elétrico utiliza, conhecida como Lei de Faraday, ocorre quando há movimento relativo entre um condutor e um campo magnético, o que faz com que tensão/corrente seja induzida no condutor (BE-EBY et al., 2006).

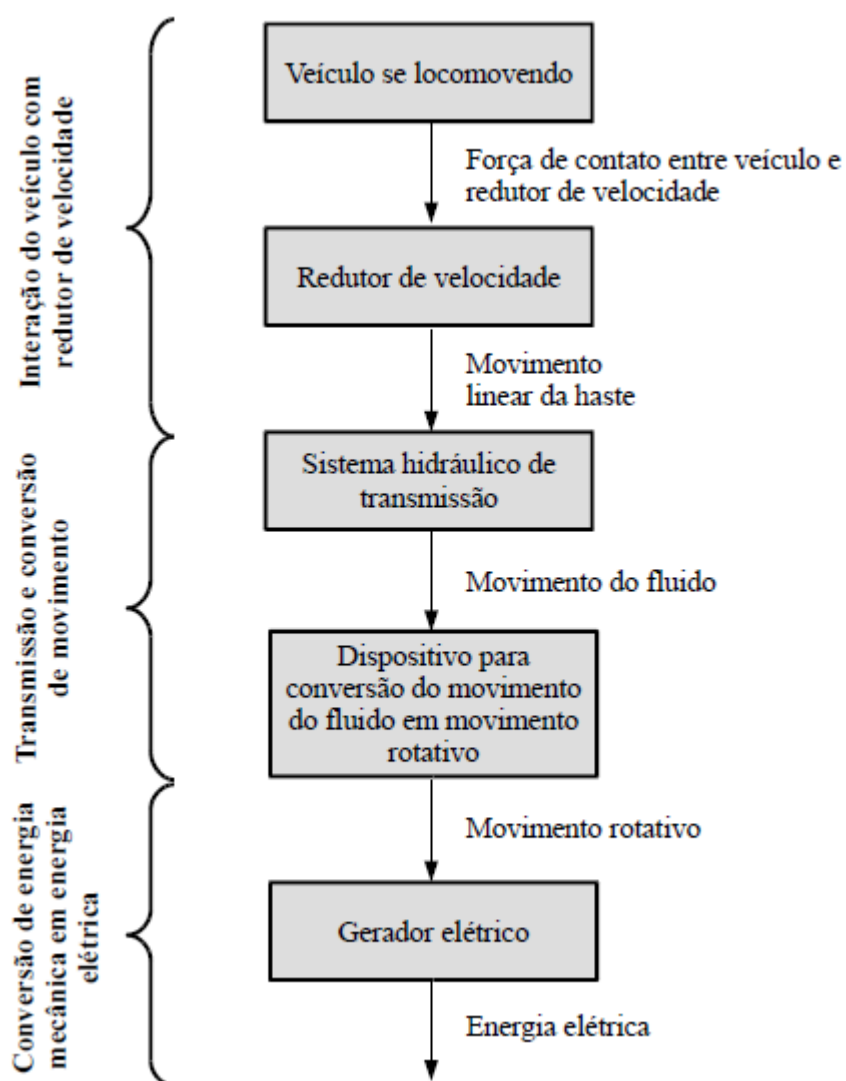
Apesar dos sistemas hidráulicos/pneumáticos e eletromecânicos necessitarem desses dispositivos intermediários para então transmitir o movimento para um gerador elétrico, os mesmos tem maior potencial de geração elétrica segundo o estudo de Duarte e Ferreira (2016). No entanto a tabela comparativa das diferentes tecnologias de *energy harvesting* para estradas que esse trabalho apresenta tem uma falta de padronização dos dados, tornando difícil de entender as diferenças reais entre os sistemas mostrados.

2.3 Coletores de energia hidráulicos

Um sistema hidráulico consiste num sistema de transmissão ou direcionamento de fluidos pressurizados usado para transmitir forças e atuar componentes mecânicos, como pistões, turbinas etc (PARR, 2011). Sua função em sistemas coletores de energia de estradas pavimentadas é ser um elemento intermediário capaz de transmitir a força vinda do veículo e/ou elementos mecânicos do sistema coletor para outras partes do sistema, tipicamente geradores elétricos (DUARTE, 2018).

O fluxograma da Figura 2 mostra os elementos de um tipo de coletor de energia hidráulico utilizado em estradas pavimentadas. Nesse fluxograma é possível ver como ocorre a interação desses elementos. Inicialmente o veículo em movimento passa sobre o redutor de velocidade, liberando energia mecânica através de suas rodas. Essa energia é então coletada pelo redutor, que começa a se movimentar junto com sua haste, atuando no sistema hidráulico do equipamento, que dessa forma transmite força pelo escoamento do fluido. Essa transmissão de força hidráulica aciona o sistema que converte a energia hidráulica em mecânica. Essa energia mecânica movimenta o eixo de um gerador elétrico, convertendo a energia de entrada para sua forma final, que é a energia elétrica.

Figura 2 – Fluxograma dos sistemas hidráulicos de coleta de energia proveniente da passagem de veículos.



Fonte: Adaptado de (DUARTE, 2018)

2.4 Coletores de energia eletromecânicos

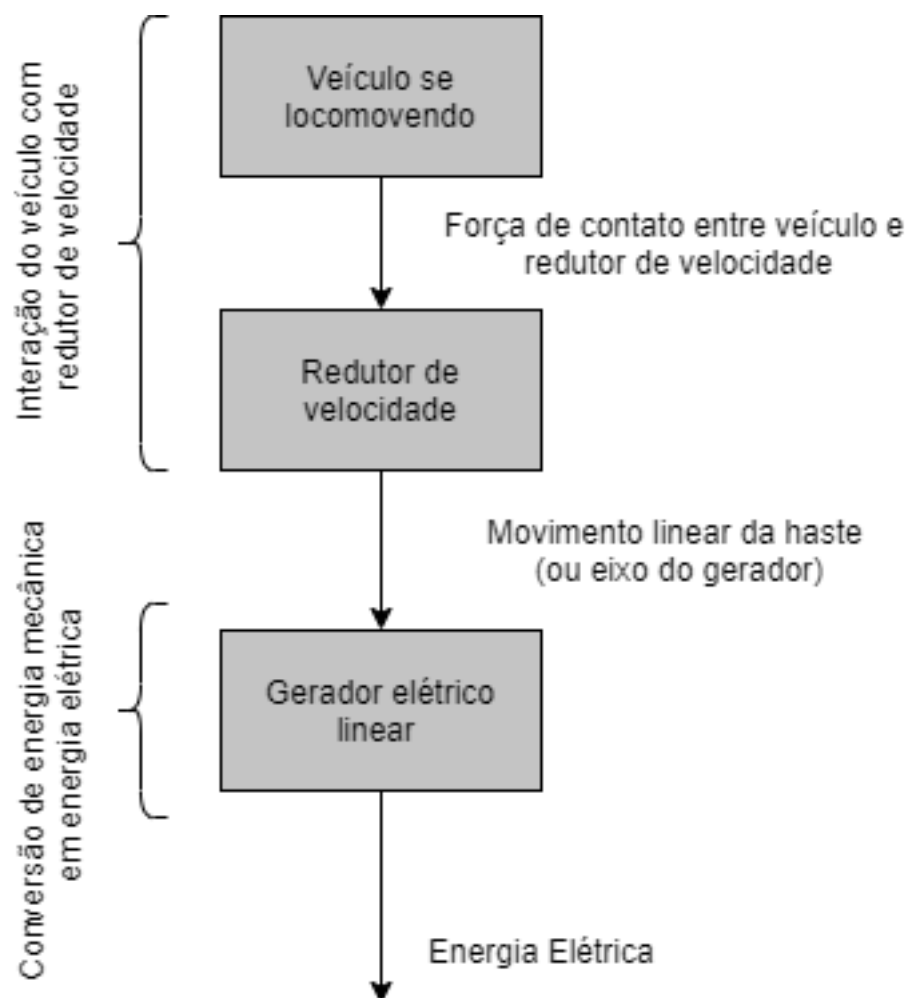
Em sistemas eletromecânicos, os dispositivos elétricos são atuados por componentes mecânicos ou vice-versa. No caso de dispositivos coletores de energia de passagem de veículos eletromecânicos, a energia mecânica é usada para acionar uma máquina elétrica, tipicamente um gerador eletromagnético, rotativo ou linear (DUARTE, 2018).

Os coletores de energia de passagem de veículos eletromecânicos podem ser divididos em quatro classes:

1. Conversão de movimento rotacional da superfície em movimento rotacional de um gerador elétrico (Rot-Rot);
2. Conversão de movimento linear da superfície em movimento rotacional de um gerador elétrico (Lin-Rot);
3. Conversão de movimento linear da superfície em movimento linear de um gerador elétrico (Lin-Lin);
4. Conversão de movimento rotacional da superfície em movimento linear de um gerador elétrico (Rot-Lin);

O fluxograma da Figura 3 mostra os elementos de um tipo de coletor de energia eletromecânico (Lin-Lin) utilizado em estradas pavimentadas. Como no sistema hidráulico, o fluxograma mostra que a primeira interação com o sistema coletor é quando o veículo em movimento interage com o redutor de velocidade, liberando energia mecânica através de suas rodas. No entanto, o movimento de translação vertical do redutor junto com sua haste, que também é o eixo do gerador elétrico linear, produz diretamente energia elétrica. Assim, a conversão de energia é realizada de maneira direta, eliminando a necessidade de diversas etapas de conversão de energia intermediárias, resultando em menor número de elementos no sistema e processos de perda de energia.

Figura 3 – Fluxograma dos sistemas eletromecânicos de coleta de energia proveniente da passagem de veículos (Lin-Lin).



Fonte: Adaptado de (DUARTE, 2018)

3 MODELAGEM DINÂMICA DOS SISTEMAS DE APROVEITAMENTO DE ENERGIA

Nas subseções 3.1 e 3.2 que se seguem é desenvolvido o estudo dos dois sistemas propostos nessa monografia, que são o sistema coletor de energia de estradas pavimentadas hidráulico e o sistema coletor de energia de estradas pavimentadas eletromecânico, respectivamente.

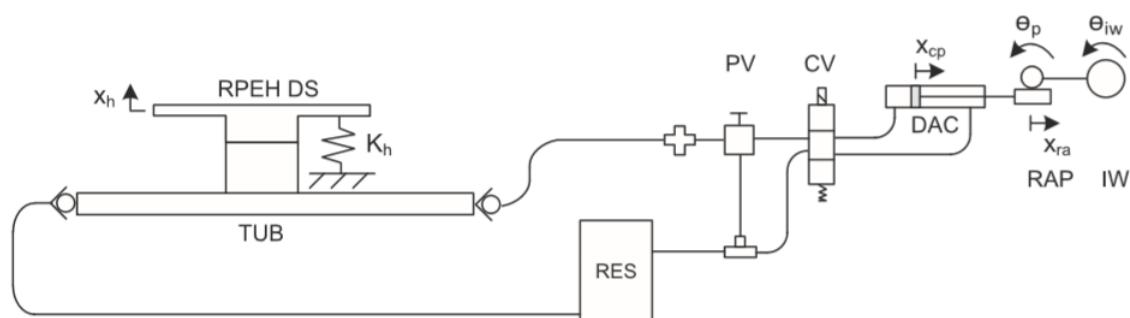
Em cada um dos objetos de estudo, primeiramente é feita uma descrição do sistema, modelagem matemática e implementação no software MATLAB/SIMULINK, para criação de um modelo computacional capaz de ser simulado e gerar dados, que posteriormente serão analisados na seção 4 (Resultados e discussão).

3.1 Sistema *RPEH* hidráulico

Aqui é feita uma descrição geral do dispositivo coletor de energia de estradas pavimentadas com transmissão hidráulica (*RPEH* hidráulico), apresentado no trabalho de (DUARTE; FERREIRA; FAEL, 2017). Esse sistema é composto por um redutor de velocidade (*RPEHDS*, do inglês *Road Pavement Energy Harvesting Device Surface*) com uma geometria específica, de modo a minimizar efeitos nocivos ao veículo ao passar sobre o dispositivo. Este redutor transmite movimento para uma haste que pressuriza um determinado fluido de trabalho. Uma mola de constante de rigidez (K_h) é acoplada à haste para que o redutor de velocidade retorne à sua posição original após a passagem do veículo. Um sistema hidráulico de transmissão de movimento composto por um reservatório (*RES*, do inglês *Hydraulic fluid reservoir*), válvula de controle (*CV*, do inglês *Control valve*), tubulação (*TUB*, do inglês *Hydraulic Tubing*) e uma válvula de pressão (*PV*, do inglês *Pressure valve*) fazem com que um cilindro de dupla ação (*DAC*, do inglês *Double acting cylinder*) seja movimentado.

No arranjo de (DUARTE; FERREIRA; FAEL, 2017) esse cilindro movimenta uma cremalheira acoplada a um pinhão (*RAP*, do inglês *Rack and pinion*). Um tipo de embreagem então é responsável pelo acoplamento/desacoplamento dessa engrenagem ao eixo de um gerador elétrico, que transformará a energia do movimento rotativo em energia elétrica. Esse dispositivo ainda contém um volante de inércia (*IW*, do inglês *Inertia wheel*) no sistema rotativo, para fazer a velocidade angular do eixo do gerador decair de maneira suave, após ocorrer o desacoplamento entre o eixo do gerador e o pinhão. A Figura 4 ilustra de forma esquemática esse sistema.

Figura 4 – Esquemático do sistema RPEH hidráulico.

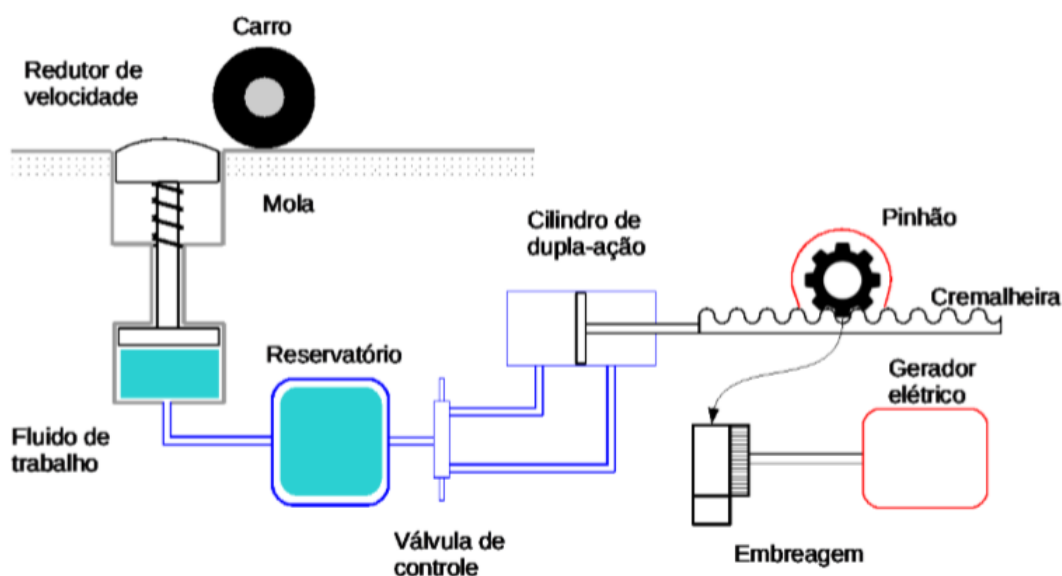


Fonte: (DUARTE; FERREIRA; FAEL, 2017)

O modelo matemático para esse sistema é dividido em 4 partes (ou manobras que ele é capaz de realizar), devido ao arranjo dos componentes do dispositivo e pela forma que eles modificam seu comportamento com base em determinadas condições. Como o comportamento do equipamento é distinto em cada uma dessas partes, isso implica em modelos diferentes para estudar cada etapa do sistema. No entanto os modelos são complementares, e são utilizados em conjunto para a representação completa do dispositivo RPEH hidráulico.

Para facilitar a compreensão do funcionamento do sistema, foi criado um esquemático adaptado do proposto por (DUARTE; FERREIRA; FAEL, 2017), a partir do qual é usado para ilustrar de maneira clara cada uma das manobras que ocorrem durante a operação do equipamento. O esquemático adaptado é apresentado na Figura 5, e a ilustração das etapas 1, 2, 3 e 4 são exibidas nas Figuras 6, 7, 8 e 9 respectivamente.

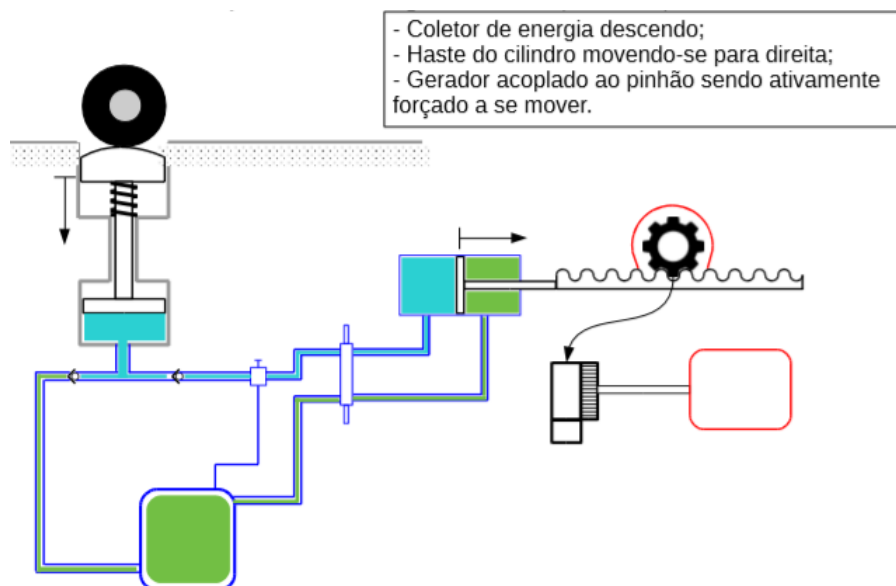
Figura 5 – Esquemático adaptado do sistema *RPEH* hidráulico proposto por (DUARTE; FERREIRA; FAEL, 2017)



Fonte: (SHIKI et al., 2018)

- Manobra 1:** A força que o veículo aplica na superfície do redutor de velocidade (ou coletor de energia) faz com que este se movimente para baixo, empurrando o fluido do circuito hidráulico. Esse fluido que sofreu escoamento transmite força para o lado esquerdo do pistão, que começa a se mover para a direita. Como o pistão está conectado a cremalheira, ela também se desloca da mesma maneira, e gira o pinhão a ela conectado. O movimento de giro do pinhão rotaciona o eixo do gerador elétrico, que passa a induzir tensão elétrica em seus terminais, convertendo a energia coletada em energia elétrica. Essa manobra está ilustrada na Figura 6).

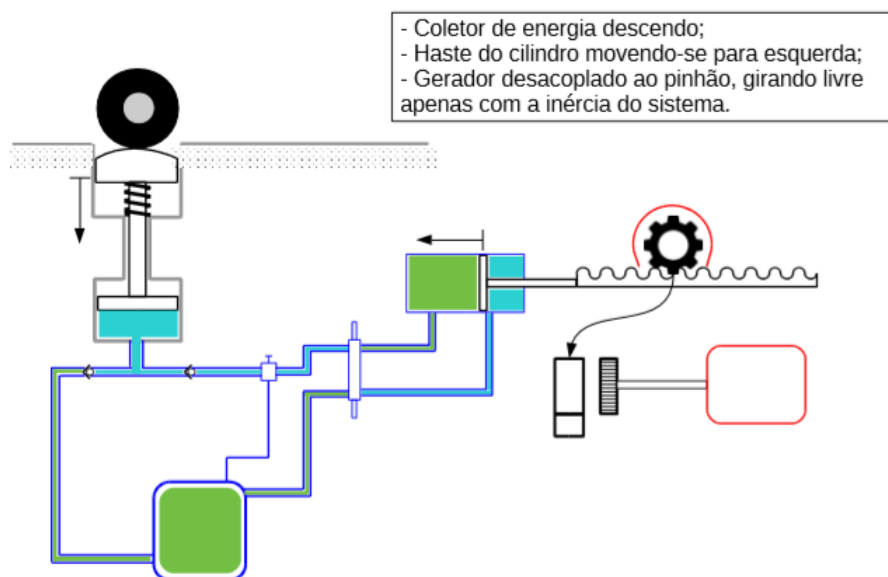
Figura 6 – Representação da Manobra 1 do dispositivo *RPEH* hidráulico.



Fonte: (SHIKI et al., 2018)

- **Manobra 2:** A força que o veículo aplica na superfície do redutor de velocidade (ou coletor de energia) faz com que este se movimente para baixo, empurrando o fluido do circuito hidráulico. Esse fluido que sofreu escoamento transmite força para o lado direito do pistão, que começa a se mover para a esquerda. O movimento do pistão para a esquerda só ocorre quando o mesmo chegou ao fim de curso. Quando isso ocorre, o gerador e o volante de inércia se desacoplam do pinhão, impedindo que a rotação de seu eixo seja invertida. O movimento do pistão para a esquerda também serve para o mesmo voltar a sua posição inicial, para conseguir repetir a manobra 1. Durante essa manobra o gerador elétrico só é capaz de induzir tensão elétrica se ainda estiver girando livremente devido ao volante de inércia. A ilustração dessa manobra é encontrada na Figura 7.

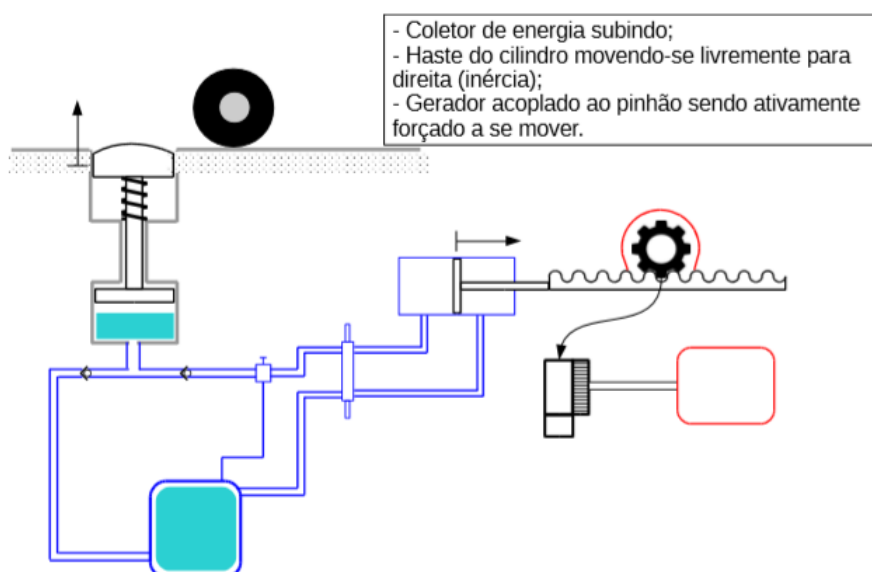
Figura 7 – Representação da Manobra 2 do dispositivo *RPEH* hidráulico.



Fonte: (SHIKI et al., 2018)

- **Manobra 3:** Nessa manobra o veículo não está mais passando sobre a superfície do redutor de velocidade, que começa a subir para sua posição inicial devido a ação da mola de retorno. Logo, nenhuma energia é coletada nessa etapa. No entanto, a inércia dos elementos do sistema fazem com que os mesmos continuem a se movimentar por determinada quantidade de tempo. A manobra 3 (Figura 8) representa justamente esse comportamento, especificamente quando o pistão está se movimentando para a direita através de seu movimento inercial. Como o movimento do pistão é para direita, o eixo do gerador acoplado ao pinhão continua a rotacionar.

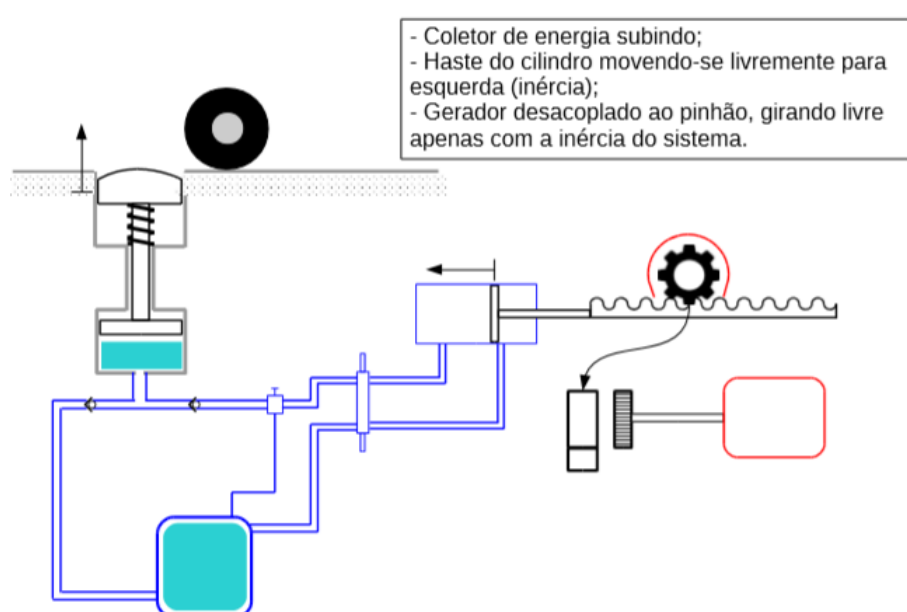
Figura 8 – Representação da Manobra 3 do dispositivo *RPEH* hidráulico.



Fonte: (SHIKI et al., 2018)

- **Manobra 4:** De maneira similar a manobra 3, o veículo não está mais passando sobre a superfície do redutor de velocidade. O redutor então sobe para sua posição inicial por meio da ação da mola de retorno. Nenhuma energia é coletada nessa etapa e os elementos do sistema se movimentam através de sua inércia. Porém, nessa manobra o movimento do pistão é para a esquerda e o gerador não está acoplado ao pinhão. O gerador segue com seu movimento independente até que seja reacoplado para executar novamente a manobra 1. Essa etapa é ilustrada na Figura 9.

Figura 9 – Representação da Manobra 4 do dispositivo *RPEH* hidráulico.



Fonte: (SHIKI et al., 2018)

Deve-se observar que para este sistema apenas a manobra 1 realmente transfere a força do veículo para geração de energia elétrica. Nas demais manobras, quando há ainda indução de tensão elétrica no gerador elétrico, isso ocorre apenas pelo movimento livre de seu eixo ou pelo movimento inercial do pistão para direita (manobra 3). Além disso, o reacoplamento do eixo do gerador com o pinhão ocorre sempre que o pistão do cilindro de dupla ação chegar no início de seu curso.

Na modelagem matemática do coletor de energia proposto por Duarte, Ferreira e Fael (2017), observa-se que este prevê apenas um grau de liberdade para o coletor, a translação vertical.

De modo a simplificar a modelagem, foram consideradas hipóteses que ignoram aspectos complexos do sistema, sem afetar de maneira significativa os resultados matemáticos obtidos (FELÍCIO, 2007).

As hipóteses consideradas durante a modelagem são descritas abaixo:

- Modelo tem parâmetros concentrados (não possui massa, elasticidade e amortecimento distribuído);
- Massas são rígidas e possuem valor constante;
- As molas são puras e lineares, seus coeficientes são constantes e não há perdas de energia nas mesmas;
- Os amortecedores são puros e lineares e seus coeficientes são constantes;
- O diodo que pertence ao circuito do gerador elétrico é ideal (chave aberta ou chave fechada).
- Massas transladam em uma única direção;
- Condições iniciais do sistema são nulas;
- Não há atrito;
- Pneu do veículo está sempre em contato com a estrada;
- Variações das grandezas do sistema são relativamente pequenas.

Em seguida foram aplicadas leis físicas ao modelo do sistema, para obter equações que descrevem o comportamento do mesmo.

Esse modelo (união dos modelos das 4 manobras descritas anteriormente) é responsável por representar a dinâmica de um coletor de energia se movimentando ao entrar em contato com as rodas de um veículo em movimento.

As constantes e dimensões do sistema tem seus valores descritos na Tabela 1. Os valores foram extraídos do trabalho de Duarte, Ferreira e Fael (2017), embora alguns valores tenham sido adaptados para melhor corresponderem a realidade deste tipo de sistema. Esses parâmetros foram utilizados para conduzir as simulações computacionais do modelo. Para comparação entre os dois tipos de sistemas propostos, alguns valores comuns entre eles foram mantidos iguais.

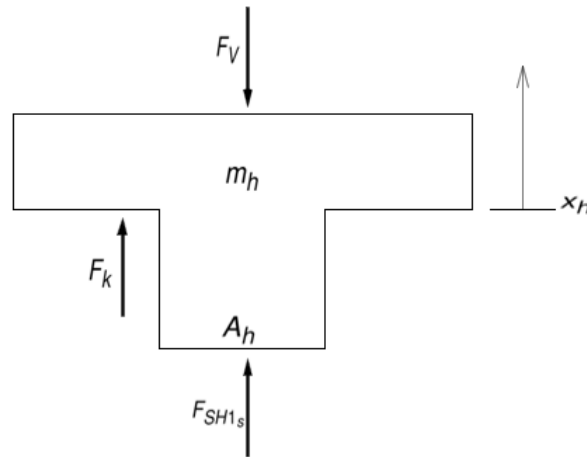
Tabela 1 – Parâmetros da simulação do sistema *RPEH* hidráulico.

Parâmetro	Valor
Massa do coletor de energia m_h [kg]	30
Rigidez do coletor de energia K_h [$\frac{kN}{m}$]	400
Amortecimento do coletor de energia c_h [$\frac{kNs}{m}$]	1
Área do pistão pressurizador do fluido A_h [mm ²]	1600
Comprimento da tubulação (para perda de carga) L [m]	3
Diâmetro da tubulação D [pol]	1
Coefficiente de perda de carga resultante K_{loc}	20.9
Fluido de trabalho Óleo SAE	30
Área do pistão do cilindro de dupla ação A_{cp} [mm ²]	160
Curso total do cilindro de dupla ação [mm]	250
Massa do pistão do cilindro de dupla ação m_{cp} [kg]	2
Raio do pinhão r_p [cm]	10
Momento de inércia do pinhão J_p [kg m ²]	1.2*e-5
Constante do gerador elétrico k_a [$\frac{Nm}{A}$]	0.25
Resistência da armadura do gerador elétrico R_a [Ω]	0.3
Indutância da armadura do gerador elétrico L_a [H]	0.06
Resistência da carga ligada ao gerador elétrico R_L [Ω]	100
Momento de inércia do gerador elétrico J_a [kg m ²]	0.05
Momento de inércia do volante de inércia J_{IW} [kg m ²]	0.0045
Momento de inércia do eixo rotativo J_{sh} [kg m ²]	5.0*e-5

3.1.1 RPEH DS (Movimento para baixo)

Como visto na Figura 4, *RPEHDS* é a superfície móvel do dispositivo, capaz de coletar parte da energia cinética do veículo. Aplicando a 2^o lei de Newton no Diagrama de Corpo Livre (*DCL*) do redutor de velocidade *RPEHDS* (Figura 10), de massa m_h , chega-se na equação 1, considerando que a força peso do *RPEHDS* é cancelada com a força de restauração elástica da mola (portanto essas forças não são mostradas nas equações). A variável x_h é o deslocamento vertical de *RPEHDS*, que também é perpendicular a superfície do pavimento.

Figura 10 – DCL do RPEHDS durante a manobra 1



Fonte: Próprio Autor

$$F_{k_h} + F_{SH1_s} - F_V = m_h \ddot{x}_h \quad (1)$$

As forças que atuam em *RPEHDS* e aparecem na equação 1 são F_{K_h} , F_{SH1_s} e F_V , e são respectivamente a força da mola de retorno, força de reação do circuito hidráulico 1 e força aplicada pelo pneu do veículo na superfície do redutor de velocidade. A equação 2 abaixo descreve a relação da força da mola de retorno, de constante de rigidez K_h , com o deslocamento x_h .

$$F_k = -K_h x_h \quad (2)$$

Substituindo a equação 2 na equação 1, e isolando F_{SH1_s} , obteve-se a seguinte expressão a seguir, que será utilizada para realizar a interface de *RPEHDS* com o circuito hidráulico 1. Nessa equação F_{SH1_s} é calculado em função da força de entrada F_V , do deslocamento (x_h) e aceleração \ddot{x}_h do redutor.

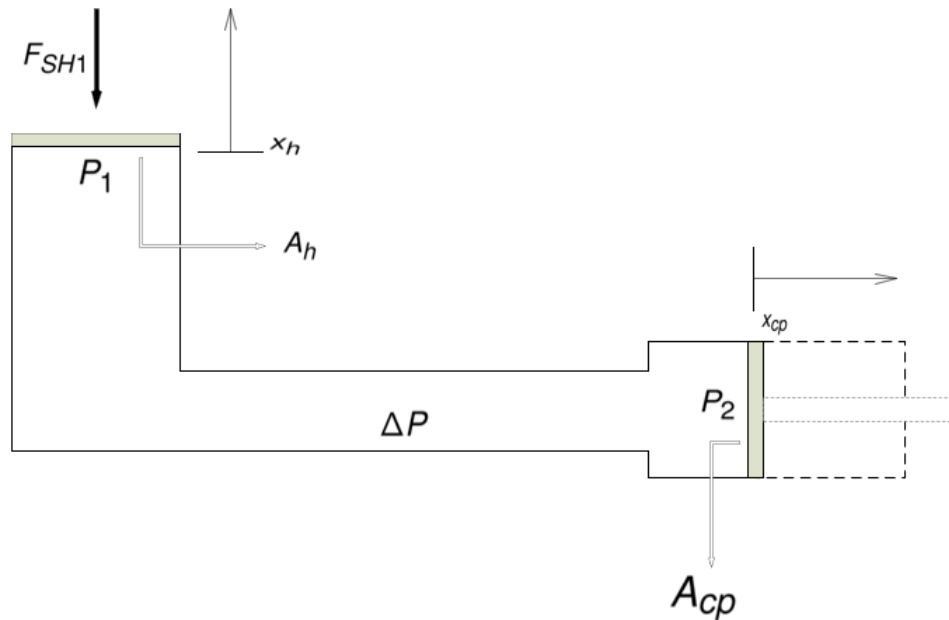
$$F_{SH1_s} = m_h \ddot{x}_h + F_V + K_h x_h \quad (3)$$

3.1.2 CIRCUITO HIDRÁULICO 1

O circuito hidráulico 1 modela o comportamento dos componentes do sistema hidráulico (Válvula de retenção, tubulação (*TUB*), válvula de pressão (*PV*), válvula de controle (*CV*) e mangueira) que estão no caminho do fluido (*RPEHDS* até o cilindro de dupla ação (*DAC*)), através da queda de pressão total (ΔP) que esses componentes causam. Todas as pressões são manométricas e medidas em relação a pressão do

reservatório. A Figura 11 representa esquematicamente o circuito hidráulico 1 durante a realização da manobra 1, da qual foram extraídas as equações 4 a 10.

Figura 11 – Esquemático do circuito hidráulico 1 durante a manobra 1



Fonte: Próprio Autor

$$P_1 = \frac{F_{SH1}}{A_h} \quad (4)$$

$$P_1 - P_2 = \Delta P \quad (5)$$

$$P_2 = \frac{F_{SH1}}{A_h} - \Delta P \quad (6)$$

A pressão P_1 é a pressão no início do circuito hidráulico 1 e é calculada na equação 4 por meio da razão da força F_{SH1_s} e da área A_h de *RPEHDS*, que é área do redutor que faz contato com o fluido durante o escoamento do mesmo. Já a pressão P_2 é a pressão no final do circuito hidráulico 1 (equação 6) e pode ser relacionada com a pressão P_1 e a queda de pressão ΔP conforme visto na equação 5. Essa queda de pressão ΔP , também chamada de perda de carga hidráulica, causa perda de energia no sistema e pode ser também equacionada considerando a perda de carga distribuída ao longo das tubulações e as perdas localizadas nos componentes do circuito hidráulico (válvulas, cotovelos, entre outros), como visto na equação 7 (PARR, 2011).

Os parâmetros ρ , μ , D , L e K_{loc} são respectivamente a densidade do fluido $[\frac{kg}{m^3}]$, viscosidade dinâmica do fluido $[\frac{m^2}{s}]$, diâmetro da tubulação $[m]$, comprimento da tubulação $[m]$ e coeficiente de perdas localizadas relativo à todos os acessórios hidráulicos presentes na tubulação. Já a variável V é a velocidade de escoamento do fluido na tubulação $[\frac{m}{s}]$.

Dentre as perdas de energia que ocorrem nesse sistema (perdas mecânicas e elétricas) a perda de carga hidráulica é a menos significativa (SHIKI et al., 2018). No entanto, a mesma ainda foi considerada para se contabilizar seu efeito no modelo.

$$\Delta P = \frac{32\mu L}{D^2}V + \frac{K_{loc}\rho}{2}V^2 \quad (7)$$

O volume de fluido deslocado pelo coletor *RPEHDS* (V_h) é o mesmo que o volume deslocado pelo pistão (V_{cp}), conforme visto na equação 8). Esse fato decorre da incompressibilidade do fluido de trabalho utilizado e permite que se obtenha as relações mostradas nas equações 8, 9 e 10.

A equação 8 é o ponto de partida para estabelecer a relação entre o redutor de velocidade e o pistão. Nas equações 9 e 10 é visto que o deslocamento x_h do redutor e o deslocamento x_{cp} do pistão se relacionam através das áreas A_h e A_{cp} , onde a área A_{cp} é a área do lado esquerdo do pistão que faz contato com o fluido. A_{cp} e x_{cp} podem ser vistos na Figura 12.

$$V_h = V_{cp} \quad (8)$$

$$|A_h x_h| = |A_{cp} x_{cp}| \quad (9)$$

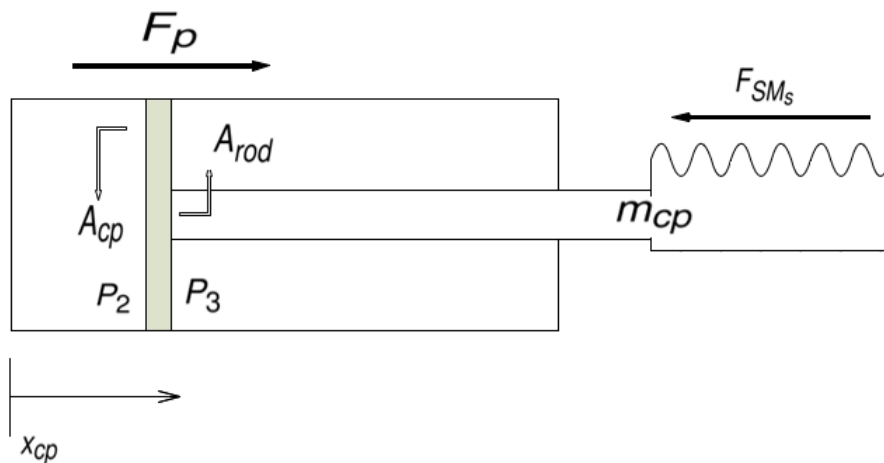
$$x_{cp} = -\frac{A_h}{A_{cp}} x_h \quad (10)$$

3.1.3 PISTÃO DAC E CREMALHEIRA (Movimento para direita)

Quando o *RPEHDS* se move para baixo, transmitindo a força do pneu do veículo para o sistema hidráulico e amplificando a força que agirá sobre o pistão, o mesmo avança. A força aplicada no pistão (F_p) é calculada como sendo a diferença entre as forças aplicadas no lado esquerdo e do lado direito do pistão (equação 11), que dependem das pressões e das áreas em cada lado, P_2 e A_{cp} no lado esquerdo e

P_3 e A_{rod} no lado direito. A haste do pistão está ligada a uma cremalheira, que transforma o movimento linear da haste em movimento circular, por meio de um pinhão. Aplicando a 2ª lei de Newton no conjunto pistão/cremalheira, de massa m_{cp} , chega-se na equação 12, que é extraída do esquemático da Figura 12, que representa o conjunto pistão DAC e a cremalheira durante a manobra 1. A força F_{SM_s} é força de reação do pinhão no conjunto pistão/cremalheira.

Figura 12 – Esquemático do conjunto pistão/cremalheira durante a manobra 1.



Fonte: Próprio Autor

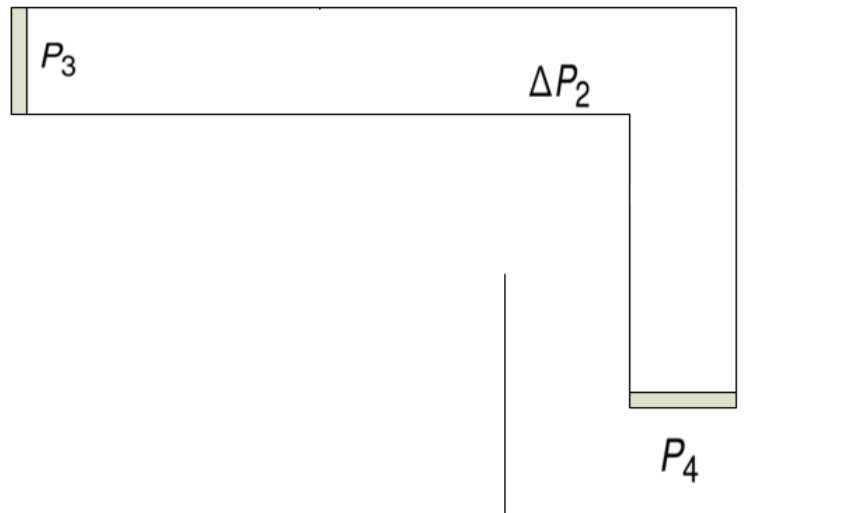
$$F_p = P_2 A_{cp} - P_3 A_{rod} \quad (11)$$

$$F_p - F_{SM_s} = m_{cp} \ddot{x}_{cp} \quad (12)$$

3.1.4 CIRCUITO HIDRÁULICO 2

Circuito hidráulico 2 é o nome dado ao caminho que o fluido percorre desde o pistão até o reservatório. Uma queda de pressão no fluido é causada devido aos componentes (válvula de controle, tubulação e mangueira) encontrados durante seu percurso. O esquemático da Figura 13 representa o circuito hidráulico 2 durante a manobra 1, que causa uma queda de pressão ΔP_2 (equação 13) no sistema. A pressão P_3 é a pressão no início do circuito hidráulico 2 (ou a pressão no lado direito do pistão, durante a manobra 1), enquanto a pressão P_4 é a pressão no final desse circuito, onde está localizado o reservatório. Isso significa que a $P_4 = 0$, já que essa pressão é aferida em relação a pressão do reservatório. Logo a pressão P_3 só depende da queda de pressão no circuito hidráulico 2, como mostrado na equação 14.

Figura 13 – Esquemático do circuito hidráulico 2 durante a manobra 1



Fonte: Próprio Autor

$$\Delta P_2 = P_3 - P_4 \quad (13)$$

$$P_3 = \Delta P_2 \quad (14)$$

De maneira análoga ao cálculo da perda de carga ΔP , a queda de pressão ΔP_2 também é calculada, conforme observado na equação 15. Essa queda de pressão causa perda de energia no sistema e depende dos parâmetros do circuito hidráulico, das características do fluido e de sua velocidade de escoamento.

$$\Delta P_2 = \frac{32\mu L}{D^2} V + \frac{K_{loc}\rho}{2} V^2 \quad (15)$$

3.1.5 EIXO DO GERADOR ELÉTRICO (Pinhão no sentido anti-horário)

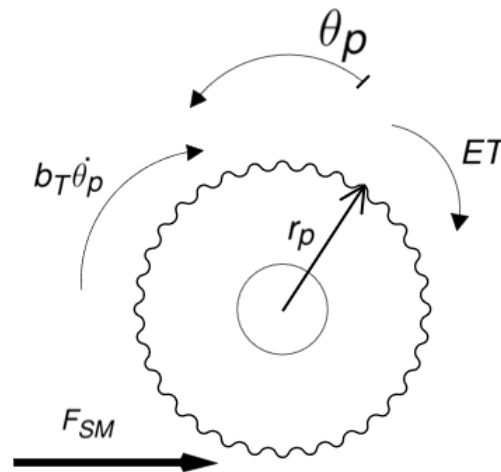
Pinhão é o elemento do sistema que junto com a cremalheira converte o movimento linear da haste do pistão em movimento rotativo. Ele está acoplado no mesmo eixo da roda de inércia IW e do gerador de corrente contínua (DC , do inglês direct current), e gira no sentido anti-horário e horário. Como o gerador modelado é de corrente contínua, seu eixo só deve girar em um sentido (sentido anti-horário no movimento de avanço do pistão). No sentido horário (movimento de retorno do pistão) o pinhão será

desacoplado do eixo do gerador por meio de um sistema de embreagens, fazendo com que ele não gire o eixo do gerador nesse sentido.

Aplicando no eixo do gerador a 2º lei de Newton para rotações, encontra-se a equação 19, onde F_{SM} é a força que o conjunto pistão/cremalheira exerce sobre o pinhão de raio r_p , $b_T \dot{\theta}_p$ é o torque total de amortecimento no eixo, ET é o torque elétrico oposto ao movimento do eixo do gerador e $J_T \ddot{\theta}_p$ é o torque resultante de inércia no eixo, com momento de inércia total J_T (equação 17). O deslocamento angular θ_p do pinhão, ou do eixo do gerador (já que é o mesmo deslocamento), é definido como positivo no sentido anti-horário. O *DCL* da Figura 14 ilustra o que foi dito até aqui.

A constante de amortecimento b_T é a soma dos amortecimentos b_p e b_{gen} , que são as constantes de amortecimento do pinhão e do gerador elétrico respectivamente. Já J_T é a soma dos momentos de inércia do pinhão (J_p), eixo (J_{sh}), roda de inércia (J_{IW}) e gerador (J_{gen}), enquanto ET (equação 18) é calculado pelo produto da constante do gerador k_a pela corrente de carga i .

Figura 14 – *DCL* do pinhão durante a Manobra 1.



Fonte: Próprio Autor

$$b_T = b_p + b_{gen} \quad (16)$$

$$J_T = J_p + J_{sh} + J_{IW} + J_{gen} \quad (17)$$

$$ET = k_a i \quad (18)$$

$$F_{SM}r_p - ET - b_T\dot{\theta}_p = J_T\ddot{\theta}_p \quad (19)$$

Isolando F_{SM} e substituindo o valor de ET (equação 18) e J_T (equação 17), obteve-se a equação 20, que deixa F_{SM} escrito em função da aceleração no eixo do gerador ($\ddot{\theta}_p$), velocidade angular no eixo do gerador ($\dot{\theta}_p$) e corrente elétrica i . Essa equação será importante para descrever a interação que ocorre entre o conjunto pistão/cremalheira e o pinhão.

$$F_{SM} = \frac{(J_p + J_{sh} + J_{IW} + J_{gen})\ddot{\theta}_p + k_a i + b_T\dot{\theta}_p}{r_p} \quad (20)$$

3.1.6 GERADOR ELÉTRICO

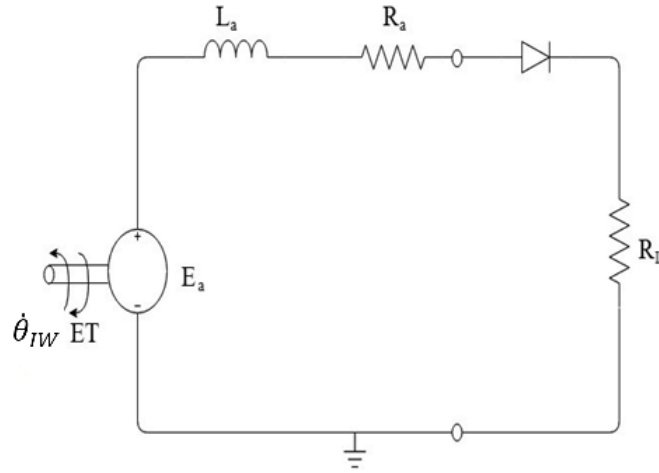
A energia entregue pela parte mecânica do sistema é convertida em energia elétrica através do uso de um gerador eletromagnético *DC* de imã permanente. Esse gerador está conectado a uma carga de resistência R_L por meio de um diodo, como visto no circuito elétrico da Figura 15, que representa a parte elétrica do dispositivo *RPEH* hidráulico.

O torque resultante no eixo do gerador *DC* faz o mesmo girar com velocidade angular $\dot{\theta}_{IW}$ (equação 21), induzindo uma tensão E_a em sua armadura (equação 22). Como já foi visto, ET (equação 18) é o torque elétrico que se opõe ao movimento do rotor do gerador, quando a carga R_L drena a corrente elétrica i .

Os parâmetros do gerador são sua constante característica k_a , resistência de armadura R_a e indutância de armadura L_a . Já o diodo do circuito é considerado ideal (chave aberta ou chave fechada), pois consome pouquíssima energia. Ele exerce a função de proteger o gerador e a carga, impedindo a passagem de corrente reversa em ambos (já que mantêm o sentido unidirecional da corrente), além de estabelecer uma tensão regulada na saída.

O modelo dinâmico que dita o comportamento do circuito elétrico da Figura 15 é obtido aplicando-se a Lei de Kirchhoff das tensões no mesmo, que resulta na equação 23. Com a substituição da equação 21 em 22, e essa em 23 chega-se na equação 24, que é a equação diferencial nas variáveis x_h e i que modela a parte elétrica do sistema.

Figura 15 – Circuito elétrico do Gerador do sistema RPEH hidráulico



Fonte: Próprio Autor

$$\dot{\theta}_{IW} = \dot{\theta}_p = \frac{A_h}{A_{cp}r_p} \dot{x}_h \quad (21)$$

$$E_a = k_a \dot{\theta}_{IW} \quad (22)$$

$$E_a - L_a \frac{di}{dt} - R_a i - R_L i = 0 \quad (23)$$

$$k_a \frac{A_h}{A_{cp}r_p} \dot{x}_h - L_a \frac{di}{dt} - (R_a + R_L) i = 0 \quad (24)$$

3.1.7 INTERAÇÃO ENTRE OS COMPONENTES DO SISTEMA RPEH HIDRÁULICO (Movimento do pistão para direita)

Utilizando a equação 12, e substituindo nela as equações 11, 6 e 14, isola-se F_{SM_s} , obtendo assim a equação 25.

$$F_{SM_s} = \left(\frac{F_{SH1}}{A_h} - \Delta P \right) A_{cp} - \Delta P_2 A_{rod} - m_{cp} \ddot{x}_{cp} \quad (25)$$

Por meio da aplicação da 3º lei de Newton chega-se nas relações mostradas nas equações 26 e 27.

$$F_{SM} = F_{SM_s} \quad (26)$$

$$F_{SH1} = F_{SH1_s} \quad (27)$$

Assim, igualando as equações 20 e 25, e fazendo a substituição de F_{SH1} por F_{SH1s} da equação 3, chega-se na equação 28 .

$$\frac{J_T + k_a i + b_T \dot{\theta}_p}{r_p} = \left(\frac{m_h \ddot{x}_h + K_h x_h}{A_h} - \Delta P \right) - \Delta P_2 A_{rod} - m_{cp} \ddot{x}_{cp} \quad (28)$$

Usando as relações das equações 29 a 33 e fazendo a substituição das equações 30, 32 e 33 em 28 é obtida a equação 34, que é uma equação diferencial nas variáveis x_h e i .

$$x_{cp} = -\frac{A_h}{A_{cp}} x_h \quad (29)$$

$$\ddot{x}_{cp} = -\frac{A_h}{A_{cp}} \ddot{x}_h \quad (30)$$

$$x_{cp} = \theta_p r_p \quad (31)$$

$$\dot{\theta}_p = \frac{\dot{x}_{cp}}{r_p} = -\frac{A_h}{A_{cp} r_p} \dot{x}_h \quad (32)$$

$$\ddot{\theta}_p = \frac{\ddot{x}_{cp}}{r_p} = -\frac{A_h}{A_{cp} r_p} \ddot{x}_h \quad (33)$$

$$\begin{aligned} \frac{-J_T \left(\frac{A_h}{A_{cp} r_p} \ddot{x}_h \right) + k_a i - b_T \left(\frac{A_h}{A_{cp} r_p} \dot{x}_h \right)}{r_p} = & \left(\frac{(m_h \ddot{x}_h + F_V + K_h x_h)}{A_h} - \Delta P \right) A_{cp} \dots \\ & \dots - \Delta P_2 A_{rod} + m_{cp} \left(\frac{A_h}{A_{cp}} \ddot{x}_h \right) \end{aligned} \quad (34)$$

Simplificando a equação 34 e rearranjando os termos, obteve-se a equação 35, que com a equação do gerador *DC* (equação 24) formam um sistema de duas equações e duas incógnitas, com entrada F_V (equação 36). Após obter a solução do sistema, encontrando x_h e i , as outras variáveis ficam também determinadas pelas relações citadas anteriormente.

$$\begin{aligned} \left(\frac{J_T A_h}{A_{cp} r_p^2} + \frac{A_{cp} m_h}{A_h} + \frac{A_h m_{cp}}{A_{cp}} \right) \ddot{x}_h + \left(\frac{b_T A_h}{A_{cp} r_p^2} \right) \dot{x}_h + \left(\frac{K_h A_{cp}}{A_h} \right) x_h - \frac{k_a i}{r_p} = \dots \\ \dots - \frac{A_{cp}}{A_h} F_V + \Delta P A_{cp} + \Delta P_2 A_{rod} \end{aligned} \quad (35)$$

$$\begin{cases} \left(\frac{J_T A_h}{A_{cp} r_p^2} + \frac{A_{cp} m_h}{A_h} + \frac{A_h m_{cp}}{A_{cp}} \right) \ddot{x}_h + \left(\frac{b_T A_h}{A_{cp} r_p^2} \right) \dot{x}_h + \left(\frac{K_h A_{cp}}{A_h} \right) x_h - \frac{k_a i}{r_p} = \dots \\ \dots - \frac{A_{cp}}{A_h} F_V + \Delta P A_{cp} + \Delta P_2 A_{rod} \\ \frac{k_a A_h}{A_{cp} r_p} \dot{x}_h - L_a \frac{di}{dt} + (R_a + R_L) i = 0 \end{cases} \quad (36)$$

$$\text{Condições iniciais: } \begin{cases} x_h(0) = 0 \\ \dot{x}_h(0) = 0 \\ i(0) = 0 \end{cases} \quad (37)$$

$$\text{Condições iniciais: } \begin{cases} x_h = x_h(t_2) \\ \dot{x}_h = \dot{x}_h(t_2) \\ i = i(t_2) \end{cases} \quad (38)$$

$$\text{Condições iniciais: } \begin{cases} x_h = x_h(t_d) \\ \dot{x}_h = \dot{x}_h(t_d) \\ i = i(t_d) \end{cases} \quad (39)$$

As condições iniciais do modelo (equação 36) são as equações 37 para $t = 0$, 38 para o caso em que ocorre a condição no qual $t = t_2$ e 39 para o caso em que ocorre a condição no qual $t = t_d$.

3.1.8 Movimento livre do gerador/ Movimento do pistão para esquerda/ Retorno do *RPEH DS* para cima

Um sistema de duas equações diferenciais de duas incógnitas (x_h e i) com entrada F_V (equação 36) descreve o comportamento do dispositivo *RPEH* quando o pistão move-se para direita, com o disco de inércia *IW* acoplado ao pinhão. Quando o deslocamento do pistão é máximo (valor máximo de x_{cp}) o disco de inércia *IW* se desacopla do pinhão, fazendo com que o eixo do gerador gire livremente. Simultaneamente ao desacoplamento também é realizada a mudança de posição da válvula *CV* (da posição 1 para a posição 2), responsável por mudar o sentido de deslocamento do pinhão.

As equações que representam o comportamento do movimento livre do disco de inércia e do gerador são vista a seguir. A equação 40 é obtida aplicando a 2ª lei de Newton para rotações no eixo do gerador (de momento de inércia J_{sh}), que tem conectado a ele o disco de inércia *IW* (de momento de inércia J_{IW}) e o rotor do gerador (de momento de inércia), que juntos estabelecem um momento de inércia J_{T2} ao conjunto, calculado pela equação 41.

$$b_{gen}\dot{\theta}_{IW} + k_a i - J_{T2}\ddot{\theta}_{IW} = 0 \quad (40)$$

$$J_{T2} = J_{sh} + J_{IW} + J_{gen} \quad (41)$$

$$k_a\dot{\theta}_{IW} - L_a\frac{di}{dt} - (R_a + R_L)i = 0 \quad (42)$$

$$\begin{cases} b_{gen}\dot{\theta}_{IW} + k_a i - J_{T2}\ddot{\theta}_{IW} = 0 \\ k_a\dot{\theta}_{IW} - L_a\frac{di}{dt} - (R_a + R_L)i = 0 \end{cases} \quad (43)$$

$$\dot{\theta}_{IW} = \dot{\theta}_{IW}(t_1) = -\frac{A_h}{A_{cp}r_p}\dot{x}_h(t_1) \quad (44)$$

$$\theta_{IW} = \theta_{IW}(t_1) = -\frac{A_h}{A_{cp}r_p}x_h(t_1) \quad (45)$$

A partir do instante t_1 deve-se realizar um testes para saber se o *RPEHDS* começa a retornar a posição de equilíbrio ou se continua descendo (até o valor máximo de x_h), e conseqüentemente empurrando o pistão para esquerda (a válvula *CV* foi para posição 2 em t_1). Esses testes consistem em realizar a comparação do sinal de \dot{x}_h . Se $\dot{x}_h < 0$ for verdadeiro (para $t_1 < t < t_2$, com t_2 sendo o tempo em que x_{cp} é mínimo e a válvula *CV* muda para posição 1) significa que o *RPEHDS* está descendo e portanto o pistão se move para esquerda, caso contrário ($\dot{x}_h \geq 0$) *RPEHDS* começa a retornar a posição de equilíbrio pela força da mola, ou fica parado, até que $\dot{x}_h < 0$ novamente.

O modelo que governa o movimento do pistão para esquerda (equação 46) foi obtido de maneira análoga ao que descreve o movimento do pistão para direita, porém agora o disco de inércia *IW* e o gerador estão desacoplados do pinhão, além de que a pressão proveniente do *RPEHDS* agora é aplicada ao lado direito do pistão, devido a mudança de posição da válvula *CV*. Nessa equação a variável ΔP representa a queda de pressão no fluido causada pelos componentes entre *RPEHDS* e o lado direito do pistão, e ΔP_2 representa a queda de pressão no fluido causada pelos elementos que estão entre o lado esquerdo do pistão e o reservatório. As condições iniciais do modelo são provenientes de uma das equações, dependendo do comportamento do *RPEHDS*, dado pelos testes no sinal de x_h , como citado acima.

Quando o pistão chega no fim de curso (valor mínimo de x_{cp}) a válvula de controle (*CV*) muda de posição novamente (para posição 1), direcionando o fluido para esquerda do pistão, fazendo com que ele se desloque para direita (equação 36) caso $\dot{x}_h < 0$ novamente, ou faça o *RPEHDS* retornar a sua posição de equilíbrio caso $\dot{x}_h \geq 0$

No instante t_2 deve ocorrer o acoplamento disco de inércia ao pinhão através sistema de embreagem, para que quando o *RPEHDS* abaixar novamente o disco de inércia *IW* receba torque. Porém caso o disco de inércia *IW* esteja girando e o *RPEHDS* estiver parado ou subindo, o acoplamento deve ser evitado para que não aumente a inércia do eixo do gerador (com a inclusão do pinhão e os outros elementos

do *RPEH*) e o conjunto pistão/cremalheira não se movimenta apenas pelo disco de inércia *IW*.

Logo o acoplamento deve ser feito apenas se a válvula de controle estiver na posição 1 (instante t_2) e $\dot{x}_h < 0$ (*RPEH DS* descendo). Caso outros carros passem pelo *RPEHDS* o ciclo descrito acima se repete.

$$\left(\frac{A_{rod}m_h}{A_h} + \left(m_{cp} + \frac{J_p}{r_p^2}\right)\frac{A_h}{A_{rod}}\right)\ddot{x}_h + \frac{K_h A_{rod}}{A_h}x_h = \Delta P A_{rod} + \Delta P_2 A_{cp} - \frac{A_{rod}}{A_h}F_V \quad (46)$$

$$\text{Condições iniciais: } \begin{cases} x_h = x_h(t_1) \\ \dot{x}_h = \dot{x}_h(t_1) \end{cases} \quad (47)$$

$$\text{Condições iniciais: } \begin{cases} x_h = x_h(t_c) \\ \dot{x}_h = \dot{x}_h(t_c) \end{cases} \quad (48)$$

As condições iniciais do modelo (equação 46) são as equações 47 para o caso em que ocorre a condição no qual $t = t_1$ e 48 para o caso em que ocorre a condição no qual $t = t_c$.

$$m_h\ddot{x}_h + K_h x_h = -F_V \quad (49)$$

$$\text{Condições iniciais: } \begin{cases} x_h = x_h(t_a) \\ \dot{x}_h = \dot{x}_h(t_a) \end{cases} \quad (50)$$

$$\text{Condições iniciais: } \begin{cases} x_h = x_h(t_b) \\ \dot{x}_h = \dot{x}_h(t_b) \end{cases} \quad (51)$$

As condições iniciais do modelo (equação 49) são as equações 50 para o caso em que ocorre a condição no qual $t = t_a$ e 51 para o caso em que ocorre a condição no qual $t = t_b$.

Os modelos das manobras 3 e 4, que descrevem o funcionamento do dispositivo quando não há transmissão de força hidráulica pelo coletor, são obtidos de maneiras similares a análise das manobras 1 e 2 respectivamente. O que muda nessa análise é a ausência das forças F_V (Força de entrada) e força F_{SH1} e das relações entre o deslocamento do coletor e do pistão, que estão operando de maneira independente e isolada através de sua inércia própria, que depende somente das condições iniciais do início da manobra. Essa análise não é desenvolvida aqui mas está implementada no MATLAB/SIMULINK. O diagrama de blocos do SIMULINK das manobra 1 a 4, como os demais códigos do MATLAB necessários para a simulação do dispositivo *RPEH* hidráulico podem ser encontrados no apêndice A.

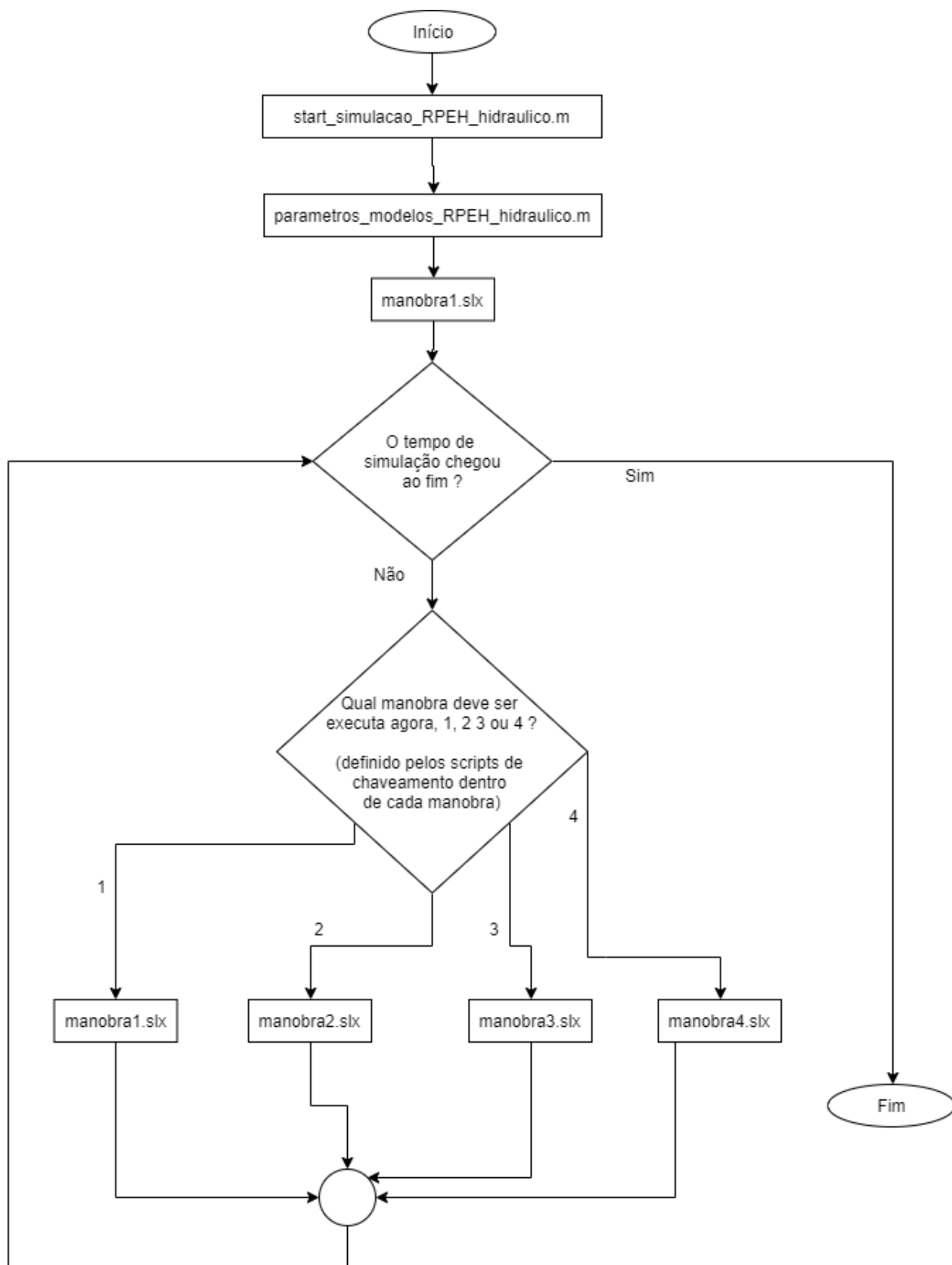
3.1.9 Modelo computacional

O modelo computacional do dispositivo *RPEH* hidráulico foi implementado no software MATLAB/SIMULINK. Os scripts e diagramas de blocos produzidos são encontrados no apêndice A. Esses arquivos são responsáveis pela simulação completa do dispositivo.

Cada arquivo utilizado no modelo computacional é descrito abaixo e sua ordem de execução segue o fluxograma visto na Figura 16.

- `start_simulacao_RPEH_hidraulico.m`: Esse arquivo é o primeiro a ser executado. Ele inicializa os parâmetros do modelo e da simulação e inicia a execução do arquivo “`manobra1.slx`”. A partir desse momento o fluxo do programa depende da simulação e condições de transição encontradas nos códigos de “`chaveamento_manobraX.m`”, que pode executar qualquer um dos arquivos “`manobraX.slx`” (X de 1 a 4);
- `parametros_modelos_RPEH_hidraulico.m`: Esse arquivo contém os parâmetros e valores iniciais utilizados pelos arquivos “.slx”, que implementam as manobras realizadas pelo dispositivo *RPEH* hidráulico;
- `manobraX.slx`: Esses arquivos são os modelos computacionais de cada uma das 4 manobras realizadas pelo dispositivo *RPEH* hidráulico (X de 1 a 4);
- `chaveamento_manobraX.m`: Esses arquivos são executados internamente pelos seus respectivos diagramas de blocos “`manobraX.slx`” e são responsáveis por parar suas simulações, com base nas condições que determinam quando deve ocorrer a transição entre as manobras (X de 1 a 4).

Figura 16 – Fluxograma da simulação do modelo computacional do dispositivo RPEH hidráulico.

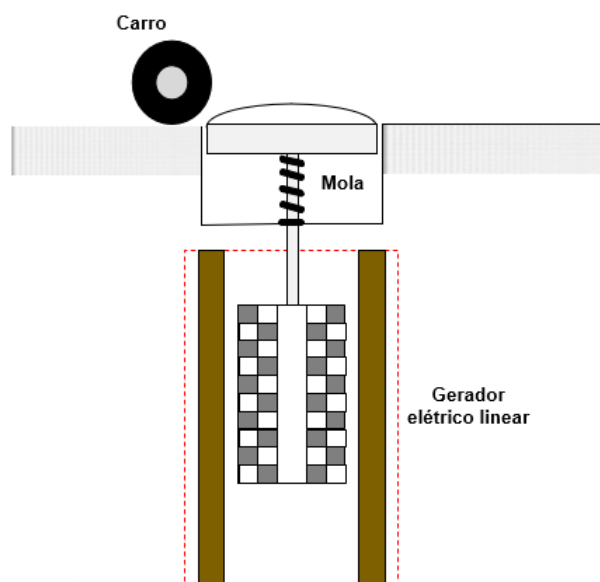


Fonte: Próprio Autor

3.2 Sistema RPEH Eletromecânico

O Sistema Coletor de Energia de Estradas Pavimentadas eletromecânico e com gerador eletromagnético linear (RPEH eletromecânico) é descrito nesse momento. Esse sistema difere em alguns aspectos do sistema apresentado por Duarte, Ferreira e Fael (2017), que foi abordado em 3.1. Agora o redutor de velocidade (*RPEHDS*) movimenta uma haste que também é o eixo do gerador eletromagnético linear. Uma mola de constante de rigidez (K_h) ainda permanece acoplada à haste para que o redutor de velocidade retorne à sua posição original após a passagem do veículo. Um amortecedor de constante de amortecimento (B_e) está conectado no redutor *RPEHDS*, produzindo o efeito de diminuir a amplitude de possíveis oscilações, e representa de maneira concentrada a dissipação de energia que ocorre no sistema. O gerador eletromagnético linear produz energia elétrica para uma carga *RL* conforme ocorre a movimentação da haste (que está conectada a um conjunto de ímãs permanentes) dentro do estator (conjunto de cabos condutores que envolvem os ímãs permanentes). A Figura 4 mostra o esquemático desse sistema, que é baseado nos trabalhos de Thorburn e Leijon (2007) e Duarte e Ferreira (2016).

Figura 17 – *DCL* do pinhão durante a Manobra 1.



Fonte: Próprio Autor

Observa-se que em relação ao sistema proposto por Duarte, Ferreira e Fael (2017), o sistema RPEH eletromecânico é composto por menos elementos em sua estrutura, o que facilita sua construção e diminui sua complexidade.

Como o eixo do gerador linear está conectado a haste do redutor, todo o movimento realizado pela haste é aproveitado para gerar energia elétrica, ao contrário do sistema baseado em transmissão hidráulica, que usa fluido pressurizado para girar o

eixo do gerador elétrico em apenas um sentido. Por esse motivo a tensão/corrente no gerador linear pode assumir valores positivos ou negativos.

Desenvolveu-se um modelo analítico capaz de representar o dispositivo. O gerador eletromagnético linear é representado analiticamente como verificado no trabalho de Thorburn e Leijon (2007), que descreve uma abordagem analítica para a análise de um gerador eletromagnético linear, ao invés da abordagem do método dos elementos finitos, que apesar de apresentar um modelo mais realista, é um método complexo e que exige o uso de softwares específicos para modelagem.

As hipóteses da modelagem matemática desse sistema são vistas abaixo:

- Modelo tem parâmetros concentrados (não possui massa, elasticidade e amortecimento distribuído);
- Massas são rígidas e possuem valor constante;
- As molas são puras e lineares, seus coeficientes são constantes e não há perdas de energia nas mesmas;
- Os amortecedores são puros e lineares e seus coeficientes são constantes;
- Massas transladam em uma única direção;
- Condições iniciais do sistema são nulas;
- Pneu do veículo está sempre em contato com a estrada;
- Variações das grandezas do sistema são relativamente pequenas.
- O fluxo magnético no gerador eletromagnético linear é senoidal.
- O gerador eletromagnético linear é ideal.

Os valores dos parâmetros utilizados para esse dispositivo são apresentados na Tabela 2. Os valores são provenientes dos trabalhos de Duarte, Ferreira e Fael (2017) e Thorburn e Leijon (2007), embora alguns deles tiveram que ser adaptados para melhor corresponderem a realidade deste tipo de sistema. Esses parâmetros foram utilizados para conduzir as simulações computacionais do modelo. Os dois tipos de sistemas propostos possuem parâmetros em comum, para efeito de comparação.

3.2.1 Modelo Matemático do sistema

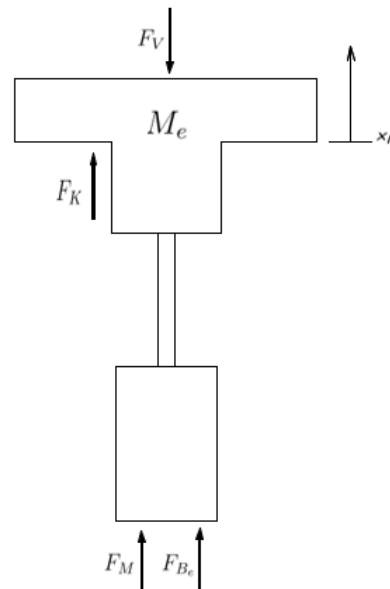
A Figura 18 exibe o Diagrama de Corpo Livre (*DCL*) do conjunto formado pelo coletor, haste (eixo do gerador) e ímãs permanentes, que é a parte móvel do sistema.

Tabela 2 – Parâmetros da simulação do sistema *RPEH* eletromecânico.

Parâmetro	Valor
Massa do conjunto (coletor, haste e conjunto móvel de ímãs permanentes) m_h [kg]	50
Rigidez do coletor de energia K_h [$\frac{kN}{m}$]	400
Amortecimento do sistema coletor de energia B_e [$\frac{kNs}{m}$]	2
Resistência da carga ligada ao gerador elétrico linear R_L [Ω]	100
Largura de um par de polos w_p [m]	0.1
Campo magnético em um tooth B_t [T]	1.55
Largura de um tooth do estator w_t [m]	0.008
Largura do stack do estator d [m]	0.4
Número de polos p	100
Número de slots por polo q [$\frac{slots}{polo}$]	6/5
Número de cabos em um slot c	6

Com a aplicação da 2ª Lei Newton nesse conjunto de massa M_e , obtêm-se a equação 52:

$$-F_V + F_{K_h} + F_M + F_{B_e} - M_e \ddot{x}_h = 0 \quad (52)$$

Figura 18 – *DCL* da massa móvel do sistema *RPEH* eletromecânico.

Fonte: Próprio Autor

A força F_V é a força aplicada pelo veículo no redutor de velocidade *RPEHDS*. Já as forças F_{K_h} (equação 53) e F_{B_e} (equação 54) são as forças da mola e de amortecimento do sistema, respectivamente. A força peso é cancelada com a força de restauração elástica da mola.

$$F_{K_h} = -K_h x_h \quad (53)$$

$$F_{B_e} = -B_e \dot{x}_h \quad (54)$$

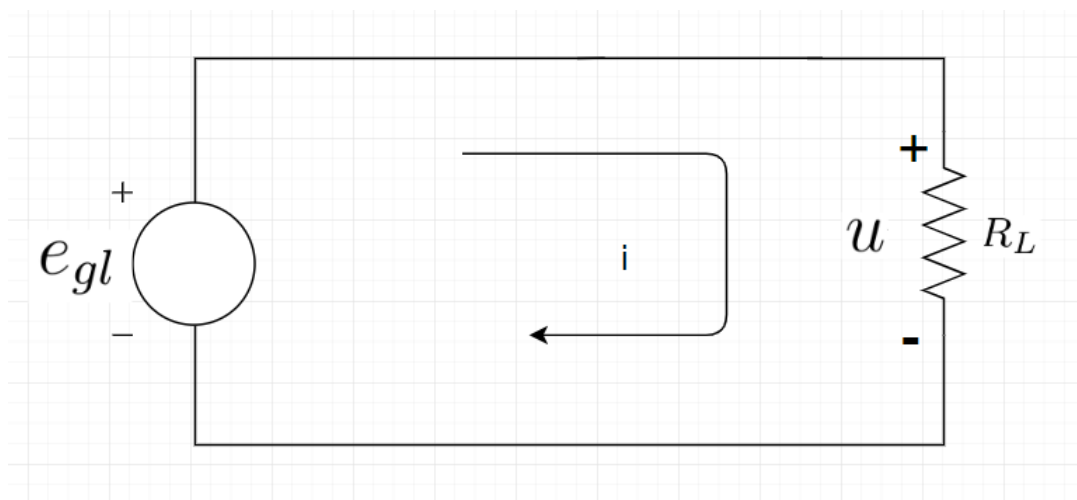
F_M é a força magnética proveniente do gerador linear e se opõe ao movimento de seu eixo conforme a carga R_L consome energia elétrica. Essa força de reação contribui para o amortecimento do redutor de velocidade e é calculada conforme visto na equação 55, onde P_{R_L} , u e i são a potência na carga, tensão na carga respectivamente (ZHENG et al., 2015).

$$F_M = -\frac{P_{R_L}}{\dot{x}_h} = -\frac{ui}{\dot{x}_h} \quad (55)$$

O circuito elétrico mostrado na Figura 19 é a parte elétrica do sistema. A equação que governa seu comportamento é obtida aplicando-se a Lei de Kirchhoff das Tensões em sua malha (equação 56), formada pela conexão do gerador linear com a carga de resistência R_L .

A tensão u sobre a carga é simplesmente a tensão induzida no gerador linear (e_{gl}), como mostrado na equação 57, e de acordo com a Lei de Ohm a corrente i na carga pode ser calculada a partir dela conforme visto na equação 58.

Figura 19 – Parte elétrica do sistema *RPEH* eletromecânico.



Fonte: Próprio Autor

$$e_{gl} - R_L i = 0 \quad (56)$$

$$u = e_{gl} \quad (57)$$

$$i = \frac{u}{R_L} \quad (58)$$

A tensão induzida pelo gerador eletromagnético linear (e_{gl} , equação 61) depende de como o fluxo magnético dos ímãs permanentes varia dentro dos enrolamentos do estator. Considerando que a variação do fluxo é senoidal, pode-se expressá-lo pela senoide da equação 59, que depende da posição da haste x_h e do parâmetro w_p do gerador linear, que é a largura de um par de polos (distância do polo norte de um ímã a outro). Já os parâmetros, B_t , w_t , d , p , q e c determinam o fluxo magnético máximo ϕ_t (equação 60) e são denominados como campo magnético em um tooth, largura de um tooth do estator, largura do stack do estator, número de polos, número de slots por polo e número de cabos em um slot, respectivamente.

$$\phi = \phi_t \cos\left(\frac{2\pi}{w_p} x_h\right) \quad (59)$$

$$\phi_t = B_t w_t d p q c \quad (60)$$

$$e_{gl} = -\frac{d\phi}{dt} = \phi_t \frac{2\pi}{w_p} \dot{x}_h \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi}{w_p} x_h\right) \quad (61)$$

Substituindo a equação 61 (e_{gl}) nas equações 57 (u) e 58 (i) e estas em 55, chega-se na equação 62.

$$F_M = -\frac{1}{R_L} \left(\frac{2\pi}{w_p} \phi_t \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi}{w_p} x_h\right)\right)^2 \dot{x}_h \quad (62)$$

Fazendo a substituição das equações 53 (F_{K_h}), 54 (F_{B_e}) e 62 (F_M) na equação 52, que governa a dinâmica do coletor, chega-se na equação 63.

$$M_e \ddot{x}_h + \left(B_e + \frac{1}{R_L} \left(\frac{2\pi}{w_p} \phi_t \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi}{w_p} x_h\right)\right)^2\right) \dot{x}_h + K_h x_h = -F_V \quad (63)$$

A equação 63 é a equação diferencial na variável x_h e de entrada F_V que modela o dispositivo *RPEH* eletromecânico. Todas as outras variáveis de interesse como u , i e potência gerada ($e_{gl}i$) por exemplo, podem ser expressadas em função da resposta desta equação.

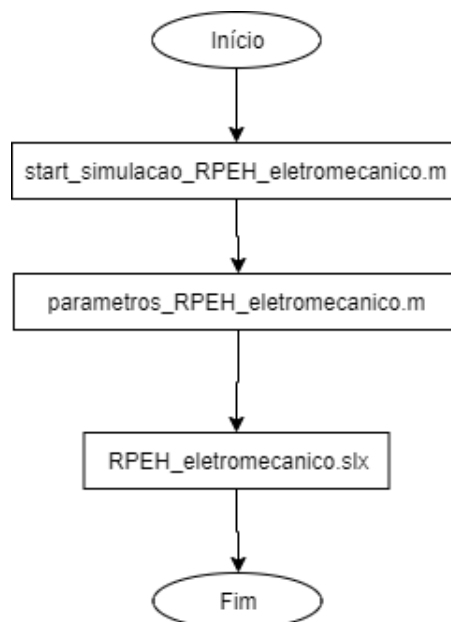
3.2.2 Modelo computacional

O modelo computacional do dispositivo RPEH eletromecânico é implementado no software MATLAB/SIMULINK. Os scripts e diagrama de blocos produzidos são encontrados no apêndice B. Esses arquivos são responsáveis pela simulação completa do dispositivo.

Cada arquivo utilizado no modelo computacional é descrito abaixo e sua ordem de execução segue o fluxograma visto na Figura 20.

- `start_simulacao_RPEH_eletromecanico.m`: Esse arquivo é o primeiro a ser executado. Ele inicializa os parâmetros do modelo e da simulação e inicia a execução do arquivo “`RPEH_eletromecanico.slx`”;
- `parametros_RPEH_eletromecanico.m`: Esse arquivo contém os parâmetros e valores iniciais utilizados pelo arquivo “`RPEH_eletromecanico.slx`”, que implementa modelo matemático do dispositivo RPEH eletromecânico;
- `RPEH_eletromecanico.slx`: Implementa o modelo matemático do dispositivo RPEH eletromecânico no SIMULINK.

Figura 20 – Fluxograma da simulação do modelo computacional do dispositivo *RPEH* eletromecânico.



Fonte: Próprio Autor

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

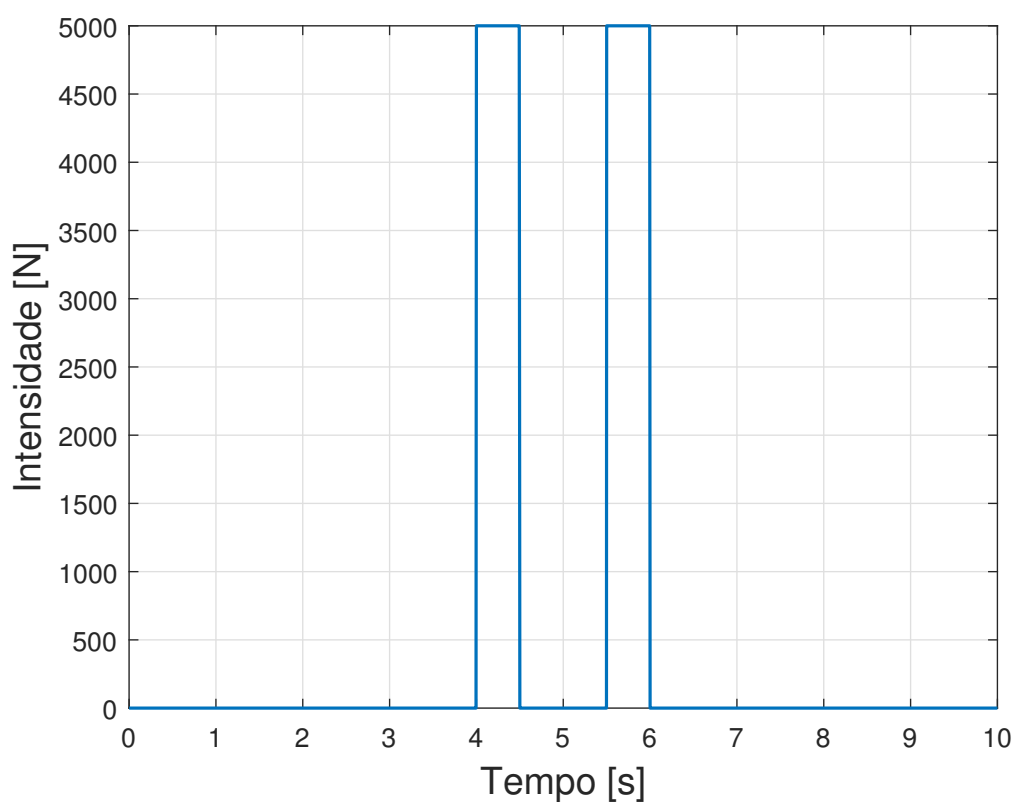
Esta seção da monografia ilustra os principais resultados das simulações computacionais realizadas. A subseção 4.1 apresenta os resultados relativos ao sistema *RPEH* hidráulico, cujo modelo foi desenvolvido na subseção 3.1. Já a subseção 4.2 exibe os resultados do sistema *RPEH* eletromecânico, a partir do modelo desenvolvido na subseção 3.2.

Os valores dos parâmetros do sistema *RPEH* hidráulico foram apresentados na Tabela 1 e servem de referência na escolha dos valores dos parâmetros de simulação, enquanto a simulação do sistema *RPEH* eletromecânico valores dos parâmetros encontrados na Tabela 2. Alguns valores de parâmetros são comuns aos dois sistemas, assim como a entrada dos mesmos (Força F_V aplicada pelo veículo). Isso facilitará a comparação do desempenho dos dispositivos propostos.

4.1 Simulação do sistema *RPEH* hidráulico

O sistema ilustrado na Figura 4 foi simulado computacionalmente utilizando os parâmetros relatados na tabela 1.

Considerou-se que um carro passando sobre o redutor de velocidade com superfície móvel produz dois pulsos retangulares com intensidade de 5000 N . Essa é a força de contato do veículo atuando no coletor de energia (F_V), que é a entrada do sistema. Os dois pulsos de força são devido à passagem dos dois eixos de um carro. A Figura 21 ilustra essa força de entrada.

Figura 21 – Força de interação entre o veículo e o coletor de energia *RPEH* hidráulico.

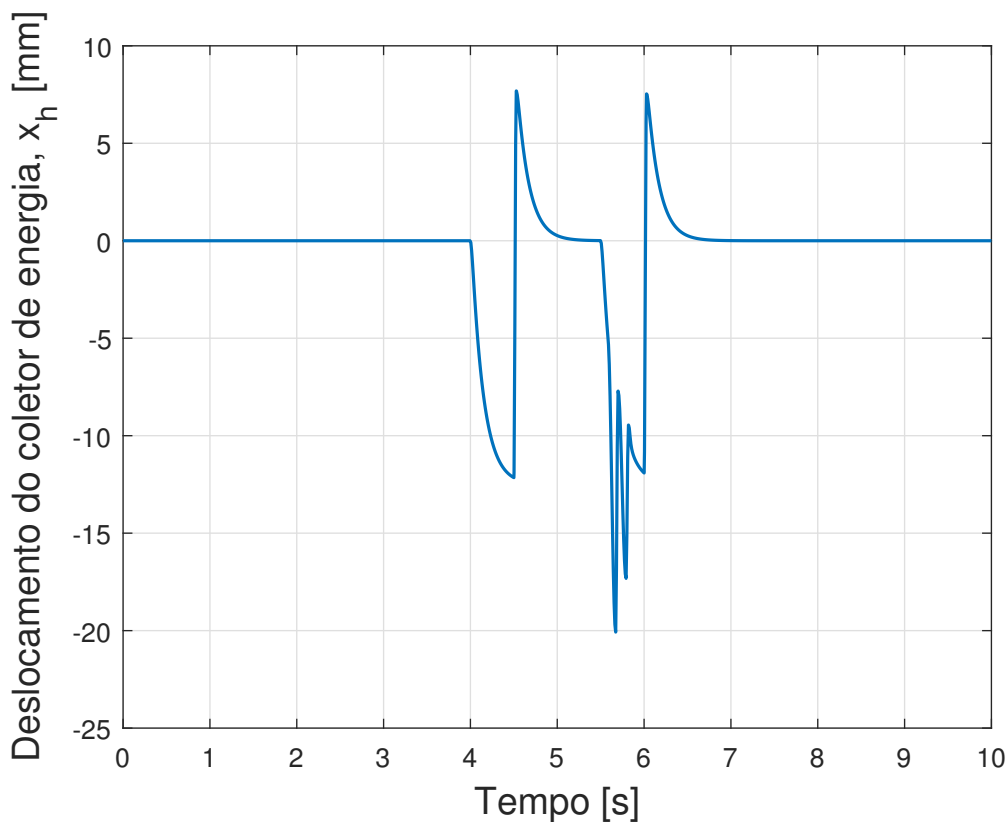
Fonte: Próprio autor

A Figura 22 ilustra o deslocamento do coletor de energia. Observa-se também duas perturbações no deslocamento devido à passagem dos dois eixos do carro.

No primeiro pulso de entrada o gerador começa acoplado ao coletor, enquanto que no segundo pulso o gerador desacopla/reacopla conforme a posição do pistão. Isso causa uma mudança na inércia do sistema, o que explica a diferença entre os padrões de formas de onda de deslocamento visto na Figura 22. Pode-se comprovar esse fato observando a Figura 23 que mostra que o início da oscilação encontrada no segundo padrão de deslocamento ocorre justamente no instante de mudança de sentido do pistão. Como era esperado os padrões de deslocamento se iniciam em sincronia com seus respectivos pulsos de entrada.

O movimento do coletor de energia é o responsável pela indução de escoamento de fluido na tubulação, que transmite força para o pistão mover a cremalheira e girar o pinhão. Esse pinhão, por sua vez, está acoplado por um conjunto de embreagens no eixo que contém o volante de inércia e o gerador rotativo, sendo que esse conjunto de embreagens pode acoplar ou desacoplar o gerador e volante de inércia, dependendo da posição do pistão.

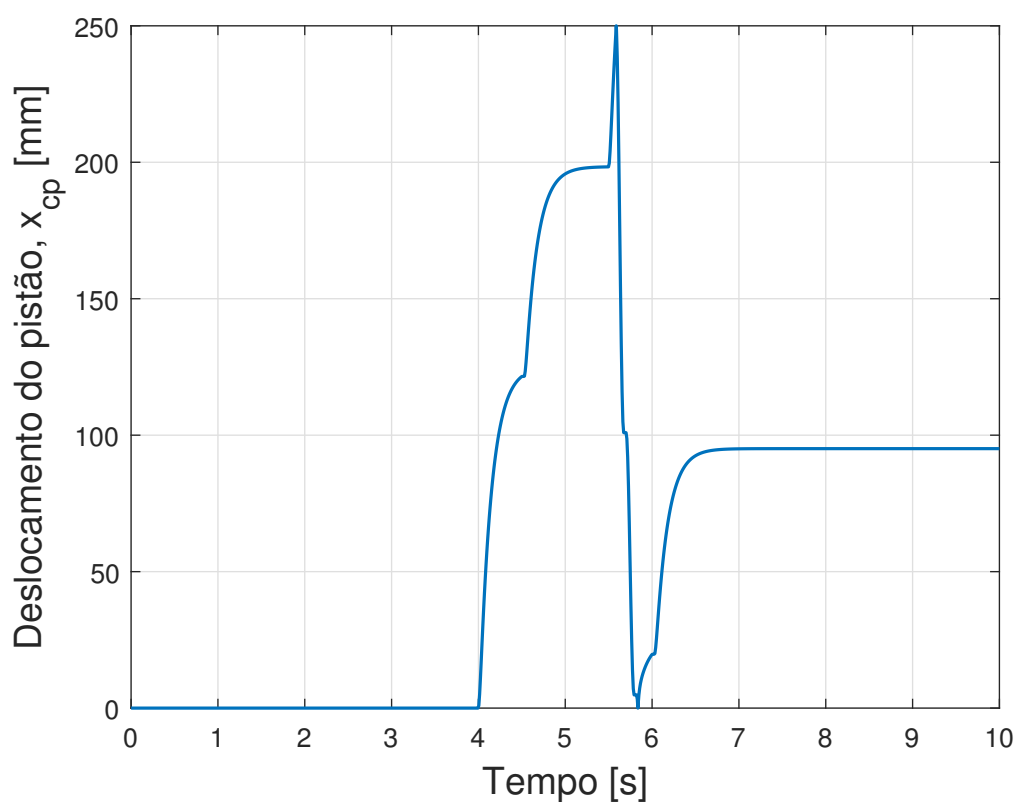
Figura 22 – Deslocamento do coletor de energia.



Fonte: Próprio autor

A Figura 23 mostra a posição do pistão do cilindro de dupla ação ao longo do tempo de simulação computacional. Nota-se que o pistão se move para valores positivos até 250 milímetros, que corresponde ao fim de curso do cilindro. Após isso o mesmo retorna para a posição 0 e recomeça o movimento. Como comentado anteriormente, este sistema em específico tem a grande desvantagem de não gerar movimento útil e corrente elétrica no gerador durante o movimento de retorno do pistão, uma vez que o gerador só está acoplado no movimento de avanço do pistão (valores crescentes no deslocamento).

Figura 23 – Deslocamento do pistão do cilindro de dupla ação.

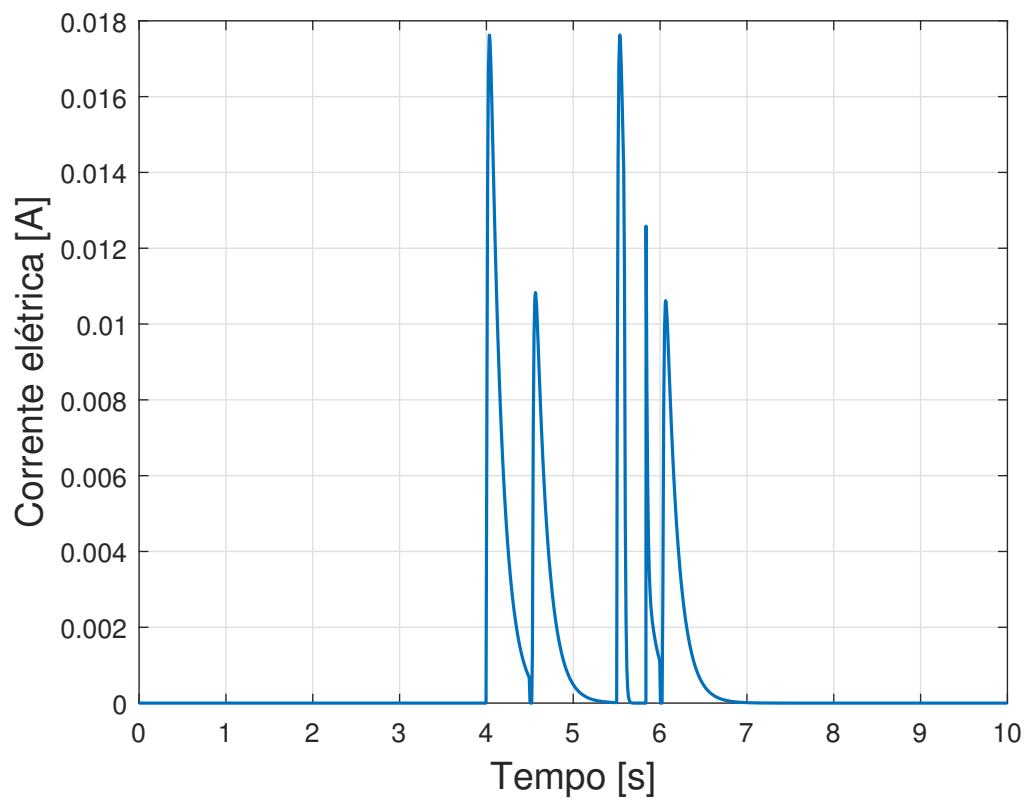


Fonte: Próprio autor

Na Figura 24 é ilustrado a corrente elétrica induzida pelo gerador. Nota-se que os momentos onde existe corrente elétrica são os mesmos onde ocorrem a passagem dos dois eixos do veículo no coletor de energia. Nota-se um pico de corrente elétrica (i) baixo, cerca de 17.622 mA . De modo similar, a Figura 25 ilustra a tensão elétrica gerada (E_a) que apresenta picos de 1.762 V e a Figura 26 mostra a potência elétrica instantânea da saída do gerador DC ($E_a i$) com picos de potência de 31.053 mW .

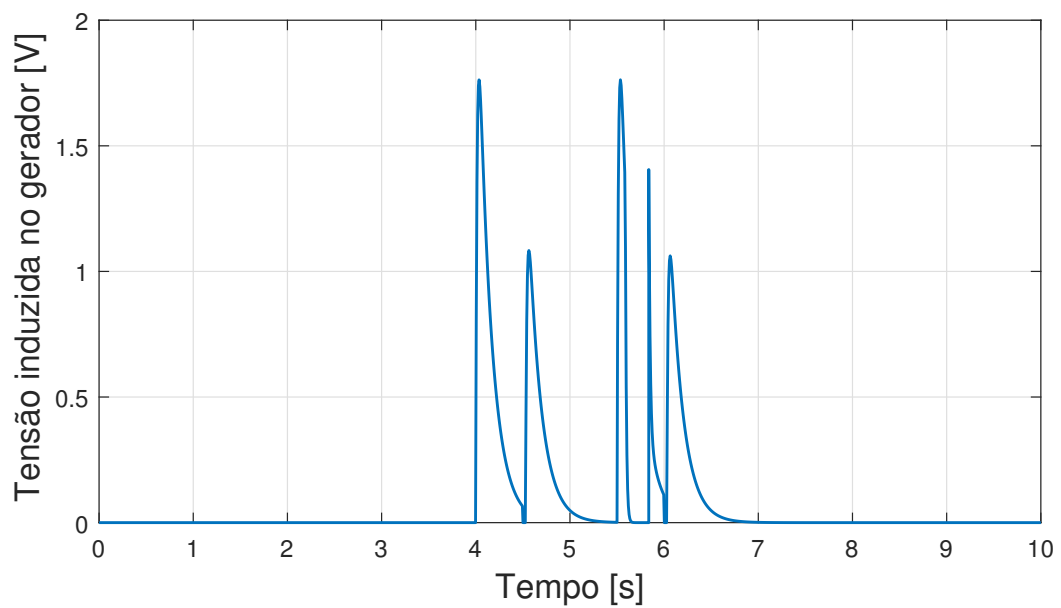
Através do gráfico de potência do gerador (Figura 26) calculou-se que a energia produzida por ele durante a passagem do veículo sobre o coletor de energia foi de 8.03 mJ .

Figura 24 – Corrente elétrica induzida no gerador.



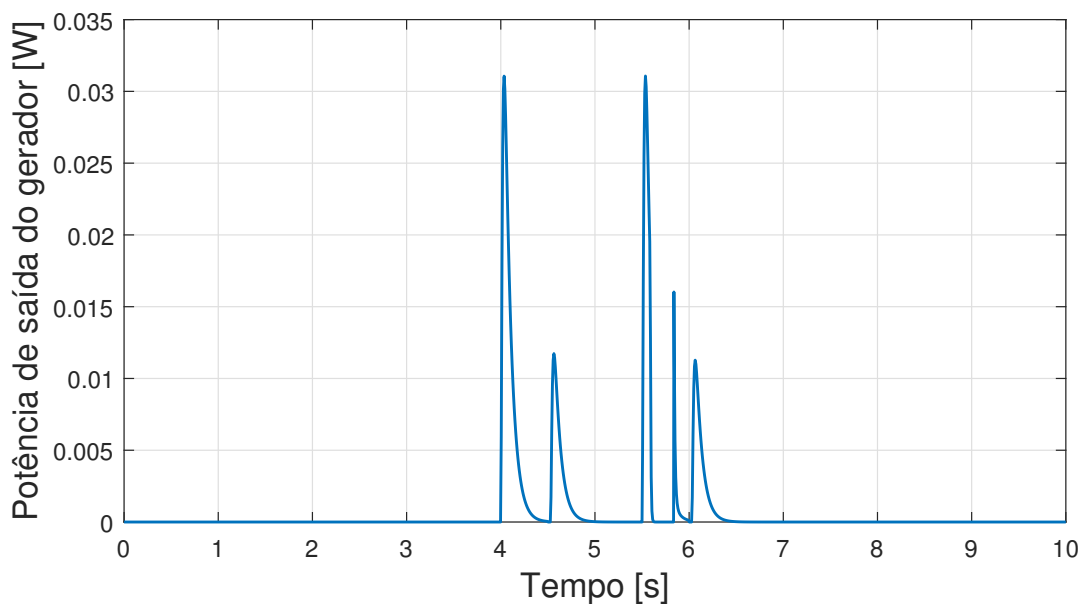
Fonte: Próprio autor

Figura 25 – Tensão elétrica induzida no gerador.



Fonte: Próprio autor

Figura 26 – Potência de saída do gerador.

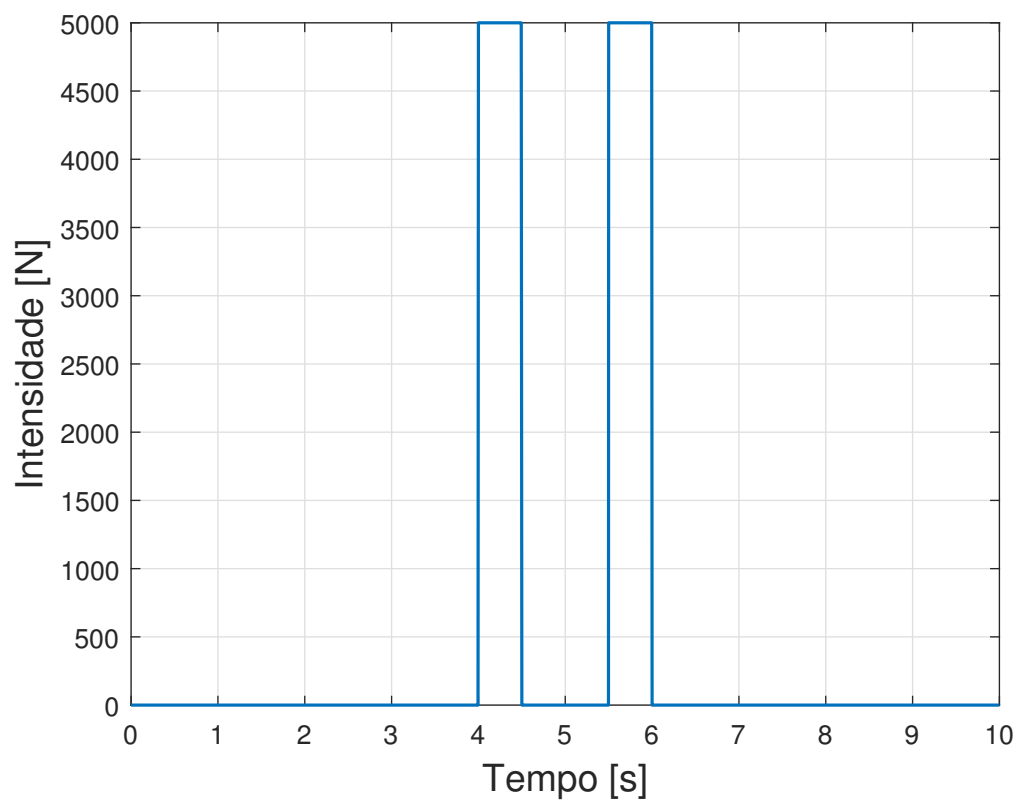


Fonte: Próprio autor

4.2 Simulação do sistema *RPEH* eletromecânico

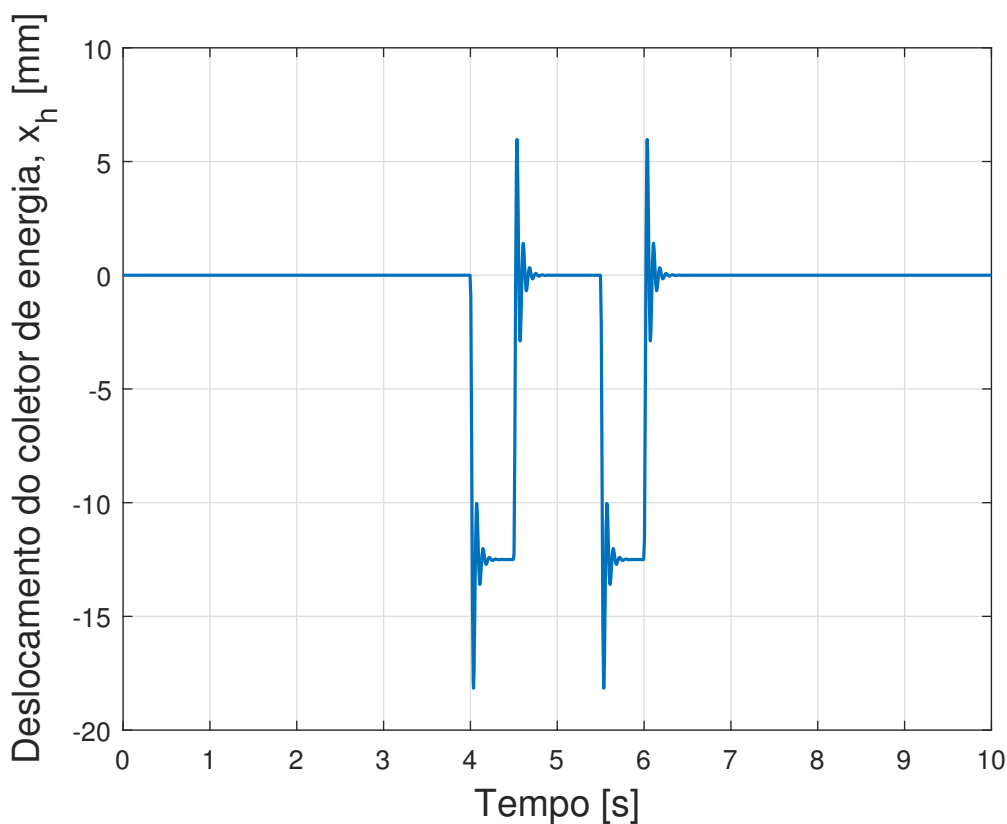
De forma similar ao apresentado na seção 4.1, foi também simulado o sistema eletromecânico com gerador linear, visto na Figura 17. Os parâmetros utilizados para simulação desse sistema estão definidos na Tabela 2. Como mencionado anteriormente, de modo a facilitar a comparação dos dispositivos, alguns parâmetros utilizados tem valores comuns, ao menos para as partes dos dois sistemas que são de mesma natureza (coletor de energia, mola de retorno e carga). A Figura 27 mostra a força de atuação do veículo passando sobre o coletor de energia, que é a mesma força de entrada considerada na simulação do sistema *RPEH* hidráulico, composta por dois pulsos de força relacionados à passagem dos dois eixos do veículo. Ao passar no coletor de energia, o carro provoca o deslocamento dessa superfície móvel, a qual é mostrada na Figura 28. Os dois padrões similares de deslocamento ao longo do tempo são devido à passagem dos dois eixos do carro. Caso seja necessário, as oscilações que são vistas nesses padrões de deslocamento podem ser atenuadas inserindo-se algum elemento causador de perda de energia.

Figura 27 – Força de entrada: Força de contato do veículo no coletor.



Fonte: Próprio autor

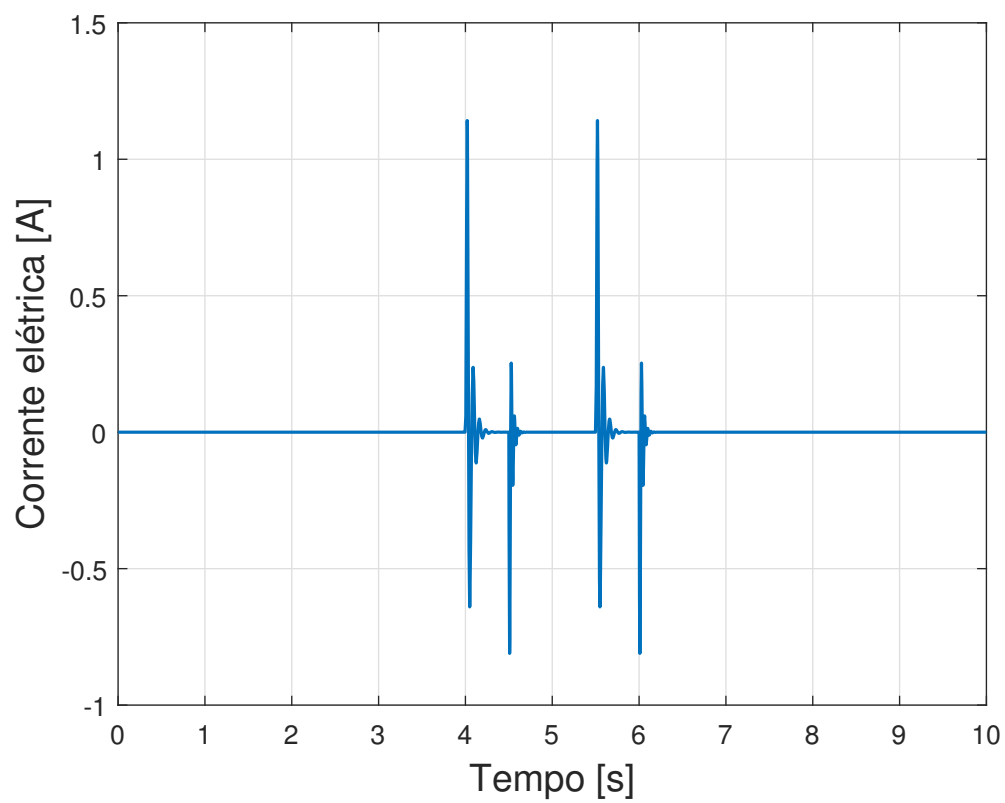
Figura 28 – Deslocamento do coletor.



Devido ao movimento de translação vertical do eixo gerador elétrico linear, o mesmo passa a induzir tensão elétrica na saída do equipamento. Os níveis de corrente elétrica (i), tensão elétrica (e_{gl}) e potência elétrica de saída (R_{R_L}) são mostrados ao longo do tempo respectivamente nas Figuras 29, 30 e 31. Notam-se picos máximos de corrente em cerca de $1.14 A$, enquanto a tensão máxima foi da ordem de $114.1 V$ e de potência elétrica na ordem de $130.4 W$. No entanto, esses valores são transitórios, ou seja, a geração dessas grandezas elétricas se mantém durante um intervalo de tempo pequeno, apenas quando há contato dos pneus do carro com o coletor de energia.

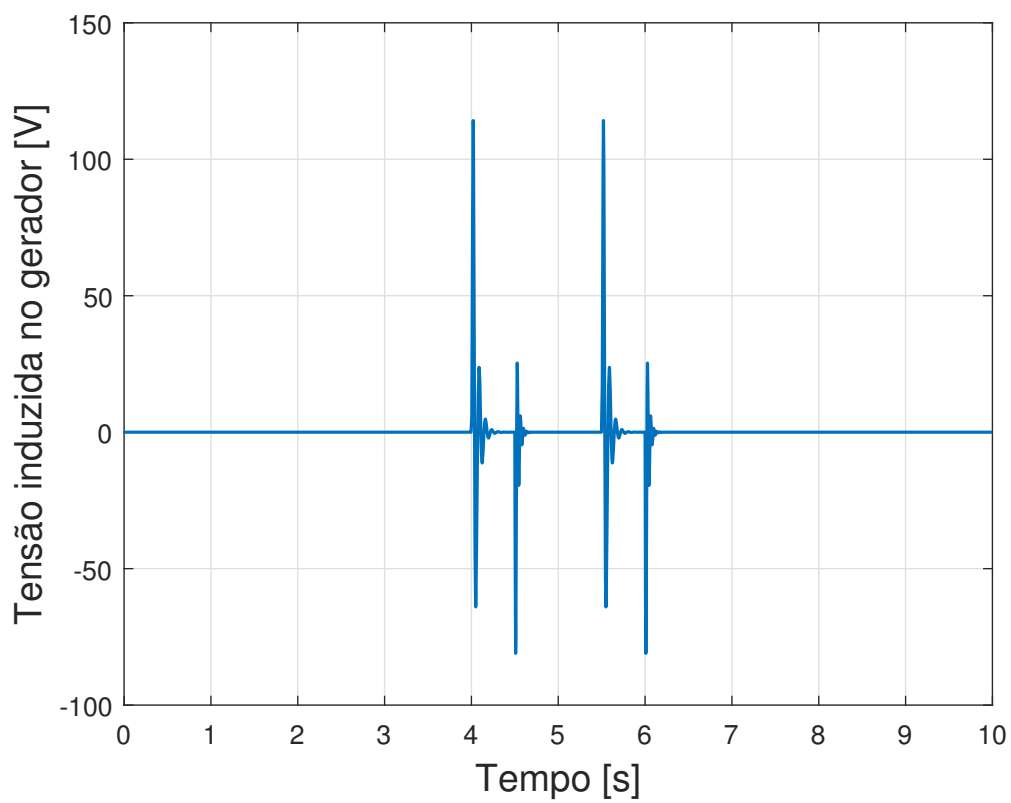
Analisando o gráfico de potência da Figura 31 calculou-se que o gerador produziu $6.7199 J$ de energia durante a passagem do veículo sobre o dispositivo.

Figura 29 – Corrente de carga.



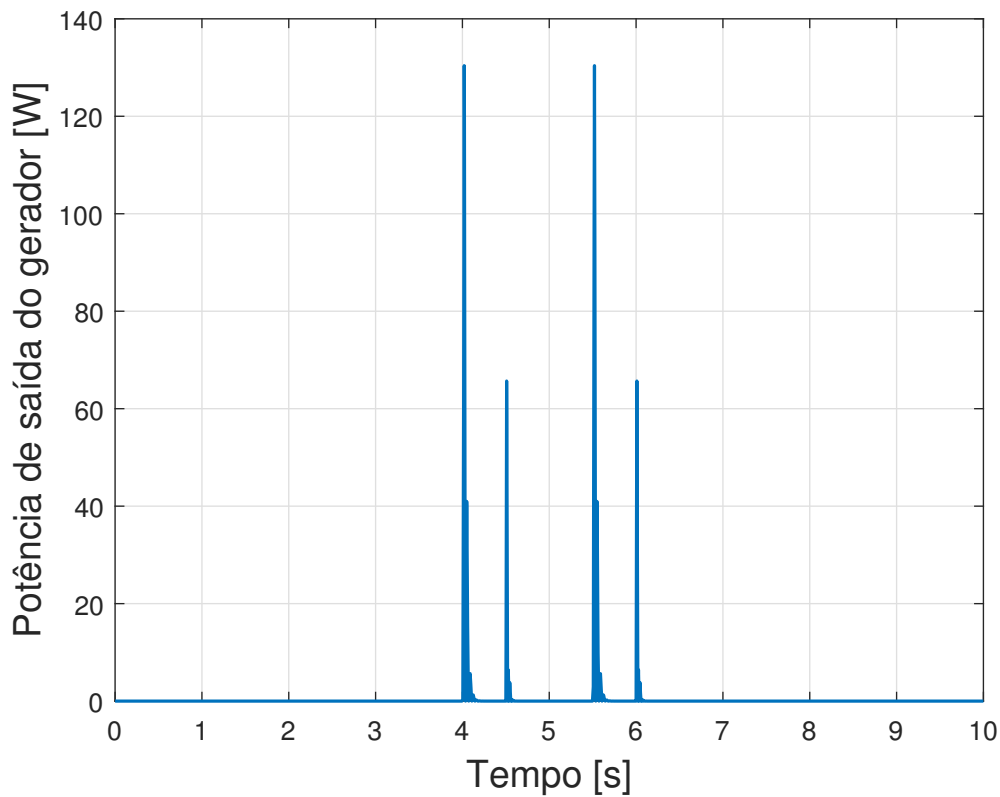
Fonte: Próprio autor

Figura 30 – Tensão induzida no gerador.



Fonte: Próprio autor

Figura 31 – Potência de saída do gerador.



Fonte: Próprio autor

4.3 Comparação entre o sistema coletor hidráulico e o sistema coletor eletromecânico

Aqui é feita uma comparação entre os dois sistemas propostos, cujos resultados foram mostrados nas subseções anteriores. Ambos os sistemas foram sujeitos a mesma força de entrada de intensidade 5000 N . Os dados comparados são os valores de máximos do deslocamento do coletor (x_h [mm]), corrente elétrica de saída do gerador (i_{GE} [A]), tensão elétrica de saída do gerador (e_{GE} [V]) e potência elétrica de saída do gerador (P_{GE} [W]), além da energia produzida pelos sistemas coletores (E_{GE} [J]). Essas informações são resumidas na Tabela 3.

Tabela 3 – Comparação dos resultados das simulações dos dispositivos *RPEH* hidráulico e eletromecânico.

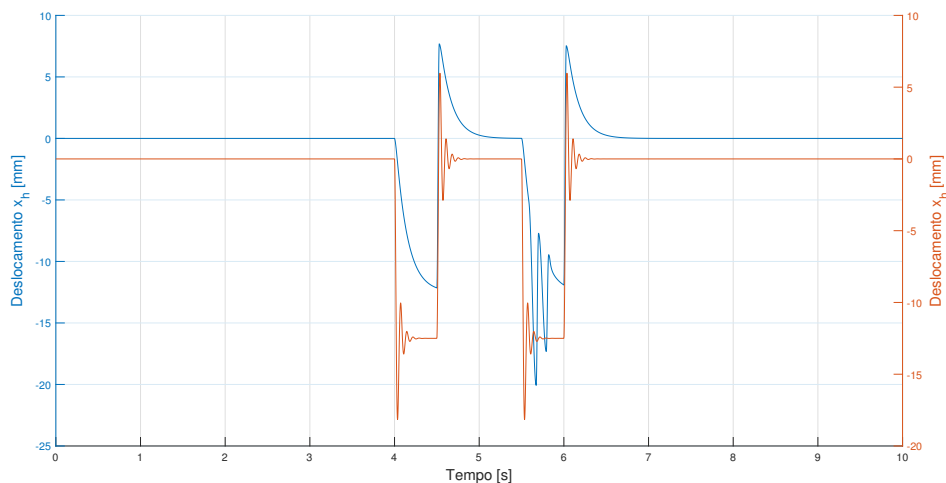
Dispositivo	x_h [mm]	i_{GE} [A]	e_{GE} [V]	P_{GE} [W]	E_{GE} [J]
Hidráulico	20.00	0.0176	1.762	0.031053	0.00803
Eletromecânico	18.17	1.14	114.18	130.4	6.7199

Nota-se claramente a diferença dos níveis de energia gerada durante a passagem do veículo ao comparar o dispositivo *RPEH* hidráulico com o eletromecânico, sendo que este último produz uma quantidade muito maior de energia. No entanto,

pela diferença baixa entre os níveis de deslocamento máximo nos coletores de energia e pelo formato similar de seus gráficos de deslocamento em função do tempo, como também é mostrado na Figura 32, por mais que as características elétricas sejam bem distintas entre esses dispositivos o comportamento dinâmico de seus coletores (*RPEHDS*) são semelhantes.

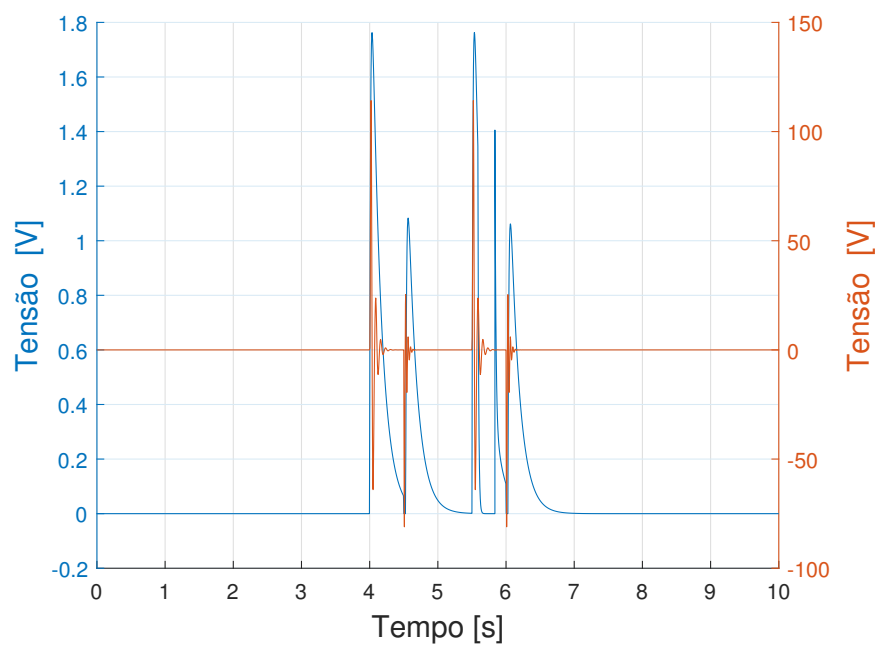
Os dados comparativos obtidos ficam mais evidentes se observadas as Figuras 32 a 35, que mostram as curvas dos dispositivos sobrepostas. As curvas em azul são gráficos do sistema *RPEH* hidráulico, enquanto as curvas em laranja são gráficos do sistema *RPEH* eletromecânico. Por causa da diferença muito grande entre os valores das respectivas grandezas dos dispositivos, as curvas tiveram que ser mostradas em escala distintas (exceto para a curva do deslocamento do coletor), sendo que no eixo y do lado esquerdo das Figuras encontra-se a escala das curvas do sistema *RPEH* hidráulico e no lado direito encontra-se a escala das curvas do sistema *RPEH* eletromecânico. Percebe-se através das Figuras 33 a 35 que as curvas do sistema *RPEH* eletromecânico tem mudanças mais abruptas que as do sistema *RPEH* hidráulico. O motivo para tal fato é que o sistema *RPEH* hidráulico tem o disco de inércia, responsável por manter a energia acumulada por determinado tempo, enquanto o sistema eletromecânico não possui um elemento específico para acúmulo de energia. Percebe-se também que os valores de tensão e corrente do sistema *RPEH* hidráulico são somente positivos, pois seu gerador é de corrente contínua, ao contrário do sistema *RPEH* eletromecânico que possui um gerador elétrico linear que permite a indução de tensão/corrente positiva ou negativa.

Figura 32 – Comparação das curvas de deslocamento dos coletores.



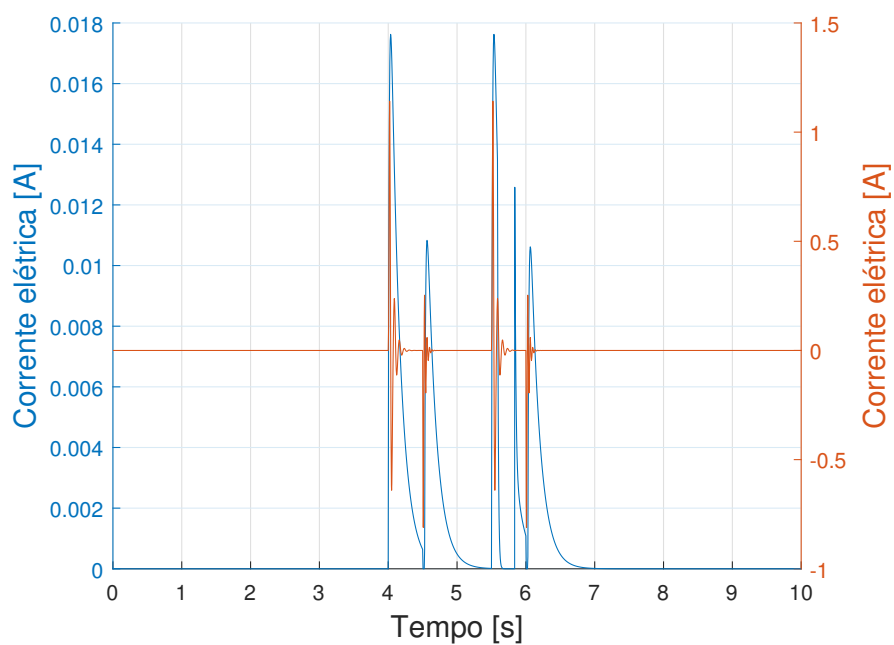
Fonte: Próprio autor

Figura 33 – Comparação das curvas de tensão induzida.



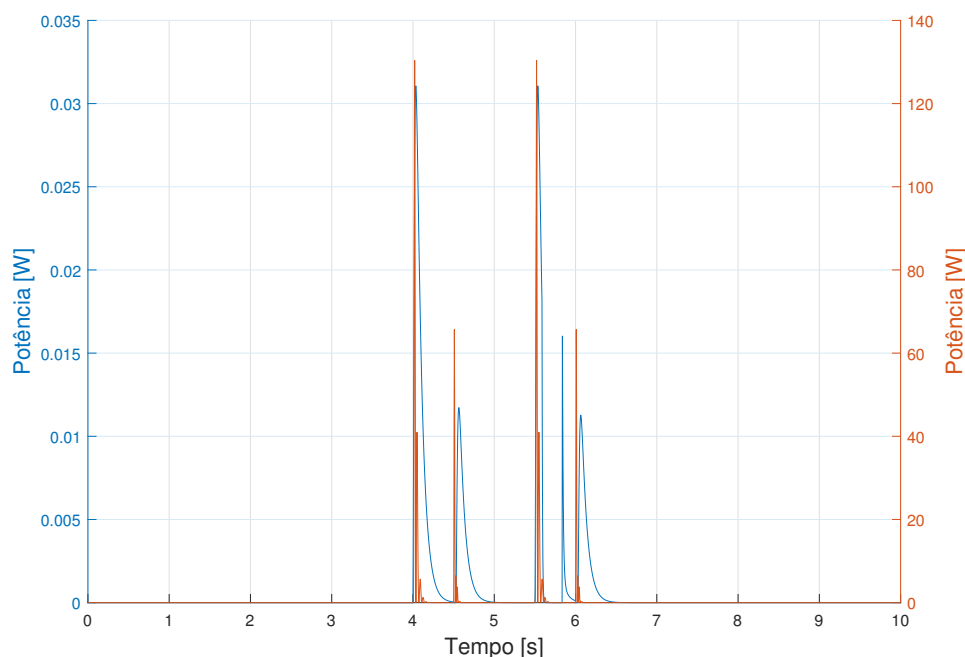
Fonte: Próprio autor

Figura 34 – Comparação das curvas de corrente elétrica.



Fonte: Próprio autor

Figura 35 – Comparação das curvas de potência elétrica.



Fonte: Próprio autor

É importante notar que os valores da de tensão, corrente, e potência gerada da Tabela 3 são apenas os valores de pico, visto que os sinais elétricos induzidos no gerador *DC* são altamente transitórios. Acredita-se que as diferenças nos níveis de geração de energia se devem principalmente às diferenças operacionais dos dois dispositivos. Enquanto o dispositivo *RPEH* hidráulico gera movimento útil apenas durante o movimento no sentido positivo do cilindro de dupla ação, o sistema *RPEH* eletromecânico aproveita todo o movimento de descida da superfície móvel do coletor de energia. Outra grande desvantagem do sistema *RPEH* hidráulico reside na grande quantidade de componentes de transmissão de movimento/energia, e quanto mais componentes existem no sistema maior o número estágios de perda de energia.

Uma pequena vantagem do dispositivo *RPEH* hidráulico é que o movimento do escoamento do fluido é intermediado pelo cilindro de dupla ação, além do sistema cremalheira-pinhão, o que de certa forma alivia possíveis problemas em casos de sobrecarga de força aplicada no sistema. Porém, um grande problema para esses dois sistemas ainda é o caráter transitório da geração de energia elétrica. Ambos os sistemas possuem apenas pulsos de duração limitada de tensão/corrente elétrica, o que dificulta uma operação adequada para o fornecimento de energia para cargas convencionais. Uma solução viável para ajudar a resolver esse problema para ambos os dispositivos *RPEH* seria fazer o acúmulo da energia produzida pelos geradores através do uso de um banco de capacitores ou bateria e depois utilizar essa energia con-

forme demandado por uma carga. No entanto, essa solução exige o uso de sistemas que fazem essa etapa de tratar as grandezas elétricas envolvidas, como retificadores, conversores etc, aumentando os estágios de perda de energia. No caso do dispositivo *RPEH* hidráulico os pulsos de energia também podem ser estendidos por mais tempo inserindo-se um volante de inércia com maior momento de inércia. Entretanto, a geração de energia intermitente é característica desses tipos de sistemas, devido a natureza da força de entrada que movem os sistemas de transmissão de movimento, como foi visto anteriormente.

Na Tabela 4 abaixo são resumidas as principais características dos dois sistemas estudados, mostrando suas diferenças básicas.

Tabela 4 – Comparação das principais características dos sistemas *RPEH*.

	Hidráulico	Eletromecânico
Coletor	Redutor de velocidade com mola de retorno	Redutor de velocidade com mola de retorno
Sistemas intermediários	Hidráulico, mecânico linear e mecânico rotativo.	Sem estágios intermediários. Conversão direta de energia mecânica em elétrica
Gerador	Gerador eletromagnético DC rotativo	Gerador eletromagnético linear de imã permanente
Acumulador de energia	Disco de inércia	Não tem elemento acumulador de energia

5 CONCLUSÃO

Pode-se concluir que os objetivos principais desse trabalho foram alcançados, pois foi possível modelar, implementar, simular, analisar e comparar a resposta de dois dispositivos coletores de energia de estradas pavimentadas de natureza distinta, neste caso o hidráulico e o eletromecânico.

Aparentemente, não existe consenso na literatura e pesquisa acadêmica sobre a melhor forma de se capturar energia da passagem de veículos sem alterar significativamente o tráfego dos mesmos.

No entanto pela comparação dos sistemas estudados nessa monografia percebeu-se um maior potencial energético do dispositivo coletor baseado em sistema eletromecânico, seja pelo número menor de estágios intermediários onde ocorrem perda de energia ou pela própria característica de operação do sistema.

Os modelos computacionais implementados neste trabalho foram fundamentais para a devida compreensão dos sistemas estudados. Esses tipos de simulações computacionais tem grande utilidade para minimizar os gastos em possíveis testes experimentais, visto que, validado os modelos, pode-se testar a mudança de múltiplos valores de parâmetros dos sistemas sem ter de alterá-los fisicamente, o que seria inviável.

Os sistemas estudados neste trabalho mostraram-se funcionar de forma extremamente transitória, sendo que a tensão/corrente elétrica induzidas no gerador ocorreria apenas em uma faixa de tempo próxima à ocorrência da passagem do veículo. Em casos onde haverá pouco fluxo de veículos, a geração poderia ser muito pequena. Os resultados de energia obtidos que cada par de pulsos de entrada produz (representação da passagem de um veículo) pode ser estendido multiplicando a quantidade de energia gerada pelos dispositivos pela quantidade de veículos que passaram pelo sistema. Para minimizar as características transitórias das grandezas elétricas desses sistemas é possível fazer o uso de acumuladores de energia em conjunto dos dispositivos coletores. Esses acumuladores, como banco de capacitores ou baterias, poderiam armazenar uma quantidade considerável de energia durante determinado período de operação do dispositivo coletor e depois deixar essa energia disponível para ser utilizada conforme desejado. Entretanto, esses sistemas entrariam como um estágio intermediário do sistema como um todo, o que reduziria um pouco a eficiência do mesmo. Uma análise energética seria indicada caso essa abordagem fosse adotada.

Acredita-se que o trabalho desenvolvido nessa monografia poderia ser utilizado como base para criação de modelos semelhantes de sistemas coletores de energia de estradas pavimentadas baseados em elementos hidráulicos ou eletromecânicos,

através do uso das abordagens de modelagem matemática e computacional desenvolvidas nesse trabalho, bem como utilizar as simulações já produzidas para guiar o desenvolvimento de protótipos experimentais dos modelos aqui estudados.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Para trabalhos futuros baseados na presente monografia, recomenda-se as seguintes sugestões:

- Integrar o modelo matemático de um veículo com o modelo dos dispositivos RPEH aqui estudados, para substituir os pulsos que foram considerados como força de entrada por uma entrada mais realista. Embora seja uma boa suposição utilizar esse tipo de sinal de entrada, a influência dos dispositivos coletores nos veículos não foram estudadas.
- Realizar a otimização dos parâmetros dos sistemas, utilizando para isso os modelos computacionais já implementados. Este procedimento permitirá também maximizar a geração de energia elétrica.
- Realizar experimentos controlados em laboratório para validar os modelos computacionais aqui implementados. Apesar dos modelos terem sido confeccionados com base em sólidos princípios físicos, é necessário verificar se as suposições adotadas nessas modelagens não comprometem a previsão desses modelos.
- Analisar como o sistema se comporta após inserir dispositivos acumuladores de energia.
- Realizar o dimensionamento e projeto de protótipo dos sistemas. A partir disso poderia-se ter uma melhor informação da viabilidade econômica/energética dos sistemas.

REFERÊNCIAS

- ANDRIOPOULOU, S. *A review on energy harvesting from roads*. 2012.
- ANTON, S. R.; SODANO, H. A. A review of power harvesting using piezoelectric materials (2003–2006). *Smart materials and Structures*, IOP Publishing, v. 16, n. 3, p. R1, 2007.
- BEEBY, S. P. et al. Energy harvesting vibration sources for microsystems applications. *Measurement science and technology*, IOP Publishing, v. 17, n. 12, p. R175, 2006.
- DUARTE, F.; FERREIRA, A. Energy harvesting on road pavements: state of the art. *Proceedings of the institution of civil engineers*, v. 169, p. 79–90, 2016.
- DUARTE, F.; FERREIRA, A.; FAEL, P. Road pavement energy harvesting: An evaluation methodology for new and existing vehicle-derived mechanical energy collectors. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, AIP Publishing, v. 9, n. 3, p. 034701, 2017.
- DUARTE, F. J. A. *Pavement energy harvesting system to convert vehicles kinetic energy into electricity*. Tese (Doutorado) — 00500:: Universidade de Coimbra, 2018.
- FELÍCIO, L. C. Modelagem da dinâmica de sistemas e estudo da resposta. 2007.
- HARB, A. Energy harvesting: State-of-the-art. *Renewable Energy*, Elsevier, v. 36, n. 10, p. 2641–2654, 2011.
- KIM, H. S. et al. A review of piezoelectric energy harvesting based on vibration. *International journal of precision engineering and manufacturing*, Springer, v. 12, n. 6, p. 1129–1141, 2011.
- PAN, P. et al. A review on hydronic asphalt pavement for energy harvesting and snow melting. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, v. 48, p. 624–634, 2015.
- PARR, A. *Hydraulics and pneumatics: a technician's and engineer's guide*. [S.l.]: Elsevier, 2011.
- SHIKI, S. B. et al. *Relatório final- Consultoria sobre a viabilidade técnica de dispositivos de aproveitamento de energia de passagem de veículos em conjunto com a empresa Vitalis Energia Eficiente*. 2018. ProEx- UFSCar. Nº do processo 23112.003519/2-17-34.
- THORBURN, K.; LEIJON, M. Farm size comparison with analytical model of linear generator wave energy converters. *Ocean Engineering*, v. 34, p. 908–916, 04 2007.
- WANG, H.; JASIM, A.; CHEN, X. Energy harvesting technologies in roadway and bridge for different applications—a comprehensive review. *Applied energy*, Elsevier, v. 212, p. 1083–1094, 2018.

ZHENG, Z.-Q. et al. Analysis of electromagnetic force of the linear generator in point absorber wave energy converters. *Journal of Marine Science and Technology*, v. 23, n. 4, p. 475–480, 2015.

APÊNDICE A – MODELO COMPUTACIONAL DO DISPOSITIVO RPEH HIDRÁULICO- MATLAB/SIMULINK

Esse apêndice apresenta os códigos do MATLAB e diagrama de blocos do SIMULINK que foram utilizados para implementação do modelo computacional do dispositivo coletor de energia de estradas pavimentadas hidráulico. O modelo computacional é utilizado para simular esse dispositivo e originar dados que permitem a análise energética do mesmo. A ordem que esses códigos e diagramas são executados são vistos no fluxograma da Figura 16, apresentado em 3.1.9.

start_simulacao_RPEH_hidraulico.m 1/8
 C:\Users\leoga\Documents\UFSCar\11°... 13 de Dezembro de 2019

```

1 %%% Simulacao do sistema RPEH hidráulico
2 clear;
3 clc;
4 close all;
5 parametros_modelos_RPEH_hidraulico %% parametros dos modelos
6
7 t_ini=0; %% [s] tempo de inicio da simulacao
8 t_fim= 10; % [s] tempo final da simulacao
9 dt= 0.0001 ; %% [s] tamanho do tempo do passo de simulação
10
11 %%% parametros da entrada Fv %%%
12 valor_pulso= 5000 ; %% [N] valor do pulso retangular
13 ti_pulso= 4 ; %% [s] inicio do pulso
14 tf_pulso= ti_pulso +0.5 ; %% [s] fim do pulso
15 ind_ti_pulso= ti_pulso/dt + 1; %% indice do ti_pulso
16 ind_tf_pulso= tf_pulso/dt + 1 ; %% indice do tf_pulso
17 %%% pulso 2
18
19 ti_pulso2= tf_pulso + 1 ; %% [s] inicio do pulso
20 tf_pulso2= ti_pulso2 + 0.5 ; %% [s] fim do pulso
21 ind_ti_pulso2= ti_pulso2/dt + 1; %% indice do ti_pulso
22 ind_tf_pulso2= tf_pulso2/dt + 1 ; %% indice do tf_pulso
23
24 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
25 t = t_ini:dt:t_fim; % Vetor de tempo
26 Fv = zeros(length(t),2); % inicializa a matriz Fv com zeros
27 Fv(:,1) = t'; % Primeira coluna de Fv deve ser tempo (para simulink)
saber em que instante a força é aplicada)
28 Fv(ind_ti_pulso:ind_tf_pulso,2) = valor_pulso;
29 Fv(ind_ti_pulso2:ind_tf_pulso2,2) = valor_pulso;
30
31
32 % Força de entrada na segunda coluna
33 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
34 manobra1 = 'manobra1.slx';
35 manobra2 = 'manobra2.slx';
36 manobra3 = 'manobra3.slx';
37 manobra4 = 'manobra4.slx';
38
39 %%% status da execucao de cada modelo %%% Status Inicial do funcionamento dos
modelos
40
41 status_manobra1= 1; %% pistão para direita (gerador acoplado) %
42 status_manobra3= 0; %% coletor (RPEH DS) subindo e movimento do pistao para
direita sem transmissão de força hidráulica (gerador acoplado)
43 status_manobra2= 0; %% pistao para esquerda (gerador desacoplado); movimento
livre do gerador %% manobra 2
44 status_manobra4= 0; %% coletor (RPEH DS) subindo e movimento do pistao para
esquerda sem transmissão de força hidráulica (gerador desacoplado)
45
46
47 %% Posicao da valvula de controle (1 ou 2) ; posicao 1 (pistão para direita) ;
posicao 2 (pistao para esquerda)

```

start_simulacao_RPEH_hidraulico.m 2/8
 C:\Users\leoga\Documents\UFSCar\11°... 13 de Dezembro de 2019

```

48
49 stop_simulacao=0; %% para a simulacao global
50 %%% condicoes iniciais para o inicio de simulacao
51
52 i0=0; %% corrente inicial do gerador
53 xh0=0; %% deslocamento inicial do coletor
54 vh0=0 ; %% velocidade inicial coletor
55 tetaiw0=0; %% deslocamento angular inicial do rotor do gerador
56 wtetaiw0=0; %% velocidade angular inicial do rotor do gerador
57 xcp0=0 ; %% posição do pistão
58 vcp0=0; %% velocidade do pistão
59
60 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
61
62 tc = t_ini; % Inicializa contador de tempo tc
63
64 %%% Inicializa os vetores globais
65 xh = xh0; % Inicializa vetor com a posição do RPEHDS
66 vh = vh0; % Inicializa vetor com a velocidade do RPEHDS
67 i = i0; % Inicializa vetor com corrente do gerador
68 xcp= xcp0; % Inicializa vetor com a posição do pistão
69 vcp= vcp0; % Inicializa vetor com velocidade do pistão
70 tetaiw= tetaiw0; % Inicializa vetor com a posicao angular do disco IW
71 wtetaiw= wtetaiw0; % Inicializa vetor com a velocidade angular do disco
IW
72
73
74 % Loop para simulação global (O Fluxo do programa depende do chaveamento de cada
modelo)
75
76 while tc<t_fim
77
78 if status_manobral % Modelo RPEHDS descendo (pistão para direita) com o
gerador acoplado
79
80 data_manobral = sim(manobral,'ReturnWorkspaceOutputs','on'); %
Simulação manobra 1
81
82 %%% Recebendo os dados da simulação atual
83 model_xh = get(data_manobral,'model_xh'); % Pega valores
de posição RPEHDS simulados no manobra 1
84 model_vh = get(data_manobral,'model_vh'); % Pega valores
de velocidade do RPEHDS simulados no manobra 1
85 model_i = get(data_manobral,'model_i'); % Pega valores
de corrente obtidos no manobra 1
86 model_xcp=get(data_manobral,'model_xcp'); % Pega valores
de posição do pistão simulados no manobra 1
87 model_vcp=get(data_manobral,'model_vcp'); % Pega valores
de velocidade do pistão simulados no manobra 1
88 model_tetaiw=get(data_manobral,'model_tetaiw'); % Pega valores
de posição angular da roda de inércia IW simulados no manobra 1
89 model_wtetaiw=get(data_manobral,'model_wtetaiw'); % Pega os
valores de velocidade angular da roda de inércia IW simulados no manobra 1

```

start_simulacao_RPEH_hidraulico.m 3/8
 C:\Users\leoga\Documents\UFSCar\11°... 13 de Dezembro de 2019

```

90          tout = get(data_manobra1,'tout'); % Pega vetor de tempo rodado
na manobra 1
91
92          %%% Formando os vetores globais
93          xh = [xh;model_xh(2:end)]; % Incrementa vetor de posicao
global RPEHDS -
94          vh = [vh;model_vh(2:end)]; % Incrementa vetor de velocidade
global RPEHDS -
95          i = [i;model_i(2:end)]; % Incrementa vetor de corrente
global -
96          xcp= [xcp;model_xcp(2:end)]; % Incrementa vetor posicao
global do pistão-
97          vcp= [vcp;model_vcp(2:end)]; % Incrementa vetor velocidade
global do pistão-
98          tetaiw=[tetaiw;model_tetaiw(2:end)];%Incrementa vetor posicao
angular iw global pistão-
99          wtetaiw=[wtetaiw; model_wtetaiw(2:end)];%Incrementa vetor
velocidade angular iw global -
100
101          %%% Passagem das CI para os próximos modelos
102          xh0 = xh(end); % Passa condição inicial para o próximo
modelo (posição inicial)
103          vh0 = vh(end); % Passa condição inicial para o próximo
modelo (velocidade inicial)
104          i0= i(end) ; % Passa a condição inicial para próximo
modelo (corrente inicial)
105          xcp0= xcp(end) ; % Passa a condição inicial para próximo
modelo (posição pistão inicial)
106          vcp0= vcp(end); % Passa a condição inicial para próximo
modelo (velocidade pistão inicial)
107          tetaiw0=tetaiw(end) ; % Passa a condição inicial para próximo
modelo (posição angular disco IW inicial)
108          wtetaiw0=wtetaiw(end); % Passa a condição inicial para
próximo modelo (velocidade angular disco IW inicial)
109          %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
110
111          t_ini = tout(end); % Passa tempo final da simulação do
manobra 1 para o próximo modelo
112          tc = tout(end); % Atualiza contador de tempo
para o loop while
113
114          elseif status_manobra2 %%% Modelo do RPEHDS indo para baixo (pistão para
esquerda) com gerador desacoplado
115
116          data_manobra2 = sim(manobra2,'ReturnWorkspaceOutputs','on'); %
Simulação
117
118          %%% Recebendo os dados da simulação atual
119          model_xh = get(data_manobra2,'model_xh'); % Pega valores
de posição RPEHDS da simulação
120          model_vh = get(data_manobra2,'model_vh'); % Pega valores
de velocidade do RPEHDS da simulação
121          model_i = get(data_manobra2,'model_i'); % Pega valores

```

start_simulacao_RPEH_hidraulico.m 4/8
 C:\Users\leoga\Documents\UFSCar\11º... 13 de Dezembro de 2019

```

de corrente obtidos da simulação
122         model_xcp=get(data_manobra2,'model_xcp');           % Pega valores
de posição do pistão da simulação
123         model_vcp=get(data_manobra2,'model_vcp');           % Pega valores
de velocidade do pistão da simulação
124         model_tetaiw=get(data_manobra2,'model_tetaiw'); % Pega valores
de posição angular da roda de inércia IW da simulação
125         model_wtetaiw=get(data_manobra2,'model_wtetaiw'); % Pega os
valores de velocidade angular da roda de inércia IW da simulação
126         tout = get(data_manobra2,'tout'); % Pega vetor de tempo
127
128         %%% Formando os vetores globais
129         xh = [xh;model_xh(2:end)]; % Incrementa vetor de posicao
global RPEHDS -
130         vh = [vh;model_vh(2:end)]; % Incrementa vetor de velocidade
global RPEHDS -
131         i = [i;model_i(2:end)]; % Incrementa vetor de corrente
global -
132         xcp= [xcp;model_xcp(2:end)]; % Incrementa vetor posicao
global do pistão-
133         vcp= [vcp;model_vcp(2:end)]; % Incrementa vetor velocidade
global do pistão-
134         tetaiw=[tetaiw;model_tetaiw(2:end)];%Incrementa vetor posicao
angular iw global pistão-
135         wtetaiw=[wtetaiw; model_wtetaiw(2:end)];%Incrementa vetor
velocidade angular iw global -
136
137         %%% Passagem das CI para os próximos modelos
138         xh0 = xh(end); % Passa condição inicial para o próximo
modelo (posição inicial)
139         vh0 = vh(end); % Passa condição inicial para o próximo
modelo (velocidade inicial)
140         i0= i(end) ; % Passa a condição inicial para próximo
modelo (corrente inicial)
141         xcp0= xcp(end) ; % Passa a condição inicial para próximo
modelo (posição pistão inicial)
142         vcp0= vcp(end); % Passa a condição inicial para próximo
modelo (velocidade pistão inicial)
143         tetaiw0= tetaiw(end) ; % Passa a condição inicial para
próximo modelo (posição angular disco IW inicial)
144         wtetaiw0= wtetaiw(end); % Passa a condição inicial para
próximo modelo (velocidade angular disco IW inicial)
145         %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
146
147         t_ini = tout(end); % Passa tempo final da simulação para o
próximo modelo
148         tc = tout(end); % Atualiza contador de tempo
para o loop while
149
150
151         elseif status_manobra3 % Modelo do RPEDS indo para cima e (pistão e eixo do
gerador se movendo somente com sua Inércia (Sem transmissão de força do circuito
hidráulico para o pistão (CI não nulas))

```

start_simulacao_RPEH_hidraulico.m 5/8
 C:\Users\leoga\Documents\UFSCar\11º... 13 de Dezembro de 2019

```

152
153         data_manobra3 = sim(manobra3,'ReturnWorkspaceOutputs','on'); %
Simulação
154         %%%% Recebendo os dados da simulação atual
155         model_xh = get(data_manobra3,'model_xh'); % Pega valores
de posição RPEHDS
156         model_vh = get(data_manobra3,'model_vh'); % Pega valores
de velocidade do RPEHDS
157         model_i = get(data_manobra3,'model_i'); % Pega valores
de corrente
158         model_xcp=get(data_manobra3,'model_xcp'); % Pega valores
de posição do pistão
159         model_vcp=get(data_manobra3,'model_vcp'); % Pega valores
de velocidade do pistão
160         model_tetaiw=get(data_manobra3,'model_tetaiw'); % Pega valores
de posição angular da roda de inércia IW
161         model_wtetaiw=get(data_manobra3,'model_wtetaiw'); % Pega os
valores de velocidade angular da roda de inércia IW
162         tout = get(data_manobra3,'tout'); % Pega vetor de tempo
163
164         %%%% Formando os vetores globais
165         xh = [xh;model_xh(2:end)]; % Incrementa vetor de posicao
global RPEHDS -
166         vh = [vh;model_vh(2:end)]; % Incrementa vetor de velocidade
global RPEHDS -
167         i = [i;model_i(2:end)]; % Incrementa vetor de corrente
global -
168         xcp= [xcp;model_xcp(2:end)]; % Incrementa vetor posicao
global do pistão-
169         vcp= [vcp;model_vcp(2:end)]; % Incrementa vetor velocidade
global do pistão-
170         tetaiw=[tetaiw;model_tetaiw(2:end)];%Incrementa vetor posicao
angular iw global pistão-
171         wtetaiw=[wtetaiw; model_wtetaiw(2:end)];%Incrementa vetor
velocidade angular iw global -
172
173         %%%% Passagem das CI para os próximos modelos
174         xh0 = xh(end); % Passa condição inicial para o próximo
modelo (posição inicial)
175         vh0 = vh(end); % Passa condição inicial para o próximo
modelo (velocidade inicial)
176         i0= i(end) ; % Passa a condição inicial para próximo
modelo (corrente inicial)
177         xcp0= xcp(end) ; % Passa a condição inicial para próximo
modelo (posição pistão inicial)
178         vcp0= vcp(end); % Passa a condição inicial para próximo
modelo (velocidade pistão inicial)
179         tetaiw0=tetaiw(end) ; % Passa a condição inicial para próximo
modelo (posição angular disco IW inicial)
180         wtetaiw0=wtetaiw(end); % Passa a condição inicial para
próximo modelo (velocidade angular disco IW inicial)
181         %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
182         t_ini = tout(end); % Passa tempo final da simulação para o

```

start_simulacao_RPEH_hidraulico.m 6/8
 C:\Users\leoga\Documents\UFSCar\11°... 13 de Dezembro de 2019

```

próximo modelo
183             tc = tout(end);           % Atualiza contador de tempo
para o loop while
184
185
186     elseif status_manobra4
187
188         data_manobra4 = sim(manobra4, 'ReturnWorkspaceOutputs', 'on'); % Simulação
manobra 4
189
190         %%%% Recebendo os dados da simulação atual
191         model_xh = get(data_manobra4, 'model_xh');           % Pega valores
de posição RPEHDS da simulação
192         model_vh = get(data_manobra4, 'model_vh');           % Pega valores
de velocidade do RPEHDS da simulação
193         model_i = get(data_manobra4, 'model_i');           % Pega valores
de corrente obtidos da simulação
194         model_xcp=get(data_manobra4, 'model_xcp');           % Pega valores
de posição do pistão da simulação
195         model_vcp=get(data_manobra4, 'model_vcp');           % Pega valores
de velocidade do pistão da simulação
196         model_tetaiw=get(data_manobra4, 'model_tetaiw'); % Pega valores
de posição angular da roda de inércia IW da simulação
197         model_wtetaiw=get(data_manobra4, 'model_wtetaiw'); % Pega os
valores de velocidade angular da roda de inércia IW da simulação
198         tout = get(data_manobra4, 'tout'); % Pega vetor de tempo rodado
na manobra 4
199
200         %%%% Formando os vetores globais
201         xh = [xh;model_xh(2:end)]; % Incrementa vetor de posicao
global RPEHDS -
202         vh = [vh;model_vh(2:end)]; % Incrementa vetor de velocidade
global RPEHDS -
203         i = [i;model_i(2:end)]; % Incrementa vetor de corrente
global -
204         xcp= [xcp;model_xcp(2:end)]; % Incrementa vetor posicao
global do pistão-
205         vcp= [vcp;model_vcp(2:end)]; % Incrementa vetor velocidade
global do pistão-
206         tetaiw=[tetaiw;model_tetaiw(2:end)];%Incrementa vetor posicao
angular iw global pistão-
207         wtetaiw=[wtetaiw; model_wtetaiw(2:end)];%Incrementa vetor
velocidade angular iw global
208
209         %%%% Passagem das CI para os próximos modelos
210         xh0 = xh(end); % Passa condição inicial para o próximo
modelo (posição inicial)
211         vh0 = vh(end); % Passa condição inicial para o próximo
modelo (velocidade inicial)
212         i0= i(end) ; % Passa a condição inicial para próximo
modelo (corrente inicial)
213         xcp0= xcp(end) ; % Passa a condição inicial para próximo
modelo (posição pistão inicial)

```


start_simulacao_RPEH_hidraulico.m 7/8
 C:\Users\leoga\Documents\UFSCar\11°... 13 de Dezembro de 2019

```

214         vcp0= vcp(end);           % Passa a condição inicial para próximo↙
modelo (velocidade pistão inicial)
215         tetaiw0=tetaiw(end) ; % Passa a condição inicial para próximo↙
modelo (posição angular disco IW inicial)
216         wtetaiw0=wtetaiw(end); % Passa a condição inicial para↙
próximo modelo (velocidade angular disco IW inicial)
217         %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
218
219         t_ini = tout(end); % Passa tempo final da simulação da↙
manobra 4 para o próximo modelo
220         tc = tout(end);           % Atualiza contador de tempo↙
para o loop while
221
222     end
223
224
225 end
226
227
228 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Plota os gráficos da simulação (valores globais)
229
230
231 %% ANÁLISE DO SINAL ELÉTRICO GERADO
232 v_Ea = ka.*wtetaiw;           % Voltagem induzida na armadura [V]
233 v_Ua = v_Ea - Ra*i;           % Voltagem gerada [V]
234 v_ULo = RL*i;                 % Voltagem na carga [V]
235 v_PGe = v_Ua.*i;             % Potência gerada no gerador [W]
236 EGe = trapz(t(1:length(v_PGe)),v_PGe); % Energia gerada [J]
237 v_PLo = v_ULo.*i;           % Potência dissipada na carga [W]
238 ELo = trapz(t(1:length(v_PLo)),v_PLo); % Energia dissipada na carga [J]
239
240 max_x = max(abs(xh))*1000;
241 max_w = 60*max(wtetaiw)/(2*pi);
242 max_ia = max(i);
243 max_Ua = max(v_Ua);
244 max_ULo = max(v_ULo);
245 max_PGe = max(v_PGe);
246
247
248 disp('-----');
249 disp(['x = ',num2str(max_x)]);
250 disp(['w = ',num2str(max_w)]);
251 disp(['ia = ',num2str(max_ia)]);
252 disp(['Ua = ',num2str(max_Ua)]);
253 disp(['ULo = ',num2str(max_ULo)]);
254 disp(['PGe = ',num2str(max_PGe)]);
255 disp(['EGe = ',num2str(EGe)]);
256 disp(['ELo = ',num2str(ELo)]);
257
258 %% PLOTS
259
260 figure(1);
261 plot(t(1:length(xh)),xh*1000,'linewidth',1.2); grid on;

```

start_simulacao_RPEH_hidraulico.m 8/8
 C:\Users\leoga\Documents\UFSCar\11°... 13 de Dezembro de 2019

```

262 xlabel('Tempo [s]','fontsize',14);ylabel('Deslocamento do coletor de energia, x_h
[mm]','fontsize',14);
263
264 figure(2);
265 plot(t(1:length(vh)),vh*1000,'linewidth',1.2);grid on;
266 xlabel('Tempo [s]','fontsize',14);ylabel('Velocidade [mm/s]','fontsize',14);
267
268 figure(3);
269 plot(t(1:length(xcp)),xcp*1000,'linewidth',1.2);grid on;
270 xlabel('Tempo [s]','fontsize',14);ylabel('Deslocamento do pistão, x_{cp}
[mm]','fontsize',14);
271
272 figure(4);
273 plot(t(1:length(wtetaiw)),wtetaiw*60/(2*pi),'linewidth',1.2);grid on;
274 xlabel('Tempo [s]','fontsize',14);ylabel('Rotação [rpm]','fontsize',14);
275
276 figure(5);
277 plot(t(1:length(i)),i,'linewidth',1.2);grid on;
278 xlabel('Tempo [s]','fontsize',14);ylabel('Corrente elétrica [A]','fontsize',14);
279
280 figure(6);
281 plot(t(1:length(v_Ua)),v_Ua,'linewidth',1.2);grid on;
282 xlabel('Tempo [s]','fontsize',14);ylabel(' Tensão induzida no gerador
[V]','fontsize',14);
283
284 figure(7);
285 plot(t(1:length(v_PGe)),v_PGe,'linewidth',1.2);grid on;
286 xlabel('Tempo [s]','fontsize',14);ylabel('Potência de saída do gerador
[W]','fontsize',14);
287
288
289 figure(8);
290 plot(t, Fv(:,2),'linewidth',1.2);grid on;
291 xlabel('Tempo [s]','fontsize',14);ylabel('Intensidade [N]','fontsize',14);
292
293
294

```

parametros_modelos_RPEH_hidraulico.m 1/2
 C:\Users\leoga\Documents\UFSCar\11°... 10 de Dezembro de 2019

```

1 %%Parâmetros utilizado nos modelos das manobras, para as
2 %simulações do dispositivo RPEH hidráulico no Simulink %%%
3
4
5 m_h= 30; %%% [Kg]
6 A_h= 0.04*0.04 ; %%% [m^2]
7 K_h= 400000; %%% [N/m]
8 A_cp= 0.1*A_h; %%% [m^2]
9 A_rod= 0.8*A_cp ;%% [m^2]
10 m_cp= 2 ; %%% [Kg]
11 r_p= 0.1; %%% [m]
12 ka= 0.25 ; %%% [V/(rad/s)]
13 La= 0.06 ; %%% [H]
14 Ra = 0.3; %%% [ohms]
15 RL= 100; %%% [ohms]
16
17 J_gen= 0.05 ; % Momento de inércia do gerador kg*m^2
18 J_IW=0.0045; % Momento de inércia do Volante de inércia:kg*m^2
19 J_p= (1*0.005^2)/2; % Momento de inércia Pinhão kg*m^2 ;
20 J_sh= 5*10^-5; % Momento de inércia eixo kg*m^2 ;
21
22 %% parametros perda de carga
23
24 dtub = 25.4*10^-3; % 1 [pol]
25 Atub = pi*(dtub^2)/4;
26 rho = 865; % Densidade do fluido [kg/m^3]
27 mi = 1.05/(100^2); % Viscosidade cinemática
28 Kloss = 20.9; % K resultante das perdas de carga localizadas
29 Ltub = 3; % Comprimento da tubulação [m]
30
31
32 %%%parametros do pistão %%%
33
34 xcp_min=0; %%% [m] pistão começa com deslocamento nulo
35 xcp_max=0.25 ;%0.25 ; %%% [m] tamanho do cursor do pistão (deslocamento máximo do
36 pistão)
37 %%%
38 J_T= J_gen + J_IW + J_sh + J_p ; %% [kg*m^2] Momento de inércia total no eixo do
39 sistema RPEH
40 b_gen= 5 ; %%% [Ns/m] amortecimento no eixo do gerador
41 b_p= 1; %%% [Ns/m] amortecimento do pinhão
42 b= b_gen + b_p; %%% [Ns/m] amortecimento dos elementos rotativos;
43
44 a0= ((J_T*A_h)/(A_cp*(r_p^2))) + ((A_cp*m_h)/A_h) + ((m_cp*A_h)/A_cp);
45
46 a_1= (b*A_h)/(A_cp*(r_p^2));
47
48 a_2= (K_h*A_cp)/A_h ;
49
50 a3= ka/r_p ;
51

```

parametros_modelos_RPEH_hidraulico.m 2/2
C:\Users\leoga\Documents\UFSCar\11°... 10 de Dezembro de 2019

```
52 a4= A_cp/A_h ;
53
54 a5= A_cp ;
55
56 a6= A_rod ;
57
58 b0= (ka*A_h)/(A_cp*r_p);
59
60 b1= La ;
61
62 b2= Ra+RL ;
63
64
65 arm_artificial= -1000; %%% amortecimento artificial para evitar que xh>0
66
67
68 J_T2= J_gen + J_IW + J_sh ; %% soma de momento de energia no eixo do gerador
(desacoplado do pinhão)
69
70
71 c0= ( ((A_rod*m_h)/A_h) + ( (m_cp+(J_p/(r_p^2)))*(A_h/A_rod) ) );
72
73 c1= (K_h*A_rod)/A_h ;
74
75 c4= A_rod/A_h ;
76
77 c2= A_rod ;
78
79 c3= A_cp ;
80
81
82 t_fim= 15; % [s] tempo final da simulacao
83 dt= 0.0001 ; %% [s] tamanho do tempo do passo de simulacao
84 valor_pulso= 5000 ;
85
86
```


chaveamento_manobra1.m

1/4

C:\Users\leoga\Documents\UFSCar\11º... 10 de Dezembro de 2019

```

1
2 function [sys,x0,str,ts,simStateCompliance] = chaveamento_manobra1(t,x,u,flag)
3
4 persistent A_h ;
5 persistent A_cp ;
6 persistent xcp_max ;
7 persistent r_p ;
8 persistent xcp0 ;
9 persistent vcp0 ;
10 persistent xh0 ;
11 persistent vh0 ;
12 persistent tetaiw0 ;
13 persistent wtetaiw0 ;
14 persistent xcp ;
15 persistent vcp ;
16 persistent tetaiw ;
17 persistent wtetaiw ;
18 persistent stop ;
19
20     switch flag
21
22         %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
23         % Initialization %
24         %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
25     case 0
26
27     A_h = evalin('base','A_h;'); % Avalia o valor de A_h no workspace base (Area do
lado esquerdo do pistao)
28     A_cp = evalin('base','A_cp;'); % Avalia o valor de A_cp no workspace base (Area
do lado esquerdo do pistao)
29     xcp_max = evalin('base','xcp_max;'); %%% valor max da posicao do pistao
30     r_p = evalin('base','r_p;'); %%% valor do raio do pinhão
31     xcp0 = evalin('base','xcp0;'); %%% valor da posicao inicial do pistao
32     vcp0 = evalin('base','vcp0;'); %%% valor da velocidade inicial do pistao ;
33     xh0 = evalin('base','xh0 ;'); %%% valor da posicao inicial do RPEHDS
34     vh0 = evalin('base','vh0 ;'); %%% valor da velocidade inicial do RPEHDS
35     tetaiw0 = evalin('base','tetaiw0 ;'); %%% valor da posicao angular inicial do
disco IW
36     wtetaiw0 = evalin('base','wtetaiw0 ;'); %%% valor da velocidade angular inicial do
disco IW
37     % CV= evalin('base','CV;'); %%% posicao da valvula de controle
38     stop = 0 ;
39     xcp = xcp0; %%% Inicializa o valor de xcp
40     vcp = vcp0; %%% Inicializa o valor de vcp
41     tetaiw = tetaiw0 ; %%% Inicializa o valor de tetaiw
42     wtetaiw = wtetaiw0 ; %%% Inicializa o valor de wtetaiw
43
44     [sys,x0,str,ts,simStateCompliance]=mdlInitializeSizes();
45
46
47     case { 1, 2, 4} %%% As flags 1,2,4 retornando matriz vazia
48         sys=[];
49         %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

chaveamento_manobra1.m

2/4

C:\Users\leoga\Documents\UFSCar\11º... 10 de Dezembro de 2019

```

50     % Outputs %
51     %%%%%%%%%%
52     case 3
53         %%%%%%%%%% INICIO CHAVEAMENTO %%%%%%%%%%
54
55     %%%%% Entradas %%%%%%%%%%
56     xh= u(1); %%% u(1) %% xh           Entrada do bloco s_function
(entrada do mux)
57     vh =u(2) ;%% u(2) %% xh_linha
58     %%%%%%%%%%
59 % modelo 1 sendo executado (No Inicio da simulação as CI são nulas)
60
61     if vh<0 %%% se RPEH DS estiver descendo com xh<0
62
63
64         xcp= -(A_h/A_cp)*(xh- xh0) + xcp0 ; %%% posicao de xcp
(Movimento do pistao para direita)
65         vcp= -(A_h/A_cp)*vh ;           %%% velocidade do
pistao
66         tetaiw= -(A_h/(A_cp*r_p))*(xh- xh0) + tetaiw0 ;%%
posicao angular do disco iw
67         wtetaiw= vcp/r_p ; %%% velocidade angular do disco iw
68
69
70
71         if (xcp>=xcp_max) %%% se o
pistao tiver deslocamento máximo (troca de modelo)
72
73         xcp=xcp_max ; %%% o pistao é
forçado a para quando o pistao chega no fim do curso (vcp=0)
74         vcp=0 ;
75         evalin
('base','status_manobra2= 1;') ; %%% habilita o modelo 3 (pistao esquerda) ; CV=
posicao 2 %% executa o modelo 4 (gerador girando livre)
76         evalin
('base','status_manobra4= 0;') ;
77         evalin
('base','status_manobra1= 0;') ;
78         evalin
('base','status_manobra3= 0;') ;
79         stop=1;
80         sys=[stop xcp vcp tetaiw
wtetaiw];
81
82         end
83
84         sys=[stop xcp vcp tetaiw wtetaiw]; %%% roda essa parte
até xcp==xcp_max ou (xh>0 ou vh>0)
85
86     else %% quer dizer que RPEH DS está subindo(xh'>0) ou parado xh=0 => fluido
não se move, logo não tem perda de carga
87         evalin('base','status_manobra3= 1;') ; %% executa
o modelo 2

```

chaveamento_manobra1.m 3/4
 C:\Users\leoga\Documents\UFSCar\11º... 10 de Dezembro de 2019

```

88         evalin('base','status_manobra1= 0;') ;
89         evalin('base','status_manobra2= 0;') ;
90         evalin('base','status_manobra4= 0;') ;
91         stop=1;
92         sys=[stop xcp vcp tetaiw wtetaiw];
93     end
94
95
96         %%% FIM CHAVEAMENTO %%%
97
98     %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
99     % Terminate %
100    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
101    case 9
102        sys=mdlTerminate();
103        %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
104        % Unexpected flags %
105        %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
106    otherwise
107        DASTudio.error('Simulink:blocks:unhandledFlag', num2str(flag));
108    end %%% fim switch
109
110    function [sys,x0,str,ts,simStateCompliance]=mdlInitializeSizes()
111
112    sizes = simsizes;
113    sizes.NumContStates = 0;
114    sizes.NumDiscStates = 0;
115    sizes.NumOutputs = 5 ;
116    sizes.NumInputs = 2;
117    sizes.DirFeedthrough = 1;
118    sizes.NumSampleTimes = 1;
119    sys = simsizes(sizes);
120
121    % initialize the initial conditions
122    x0 = [];
123    % str is always an empty matrix
124    str = [];
125    % initialize the array of sample times
126    ts = [0 0]; %%% tempo de amostragem continuo (executa o s_function no passo
de simulação)
127    % 'UnknownSimState', < The default setting; warn and assume DefaultSimState
128    simStateCompliance = 'UnknownSimState';
129
130    %=====
131    % mdlTerminate
132    % Perform any end of simulation tasks.
133    %=====
134    function sys=mdlTerminate() %%% função usada na flag 9
135
136    %%% passagem das condicoes iniciais
137

```


chaveamento_manobra1.m

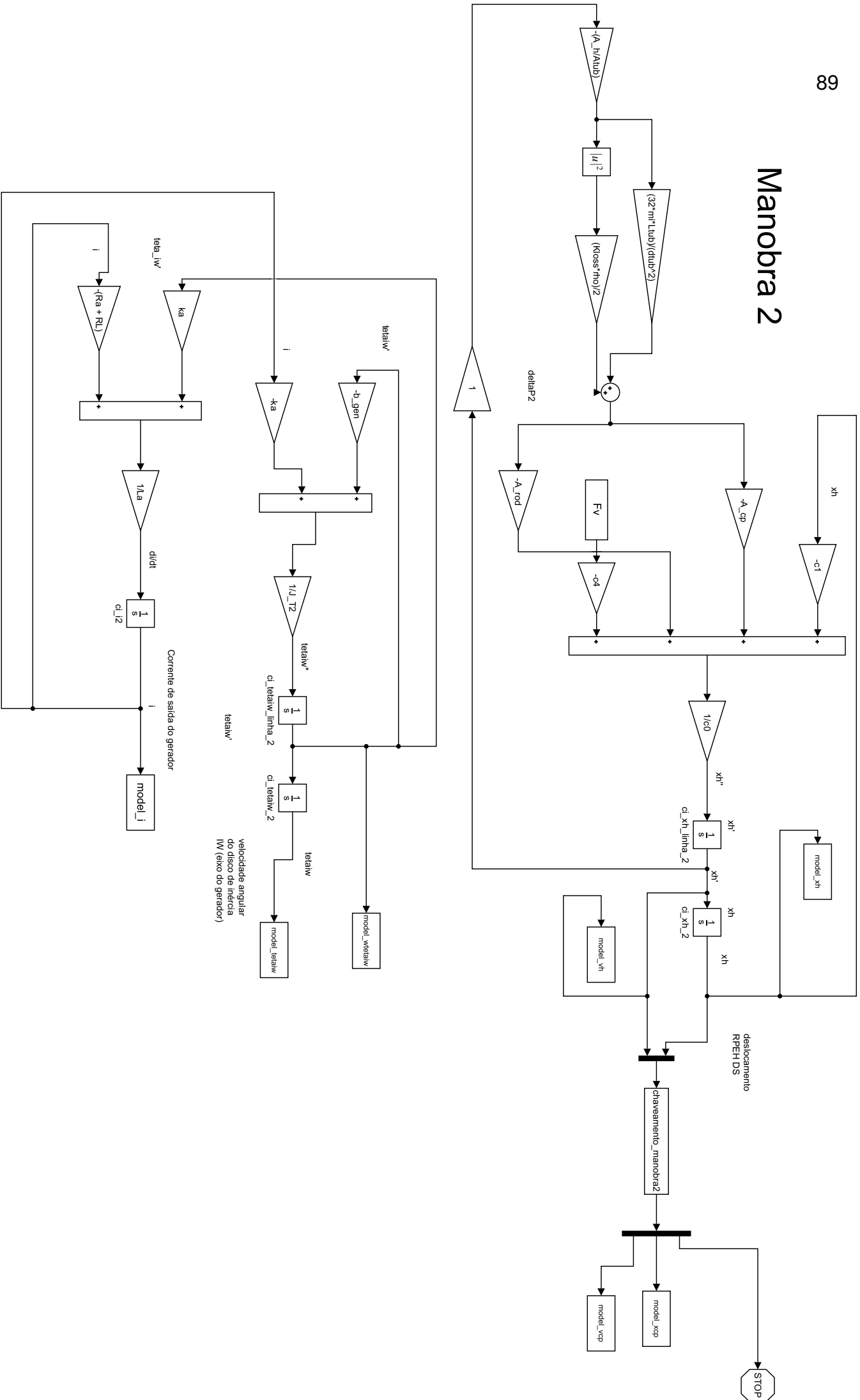
4/4

C:\Users\leoga\Documents\UFSCar\11°...

10 de Dezembro de 2019

```
138 sys = []; %% Não faz nada no final da simulação
139 % end mdlTerminate
140
141
142
143
```

Manobra 2



chaveamento_manobra2.m

1/3

C:\Users\leoga\Documents\UFSCar\11º... 10 de Dezembro de 2019

```

1
2 function [sys,x0,str,ts,simStateCompliance] = chaveamento_manobra2(t,x,u,flag)
3
4 persistent A_h ;
5 persistent A_cp ;
6 persistent xcp_min ;
7 persistent xcp0 ;
8 persistent vcp0 ;
9 persistent xh0 ;
10 persistent vh0;
11 persistent xcp ;
12 persistent vcp ;
13 persistent stop_2 ;
14
15     switch flag
16
17         %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
18         % Initialization %
19         %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
20     case 0
21
22         A_h = evalin('base', 'A_h;'); % Avalia o valor de A_h no workspace base
23         A_cp = evalin('base','A_cp;'); % Avalia o valor de A_cp no workspace
24         xcp0= evalin('base','xcp0;'); %%% valor da posicao inicial do pistao
25         vcp0= evalin('base','vcp0;'); %%% valor da velocidade inicial do pistao ;
26         xh0= evalin('base','xh0 ;'); %%% valor da posicao inicial do RPEHDS
27         vh0= evalin('base','vh0 ;'); %%% valor da velocidade inicial do RPEHDS
28         xcp= xcp0; %%% Inicializa o valor de xcp
29         vcp= vcp0; %%% Inicializa o valor de vcp
30         stop_2 =0 ;
31         xcp_min = evalin('base','xcp_min;');
32
33         [sys,x0,str,ts,simStateCompliance]=mdlInitializeSizes();
34     case { 1, 2, 4} %%% As flags 1,2,4 retornando matriz vazia
35         sys=[];
36         %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
37         % Outputs %
38         %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
39     case 3
40
41     %%% Entradas %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
42     xh= u(1); %%% u(1)                               Entrada do bloco s_function
43     vh =u(2) ;%% u(2)
44
45     %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
46
47     %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
48     %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% INICIO CHAVEAMENTO
49     %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

chaveamento_manobra2.m

2/3

C:\Users\leoga\Documents\UFSCar\11º... 10 de Dezembro de 2019

```

50  if vh<0 %%%% se RPEH DS estiver descendo com xh<0
51
52      xcp2= (A_h/A_cp)*(xh-xh0) ; %%% deslocamento do pistao (incremento de xh)
53      xcp= xcp0 + xcp2; %%% posicao de xcp, usando xcp_max (xcp0) como referencia
; xcp2<0
54      vcp= (A_h/A_cp)*vh ; %%% velocidade de xcp (não depende de referencia)
55
56      if xcp<= xcp_min %%%% se o pistao chegar no
inicio do curso (xcp_min) (troca de modelo)
57          xcp=xcp_min ; %%% o pistao é forçado a
para quando o pistao chega no inicio do curso (vcp=0)
58          vcp=0 ;
59          evalin('base','status_manobra3= 0 ;') ;
60          evalin('base','status_manobra2= 0 ;') ;
61          evalin('base','status_manobra1= 1 ;') ; %
62          evalin('base','status_manobra4= 0 ;') ; %
63          stop_2= 1;
64          sys=[stop_2 xcp vcp];
65      end
66      sys=[stop_2 xcp vcp];
67
68
69  else % quer dizer que RPEH DS está subindo(xh'>0) ou xh'=0 => não desloca
fluido
70      %          executa o modelo 5 (RPEH DS retornando para cima)
71          evalin('base','status_manobra1= 0 ;') ; %
72          evalin('base','status_manobra3= 0 ;') ; %
73          evalin('base','status_manobra2= 0 ;') ; %
74          evalin('base','status_manobra4= 1 ;') ; %
75          stop_2= 1;
76          sys=[stop_2 xcp vcp] ;
77  end
78
79  %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% FIM CHAVEAMENTO
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
80
81      %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
82      % Terminate %
83      %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
84      case 9
85          sys=mdlTerminate();
86          %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
87          % Unexpected flags %
88          %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
89      otherwise
90          DAStudio.error('Simulink:blocks:unhandledFlag', num2str(flag));
91  end %%% fim switch
92
93
94  function [sys,x0,str,ts,simStateCompliance]=mdlInitializeSizes()
95
96  sizes = simsizes;
97  sizes.NumContStates = 0;

```

chaveamento_manobra2.m

3/3

C:\Users\leoga\Documents\UFSCar\11º... 10 de Dezembro de 2019

```
98 sizes.NumDiscStates = 0;
99 sizes.NumOutputs    = 3 ;
100 sizes.NumInputs    = -1;
101 sizes.DirFeedthrough = 1;
102 sizes.NumSampleTimes = 1;
103
104 sys = simsizes(sizes);
105
106 % initialize the initial conditions
107 x0 = [];
108 % str is always an empty matrix
109 str = [];
110 % initialize the array of sample times
111 ts = [0 0]; %%% tempo de amostragem contínuo (executa o s_function no passo
de simulação)
112 % 'UnknownSimState', < The default setting; warn and assume DefaultSimState
113 simStateCompliance = 'UnknownSimState';
114
115
116 %=====
117 % mdlTerminate
118 % Perform any end of simulation tasks.
119 %=====
120 function sys=mdlTerminate() %%% função usada na flag 9
121
122 %%% passagem das condições iniciais
123
124 sys = []; %% Não faz nada no final da simulação
125 % end mdlTerminate
126
127
128
129
```


chaveamento_manobra3.m

2/3

C:\Users\leoga\Documents\UFSCar\11°... 10 de Dezembro de 2019

```

50 tetaiw = ((xcp- xcp0)/r_p) + tetaiw0; %%% posicao angular do disco IW
51 wtetaiw= vcp/r_p ; %%% velocidade angular do disco IW
52
53         if(vh<0) %%% ocorre o amortecimento pelo fluido ( perda de
carga pelo circuito hidraulico);
54
55         if xcp>=xcp_max
56             evalin('base','status_manobra3= 0;') ;
57             evalin('base','status_manobra1= 0;') ;
58             evalin('base','status_manobra2= 1;') ;
59             evalin('base','status_manobra4= 0;') ;
60             xcp= xcp_max; %%% quando o pistao chega no fim
do curso xcp=xcp_max e vcp=0
61             % vcp=0;
62             tetaiw = ((xcp- xcp0)/r_p) + tetaiw0; %%%
posicao angular do disco IW
63             stop_3=1;
64             sys=[stop_3 xcp vcp tetaiw wtetaiw] ;
65         end
66
67             evalin('base','status_manobra1= 1;') ;
68             evalin('base','status_manobra3= 0;') ;
69             evalin('base','status_manobra2= 0;') ;
70             evalin('base','status_manobra4= 0;') ;
71             stop_3=1;
72             sys=[stop_3 xcp vcp tetaiw wtetaiw] ;
73
74         else
75
76         if xcp>=xcp_max
77             xcp= xcp_max; %%% quando o pistao chega no
fim do curso xcp=xcp_max e vcp=0
78             % vcp=0;
79             tetaiw = ((xcp- xcp0)/r_p) + tetaiw0; %%%
posicao angular do disco IW
80             stop_3=1;
81             evalin('base','status_manobra1= 0;') ;
82             evalin('base','status_manobra3= 0;') ;
83             evalin('base','status_manobra2= 1;') ;
84             evalin('base','status_manobra4= 0;') ;
85             sys=[stop_3 xcp vcp tetaiw wtetaiw] ;
86         end
87
88             sys=[stop_3 xcp vcp tetaiw wtetaiw] ;
89
90         end
91
92         %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% FIM CHAVEAMENTO%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
93
94         %%%%%%%%%%%%%
95         % Terminate %
96         %%%%%%%%%%%%%
97         case 9

```


chaveamento_manobra3.m

3/3

C:\Users\leoga\Documents\UFSCar\11°...

10 de Dezembro de 2019

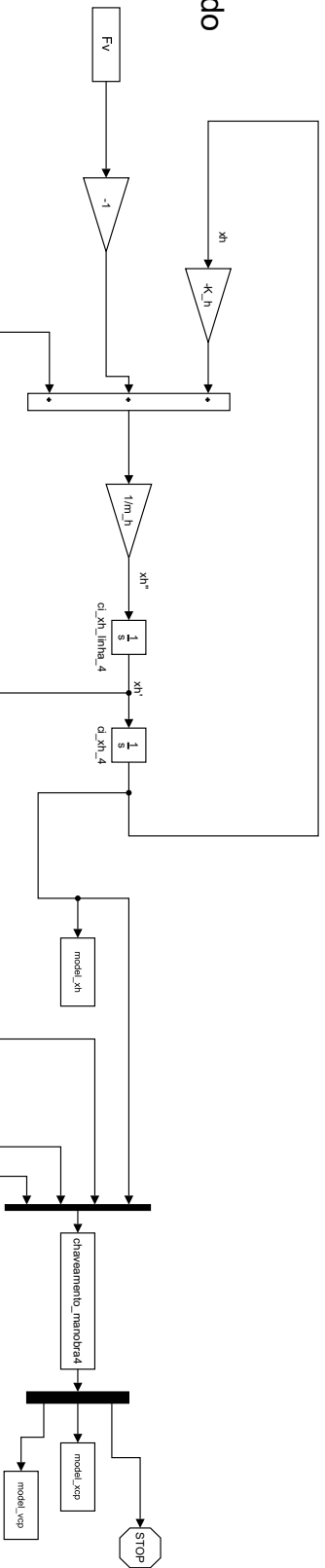
```

98     sys=mdlTerminate();
99     %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
100    % Unexpected flags %
101    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
102    otherwise
103        DASTudio.error('Simulink:blocks:unhandledFlag', num2str(flag));
104    end %%% fim switch
105
106
107
108 function [sys,x0,str,ts,simStateCompliance]=mdlInitializeSizes ()
109
110 sizes = simsizes;
111 sizes.NumContStates = 0;
112 sizes.NumDiscStates = 0;
113 sizes.NumOutputs = 5 ;
114 sizes.NumInputs = 4;
115 sizes.DirFeedthrough = 1;
116 sizes.NumSampleTimes = 1;
117 sys = simsizes(sizes);
118
119 % initialize the initial conditions
120 x0 = [];
121 % str is always an empty matrix
122 str = [];
123 % initialize the array of sample times
124 ts = [0 0]; %%%% tempo de amostragem contínuo (executa o s_function no passo
de simulação)
125 % 'UnknownSimState', < The default setting; warn and assume DefaultSimState
126 simStateCompliance = 'UnknownSimState';
127
128
129 %=====
130 % mdlTerminate
131 % Perform any end of simulation tasks.
132 %=====
133 function sys=mdlTerminate() %%% função usada na flag 9
134
135 sys = []; %% Não faz nada no final da simulação
136 % end mdlTerminate
137
138
139
140

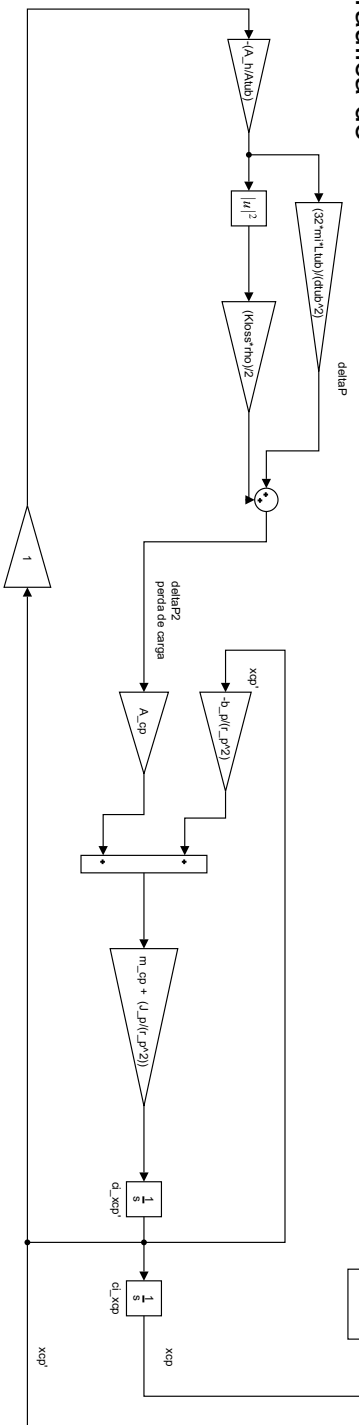
```

Manobra 4

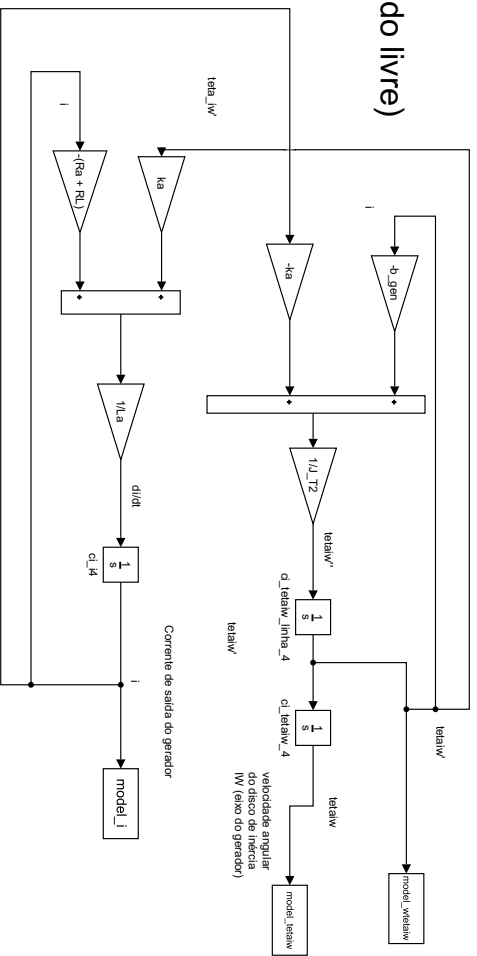
Modelo coletor retornando
(sem amortecimento)



Modelo do pistão/
cremalheira/pinhão
(sem transmissão de
pressão hidráulica do
coletor)



Modelo do gerador
desacoplado (girando livre)



chaveamento_manobra4.m

1/3

C:\Users\leoga\Documents\UFSCar\11º... 10 de Dezembro de 2019

```

1
2 function [sys,x0,str,ts,simStateCompliance] = chaveamento_manobra4(t,x,u,flag)
3
4 persistent xcp_min;
5 persistent stop_4 ;
6 persistent xcp ;
7 persistent vcp;
8
9
10 switch flag
11
12     %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
13     % Initialization %
14     %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
15     case 0
16
17         xcp_min = evalin('base','xcp_min;'); %% valor max da posicao do pistão
18         stop_4 = 0 ;
19
20
21         [sys,x0,str,ts,simStateCompliance]=mdlInitializeSizes();
22
23     case { 1, 2, 4} %%% As flags 1,2,4 retornando matriz vazia
24         sys=[];
25
26         %%%%%%%%%%%
27         % Outputs %
28         %%%%%%%%%%%
29     case 3
30
31 %%%%% Entradas %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
32 xh= u(1); %%% xh_2 u(1)                               Entrada do bloco✓
33 s_function (entrada do mux)
34 vh =u(2) ;%% xh_linha_2 u(2)
35 xcp= u(3); %% xcp
36 vcp= u(4); %% xcp_linha
37 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% INICIO CHAVEAMENTO✓
38 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
39
40         if vh<0
41
42             if xcp<=xcp_min
43
44                 evalin('base','status_manobra3= 0;') ;
45                 evalin('base','status_manobra1= 1;') ;
46                 evalin('base','status_manobra2= 0;') ;
47                 evalin('base','status_manobra4= 0;') ;
48                 xcp= xcp_min; %quando o pistao chega no inicio✓
49
50         do curso xcp=xcp_min e vcp=0
51                 vcp=0;
52                 stop_4=1;

```

chaveamento_manobra4.m

2/3

C:\Users\leoga\Documents\UFSCar\11º... 10 de Dezembro de 2019

```

51         sys=[stop_4 xcp vcp ] ;
52     end
53
54
55         evalin('base','status_manobra1= 0;') ;
56         evalin('base','status_manobra3= 0;') ;
57         evalin('base','status_manobra2= 1;') ;
58         evalin('base','status_manobra4= 0;') ;
59         stop_4=1;
60         sys=[stop_4 xcp vcp ] ;
61
62     else
63
64         if xcp<=xcp_min
65             xcp= xcp_min; %%% quando o pistao chega no
66 inicio do curso xcp=xcp_min e vcp=0
67             vcp=0;
68             evalin('base','status_manobra1= 1;') ;
69             evalin('base','status_manobra3= 0;') ;
70             evalin('base','status_manobra2= 0;') ;
71             evalin('base','status_manobra4= 0;') ;
72             stop_4=1;
73             sys=[stop_4 xcp vcp ] ;
74         end
75
76         sys=[stop_4 xcp vcp ] ;
77     end
78
79     %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% FIM CHAVEAMENTO%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
80
81     %%%%%%%%%%%
82     % Terminate %
83     %%%%%%%%%%%
84     case 9
85         sys=mdlTerminate();
86     %%%%%%%%%%%
87     % Unexpected flags %
88     %%%%%%%%%%%
89     otherwise
90         DASTudio.error('Simulink:blocks:unhandledFlag', num2str(flag));
91     end %%% fim switch
92
93
94
95 function [sys,x0,str,ts,simStateCompliance]=mdlInitializeSizes()
96
97 sizes = simsizes;
98 sizes.NumContStates = 0;
99 sizes.NumDiscStates = 0;
100 sizes.NumOutputs = 3 ;
101 sizes.NumInputs = 4;
102 sizes.DirFeedthrough = 1;

```

chaveamento_manobra4.m

3/3

C:\Users\leoga\Documents\UFSCar\11°... 10 de Dezembro de 2019

```
103 sizes.NumSampleTimes = 1;
104 sys = simsizes(sizes);
105
106 % initialize the initial conditions
107 x0 = [];
108 % str is always an empty matrix
109 str = [];
110 % initialize the array of sample times
111 ts = [0 0]; %%%% tempo de amostragem contínuo (executa o s_function no passo
de simulação)
112 % 'UnknownSimState', < The default setting; warn and assume DefaultSimState
113 simStateCompliance = 'UnknownSimState';
114
115
116 %=====
117 % mdlTerminate
118 % Perform any end of simulation tasks.
119 %=====
120 function sys=mdlTerminate() %%% função usada na flag 9
121
122 sys = []; %% Não faz nada no final da simulação
123 % end mdlTerminate
124
125
126
127
```

APÊNDICE B – MODELO COMPUTACIONAL DO DISPOSITIVO RPEH ELETROMECAÂNICO- MATLAB/SIMULINK

Esse apêndice apresenta os códigos do MATLAB e diagrama de blocos do SIMULINK que foram utilizados para implementação do modelo computacional do dispositivo coletor de energia de estradas pavimentadas eletromecânico. O modelo computacional é utilizado para simular esse dispositivo e originar dados que permitem a análise energética do mesmo. A ordem que esses códigos e diagramas são executados são vistos no fluxograma da Figura 20, apresentado em 3.2.2.

start_simulacao_RPEH_eletromecanico.m 1/2
 C:\Users\leoga\Documents\UFSCar\11°... 13 de Dezembro de 2019

```

1 %%%% simulacao do dispositivo RPEH eletromecânico%%
2 clear;
3 clc;
4 close all;
5
6 parametros_RPEH_eletromecanico %% parametros RPEH eletromecanico
7
8 t_ini=0; %% [s] tempo de inicio da simulacao
9 t_fim= 10; % [s] tempo final da simulacao
10 dt= 0.0001 ; %% [s] tamanho do tempo do passo de simulação
11
12 %%%% parametros da entrada Fv %%%%
13 valor_pulso= 5000 ; %% [N] valor do pulso retangular
14 ti_pulso= 4 ; %% [s] inicio do pulso
15 tf_pulso= ti_pulso+0.5 ; %% [s] fim do pulso
16 ind_ti_pulso= ti_pulso/dt + 1; %% indice do ti_pulso
17 ind_tf_pulso= tf_pulso/dt + 1 ; %% indice do tf_pulso
18 %%%% pulso 2
19
20 ti_pulso2= tf_pulso + 1 ; %% [s] inicio do pulso
21 tf_pulso2= ti_pulso2 + 0.5 ; %% [s] fim do pulso
22 ind_ti_pulso2= ti_pulso2/dt + 1; %% indice do ti_pulso
23 ind_tf_pulso2= tf_pulso2/dt + 1 ; %% indice do tf_pulso
24
25 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
26 t = t_ini:dt:t_fim; % Vetor de tempo
27 Fv = zeros(length(t),2); % inicializa a matriz Fv com zeros
28 Fv(:,1) = t'; % Primeira coluna de Fv deve ser tempo (para simulink
saber em que instante a força é aplicada)
29 Fv(ind_ti_pulso:ind_tf_pulso,2) = valor_pulso;
30 Fv(ind_ti_pulso2:ind_tf_pulso2,2) = valor_pulso;
31
32
33 model = 'RPEH_eletromecanico.slx' ;
34 data_model = sim(model, 'ReturnWorkspaceOutputs', 'on', 'SrcWorkspace', 'current'); %
Simulação modelo
35
36 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Plota os gráficos da simulação (valores globais)
37
38
39 %% ANÁLISE DO SINAL ELÉTRICO GERADO
40
41 xh= data_model.xh;
42 egl= data_model.egl;
43
44 i= egl./RL; % Corrente na carga [A]
45 PGe = egl.*i; % Potência gerada no gerador [W]
46 EGe = trapz(t(1:length(PGe)),PGe); % Energia gerada [J]
47
48 max_xh = max(abs(xh))*1000;
49 max_i = max(i);
50 max_Egl = max(egl);
51 max_PGe = max(PGe);

```

start_simulacao_RPEH_eletromecanico.m 2/2
 C:\Users\leoga\Documents\UFSCar\11º... 13 de Dezembro de 2019

```

52
53 disp('-----');
54 disp(['x = ',num2str(max_xh)]);
55 disp(['i = ',num2str(max_i)]);
56 disp(['Egl = ',num2str(max_Egl)]);
57 disp(['PGe = ',num2str(max_PGe)]);
58 disp(['EGe = ',num2str(EGe)]);
59
60 %% PLOTS
61
62 figure(1);
63 plot(t(1:length(xh)),xh*1000,'linewidth',1.2); grid on;
64 xlabel('Tempo [s]','fontsize',14);ylabel('Deslocamento do coletor de energia, x_{h} [mm]','fontsize',14);
65
66 figure(2);
67 plot(t(1:length(i)),i,'linewidth',1.2);grid on;
68 xlabel('Tempo [s]','fontsize',14);ylabel('Corrente elétrica [A]','fontsize',14);
69
70 figure(3);
71 plot(t(1:length(egl)),egl,'linewidth',1.2);grid on;
72 xlabel('Tempo [s]','fontsize',14);ylabel('Tensão induzida no gerador [V]','fontsize',14);
73
74 figure(4);
75 plot(t(1:length(PGe)),PGe,'linewidth',1.2);grid on;
76 xlabel('Tempo [s]','fontsize',14);ylabel('Potência de saída do gerador [W]','fontsize',14);
77
78 figure(5);
79 plot(t, Fv(:,2),'linewidth',1.2);grid on;
80 xlabel('Tempo [s]','fontsize',14);ylabel('Intensidade [N]','fontsize',14);
81
82
83
84
85
86

```


parametros_RPEH_eletromecanico.m

1/1

C:\Users\leoga\Documents\UFSCar\11°...

10 de Dezembro de 2019

```
1 %%Parametros do dispositivo RPEH eletromecanico%%
2
3 % condicoes iniciais são todas nulas
4
5 vh0=0 ;
6 xh0=0;
7
8 % Parametros do coletor e da carga
9 K= 400000; % cte rigidez [N/m] % K_{h}
10 M_e= 50 ; % massa do conjunto[coletor-imã~] [Kg] % M_{e}
11 B_e = 2000; % cte amortecimento [N/(m/s)] % B_{e}
12 RL= 100 ;% Carga[ohms]
13
14 % Main structural parameters of linear generator.
15
16 wp= 0.1; % pole width [m]
17
18 Bt= 1.55; % magnetic field in a tooth Bt [T]
19 wt= 0.008; %width of a stator tooth wt [m]
20 d= 0.4 ;%width of the stator stack [m]
21
22 p= 100; % number of pole
23 c = 6 ; % number of cables in slot
24 q = 6/5 ; % number of slots per pole and phase
25
26
27 Bmax= Bt*wt*d*p*q*c ; %% fluxo máximo do imã [T]
28
```

Dispositivo RPEH eletromecânico

