UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

SERGIO LOURENÇO ROSSI JÚNIOR

MODELAGEM ELÉTRICA DE UM SISTEMA DE REDUTORES DE VELOCIDADE APLICADO NA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA PÚBLICA

> Caxias do Sul 2020

SERGIO LOURENÇO ROSSI JÚNIOR

MODELAGEM ELÉTRICA DE UM SISTEMA DE REDUTORES DE VELOCIDADE APLICADO NA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA PÚBLICA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica à Universidade de Caxias do Sul.

Orientador: Prof. Me. Tiago C. Severo Coorientador: Prof. Me. Felipe A. Tondo

SERGIO LOURENÇO ROSSI JÚNIOR

MODELAGEM ELÉTRICA DE UM SISTEMA DE REDUTORES DE VELOCIDADE APLICADO NA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA PÚBLICA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica à Universidade de Caxias do Sul.

Aprovado em 04/12/2020

Banca Examinadora

Professor Me. Tiago Cassol Severo Universidade de Caxias do Sul - UCS

Professor Me. Felipe Augusto Tondo Universidade de Caxias do Sul - UCS

Professor Me. Bruno Fensterseifer Dias Universidade de Caxias do Sul - UCS

Dedico este trabalho à minha amada esposa, meus pais e meus sogros, por todo o apoio nos momentos de dificuldade, especialmente nesta reta final, pela compreensão da minha ausência no último ano e pelas valiosas opiniões e discussões sobre o tema.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, à minha amada esposa Caroline, pela companhia durante toda a jornada até aqui, onde muitas vezes abria mão dos fins de semana e feriados para me ajudar com os estudos, os trabalhos e revisões. Não chegaria até aqui sem sua ajuda.

Aos meus pais, Sérgio e Rita, por acreditarem em minhas escolhas, assim como por todo o apoio, o esforço e os sacrifícios realizados para que eu chegasse até aqui. Sem o incentivo e o carinho deles, nada disso seria possível.

Aos meus sogros, Antônio e Lucélia, por terem me recebido como um filho e durante muitos momentos de dúvida serem um porto de auxílio, sempre contribuindo com ideias e incentivo. Em especial ao meu sogro por todo o suporte, ajudando com equipamentos e contribuindo com ideias e experiências.

Ao meu orientador prof. Me. Cassol e ao meu coorientador prof. Me. Tondo, pela dedicação, pelas valiosas orientações e por toda a contribuição para a construção deste trabalho. No começo eram apenas ideias soltas e as suas colaborações foram imprescindíveis para que se transformasse em algo concreto.

Aos amigos, por estarem sempre ao meu lado por todos esses anos, especialmente pelo apoio nos momentos de angústia e pela compreensão da minha ausência durante a elaboração do trabalho e atribulações da vida acadêmica.

Aos colegas de curso, em especial aos colegas Felipe, Edivaldo, Marcos, José Vinícius e Maiki, aos professores André, Tiago, Anderson e Andréa, que estiveram comigo nos últimos onze anos e que, de alguma forma, contribuíram na minha vida acadêmica.

"Nenhuma decisão sensata pode ser tomada sem que se leve em conta o mundo não apenas como ele é, mas como ele virá a ser."

Isaac Asimov

RESUMO

Em razão do uso da energia elétrica como fonte primária nos centros urbanos vem crescendo a necessidade de desenvolvimento de novas fontes de energia e métodos de aperfeicoamento para o aproveitamento de recursos energéticos. Assim, este trabalho tem por objetivo caracterizar e propor uma forma de aplicação do sistema RENERGY (Renewable Energy), voltado para a iluminação de uma via pública. Nesse sentido, o sistema opera através da transformação da energia cinética em energia elétrica, decorrente da passagem de automóveis sobre um redutor de velocidade. O presente estudo tem como foco o levantamento das características elétricas do protótipo RENERGY, gerando um modelo matemático para a visualização do comportamento do sistema sem a necessidade de sua implantação. Para o levantamento das características elétricas foram aferidos dados de funcionamento do protótipo em situações de velocidade e número de veículos na via. O modelo matemático foi implementado a partir dos dados adquiridos nas aferições realizadas com o protótipo em funcionamento. O software, no qual foi desenvolvida a modelagem, opera junto a plataforma MATLAB, sendo levantados guatorze modelos com diferentes combinações de zeros e polos. Destes modelos, os que apresentaram melhores aproximações foram os modelos com até sete polos e seis zeros. O modelo escolhido possui um polo e nenhum zero, o qual possuía características mais próximas das medições realizadas. Uma vez projetado o modelo matemático, foi possível comparar seus resultados com o comportamento do sistema, verificando, assim, a possibilidade de sua utilização para a geração de energia elétrica pública.

Palavras-Chave: Redutores de velocidade. Geração de energia. Modelagem. Veículos. Iluminação pública.

ABSTRACT

Due to the use of electric energy as a primary source of power in big cities, there is a growing need for the development of new energy sources and improvement methods for the best use of resources. Thus, this work aims to characterize and propose a way of applying the RENERGY system (Renewable Energy), aimed at lighting a public road. In this sense, the system operates by transforming kinetic energy into electrical energy, resulting from the passage of cars over a speed breaker. This study has as its initial focus the survey of the electrical characteristics of the RENERGY prototype, generating a mathematical model to facilitate the visualization of the system's behavior without the need for its implantation. To survey the electrical characteristics, the prototype's power generation will be checked in various situations of speed and number of vehicles on the road. The mathematical model will be implemented from the data acquired in the measurements carried out with the prototype in operation. The software, on which the modeling will be developed, operates alongside the MATLAB platform, fourteen models were raised with different combinations of zeros and poles. Of these models, the ones with the best approximations were models with up to seven poles and six zeros. The chosen model has one pole and none zeros, which had closer characteristics to the real measurements performed. Once the mathematical model was designed, it was possible to compare its results with the system's behavior, thus verifying the possibility of its use for the generation of public electricity.

Key words: Speed breakers. Electrical generation. Modeling. Vehicles. Public illumination.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Protótipo da lombada de Peter Hughes.	20
Figura 2 - Características da construção da lombada física tipo A	21
Figura 3 - Características da construção da lombada física tipo B	21
Figura 4 - Mecanismo de acionamento do projeto RENERGY	22
Figura 5 - Ângulo do eixo em relação ao solo	23
Figura 6 - <i>Flywheel</i> utilizado no projeto RENERGY.	24
Figura 7 - Gerador utilizado no projeto	25
Figura 8 - Esquema da ligação da ponte de Graetz	25
Figura 9 - Velocidade do <i>flywheel</i> x número de acionamentos	26
Figura 10 - Tensão x Velocidade	27
Figura 11 - Diferenças na secção do <i>flywheel</i>	31
Figura 12 - Modelo similar	31
Figura 13 - Relação entre tensão e velocidade	33
Figura 14 - Relação entre tensão e massa do veículo	33
Figura 15 - Fluxograma	36
Figura 16 - Modelo de sistema velocidade x tensão	37
Figura 17 - Circuito de acionamento e medição	41
Figura 18 - Setup desenvolvido para realizar as medições dividido em (1) cont dos solenoides e (2) sistema de aquisição de dados	role 42
Figura 19 - Sistema de imãs	43
Figura 20 - Trecho da via escolhida.	44
Figura 21 - Sistema proposto para a instalação do protótipo RENERGY	45
Figura 22 - Proposta de implementação.	46
Figura 23 - Medição dos pulsos no sensor de velocidade nas velocida sugeridas	ıdes 48
Figura 24 - Medição da tensão de saída nas velocidades sugeridas	48
Figura 25 - Medição dos pulsos no sensor de velocidade para a passagem de veículos nas velocidades sugeridas.	oito 49
Figura 26 - Medição da tensão na saída para a passagem de oito veículos nas velocidades sugeridas.	50
Figura 27 - Curva de carga potência.	51
Figura 28- Curva de carga potência Média.	51

Figura 29 - Curva relacionando o aumento da carga com a tensão gerada52
Figura 30 - Comportamento do sinal construído para utilização da ferramenta de identificação de sistemas
Figura 31 - Sinal utilizado para o modelamento da função de transferência54
Figura 32 - Comparativo entre o sinal medido e os modelos
Figura 33 - Diagrama construído no <i>Simulink</i> para validação das funções de transferencia
Figura 34 - Validação do sinal para cinco veículos em 15km/h
Figura 35 - Validação do sinal para cinco veículos em 15 km/h, após remoção dos sinais fora da tolerância
Figura 36 - Validação do sinal para cinco veículos em 15 km/h, após para o ganho de 1,1 vezes
Figura 37 - Validação do sinal para cinco veículos em 22 km/h, com ganho de 1,1 vezes
Figura 38 - Validação do sinal para cinco veículos em 30 km/h, com ganho de 1,1 vezes
Figura 39 - Validação do sinal para treze veículos em 15 km/h, com ganho de 1,1 vezes60
Figura 40 - Validação do sinal para treze veículos em 22 km/h, com ganho de 1,1 vezes60
Figura 41 - Validação do sinal para treze veículos em 30 km/h, com ganho de 1,1 vezes
Figura 42 - Diagrama no Simulink do modelo equivalente ao sistema real
Figura 43 - Distância entre veículos62
Figura 44 - Comportamento do modelo para a passagem de 1 hora de veículos a 15 km/h63
Figura 45 - Comportamento do modelo para a passagem de 1 hora de veículos a 22 km/h63
Figura 46 - Comportamento do modelo para a passagem de 1 hora de veículos a 30 km/h64
Figura 47 - Controlador Arduino71
Figura 48 - Especificações do dimensional do veículo72
Figura 49 - Sensor de velocidade Arduino73
Figura 50 - Sensor de tensão do Arduino74
Figura 51 - Sensor de corrente do Arduino

Figura 52 - Luminária Brightlux	.76
Figura 53 - Sistema de identificação após a modelagem dos sinais	.85
Figura 54 – Equações levantadas com a simulação do modelo	.86

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Especificações da lombada tipo A	21
Tabela 2 - Especificações da lombada tipo B	22
Tabela 3 - Relação de período de acionamento do eixo frontal X eixo traseiro	40
Tabela 4 - Comparativo entre funções de transferência	54
Tabela 5 - Especificação do Arduino UNO	71
Tabela 6 - Especificações do Chevrolet Onix Hatch	72
Tabela 7 - Especificação do sensor de velocidade do Arduino	73
Tabela 8 - Especificação do sensor de tensão do Arduino	74
Tabela 9 - Especificação do sensor de corrente do Arduino	75
Tabela 10 - Especificação luminária Brightlux	76
Tabela 11 - Relação de componentes	77
Tabela 12 - Medição realizada em 15km/h para um veículo	78
Tabela 13 - Medição realizada em 25km/h para um veículo	78
Tabela 14 - Medição realizada em 30km/h para um veículo	78
Tabela 15 - Medição realizada em 15km/h para oito veículos	79
Tabela 16 - Medição realizada em 25km/h para oito veículos	80
Tabela 17 - Medição realizada em 30km/h para oito veículos	81
Tabela 18 - Levantamento da curva de carga 18,80 Ω , 14,10 Ω e 9,40 Ω	82
Tabela 19 - Levantamento da curva de carga 4,7 Ω , 2,35 Ω e 1,56 Ω	83
Tabela 20 - Levantamento da curva de carga 1,17Ω	84

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

RENERGY	Renewable Energy
CTB	Código de Trânsito Brasileiro
Contran	Conselho Nacional de Trânsito
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
BNEF	Bloomberg New Energy Finance
PNUMA	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
COP21	21ª Conferência das Partes

LISTA DE SÍMBOLOS

kWh	Quilo Watt hora
V	Volts
m	Metros
km/h	Quilômetros por hora
J	Joule
kgm²	Quilograma metro quadrado
rad/s	Radianos por segundo
kg	Quilogramas
mm	Milímetros
rpm	Rotações por minuto
π	Pi
S	Segundos
m/s	Metros por segundo
N/m²	Newton por metro ao quadrado
kg/m³	Quilogramas por metros cúbicos
Ν	Newton
W	Watt
Nm	Newton Metro
В	Fluxo magnético
kWh/dia	Quilo Watt hora por dia
kWh/mês	Quilo Watt hora por mês
ms	Milisegundos
mA	Miliampère
kΩ	Quiloohm
Ω	Ohm
mW	Mili Watt
А	Ampère
μs	Microssegundos
kHz	Quilohertz
mV/A	Milivolts por Ampère

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO1	16
1.1 JUSTIFICATIVA1	17
1.2 OBJETIVOS1	17
1.2.1 Objetivo Geral1 1.2.2 Objetivos Específicos1	7 8
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA1	19
2.1 TECNOLOGIAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA ATRAVÉS DE REDUTORE DE VELOCIDADE1	ES 19
2.2 LEGISLAÇÃO2	20
2.3 PULSO EXCITATÓRIO DO SISTEMA2	22
2.4 <i>FLYWHEEL</i> (VOLANTE DE INÉRCIA)2	23
2.5 GERADOR ELÉTRICO2	<u>2</u> 4
2.6 ESTADO DA ARTE2	26
2.6.1 Artigo 01 Development of energy harvesting using spee breaker	əd 26
 2.6.1 Artigo 01 Development of energy harvesting using speed breaker	ed 26 1d 29
 2.6.1 Artigo 01 Development of energy harvesting using speed breaker	ed 26 11d 29 29 29 20 31
 2.6.1 Artigo 01 Development of energy harvesting using speed breaker	ed 26 1d 29 ≥d 31 <i>er</i> 32
 2.6.1 Artigo 01 Development of energy harvesting using speed breaker	ed 26 1d 29 ≥d 31 <i>er</i> 32 33
 2.6.1 Artigo 01 Development of energy harvesting using speed breaker	ed 26 1d 29 €d 31 er 32 33
 2.6.1 Artigo 01 Development of energy harvesting using speed breaker	ed 26 29 29 31 er 32 33 36 37
 2.6.1 Artigo 01 Development of energy harvesting using speed breaker 2.6.2 Artigo 02 A review of flywheel energy storage system technologies and their applications 2.6.3 Artigo 03 Design and performance of power generation using speed breaker with the help of rack and pinion mechanism 2.6.4 Artigo 04 Production of electricity by the method of road power generation 2.6.5 Artigo 05 Flywheel energy storage—dynamic modeling 3.1 MODELAGEM DO SISTEMA 3.2 CONSTRUÇÃO DO SISTEMA DE CONTROLE E MEDIÇÃO PARA PROTÓTIPO RENERGY 	ed 26 29 29 31 er 32 33 36 37 038

4 RESULTADOS E ANÁLISES47
4.1 MEDIÇÕES DE PARÂMETROS DO PROTÓTIPO RENERGY47
4.2 MODELAGEM UTILIZANDO A FERRAMENTA DE IDENTIFICAÇÃO DO SISTEMA
4.3 VALIDAÇÃO DOS MODELOS ATRAVÉS DA COMPARAÇÃO COM SINAIS CONHECIDOS
5 CONCLUSÃO
REFERÊNCIAS68
ANEXO A - CONTROLADOR ARDUINO71
ANEXO B - ESPECIFICAÇÕES CHEVROLET ONIX HATCH
ANEXO C - SENSOR DE VELOCIDADE ARDUINO73
ANEXO D - SENSOR DE TENSÃO ARDUINO74
ANEXO E - SENSOR DE CORRENTE ARDUINO
ANEXO F - LUMINÁRIA URBJET-0704IIMXX-XX - FABRICANTE BRIGHTLUX76
APÊNDICE A - RELAÇÃO DE COMPONENTES DO CIRCUITO DE CONTROLE DO SISTEMA DE ACIONAMENTOS77
APÊNDICE B - MEDIÇÕES DOS PULSOS REALIZADOS NAS VELOCIDADES DE 15KM/H, 25KM/H E 30KM/H78
APÊNDICE C - LEVANTAMENTO DA CURVA DE CARGA82
APÊNDICE D - IMPORTAÇÃO DE DADOS ATRÁVES DO <i>TOOLBOX</i> DE IDENTIFICAÇÃO DO SISTEMA85
APÊNDICE E - FUNÇÕES DE TRANSFERÊNCIAS LEVANTADS COM O TOOLBOX DE IDENTIFICAÇÃO DO SISTEMA86

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos dez anos as energias renováveis no mundo tiveram sua capacidade quadruplicada, com investimentos realizados em energia eólica, biomassa, hidrelétrica e, sobretudo, solar, atingindo na última década mais de 2,5 trilhões de dólares em investimentos, impulsionados pela queda nos custos.¹

Atualmente no Brasil 83% da matriz energética é originada de fontes renováveis, sendo o sistema hídrico o principal recurso utilizado como fonte primária para geração de energia elétrica (63,8%), seguida de eólica (9,3%), biomassa e biogás (8,9%) e solar centralizada (1,4%) (ANEEL, 2020).

Nesse sentido, a busca por novas formas limpas de geração de energia elétrica tem sido motivo de estudos em vários países, principalmente para redução da utilização de combustíveis fósseis e do carvão, que são as principais fontes geradoras de gases que contribuem para o aumento do efeito estufa.

Além da diminuição do volume dos gases emitidos, a substituição por energias renováveis vem sendo considerada por muitos países para alcançar as metas do acordo de Paris, proposto durante o COP21 em 2015.

Em função do acordo de Paris muitos países já estipularam datas limite para a parada de produção de veículos à combustão, sendo substituídos por elétricos. Assim, será necessário suprir o aumento da demanda energética com a entrada crescente de veículos elétricos no mercado, com fontes alternativas de geração de energia.

No que diz respeito ao Brasil, este comprometeu-se a aumentar a participação de bioenergia sustentável na sua matriz energética para aproximadamente 18% até 2030, bem como alcançar uma participação estimada de 45% de energias renováveis na composição da matriz energética em 2030 (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2016).

Nesse sentido, o presente estudo busca dar continuidade ao trabalho desenvolvido por Samuel Sebben Ribeiro, o qual teve como objetivo o desenvolvimento e a construção do sistema Renewable Energy (RENERGY), que

¹ Relatório anual produzido pela Escola de Finanças e Administração de Frankfurt e Bloomberg New Energy Finance (BNEF) com o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (FRANCE PRESSE, 2019).

realiza a geração de energia elétrica através de redutores de velocidade (RIBEIRO, 2019).

Nesse sentido, neste trabalho será realizada a modelagem teórica do sistema RENERGY, a fim de facilitar o levantamento de parâmetros do seu funcionamento em diferentes cenários e, por fim, será proposta uma aplicação do sistema voltado a iluminação de uma via pública.

A escolha deste método de geração de energia baseada na circulação de veículos, além de possuir baixo impacto visual, poderia substituir os redutores já existentes, buscando uma forma de aproveitar a energia desperdiçada pela passagem de veículos na via.

Muito embora, no cenário atual, os veículos permaneçam sendo propelidos através de energias não renováveis, o sistema traria uma solução para a utilização da energia antes desperdiçada e pensado, em um futuro, a redução de emissões de gases com ampliação da utilização de veículos elétricos.

1.1 JUSTIFICATIVA

Com o crescente consumo de energia em escala global, cada vez mais tem sido investido esforços na obtenção de energias limpas e renováveis. O sistema RENERGY visa atuar na captação e na conversão da energia mecânica resultante da passagem de veículos sobre redutores de velocidade, dessa forma, gerando energia renovável, a qual pode ser utilizada para a iluminação da própria via onde está implantado o sistema. A modelagem do comportamento do sistema antes da sua implantação tem sua importância na redução dos custos iniciais no projeto, pois, assim, é possível estimar de forma empírica sua funcionalidade pontualmente no local onde será instalada.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Realizar a modelagem do protótipo de geração de energia elétrica RENERGY, a fim de verificar o seu comportamento em diferentes cenários.

1.2.2 Objetivos Específicos

a) Montar o RENERGY em bancada, com um sistema de controle de acionamento e aquisição de dados de entrada e saída;

b) Modelar a função de transferência do protótipo RENERGY a partir da utilização da ferramenta *systemidentification* disponível no software MatLab;

c) Implementar cenários ao sistema modelado e comparar seu comportamento em relação ao do protótipo;

d) Verificar a viabilização teórica da implementação do sistema RENERGY para a iluminação de uma via pública baseado no fluxo de automóveis.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 TECNOLOGIAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA ATRAVÉS DE REDUTORES DE VELOCIDADE

Atualmente a busca por formas de geração de energias limpas e renováveis vem crescendo, considerando a finitude dos recursos naturais utilizados na produção de energia no modelo mercadológico atual.

Nesse sentido, um dos principais avanços dos últimos anos é a geração através dos sistemas passivos de captura e armazenamento, a partir da energia mecânica. Entre elas destaca-se a geração através de lombadas (redutores de velocidade) e vibração do solo.

As lombadas são capazes de gerar e armazenar energia com a passagem de veículos, energia esta que, se armazenada, poderia ser aproveitada, por exemplo, para a iluminação da rede pública.

Nesse sentido, a revista Galileu traz uma matéria sobre um projeto de lombada, desenvolvida pelo designer inglês Peter Hughes, com o objetivo de gerar energia para a iluminação de postes de luz, semáforos e a própria lombada para sinalização à noite (REDAÇÃO GALILEU, 2019).

O projeto do designer prevê uma geração de 10 a 36 kWh, o que, considerando o preço do kWh, equivaleria entre R\$ 3,40 a R\$ 12,20, aproximadamente, na data da publicação da matéria.

Por outro lado, o valor estimado de cada lombada ficaria entre R\$ 67.000,00 a R\$ 185.000,00, variando conforme o seu tamanho. Mesmo com valor inicial alto, o governo inglês considerou um investimento válido, aprovando um valor de R\$ 510.000,00 para implantar o sistema em Londres, que já possui mais de 30.000 lombadas para testes. Na Figura 1 é possível observar o protótipo de lombada inteligente.



Figura 1 - Protótipo da lombada de Peter Hughes.

Fonte: (REDAÇÃO GALLILEU, 2019).

Ademais, conforme publicação do Jornal GGN, foi realizado um trabalho com os alunos do Instituto Mauá de Tecnologia, onde criaram um sistema capaz de aproveitar a desaceleração de automóveis nos pedágios de rodovias e em ciclovias, transformando a energia cinética em energia elétrica (MELLO, 2019).

Nos testes executados pelos alunos, o protótipo conseguiu acender 7 LEDs, com uma tensão de 2,3 V. A matéria também traz um sistema similar desenvolvido pelos alunos da Mauá que será instalado nas ciclovias de Curitiba-PR. Neste sistema a forma de geração será por meio de vibrações e som do movimento das bicicletas, tendo como objetivo o acionamento das sinalizações luminosas nos cruzamentos das ciclovias com as vias de trânsito.

2.2 LEGISLAÇÃO

O uso de redutores de velocidade em vias públicas está previsto no artigo 94 da Lei nº 9.503 de 1997, Código de Trânsito Brasileiro (CTB), e regulamentado pela Resolução do Conselho Nacional de Trânsito (Contran) n°600/2016.

Na Resolução do Contran estão estabelecidos os padrões e critérios para a instalação de ondulações transversais (lombadas físicas), em vias públicas. De acordo com a Resolução, as lombadas físicas podem ser de dois tipos, sendo eles:

Tipo A: Pode ser instalado em locais cujo limite de velocidade não exceda 30 km/h, podendo ser instalada em rodovias somente em travessia de trecho urbanizado, via urbana coletora e via urbana local. A Figura 2 traz detalhes das características da construção da lombada.



Figura 2 - Características da construção da lombada física tipo A.

Fonte: (CONTRAN, 2016).

Dimensão	Especificação
Largura (L)	Igual à da pista, mantendo-se as condições de
	drenagem superficial.
Comprimento (C)	3,70 m
Altura (H)	0,08 <≤ H ≤ 0,10 m

Tabela 1 - Especificações da lombada tipo A.

Fonte: Adaptado de (CONTRAN, 2016).

Tipo B: Somente pode ser instalada em via urbana local em que não circulem linhas regulares de transporte coletivo, e que não haja a possibilidade de instalação da lombada do tipo A. Esse tipo de lombada é utilizada para reduzir pontualmente a velocidade máxima para 20 km/h. A Figura 3 traz detalhes das características da construção da lombada.





Fonte: (CONTRAN, 2016).

Dimensão	Especificação
	1 3
Largura (L)	Igual à da pista, mantendo-se as condições de
	drenagem superficial.
Comprimento (C)	1,50 m
Altura (H)	0,06 <≤ H ≤ 0,08 m

Tabela 2 - Especificações da lombada tipo B.

Fonte: Adaptado de (CONTRAN, 2016).

2.3 PULSO EXCITATÓRIO DO SISTEMA

Nesta seção será abordado o pulso excitatório do sistema, o qual se baseia no movimento vertical de uma correia, que movimenta uma roda dentada, conforme visto na Figura 4.

Figura 4 - Mecanismo de acionamento do projeto RENERGY.



Fonte: (O autor, 2020).

Como se observa na Figura 4, a correia simula a passagem do automóvel sob a lombada, dessa forma, como a passagem do veículo ocorre um eixo por vez, podese considerar a formação de um triangulo retângulo no momento da passagem de cada eixo, conforme indicado na Figura 5. Figura 5 - Ângulo do eixo em relação ao solo.



Fonte: (O autor, 2020).

Como visto na Figura 5, cada veículo que passar sobre o sistema irá gerar dois acionamentos.

2.4 FLYWHEEL (VOLANTE DE INÉRCIA)

O volante de inércia, ou *flywheel* em inglês, é um componente utilizado para armazenar energia rotacional (energia cinética) e seu sistema de armazenamento baseia-se no princípio de rotação de massa, na qual a quantidade de energia que pode ser acumulada está proporcionalmente ligada à massa do componente e sua velocidade de rotação conforme indicado na Equação 1.

$$E = \frac{1}{2}I\omega^2 \text{ (J)} \tag{1}$$

Onde:

E: Energia cinética armazenada (J);

I: Inércia rotacional (kgm²); e

 ω : Velocidade angular (rad/s).

Desta forma, ao armazenar energia a roda acelera e, ao ser descarregada, diminui sua velocidade, podendo, assim, ser comparada com um capacitor (AMIRYAR, 2017).

Para o projeto RENERGY optou-se por um *flywheel* em formato de disco com massa de 3,5 kg e com um diâmetro de 200 mm, conforme indicado na Figura 6 (RIBEIRO,2019).



Figura 6 - *Flywheel* utilizado no projeto RENERGY.

Fonte: (O autor, 2020).

2.5 GERADOR ELÉTRICO

O princípio de funcionamento do gerador se baseia na conversão de energia mecânica (gerada pela rotação em seu eixo), em energia elétrica. Internamente, o gerador possui um campo magnético produzido pelo rotor, através de ímãs permanentes ou eletroímãs. Quando o rotor do gerador é acionado por alguma força no eixo, ele produz um campo magnético girante dentro da máquina. Esse campo girante induz tensões nos enrolamentos localizados no estator do gerador (CHAPMAN, 2013).

No projeto RENERGY foi utilizado um gerador trifásico AC de imãs permanentes com 9 bobinas, rotor externo e ligação estrela na saída. Segundo dados do fabricante, o motor possui uma tensão nominal de fase de 18,7 Vac a uma rotação de 400 rpm. Para a conversão AC/DC foi utilizada uma ponte de Graetz trifásica com capacidade de 1600 V e 100 A (RIBEIRO, 2019).

A ponte de Graetz, por sua vez, é responsável por realizar a retificação da tensão alternada de entrada para uma tensão contínua (BARBI, 2012 *In* RIBEIRO,

2019). Nas figuras 7 e 8 estão indicados o gerador utilizado, bem como o esquema de ligações entre o gerador e a ponte.



Figura 7 - Gerador utilizado no projeto.

Fonte: (RIBEIRO, 2019).





Fonte: (BARBI, 2012 In: RIBEIRO, 2019).

Como visto na Figura 7, o rotor é constituído por imãs permanentes que vão gerar o campo magnético principal na máquina.

Este tipo de máquina apresenta algumas desvantagens em relação a máquina síncrona de rotor bobinado, uma vez que não permite controle de fluxo de excitação ou controle da potência reativa, bem como custo mais elevado.

Não obstante, mostra-se mais vantajosa quando consideradas a desnecessidade de circuitos de excitação e comutação, menores perdas por efeito

Joule, quando considerado que não requer intensidade de corrente no rotor, diminuição de manutenção e uma melhor relação potência/volume, por ser mais compacta e robusta.

Dessa forma, as máquinas de imãs permanentes apresentam mais vantagens que desvantagens, em comparação com as máquinas de rotor bobinado (GASPAR, 2013).

2.6 ESTADO DA ARTE

Nesta seção será realizada a análise teórica dos resultados e metodologias de artigos com projetos similares ao RENERGY na área de energias renováveis

2.6.1 Artigo 01 *Development of energy harvesting using speed breaker* (HARIS et al., 2016).

O presente artigo apresenta duas análises a respeito do funcionamento do sistema de geração de energia via lombadas, sendo a primeira a respeito do número mínimo de acionamentos da lombada para que o *flywheel* estabilize em sua máxima velocidade, cujos resultados obtidos são apresentados na Figura 9.



Figura 9 - Velocidade do *flywheel* x número de acionamentos.

Fonte: Adaptado e traduzido de (HARIS, NOR, et al., 2016).

Conforme evidenciado na Figura 9, quanto mais pulsos dados ao sistema, mais próximo o valor nominal se aproxima do limite físico da capacidade rotacional do *flywheel*. Segundo o estudo, foram necessários um total de treze veículos (26 acionamentos), para que o *flywheel* atingisse 1091 rpm.

Na segunda análise, o artigo apresenta a influência da velocidade do *flyweel* na tensão produzida pelo gerador, conforme indicado na Figura 10.



Figura 10 - Tensão x Velocidade.

Fonte: Adaptado e traduzido de (HARIS, NOR, et al., 2016)

Consoante indicado no gráfico, o comportamento da tensão gerada é proporcional a velocidade do *flywheel*, ou seja, quanto maior a velocidade do sistema, maior a tensão da saída. Assim, o gráfico traz como o valor máximo de tensão gerada de 10,9 V, mesmo o alternador utilizado como gerador tendo um limite de tensão 14,0 V. Este comportamento se deve ao fato do sistema ter atingido sua limitação física de velocidade e a perdas mecânicas durante a rotação.

Por fim, o artigo apresenta recomendações para aumentar a tensão gerada pelo alternador, sendo estas relacionadas ao aumento da velocidade no alternador, visto que, a relação de entre a velocidade rotacional é diretamente proporcional à tensão do gerador, visto que a tensão induzida do gerador é proporcional a velocidade do rotor. A seguir são apresentados dois métodos para o aumento da velocidade no alternador e, consequentemente, o aumento da tensão gerada.

1º Método: Sistema de relação de transmissão.

O artigo aponta o uso de engrenagem para que seja obtida a velocidade desejada, onde este pode ser instalado no redutor de velocidade entre o *flywheel* e o gerador. Essa modificação acarretaria um aumento de velocidade e em uma redução das perdas mecânicas. Para que ocorra um aumento de velocidade a engrenagem

ligada ao eixo do gerador deveria ser menor que a engrenagem ligada ao *flywheel,* como demonstrado nas equações 2 e 3.

$$R_{tr} = \frac{\partial ut}{\ln} (adimensional)$$
(2)

Onde:

R_{tr}: Relação de transmissão (adimensional);
Out: Saída; e
In: Entrada.

$$V_{nova} = \frac{V_{In}}{R_{tr}} (RPM) \tag{3}$$

Onde:

 V_{nova} : Nova Velocidade (RPM); e V_{In} : Velocidade de entrada (RPM).

2º Método: Diâmetro da roda de inércia.

Outro ponto abordado no artigo é a respeito do dimensionamento do *flywheel*, componente responsável pelo armazenamento da energia cinética e por sua conversão em energia rotacional. Para que se tenha uma maior velocidade no gerador e, por consequência, uma maior tensão na saída, é necessário o aumento do diâmetro do *flywheel*, pois este impacta no aumento do raio, conforme indicado na Equação 4.

Velocidade média
$$_{\omega} = \frac{2\pi r}{Tempo} (rad/s)$$
 (4)
Onde:
r: Raio (rad); e
t: Tempo (s).

Além disso, o artigo demonstra também que a energia armazenada no *flywheel* é proporcional a sua inércia rotacional, e corresponde ao quadrado da velocidade angular, como definido na Equação 5.

$$E = \frac{1}{2}I\omega^{2} = \frac{1}{4}mr\omega^{2} (J)$$
(5)

Onde:

E: Energia (J); ω: Velocidade angular (rad/s); I: Inércia rotacional (kgm²); e m: massa (kg).

2.6.2 Artigo 02 A review of flywheel energy storage system technologies and their applications (AMIRYAR, 2017).

No presente artigo é descrito o funcionamento de um *flywheel*, componente no qual seu funcionamento se baseia no princípio de rotação de massa, na qual a quantidade de energia que pode ser acumulada está proporcionalmente ligada à massa do componente e sua velocidade de rotação, como pode ser visto na Equação 6.

Desta forma, ao armazenar energia a roda acelera e, ao ser descarregada, diminui sua velocidade, podendo, assim, ser comparada com um capacitor.

$$E = \frac{1}{2}I\omega^2 \quad (J) \tag{6}$$

Onde:

E: energia cinética (J);

I: Momento de inércia (kgm²); e

 ω : Velocidade angular (m/s).

A Equação 6 também pode ser reescrita de forma a aproveitar a energia útil do *flywheel*, a qual utiliza a relação entre a velocidade mínima e máxima, cuja relação é exibida na Equação 7.

$$E = \frac{1}{2}I(\omega_{max}^{2} - \omega_{min}^{2}) = \frac{1}{2}I\omega_{max}^{2}\left(1 - \frac{\omega_{min}^{2}}{\omega_{max}^{2}}\right)$$
(J) (7)

O momento de inércia é uma função dependente da forma e massa do rotor. Normalmente são construídos em peças sólidas, podendo estas serem cilíndricas ou em formato de discos. No presente projeto optou-se por um *flywheel* em formato de disco e, devido à forma geométrica escolhida, a equação que rege o momento de inércia é descrita na Equação 8.

$$I = \frac{1}{2} (mr^2) (kgm^2)$$
(8)

Onde: m = massa do rotor (kg); e r = raio externo (m).

Uma vez que a máxima velocidade de um *flywheel* é limitada pela resistência à tração, inicialmente deve-se calcular uma margem de segurança, a fim de garantir que o material esteja operando abaixo da sua resistência à tração. Nesse sentido, o cálculo da resistência a tração é exibido na Equação 9

$$\sigma_{max} = \rho r^2 \omega^2 \left(N/m^2 \right) \tag{9}$$

Onde:

σ: estresse máximo(N/m²); e

 ρ : Densidade do material da roda de inércia (kg/m³).

Com base nos resultados das equações acima e a adição do fator de forma K é possível calcular as energias específicas e de densidade máxima por meio das Equações 10 e 11:

$$\frac{E}{m} = K \frac{\sigma_{max}}{\rho} \left(J/kg \right) \tag{10}$$

$$\frac{E}{V} = K\sigma_{max} \left(J/m^3 \right) \tag{11}$$

A forma da roda de inércia é voltada a determinação do seu limite de velocidade, a qual está atrelada a sua capacidade de armazenar energia. Sendo o fator

de forma K uma medição da utilização do material, na Figura 11 estão indicados os valores de K para as formas mais comuns das rodas de inércia.



Figura 11 - Diferenças na secção do flywheel.

Fonte: Adaptado e traduzido de (PENA, 2011. In: AMYRIAR et al, 2017).

A energia armazenada por um *flywheel* pode ser otimizada de duas formas, ou pelo aumento da velocidade de giro, ou pelo aumento do momento de inércia.

2.6.3 Artigo 03 Design and performance of power generation using speed breaker with the help of rack and pinion mechanism (HOSSAIN et al., 2017).

O presente artigo apresenta um modelo de excitação do sistema similar ao que será analisado no presente estudo, como visto na Figura 12.



Figura 12 - Modelo similar.

Fonte: Adaptado e traduzido de (HOSSAIN, 2017).

Como exemplificado na Figura 12, o acionamento é realizado quando ocorre a passagem de algum veículo, que movimenta a correia para baixo, causando, assim, o

movimento da roda dentada. A seguir estão indicados os cálculos realizados e os resultados obtidos.

Inicialmente foi calculada a força exercida para um veículo com uma massa de 200 kg, o qual ocasionava um deslocamento da lombada de aproximadamente 0,25 m. Com a Equação 12 foi possível determinar a força exercida pelo pulso excitatório do sistema.

$$F = ma\left(N\right) \tag{12}$$

Onde:

F: Força (N);

m: massa (kg); e

a: Aceleração gravitacional, neste estudo foi considerada $9,81ms^{-1}$.

Com base na Equação 12, o artigo apresenta um valor de força de 1962 N, o qual, convertido para Watts, de acordo com a Equação 13, era de 8,31 W.

$$P_{out} = \frac{Fd}{t} (W) \tag{13}$$

Onde: d: deslocamento (m); e t: período, neste caso o autor utilizou 60s (s).

Por fim, o autor apresentou a diferença entre a potência calculada teoricamente (8,31 W) com a potência medida (6,6 W), sendo possível, com base nesses valores, estimar um erro de 20,5%, aproximadamente.

2.6.4 Artigo 04 *Production of electricity by the method of road power generation* (FATIMA et al., 2016).

Neste artigo, assim como citado no Artigo 03, a potência da saída é aferida pela multiplicação do peso do veículo (massa do veículo vezes a aceleração da gravidade) com o deslocamento da lombada. O artigo também traz resultados de testes relacionando a velocidade do veículo e a massa do veículo com a tensão gerada, conforme indicado nas Figuras 13 e 14.



Figura 13 - Relação entre tensão e velocidade.

Fonte: Adaptado de (FATIMA et al., 2016).



Figura 14 - Relação entre tensão e massa do veículo.

Fonte: Adaptado de (FATIMA et al., 2016).

2.6.5 Artigo 05 *Flywheel energy storage—dynamic modeling* (MULJADI et al., 2017).

Assim como visto nos artigos 01 e 02, neste artigo é abordado o comportamento de um *flywheel*. A maior diferença entre eles, entretanto, é que neste artigo é abordado um estudo voltado para análise no contexto de aplicações na área da engenharia elétrica.

O armazenamento de energia é realizado exercendo-se um torque mecânico ao componente, assim elevando a velocidade de rotação e, consequentemente, a energia armazenada. Já o *flywheel* perde sua energia quando alguma carga é anexada ao seu eixo, gerando um torque contrário, o qual reduz a velocidade rotacional, e, consequentemente, a energia armazenada.

Como pode ser visto na Equação 14, a potência de entrada e saída pode ser derivada da energia armazenada.

$$P = \frac{dW}{dt} = \frac{d(\frac{1}{2}J\omega^2_n)}{dt} = J\omega_n \frac{d\omega_n}{dt} (W)$$
(14)

Com base na Equação 14, pode-se descrever as equações de carga e descarga de um *flywheel* conforme indicado nas Equações 15 (torque de carga e descarga), 16 (velocidade rotacional instantânea) e 17 (Potência entregue com o decaimento da energia armazenada).

$$T = \frac{P}{\omega_m} = J \frac{d\omega_m}{dt} (Nm)$$
(15)

Onde:

T: Torque de carga/descarga (Nm); P: Potência de carga/descarga (W); e ωm: Velocidade rotacional (m/s).

$$\omega_m(t) = \frac{1}{J} \int T_m dt \ (m/s) \tag{16}$$

Onde:

T: Torque de carga/descarga (Nm); P: Potência de carga/descarga (W); e ωm: Velocidade rotacional (m/s).

$$W(t) = W_{init} - \int Pdt \ (Watts) \tag{17}$$

Onde: *W_{init}*: Potência inicial (W); e P: Potência de descarga (W).

Para o cálculo das perdas o artigo indica que essas são o somatório das perdas elétricas com o das perdas que variam com a velocidade do *flywheel*, conforme indicado na Equação 18.

$$P_{loss} = P_{el} + P_{sp}(W) \tag{18}$$

Conforme visto na Equação 18 as perdas elétricas atreladas ao *flywheel* são um somatório das perdas elétricas (P_{el}) e as perdas que variam com a velocidade rotacional (P_{sp}), as quais podem ser expressas conforme Equações 19, 20 e 21.

$$P_{el} = I_{rms}^2 + R_{wdg} = k_{pcu}T^2 (W)$$
(19)

$$P_{sp} = P_{fe} + P_{con} + P_{frw} + P_{stray} (W)$$
(20)

$$P_{fe} = k_{FE} B f_e(W) \tag{21}$$

Na Equação 21, tem-se a frequência do gerador (fe) e o fluxo magnético dos imãs permanentes (B) utilizados no gerador.

As perdas por atrito e ventilação (Pfrw) são contabilizadas nas perdas de rolamento e resistência do ar, e variam de acordo com a velocidade de rotação. As perdas anômalas (Pstray) são perdas de difícil determinação analítica.

As perdas de energia armazenada em um *flywheel* com um sistema que utiliza rolamentos mecânicos podem ficar entre 20% e 50% em duas horas de funcionamento.
3 METODOLOGIA

Com base nos artigos analisados anteriormente, neste capítulo são abordadas as etapas de desenvolvimento de *hardware*, construção dos circuitos de acionamento, montagem dos sensores de medição de corrente, tensão e velocidade, bem como a etapa de modelagem do protótipo. Nesta, são abordados os métodos utilizados para o levantamento da função de transferência com o auxílio do MATLAB, a fim de facilitar na descrição do funcionamento do protótipo.

Outrossim, para a implementação do modelo foi sugerida uma aplicação do sistema na área de iluminação pública, conforme especificado no fluxograma abaixo.



Figura 15 - Fluxograma.

Fonte: (O autor, 2020).

3.1 MODELAGEM DO SISTEMA

Para a realização da modelagem do protótipo foi utilizado o modelo conforme indicado na Figura 16, onde o protótipo é reduzido a um sistema de entrada e saída, o qual possui na sua entrada um sinal de velocidade, adquirido com o tacômetro², e na sua saída a potência, adquirido com os módulos de leitura de tensão e corrente.

A escolha deste tipo de análise ocorreu devido a dois fatores, entre eles a sua simplicidade onde, nesse tipo de modelagem, é realizada a relação entre o sinal de entrada e o sinal de saída. Outro fator foi a ausência de informações documentais dos componentes do protótipo, especialmente as relativas ao gerador.



Figura 16 - Modelo de sistema velocidade x tensão.

Fonte: (O autor, 2020).

Como visto na Figura 16, esse sistema foi avaliado do ponto de vista da conversão da velocidade do *flywheel* em energia elétrica na saída do gerador.

O modelo foi dividido em dois blocos, sendo o primeiro o bloco Mecânico, que consiste nos pistões de acionamento que simulam a passagem do veículo na lombada, o *flywheel* e as relações das engrenagens. Já no segundo bloco, o bloco Gerador, constam o gerador elétrico, a retificação do sinal e a carga.

² Equipamento responsável pela medição da velocidade através do número de rotações de um motor ou máquina.

Nessa modelagem foram utilizados os arquivos obtidos através das medições do protótipo, no qual foi calculada a média das três medições.

De posse desses sinais foi levantada a função de transferência, a qual descreve o comportamento do sistema RENERGY. Essa ferramenta foi levantada com o auxílio do *toolbox* de sistema de identificação do MATLAB, denominado *systemidentification* e fornece, através dos dados de entrada (sinal de velocidade) e de saída (potência fornecida), a identificação da função de transferência do sistema.

Uma vez carregados os dados de entrada e saída aferidos do protótipo, tendo estes a mesma taxa de amostragem, foi necessário estimar o número de zeros e polos. A fim de tornar os resultados mais próximos do modelo prático, a análise junto a ferramenta *systemidentification* foi iniciada utilizando-se um polo e zero zeros.

Para os resultados foram geradas funções de transferência para diferentes combinações de zeros e polos. Para a validação do resultado do modelo foi aceita uma tolerância de 10% em relação ao comportamento do protótipo.

3.2 CONSTRUÇÃO DO SISTEMA DE CONTROLE E MEDIÇÃO PARA O PROTÓTIPO RENERGY

Para o controle dos pistões de acionamento do protótipo, inicialmente, foi construído um sistema responsável pela simulação da passagem de veículos, cujo circuito foi regulado através do controlador Arduino.

Assim, para esse controle, foi escolhido o modelo de controlador Arduino UNO, sendo possível a obtenção de mais detalhes sobre as características do controlador no Anexo A.

Ademais, como os solenoides escolhidos para o protótipo necessitam de 24 V nas suas boninas e o Arduino fornece somente 5 V nas suas saídas, estas foram ligadas a optoacopladores, os quais operam por meio de acionamento via feixe de luz, possibilitando, assim, um acionamento de forma isolada entre o controlador e a carga.

Sua principal vantagem é o isolamento elétrico entre seus circuitos, onde é possível trabalhar tanto com tensões quanto com referências distintas em cada um dos lados.

Ainda, o controle dos acionamentos foi realizado via *software*, o qual foi implementado em linguagem C, utilizando a própria interface de programação fornecida pelo Arduino (IDE Arduino).

O pulso dimensionado no protótipo, devido ao seu intuito de instalação em vias públicas locais, tem como base carros populares de médio porte. Assim, foi levantado que o modelo de veículo mais vendido no Brasil, nestas características, durante o ano de 2019, foi o Chevrolet Onix Hatch 2020 (AGUIAR, 2019), com suas características pertinentes apresentadas no Anexo B.

Com a análise das informações do veículo Onix Hatch, foi possível identificar que a distância entre os eixos do veículo é de 2,551 m, valor que foi utilizado para o cálculo dos acionamentos dos pistões. Considerando o momento em que ocorre o primeiro acionamento, passagem da roda dianteira sobre a lombada, como instante zero, a Equação 22 apresenta a relação entre a velocidade do veículo com o período de acionamento entre os pulsos.

Onde:

 $T_{entre\ eixos}$: Período entre o acionamento do eixo frontal e o eixo traseiro (s); $D_{entre\ eixos}$: Distância entre o eixo frontal e o eixo traseiro (m); e $V_{autom ixistored}$: Velocidade do veículo (m/s).

Para o cálculo da massa total a ser considerada deve-se levar em conta a massa do veículo acrescida da massa do motorista, a qual é de 66,4 kg³, em média, sendo a massa equivalente do veículo com o passageiro de 1.145 kg, que, para fins de cálculo, foi considerada igualmente distribuída ao longo de todo o veículo.

Para a obtenção dos dados de entrada (velocidade) e da saída (tensão) do protótipo RENERGY, inicialmente foram implementados dois sistemas de medição, sendo o primeiro para a medição da velocidade (através do módulo de leitura de velocidade do Arduino), no eixo do *flywheel*, onde esse realiza a aquisição do comportamento da velocidade durante a passagem dos veículos.

³ Conforme indicado no censo de 2008 do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) a massa média da população apta a dirigir (idade mínima de 18 anos), é de 66,4kg. (IBGE, 2020).

Esse sistema conta com um tacômetro, ligado a um controlador Arduino, que foi responsável pela aquisição e tradução dos valores de velocidade captados pelo tacômetro para o ambiente de simulação.

Já o segundo, dois módulos de leitura, um para a tensão e outro para a corrente elétrica. Estes foram ligados a saída de tensão do gerador elétrico, após a ponte retificadora. O sinal de corrente foi aferido com a conexão do sensor em série com uma carga variável, dependendo do tipo de medição necessária.

Os sensores são responsáveis pelo armazenamento do sinal de tensão e corrente após a simulação da passagem de veículos no protótipo, levantando, assim, o comportamento da potência fornecida pelo gerador.

Mais informações sobre os *hardwares* utilizados nos sistemas de medições podem ser consultadas nos Anexos A, C, D e E.

Com o auxílio do protótipo RENERGY foram aferidos os comportamentos do sistema para diferentes velocidades, sendo elas delimitadas na máxima velocidade de 30 km/h, conforme resolução do CONTRAN para vias locais e, para a velocidade mínima de 15 km/h, uma vez que "a velocidade mínima não poderá ser inferior à metade da velocidade máxima estabelecida, respeitadas as condições operacionais de trânsito e da via." (CTB, Art.62).

O controle do acionamento dos pistões foi realizado considerando o momento em que a roda dianteira do automóvel chegar ao topo da lombada, instante zero. A partir desse ponto, foi considerado o comprimento do veículo entre eixos, cujos dados de tempo de acionamento de cada pistão estão informados na Tabela 3 a seguir.

Velocidade (km/h)	Acionamento eixo traseiro (s)	Frequência de acionamento (Hz)
15,0	0,612	1,63
16,0	0,574	1,74
17,0	0,540	1,85
18,0	0,510	1,96
19,0	0,483	2,07
20,0	0,459	2,18
21,0	0,437	2,29
22,0	0,417	2,40
23,0	0,399	2,51
24,0	0,383	2,61
25,0	0,367	2,72
26,0	0,353	2,83
27,0	0,340	2,94
28,0	0,328	3,05
29,0	0,317	3,15
30,0	0,306	3,27

Tabela 3 - Relação de período de acionamento do eixo frontal X eixo traseiro.

Fonte: (O autor, 2020).

Para cada uma das velocidades informadas na Tabela 3 foram realizadas três medições com o protótipo RENERGY, nas quais foram aquisitados o comportamento da entrada (Velocidade do *flywheel*) e saída (Tensão e Corrente na saída do gerador após retificação). Durante a modelagem, as medições a serem consideradas, compreenderam uma média dos valores das três medições realizadas anteriormente.

Além dessas verificações foi levantado o número mínimo de acionamentos, para que o protótipo atinja o limite máximo do *flywheel*, conforme apontado no Artigo *Development of energy harvesting using speed breaker* (HARIS et al., 2016), apresentado na Subseção 2.6.1, no qual chegou-se à conclusão de que são necessários treze veículos, ou seja, 26 acionamentos.

Assim, o espaçamento entre os veículos foi considerado o mesmo espaçamento entre os eixos do veículo, e a velocidade média da via 22 km/h.

Sendo assim, o circuito desenvolvido segue indicado na Figura 17.



Figura 17 - Circuito de acionamento e medição.

Fonte: (O autor, 2020).

O esquemático exibido na Figura 17 foi dividido em dois blocos, conforme indicação supra, estando no primeiro representado o circuito de controle da velocidade e o número de acionamentos dos veículos. Esse controle foi realizado através de três teclas, por meio das quais é possível alterar a velocidade e a quantidade de veículos, conforme necessidade. Os componentes indicados como L1 e L2 são os solenoides

responsáveis pela simulação do veículo, cujos pistões utilizados para a geração do pulso foram alimentados por um compressor de ar regulado para fornecer 2,5 bar.

Já no segundo bloco do circuito encontra-se indicada a conexão dos sensores, na qual estes transmitiam os dados aferidos diretamente aos Arduinos. Esses dados eram tratados e enviados para o computador através da função do monitor serial da própria interface do Arduino.

Para a alimentação dos solenoides foi utilizada uma fonte de 24 V, capaz de fornecer uma corrente máxima de 3 A. Já para alimentação dos Arduinos foram utilizadas as portas USB disponíveis no computador utilizado.

Ademais, a relação dos componentes utilizados para a montagem do sistema encontra-se indicada no Apêndice A.

Após a montagem do *setup* de medição e acionamento, conforme indicado na Figura 17, foi realizado o dimensionamento do sistema de imãs para o controle da velocidade no eixo do *flywheel*, como pode ser observado na Figura 18. Esta medição tem o objetivo de verificar o comportamento da transferência de energia entre o *flywheel* e o gerador, possibilitando, assim, a análise do aproveitamento da energia armazenada no sistema.



Figura 18 - Setup desenvolvido para realizar as medições dividido em (1) controle dos solenoides e (2) sistema de aquisição de dados.

Fonte: (O autor, 2020).

Outrossim, a Figura 18 apresenta o sistema de controle e aquisição de dados, o qual foi dividido em duas partes, das quais a primeira exibe o sistema de controle dos solenoides e a segunda indica o sistema de aquisição de dados dos sensores.



Figura 19 - Sistema de imãs.

Fonte: (O autor, 2020).

Nesse sentido, uma vez que o diâmetro do eixo no qual está acoplada a roda de inércia é de 140 mm, bem como que como que cada imã possui aproximadamente 10 mm de diâmetro, foram posicionados sete imãs com espaçamento de 10 mm entre si, totalizando, assim, uma distância de 20 mm entre cada um dos pulsos, conforme indicado na Figura 19. Para a medição da velocidade foi considerado o número de pulsos no sensor de velocidade medidos no protótipo a cada 500 ms, devido a limitações do *hardware* e processamento do computador utilizados.

3.3 SIMULAÇÃO DO SISTEMA RENERGY PARA ILUMINAÇÃO PÚBLICA

Para o projeto da iluminação da avenida inicialmente foi escolhido o tipo de iluminação. Devido a diversos fatores como o baixo aquecimento, possuir uma vida útil de aproximadamente 50.000 horas e a redução do risco de choques e curtos-circuitos, foi considerada uma luminária de LED, com sua potência entre 100 W a 400 W, segundo a GED-3670 (CPFL, 2017). Para este estudo optou-se por uma lâmpada de LED de 100 W. Outro ponto a se considerar, foi o vão entre os postes de iluminação,

sendo a distância, segundo a GED-3670 (CPFL, 2017), de 28 m a 40 m para vias públicas.

O presente estudo foi aplicado, em um ambiente de simulação, no trecho de uma quadra da avenida Júlio de Castilhos, Caxias do Sul - RS, com aproximadamente 120 m, a qual possui duas vias de pistas simples, uma para cada sentido, separadas por um canteiro central, mais especificamente no trecho compreendido entre as ruas Visconde de Pelotas e Garibaldi, conforme indicado na Figura 20.





Fonte: Adaptado de (GOOGLE, 2020).

Este trecho é composto por quatro postes de iluminação com vãos de aproximadamente 34 m, possuindo cada um dos postes duas lâmpadas, uma para cada pista.

Ademais, foi considerada a luminária modelo URBJET-1004IIMXX-XX, devido a este modelo possuir uma potência de 100 W, cujos detalhes podem ser consultados no Anexo F.

As oito lâmpadas para esse trecho da avenida possuem um consumo diário, levando em consideração uma operação de doze horas, de aproximadamente 9,6 kWh/dia ou 192,8 kWh/mês.

Sendo assim, a mínima potência que o sistema RENERGY deveria suprir é de 9,6 kWh/dia, sendo essa a potência necessária para energizar todas as lâmpadas do trecho durante o período noturno ou de escurecimentos diurnos ocasionais.

Devido a inconsistência de movimentação na avenida (feriados, fins de semana, pandemias, entre outros), podem haver dias em que o fluxo de veículos não seja suficiente para manter a iluminação das lâmpadas durante todo o período noturno.

Para contornar este problema, o sistema poderia operar ligado à rede, sendo assim, durante o período diurno, o sistema operaria injetando corrente ao banco de baterias e, no período noturno, o banco supriria a demanda da iluminação. A conexão com a rede poderia suprir as necessidades, caso ocorram falhas no sistema RENERGY ou a impossibilidade de suprimento por parte das baterias.

Para o ponto de conexão à rede de baixa tensão, o sistema RENERGY poderia ser conectado através de inversores eletrônicos, a fim de transmitir a energia para a rede, e após, a rede forneceria energia ao sistema de iluminação.

. Para esse tipo de sistema, a geração e o consumo de energia nem sempre coincidem, devido a característica intermitente e aleatória da passagem de veículos. Utilização de inversores

Nesse caso, a implementação de um banco de baterias teria a função de nivelar a energia fornecida, ajudando, assim, a evitar desperdício da energia cinética gerada pela passagem dos veículos.

Além disso, a presença de uma bateria ou de um banco de baterias também é necessária para estabilizar a tensão fornecida aos equipamentos ou ao inversor eletrônico, uma vez que a tensão de saída do protótipo não será constante.

Com base no estudo levantado, chegou-se ao projeto indicado na Figura 21.



Figura 21 - Sistema proposto para a instalação do protótipo RENERGY.

Fonte: (O autor, 2020).

Como visto na Figura 21, foi possível verificar que toda a energia gerada pelo sistema RENERGY seria enviado a unidade de controle, onde ele direcionaria para o carregamento das baterias. Desta forma, a energia armazenada pelo banco de baterias seria utilizada pelo sistema de iluminação pública, quando solicitado. Caso o banco de baterias não fosse capaz de suprir a demanda, numa situação de baixo movimento da via, a unidade de controle seria responsável por injetar a potência requerida diretamente da rede.

Outrossim, foi elaborada uma proposta para a implementação do sistema numa via pública, estando indicada na Figura 22.





Fonte: (O autor, 2020).

Com base na proposta da Figura 22, foi possível evidenciar que o banco de baterias poderia ser alocado junto ao protótipo, evitando, assim, perdas por condução e a necessidade de construção de uma estrutura aérea para comportar o equipamento.

Já o sistema de controle, indicado como conversor, poderia ser montado junto a um poste, a fim de facilitar sua manutenção. Por fim, as luminárias poderiam ter seu cabeamento subterrâneo ligadas diretamente ao banco de baterias por meio de um controlador para ligar e desligar o suprimento da demanda, mantendo, assim, a estética da via.

4 RESULTADOS E ANÁLISES

Com base no estudo apresentado anteriormente a etapa realizada a seguir foi a montagem do circuito responsável pela medição da tensão, corrente e potência na saída do protótipo, possibilitando a medição dos dados durante a simulação da passagem dos veículos. Com a aferição dos dados em diferentes cenários foi possível realizar a modelagem da função de transferência que representa o comportamento do sistema.

Assim, utilizando como base a função de transferência obtida foi possível a caracterização do protótipo, facilitando, desse modo, a análise do comportamento do sistema para situações diversas, com maior número de veículos e diferentes velocidades sem a necessidade de aferições físicas.

4.1 MEDIÇÕES DE PARÂMETROS DO PROTÓTIPO RENERGY

Durante a montagem do sistema de medição foram utilizados como carga dois LEDs conectados à saída da ponte de Graetz, a fim de facilitar a visualização do funcionamento durante as medições, considerando, além das medições de tensão e corrente, um estímulo visual do comportamento do sistema.

Para tanto, foi considerada uma carga de dois LEDs de 5mm, de cor vermelha, os quais possuíam uma corrente direta de 20 mA para uma tensão de 2,0 V. Para o controle da corrente direta sobre o LED, evitando a ocorrência de danos ao componente, foi utilizado um resistor de 1 k Ω para cada LED.

Essa carga foi ligada, simultaneamente, em paralelo ao circuito de medição de tensão, e em série ao circuito de medição de corrente.

Assim, para simulação da passagem de um único veículo, que resulta em dois acionamentos do sistema, nas velocidades de 15 km/h, 25 km/h e 30 km/h, foram realizadas três medições para cada velocidade e, então, calculada a média desses valores, cuja comparação pode ser observada nas Figuras 23 e 24 e, mais detalhadamente, consultada no Apêndice B.



Figura 23 - Medição dos pulsos no sensor de velocidade nas velocidades sugeridas.

Fonte: (O autor, 2020).

Média - Tensões 3 2,5 2 Tensão [V] 1,5 1 0,5 0 1000 2000 3000 4000 5000 6000 -0,5 Período (ms) Média 30km/h Média 25km/h Média 15km/h

Figura 24 - Medição da tensão de saída nas velocidades sugeridas.

Como evidenciado na Figura 23, percebe-se que, quanto maior a velocidade do veículo, maior o pico da velocidade registrada no *flywheel*. Além disso, em todos os cenários ensaiados o pico da velocidade ocorre aproximadamente em 1000 ms.

Outrossim, para a velocidade de 15 km/h, nota-se que esta apresenta uma perda menor de intensidade no período de 2000 ms, se comparado com as demais velocidades ensaiadas.

Este fato se deve, possivelmente, devido ao maior espaçamento entre os pulsos (eixo dianteiro/eixo traseiro). Isso porque, conforme mostrado na Tabela 3, a velocidade de 15 km/h apresentou um espaçamento entre os acionamentos de 0,612 s, enquanto, para 30 km/h, esse espaçamento caiu para 0,306 s.

Fonte: (O autor, 2020).

Ademais, em análise ao gráfico apresentado na Figura 24, observa-se que o pico de tensão para as velocidades de 25 km/h e 30 km/h se deu aproximadamente em 500ms, enquanto, para 15 km/h, o pico ocorreu somente após 1000 ms.

Outro ponto verificado foi a diferença entre o pico de tensão encontrado na velocidade mínima (15 km/h) e na velocidade máxima (30 km/h), que é de aproximadamente 0,5 V.

Não obstante, apesar das diferenças de pico de tensão observadas, destaca-se também que, após o período de 1000 ms, todas as velocidades apresentam o mesmo tipo de decaimento.

Destas análises pode ser destacado que a velocidade da roda de inércia está diretamente ligada à tensão gerada, mas que um único veículo na velocidade máxima da via não seria capaz de gerar a potência mecânica necessária para imprimir a rotação máxima do gerador.

Por fim, restou evidenciado que, independente da velocidade imprimida pelo veículo, o *flywheel* permanece gerando energia por um período de aproximadamente quatro segundos.

Para o próximo passo, a fim de verificar o comportamento do sistema com a passagem de diversos veículos, foi repetido o ensaio anterior, agora com a passagem de oito veículos, conforme exibido nas Figuras 25 e 26.



Figura 25 - Medição dos pulsos no sensor de velocidade para a passagem de oito veículos nas velocidades sugeridas.

Fonte: (O autor, 2020).



Figura 26 - Medição da tensão na saída para a passagem de oito veículos nas velocidades sugeridas.

Fonte: (O autor, 2020).

Durante a análise dos dados do comportamento da velocidade do *flywheel* observou-se que os resultados indicados na Figura 25 apresentam similaridade com aqueles obtidos na Figura 23, no qual, considerando velocidades de veículos mais altas, o sistema apresenta uma rotação mais elevada.

Outro aspecto semelhante dos resultados encontrados com o acionamento de um único veículo foi a diferença no comportamento dos picos de velocidade, uma vez que, na velocidade de 15 km/h, esse pico ocorreu quase dois segundos após o registrado para a velocidade de 30 km/h.

Nesse sentido, foi observado que o período no qual o *flywheel* permanece gerando energia é cerca de dois segundos maior para a velocidade mínima da via quando comparado com o resultado obtido com a velocidade máxima da via.

Ademais, analisando os dados de tensão obtidos, conforme Figura 26, percebese que os mesmos apontamentos feitos para a análise da velocidade se aplicam também para a tensão, verificando-se um melhor aproveitamento quanto à duração da energia para velocidades mais baixas.

Entretanto, os níveis de tensão mostram-se mais baixos, devido ao gerador não atingir a sua velocidade nominal, enquanto, para velocidades mais altas, observam-se picos de tensão maiores, com menor aproveitamento de energia.

Ademais, considerando que não foi possível obter as informações e especificações do gerador utilizado, e com base nos resultados aferidos nas

verificações acima, foi realizado um estudo do comportamento do sistema com o aumento da sua carga.

Para tal foram utilizadas como cargas quatro resistências de 4,7 Ω e uma potência de 50 W cada, associadas em série e paralelo, a fim de aumentar a carga ligada à saída do sistema, sendo todas as medições realizadas com a velocidade dos veículos configurada para 15 km/h.

O referido estudo levou em consideração os dados indicados no Artigo *Development of energy harvesting using speed breaker* (HARIS et al., 2016), apresentado na Subseção 2.6.1, o qual aponta serem necessários treze veículos para que o *flywheel* atinja sua velocidade máxima.

Dessa forma, foi possível levantar a curva de carga do sistema, conforme indicado nas Figuras 27 e 28, sendo eles o comportamento da potência e tensão, respectivamente, cujos dados obtidos podem ser consultados no Apêndice C.



Figura 27 - Curva de carga potência.

Fonte: (O autor, 2020).





Fonte: (O autor, 2020).



Figura 29 - Curva relacionando o aumento da carga com a tensão gerada.

Fonte: (O autor, 2020).

Como evidenciado na Figura 27 o sistema apresenta comportamentos similares na potência da saída, independente da carga conectada ao gerador, porém, com o aumento da demanda de corrente na carga, pode -se verificar oscilações no sinal da potência.

Essas oscilações durante a medição física eram evidenciadas pela redução da velocidade do *flywheel*, o qual não conseguia suprir a energia demandada pelo gerador no instante imediatamente anterior ao acionamento dos pistões.

Já na Figura 29, verifica-se que o comportamento da tensão gerada pelo sistema apresenta uma redução dos seus valores nominais com o aumento da carga conectada à saída.

Com base nesse comportamento fica evidenciado que o protótipo seria capaz de fornecer, para as condições disponíveis de velocidade e dimensionamento do *flywheel*, uma potência constante, com uma pequena variação de amplitude entre os valores máximos e mínimos. Sendo assim, para os cenários de medições realizadas neste estudo não se mostra relevante a carga acoplada ao sistema durante a modelagem da função de transferência.

4.2 MODELAGEM UTILIZANDO A FERRAMENTA DE IDENTIFICAÇÃO DO SISTEMA

Verificado o comportamento do sistema por meio das medições supracitadas, nesta etapa do estudo foi realizada a modelagem matemática do sistema.

Nesse sentido, devido à complexidade das partes envolvidas no protótipo foi realizada a sua análise como um sistema de entrada e saída. este sistema possui o

intuito de identificação de um modelo baseado em uma função de transferência, estilo caixa preta (AGUIRRE, 2004).

Desta forma, utilizando as aquisições de dados do comportamento da saída do projeto e as condições conhecidas de entrada, foi possível identificar o sistema de forma eficiente.

Outrossim, inicialmente, foi necessária a criação de um sinal de entrada e saída com comportamento conhecido, para que fosse possível inserir esses dados no *toolbox* de identificação de sistemas do MATLAB. Para tanto, foram aferidos os comportamentos do sistema simulando velocidades que variavam de 15 km/h a 30 km/h, em intervalos de 1 km/h. Para cada velocidade foram aferidos três sinais e, desses resultados, calculou-se a média resultante.

Já para o sinal de entrada, visto que ambos os sinais devem possuir o mesmo período de aquisição, bem como que as frequências de acionamento dos pulsos dos eixos dos veículos não possuem o mesmo intervalo, foi modelado um degrau unitário, no qual o pico corresponde ao valor da velocidade medida com base no início do pulso para cada uma das velocidades, conforme exemplificado na Figura 30.

Figura 30 - Comportamento do sinal construído para utilização da ferramenta de identificação de sistemas.



Fonte: (O autor, 2020).

Com a utilização do *toolbox* de identificação do sistema no MATLAB, foi importado o sinal criado. O sinal após sua importação encontra-se exibido na Figura 31. Mais informações sobre o processo de importação do sinal podem ser consultadas no Apêndice D.



Figura 31 - Sinal utilizado para o modelamento da função de transferência.

Fonte: (O autor, 2020).

Ademais conforme sinal apresentado na Figura 31 foram simuladas diversas aproximações variando o número de polos e zeros do sistema. As aproximações das funções obtidas em relação ao sinal de entrada podem ser consultadas na Tabela 4, encontrando-se as equações dos modelos no Apêndice E.

Polos	Zeros	Aproximação	
1	0	60,08%	
2	1	68,90%	
3	2	69,92%	
4	3	70,19%	
5	4	72,14%	
6	5	72,43%	
7	6	73,91%	
8	7	40,22%	
9	8	68,31%	
10	9	76,20%	
11	10	73,77%	
12	11	76,01%	
13	12	74,33%	
14	13	58,15%	

Tabela 4 - Comparativo entre funções de transferência.

Fonte: (O autor, 2020).

Nesse sentido a Figura 32 apresenta a comparação gráfica entre os modelos levantados junto ao sinal criado através das simulações.



Figura 32 - Comparativo entre o sinal medido e os modelos.

Fonte: (O autor, 2020).

Outrossim, como pode ser observado nos dados da Tabela 4, o modelo que apresentou a melhor aproximação possuía 10 polos e 9 zeros, com uma aproximação de 76,2%.

Não obstante, embora os valores de aproximação dos modelos não sejam superiores a 76,2%, não significa que os modelos não sejam eficazes. Isso porque, para a verificação da eficácia dos modelos, os mesmos devem ser testados com diferentes tipos de entrada.

4.3 VALIDAÇÃO DOS MODELOS ATRAVÉS DA COMPARAÇÃO COM SINAIS CONHECIDOS

Com base nos modelos levantados anteriormente, a fim de validar sua aplicação, considerando que os valores de saída para o sinal de entrada utilizado já eram conhecidos, foi criado um modelo das funções no *Simulink*⁴, conforme indicado na Figura 33.

⁴ Ferramenta utilizada para modelagem, simulação e análise de sistemas dinâmicos.



Figura 33 - Diagrama construído no *Simulink* para validação das funções de transferencia.

O diagrama exibido na Figura 33 foi separado em três partes, conforme indicações acima. Assim, na primeira parte estão indicados os dois sinais, sendo eles o sinal de saída esperado, ligado diretamente ao barramento de saída indicado na terceira parte, e o sinal de entrada avaliado, este ligado aos modelos levantados na segunda parte.

Já na segunda parte encontram-se indicadas as equações dos modelos levantadas anteriormente, bem como um bloco de ganho para eventual necessidade de ajustes na amplitude da saída do modelo.

Outrossim, todas as saídas dos modelos encontram-se ligadas ao barramento de saída na terceira parte, sendo este conectado a um osciloscópio virtual.

Assim, para a validação dos modelos foram utilizados sinais aferidos com cinco veículos e treze veículos, nas velocidades de 15 km/h, sendo esta a velocidade mínima da via, 22 km/h, velocidade média da via, e 30 km/h, velocidade máxima da via. Para a distância entre um veículo e outro foi utilizada a distância entre eixos do veículo escolhido. Os resultados das validações estão exibidos nas figuras que seguem.

Fonte: (O autor, 2020).



Figura 34 - Validação do sinal para cinco veículos em 15km/h.

Como pode ser observado na Figura 34, mesmo com todos os modelos apresentando valores de aproximação superiores a 60%, é possível verificar a influência do número de polos e zeros nas equações.

Ademais, foram desprezados os modelos que apresentavam comportamentos divergentes da saída esperada, com variações de tolerância superiores a 10%, para mais ou para menos, conforme Figura 35.



Figura 35 - Validação do sinal para cinco veículos em 15 km/h, após remoção dos sinais fora da tolerância.

Fonte: (O autor, 2020).

Fonte: (O autor, 2020).

Da análise da Figura 35 é possível destacar similaridades na forma com os resultados medidos, porém, estes apresentam uma diferença na amplitude de aproximadamente 100 mW em relação ao sinal medido. Nesse sentido, o ganho foi alterado para 1,1 vezes, ou seja, um incremento 10% na saída do sinal modelado. O novo comportamento registrado é exibido na Figura 36.

Figura 36 - Validação do sinal para cinco veículos em 15 km/h, após para o ganho de 1,1 vezes.



Fonte: (O autor, 2020).

Como pode ser observado na Figura 36, agora com o aumento no ganho, o sistema apresentou um comportamento similar aos modelos calculados.

Nesse sentido nas figuras que seguem são exibidos os comportamentos dos modelos com variação das demais velocidades, conforme cenários indicados anteriormente.



Figura 37 - Validação do sinal para cinco veículos em 22 km/h, com ganho de 1,1 vezes.

Fonte: (O autor, 2020).





Fonte: (O autor, 2020).

Ademais, nas Figuras 36, 37 e 38 pode-se observar que, para o cenário de cinco veículos, há similaridade entre o comportamento do sistema medido e os modelos calculados. Nesse sentido, a fim de continuar o processo de validação, o número de veículos foi incrementado para treze. O novo comportamento dos modelos é exibido nas figuras abaixo.



Figura 39 - Validação do sinal para treze veículos em 15 km/h, com ganho de 1,1 vezes.

Fonte: (O autor, 2020).





Fonte: (O autor, 2020).



Figura 41 - Validação do sinal para treze veículos em 30 km/h, com ganho de 1,1 vezes.

Fonte: (O autor, 2020).

Como pode ser observado nas validações supracitadas, todas as simulações, com exceção da realizada com treze veículos e velocidade 30 km/h, apresentaram similaridades com o sinal medido.

No caso da validação realizada com treze veículos em 30 km/h o modelo, no seu pico, apresentou uma diferença de 25% em relação ao comportamento medido.

Essa situação, no entanto, considerando-se que a instalação da lombada é prevista para o perímetro urbano de uma cidade, torna-se improvável, uma vez que, para um número maior de veículos simultâneos na via, a velocidade média tende a reduzir.

Assim, avaliando-se as curvas nos instantes onde não haviam mais pulsos excitatórios, nas quais o sistema era alimentado somente pela energia armazenada no *flywheel*, o modelo que apresentou um comportamento mais próximo ao sinal medido foi o modelo com 1 polo e nenhum zero, o qual possuía uma aproximação de 60,08%. Nesse sentido, o modelo deste sistema no *Simulink* é representado pelo diagrama da Figura 42.



Figura 42 - Diagrama no Simulink do modelo equivalente ao sistema real.

O diagrama exibido na Figura 42 foi separado em quatro partes, conforme indicações acima. Assim, na primeira parte estão indicados os dois sinais, sendo eles o sinal de saída esperado, ligado diretamente ao barramento de saída indicado na terceira parte, e o sinal de entrada avaliado, este ligado ao modelo levantado na segunda parte.

Já na segunda parte encontra-se indicada a equação do modelo escolhido bem como um bloco de ganho ajustado para o modelo, este ligado diretamente ao barramento de saída e, consequentemente, ao osciloscópio virtual para a visualização dos resultados na terceira parte.

Ademais, para o modelo criado foi realizada a simulação da potência gerada para um sinal de uma hora de passagem de veículos, sendo modelado de forma que a distância entre o eixo traseiro de um veículo ao eixo dianteiro do próximo veículo seja de 2,551 m, mesma distância entre os eixos dianteiro e traseiro do veículo, conforme indicado na Figura 43.



Figura 43 - Distância entre veículos.

Fonte: (O autor, 2020).

Fonte: (O autor, 2020).

Nesse sentido os comportamentos das curvas de potência obtidas para as três velocidades supracitadas seguem indicados abaixo.



Figura 44 - Comportamento do modelo para a passagem de 1 hora de veículos a 15 km/h.

Figura 45 - Comportamento do modelo para a passagem de 1 hora de veículos a 22 km/h





Figura 46 - Comportamento do modelo para a passagem de 1 hora de veículos a 30 km/h

Fonte: (O autor, 2020).

Conforme observado nas Figuras 44, 45 e 46, para todas as velocidades o sistema apresentou um comportamento contínuo, com diferenças apenas na sua amplitude, a qual varia entre 250 mW, para a velocidade de 15 km/h, e 500 mW, para a velocidade de 30 km/h.

Assim, utilizando o melhor cenário, considerando uma operação contínua de doze horas, o protótipo RENERGY, com as suas atuais características, seria capaz de fornecer uma potência de 6 Wh/dia.

Conforme abordado na Seção 3.3, o trecho da via utilizado como base para a aplicação teórica do sistema necessitaria de oito lâmpadas e, uma vez que cada lâmpada possui uma potência de 100 W, em uma operação de doze horas seriam necessários, aproximadamente, 9,6 kWh/dia.

Não obstante, apesar da capacidade de fornecimento de 6 Wh/dia, trata-se apenas de um protótipo, com suas dimensões e desempenho em menor escala.

Outrossim, os estudos realizados em casos semelhantes, abordados na Seção 2.1, possuem projetos em etapas mais avançadas, nos quais mostrou-se viável a utilização de lombadas gerando energia para iluminação pública.

Ademais do estudo realizado observou-se também que o protótipo possibilita melhorias, buscando uma maior eficiência do sistema. Nesse sentido, o Artigo *Development of energy harvesting using speed breaker* (HARIS et al., 2016), apresentado na Subseção 2.6.1, indica dois métodos para a melhoria do desempenho

de sistemas que utilizam *flywheels*, sendo estes o sistema de relação de transmissão e o diâmetro da roda de inércia.

No que diz respeito à geração de tensão, há possibilidade de melhorias visando um aumento da performance do sistema, substituindo o gerador atual por um capaz de gerar tensões nos níveis da rede de distribuição. Além disso, seria interessante que o gerador operasse com sua tensão nominal na mesma velocidade atingida pelo *flywheel.*

Por fim, através da criação do modelo matemático, verificou-se a eficácia do método na análise do comportamento do sistema real, possibilitando o seu estudo antes da montagem física do sistema. Com este tipo de análise, seria possível também verificar o comportamento do sistema para diferentes associações.

5 CONCLUSÃO

O presente projeto foi realizado em continuidade ao estudo iniciado pelo Engenheiro Samuel Sebben Ribeiro, o qual consistia na criação e montagem de um protótipo de lombada para o aproveitamento da energia cinética da passagem dos veículos, denominado RENERGY.

Assim, dando sequência ao estudo, neste projeto foi realizado o modelamento em ambiente de simulação da função de transferência, a qual descreve o funcionamento do sistema, relacionando o comportamento da saída em relação à entrada, a fim de facilitar a análise do sistema RENERGY sem a necessidade de extensos testes físicos.

Para tanto, incialmente, foram realizados testes de bancada, analisando o desempenho físico do protótipo, simulando a passagem de veículos com velocidades variando entre 15 e 30 km/h, velocidades estas correspondentes aos limites inferior e superior da via, respectivamente.

Após a obtenção dos dados, foi realizada a modelagem do protótipo com o uso do software MATLAB, no qual, com o auxílio do *toolbox* de identificação do sistema e do *Simulink*, foram levantados quatorze modelos com diferentes combinações de polos e zeros, avaliando a capacidade de geração energética do sistema de forma a simular o funcionamento do protótipo.

Deste levantamento verificou-se que os modelos que apresentaram melhores aproximações foram os sete primeiros resultados indicados, possuindo variadas combinações de zeros e polos, que iniciavam com 1 polo e nenhum zero no primeiro modelo, até o último com 7 polos e 6 zeros.

Nesse sentido, através dos dados aferidos com o comportamento do sistema, avaliou-se como mais eficiente o modelo calculado com 1 polo e nenhum zero, o qual apresentou uma maior similaridade com o sistema real, considerando o comportamento observado durante a comparação com o sinal aferido no momento em que não havia mais pulsos excitatórios.

Com os dados obtidos verificou-se a capacidade do protótipo na geração de energia elétrica, bem como a possibilidade de melhorias, com novas pesquisas e levantamentos em relação ao projeto mecânico.

Seguindo esse ponto de vista, seria possível a realização de novos estudos analisando o comportamento da geração de energia, alterando-se a massa e dimensões do *flywheel,* bem como a relação das correias que ligam este ao gerador.

Ademais, como visto durante análises, uma vez que o gerador não atingiu sua velocidade nominal, mostra-se interessante a realização de um novo estudo utilizando geradores com diferentes relações entre velocidade e tensão gerada, buscando uma maior eficiência na geração.

Por fim, concluiu-se que o presente estudo se mostrou eficiente quanto à modelagem realizada, obtendo similaridades com o modelo real, o que possibilitaria a realização de estudos mais aprofundados das características do protótipo através do ambiente de simulação.

REFERÊNCIAS

AGUIAR, Gabriel. **Ranking de vendas 2019: Chevrolet Onix é líder pelo quinto ano**. Disponível em: https://quatrorodas.abril.com.br/noticias/ranking-de-vendas-2019chevrolet-onix-e-lider-pelo-quinto-ano/. Acesso em: 24 mar. 2020.

AGUIRRE, Luis Antonio. **Introdução à Identificação de Sistemas**: técnicas lineares e não-lineares aplicadas a sistemas reais. 2. ed. Belo Horizonte: Editora Ufmg, 2004. 730 p.

AMIRYAR, Mustafa; PULLEN, Keith. A Review of Flywheel Energy Storage System Technologies and Their Applications. **Applied Sciences**, [s.l.], v. 7, n. 3, p.286-307, 16 mar. 2017. MDPI AG. http://dx.doi.org/10.3390/app7030286.

ANEEL. Fontes de energia renováveis representam 83% da matriz elétrica brasileira. 2020. Disponível em: https://www.gov.br/pt-br/noticias/energia-minerais-e-combustiveis/2020/01/fontes-de-energia-renovaveis-representam-83-da-matriz-eletrica-brasileira. Acesso em: 19 maio 2020.

ARDUINO Uno Tutorial [Pinout]. [S. I.], 10 abr. 2020. Disponível em: https://diyi0t.com/arduino-uno-tutorial/. Acesso em: 7 jul. 2020.

BARBI, I. Eletrônica de Potência. 7. ed. Florianópolis: Edição do Autores, 2012.

CHAPMAN, Stephen J. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. 5. ed. Porto Alegre: Amgh, 2013.

CHEVROLET. **Ficha Técnica Onix Hatch MT 1.0**. Disponível em: https://www.chevrolet.com.br/byo-vc/client/pt/BR/chevrolet/onix/2020/onix/features/ trims/table?section=SEGURAN%C3%87A§ion=DIMENS%C3%95ES&styleOne=5A48 AL. Acesso em: 24 mar. 2020.

COMPANHIA PAULISTA DE FORÇA E LUZ. **GED-3670**: Projeto de Iluminação Pública. Campinas: Cpfl, 2017. 36 p.

ELETRO, Ardo. **PLACA UNO R3 + CABO USB**. Disponível em: https://www.arduoeletro.com/arduino-uno-r3-cabo-usb. Acesso em: 04 jun. 2020.

ELETRO, Ardo. **SENSOR DE CONTAGEM CHAVE ÓPTICA PARA ENCODER 5MM**. Disponível em: https://www.arduoeletro.com/sensor-de-contagem-chave-optica-para-encoder-6mm. Acesso em: 04 jun. 2020.

ELETRO, Ardo. **SENSOR DE CORRENTE ACS712 30A PARA ARDUINO PIC**. Disponível em: https://www.arduoeletro.com/sensor-de-corrente-ac-dc-30a-acs712 Acesso em: 04 jun. 2020.

ELETRO, Ardo. **SENSOR DE TENSÃO (VOLTAGEM) 0 - 25 VDC PARA ARDUINO PIC**. Disponível em: https://www.arduoeletro.com/sensor-de-tensao-voltagem-0-25-vdc-arduino-pic. Acesso em: 04 jun. 2020. FATIMA, Noor; MUSTAFA, Jiyaul. Production of electricity by the method of road power generation. **International Journal Of Advances In Electrical And Electronics Engineering.** India, p. 9-14. fev. 2016. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/266484527_Production_of_electricity_by_the _method_of_road_power_generation. Acesso em: 25 mar. 2020.

FRANCE PRESSE (ed.). Em dez anos, energias renováveis quadruplicaram no mundo. 2019. Disponível em: https://g1.globo.com/natureza/noticia/2019/09/05/em-dez-anos-energias-renovaveis-quadruplicaram-no-mundo.ghtml. Acesso em: 25 maio 2020.

GASPAR, J. F. P. Gerador Síncrono de Imanes Permanentes para Microgeração Eólica. UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR. Covilhã, Portugal, p. 36. 2013.

HALLIDAY, David, RESNIK Robert, KRANE, Denneth S. Física 1, volume 1, 4. Ed. Rio de Janeiro: LTC, 1996. 326 p.

HARIS, H. C. Mat; NORMAN Mohd; RAHIMAN, M. H. Fazalul; RAHMAN, N F A Abdul. Development of energy harvesting using speed breaker. **2016 leee Conference On Systems, Process And Control (icspc)**, [s.l.], p.53-57, dez. 2016. IEEE. http://dx.doi.org/10.1109/spc.2016.7920703.

HOSSAIN, Md. Emran; HASAN, Md. Rokib; AHMED, Kazi Tahsan; SHAWON, Md. Naoshat Munim. Design and performance of power generation using speed breaker with the help of Rack and Pinion mechanism. **2017 4th International Conference On Advances In Electrical Engineering (icaee)**, [s.l.], p.7-10, set. 2017. IEEE. http://dx.doi.org/10.1109/icaee.2017.8255317.

IBGE. **Tabela 2645**: Estimativas populacionais das medianas de altura e peso. 2008. Disponível em: https://sidra.ibge.gov.br/tabela/2645#resultado. Acesso em: 24 maio 2020.

IG, CARROS. Chevrolet Onix hatch tem mais imagens e especificações divulgadas pela GM. Dispónivel em: https://carros.ig.com.br/2019-11-13/chevrolet-onix-hatch-tem-mais-imagens-e-especificacoes-divulgadas-pela-gm.html. Acesso em: 10 julho 2020.

LUMINÁRIA LED PÚBLICA. Disponível em: https://www.iluminim.com.br/luminarialed-publica-100w-branco-frio. Acesso em: 25 maio 2020.

MAGOSSI, Rafael F. Q.; OLIVEIRA, Vilma A.. **Utilizando o toolbox Ident do Matlab**. Sel0328 - Laboratório de Controle de Sistemas, 2016. 10 p.

MELLO, João. **Alunos criam sistema que gera energia através da passagem de bicicletas.** Disponível em: https://jornalggn.com.br/inovacao/alunos-criam-sistema-que-gera-energia-atraves-da-passagem-de-bicicletas/. Acesso em: 07 abr. 2020.

Ministério do Meio Ambiente. **Acordo de Paris**. Disponível em: https://www.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/acordo-de-paris. Acesso em: 19 maio 2020. MULJADI, Eduard; GEVORGIAN, Vahan. Flywheel Energy Storage - Dynamic Modeling. **2017 Ninth Annual leee Green Technologies Conference (greentech)**, [s.l.], p.312-319, mar. 2017. IEEE. http://dx.doi.org/10.1109/greentech.2017.52.

REDAÇÃO GALLILEU. **Lombada inteligente gera energia enquanto carros passam**. Disponível em: http://revistagalileu.globo.com/Revista/Common/0,,EMI125 087-17783,00-LOMBADA+INTELIGENTE+GERA+ENERGIA+ENQUANTO+ CARROS+PASSAM.html. Acesso em: 07 abr. 2020.

RIBEIRO, Samuel Sebben. **SISTEMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DE UM REDUTOR DE VELOCIDADE - RENERGY**. 2019. 76 f. Graduação - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade de Caxias do Sul (UCS), Caxias do Sul, 2019.

URBJET-1004IIMXX-XX. Disponível em: https://brightlux.com.br/produto/urbjet-0304iimxx-xx-copy-copy-2/. Acesso em: 25 maio 2020.

USINAINFO: Módulo Sensor Magnético de Efeito Hall 3144 Arduino Disponível em: https://www.usinainfo.com.br/sensor-efeito-hall-arduino/modulo-sensor-magnetico-deefeito-hall-3144-arduino-5495.html. Acesso em 11 julho 2020.

VISHAY. 4N25, 4N26, 4N27, 4N28: Optocoupler, Phototransistor Output, with Base Connection. Optocoupler, Phototransistor Output, with Base Connection. 2010. Disponível em: https://www.vishay.com/docs/83725/4n25.pdf. Acesso em: 24 maio 2020.

ANEXO A - CONTROLADOR ARDUINO



Figura 47 - Controlador Arduino.

Fonte: (ARDUINO, 2020).

	-	
Microcontrolador	ATmega328	
Tensão operacional	5 V	
Tensão de entrada (recomendada)	7-12 V	
Tensão de entrada (limites)	6-20 V	
Pinos E/S digitais	14 (dos quais 6 podem ser saídas PWM)	
Pinos de entrada analógica	6	
Corrente CC por pino E/S	40 mA	
Corrente CC para o pino 3,3 V	50 mA	
Flash Memory	32 KB (ATmega328) dos quais 0,5KB são utilizados pelo bootloader	
SRAM	2 KB (ATmega328)	
EEPROM	1 KB (ATmega328)	
Velocidade de Clock	16 MHz	

Tabela 5 - E	specificaç	ão do Ar	duino UNC	Э.
--------------	------------	----------	-----------	----

Fonte: (ELETRO, 2020).
ANEXO B - ESPECIFICAÇÕES CHEVROLET ONIX HATCH

Tabela 6 - Es	specificações	do Chevrolet	Onix Hatch.
---------------	---------------	--------------	-------------

Especificação	Valor
Comprimento total	4,163 m
Distância entre eixos	2,551 m
Bitola	1,51 m
Peso	1075 kg

Fonte: (CHEVROLET, 2020).





Fonte: (IG CARROS, 2019).

ANEXO C - SENSOR DE VELOCIDADE ARDUINO.



Figura 49 - Sensor de velocidade Arduino.

Fonte: (USINAINFO, 2020).



	Tensão de operação	3,3 – 5 V	
	Sensor Magnético de Efeito Hall	3144	
Fonte: (USINAINFO, 2020).			

ANEXO D - SENSOR DE TENSÃO ARDUINO.

Figura 50 - Sensor de tensão do Arduino.



Fonte: (ELETRO, 2020).

Tabela 8 - Especificação do sensor de tensão do Arduino.

Tensão de entrada	0 a 25 V
Valor dos resistores	30k e 0,75 kΩ
Proporção da divisão	5:1
Tolerância dos Resistores	1%

Fonte: (ELETRO, 2020).

ANEXO E - SENSOR DE CORRENTE ARDUINO.



Figura 51 - Sensor de corrente do Arduino.

Fonte: (ELETRO, 2020).

Tabela 9 -	- Especificação do sensor de corrente do A	rduino.

Tensão alimentação	5V
Corrente máxima	30A
Tempo de resposta	5µs
Largura de banda	80kHz
Razão de saída	66mV/A

Fonte: (ELETRO, 2020).

ANEXO F - LUMINÁRIA URBJET-0704IIMXX-XX - FABRICANTE BRIGHTLUX.



Figura 52 - Luminária Brightlux.

Fonte: (BRIGHTLUX, 2020).

rabela 10 - Especificação luminaria Brightiux		
Uso Externo		
Base	Φ 65mm (Braços BR1 ao BR3)	
Driver	Dimerizável, Interno	
Cor Padrão	Nunsell N6,5 (Cinza)	
Temperatura de Operação -5° C - 50° C		
Grau de Proteção IP	IP66	
Potência	100W	
Tensão de Entrada	100~277VAC	
Estor do Botôncia	≥0.98 @ 127 V / ≥0.96 @ 220 V / ≥0.95 @	
	277 V	
Frequência de Operação	50 – 60 Hz	
Fluxo Luminoso 13000 lm		
Temperatura de Cor	4000 K	
IRC	>70	
Eficiência	130 lm/W	
Peso	1.5 Kg	
INMETRO Certificada		

Tabela 10 - Es	specificação	luminária	Brightlux

Fonte: (BRIGHTLUX, 2020).

APÊNDICE A - RELAÇÃO DE COMPONENTES DO CIRCUITO DE CONTROLE DO SISTEMA DE ACIONAMENTOS

R1 220 Ω R2 220 Ω R3 1 kΩ R4 10 kΩ R5 1 kΩ R6 10 kΩ R7 10 kΩ	Reierencia	Valor
R2 220 Ω R3 1 kΩ R4 10 kΩ R5 1 kΩ R6 10 kΩ R7 10 kΩ	R1	220 Ω
R3 1 kΩ R4 10 kΩ R5 1 kΩ R6 10 kΩ R7 10 kΩ	R2	220 Ω
R4 10 kΩ R5 1 kΩ R6 10 kΩ R7 10 kΩ	R3	1 kΩ
R5 1 kΩ R6 10 kΩ R7 10 kΩ	R4	10 kΩ
R6 10 kΩ R7 10 kΩ	R5	1 kΩ
R7 10 kΩ	R6	10 kΩ
	R7	10 kΩ
R8 10 KΩ	R8	10 kΩ
R9 10 kΩ	R9	10 kΩ
D1 1N4007	D1	1N4007
D2 1N4007	D2	1N4007
Q1 TIP41	Q1	TIP41
Q2 TIP41	Q2	TIP41
Opto 1 4n26	Opto 1	4n26
Opto 2 4n26	Opto 2	4n26
L1 Solenoide de acionamento roda dianteira	L1	Solenoide de acionamento roda dianteira
L2 Solenoide de acionamento roda traseira	L2	Solenoide de acionamento roda traseira
LCD LCD Azul 16x02	LCD	LCD Azul 16x02
SW1 Chave Táctil 6x6x6 mm 4 Terminais	SW1	Chave Táctil 6x6x6 mm 4 Terminais
SW2 Chave Táctil 6x6x6 mm 4 Terminais	SW2	Chave Táctil 6x6x6 mm 4 Terminais
SW3 Chave Táctil 6x6x6 mm 4 Terminais	SW3	Chave Táctil 6x6x6 mm 4 Terminais
SENSOR 1 ANEXO D	SENSOR 1	ANEXO D
SENSOR 2 ANEXO E	SENSOR 2	ANEXO E
SENSOR 3 ANEXO C	SENSOR 3	ANEXO C

Tabela 11 - Relação de componentes.

APÊNDICE B - MEDIÇÕES DOS PULSOS REALIZADOS NAS VELOCIDADES DE 15KM/H, 25KM/H E 30KM/H

Periodo (s)	Velocidade (pulsos)	Tensão (V)
0	0,00	0,014
500	1,80	0,996
1000	3,40	2,012
1500	3,20	1,506
2000	2,80	0,784
2500	1,20	0,374
3000	0,80	0,118
3500	0,40	0,046
4000	0,25	0,005
4500	0,00	0,006
5000	0,00	0,000

Tabela 12 - Medição realizada em 15km/h para um veículo.

Fonte: (O autor, 2020).

Tabela 13 - Medição realizada em 25km/h para um veículo.

Período (s)	Velocidade (pulsos)	Tensão (V)
0	0,000	0,000
500	2,666	2,043
1000	4,000	1,970
1500	3,000	1,410
2000	2,000	0,683
2500	2,333	0,536
3000	0,666	0,260
3500	0,333	0,073
4000	0,333	0,006
4500	0,000	0,006
5000	0,000	0,033

Fonte: (O autor, 2020).

Tabela 14 - Medição	realizada em 30km/h	para um veículo.
---------------------	---------------------	------------------

Período (s)	Velocidade (pulsos)	Tensão (V)
0	0	0
500	3	2,59
1000	4,66667	2,093333
1500	2,66667	1,513333
2000	2,66667	0,93
2500	2	0,546667
3000	1	0,123333
3500	0,66667	0,016667
4000	0	0
4500	0	0

Período (s)	Velocidade (pulsos)	Tensão (V)
0	0,000	0,000
500	1,000	0,533
1000	3,000	1,520
1500	3,500	2,865
2000	4,750	3,398
2500	5,750	2,870
3000	7,000	4,045
3500	7,500	4,228
4000	7,750	5,415
4500	8,250	5,675
5000	8,000	5,903
5500	9,500	4,973
6000	9,250	5,048
6500	9,250	6,145
7000	9,000	6,220
7500	9,250	6,225
8000	9,500	6,098
8500	9,000	5,918
9000	9,750	5,900
9500	9,500	6,990
10000	9,000	5,285
10500	8,250	4,470
11000	6,750	3,878
11500	6,250	3,153
12000	5,000	2,603
12500	4,500	1,948
13000	3,250	1,508
13500	2,750	0,853
14000	1,750	0,435
14500	1,250	0,098
15000	0,750	0,000
15500	0,000	0,000
16000	0,000	0,000
16500	0,000	0,000

Tabela 15 - Medição realizada em 15km/h para oito veículos.

Período (s)	Velocidade (pulsos) Tensão (V			
0	0,000	0,000		
500	1,000	0,500		
1000	5,000	3,747		
1500	7,000	3,917		
2000	7,333	5,710		
2500	9,667	4,773		
3000	9,667	6,313		
3500	10,000	7,143		
4000	10,667	7,250		
4500	11,000	7,717		
5000	10,667	7,380		
5500	11,000	7,037		
6000	10,667	6,110		
6500	10,333	6,217		
7000	9,000	4,810		
7500	7,667	4,740		
8000	7,000	4,013		
8500	5,667	3,087		
9000	5,333	2,607		
9500	4,000	1,790		
10000	3,333	1,380		
10500	2,333	0,953		
11000	2,333	0,417		
11500	1,000	0,040		
12000	0,000	0,007		
12500	0,000	0,000		
13000	0,000	0,017		

Tabela 16 - Medição realizada em 25km/h para oito veículos.

Período (s)	Velocidade (pulsos)	Tensão (V)
0	0	0,00
500	3	3,32
1000	6	4,35
1500	8	5,55
2000	8	6,57
2500	10	6,55
3000	10	7,36
3500	11	5,82
4000	11	6,40
4500	11	8,41
5000	11	6,96
5500	9	4,40
6000	9	5,91
6500	7	4,94
7000	7	4,23
7500	5	3,30
8000	6	1,93
8500	3	1,74
9000	3	1,44
9500	3	0,39
10000	1	0,34
10500	1	0,02
11000	1	0,10
11500	0	0,10
12000	0	0,00

Tabela 17 - Medição realizada em 30km/h para oito veículos.

APÊNDICE C - LEVANTAMENTO DA CURVA DE CARGA

	18,80Ω			14,10Ω		9,40Ω		
Tensão	Potência	Período	Tensão	Potência	Período	Tensão	Potência	Período
(V)	(W)	(s)	(V)	(W)	(s)	(V)	(W)	(s)
0,610	0,020	0	0,320	0,007	0	0,627	0,042	0
0,920	0,050	500	1,133	0,091	500	1,710	0,311	500
1,570	0,130	1000	2,510	0,447	1000	2,770	0,816	1000
1,940	0,200	1500	3,210	0,731	1500	3,967	1,674	1500
3,490	0,650	2000	3,553	0,895	2000	3,357	1,199	2000
3,060	0,500	2500	3,093	0,679	2500	2,777	0,820	2500
4,460	1,060	3000	3,407	0,823	3000	3,323	1,175	3000
4,240	0,950	3500	4,123	1,206	3500	3,443	1,261	3500
4,550	1,100	4000	5,130	1,866	4000	3,697	1,454	4000
5,400	1,550	4500	4,667	1,545	4500	3,823	1,555	4500
4,590	1,120	5000	3,917	1,088	5000	3,447	1,264	5000
4,350	1,010	5500	3,960	1,112	5500	3,397	1,227	5500
4,990	1,320	6000	4,397	1,371	6000	3,760	1,504	6000
5,000	1,330	6500	4,383	1,363	6500	3,250	1,124	6500
5,720	1,740	7000	4,447	1,402	7000	3,580	1,363	7000
5,210	1,440	7500	4,107	1,196	7500	4,317	1,982	7500
4,110	0,900	8000	3,657	0,948	8000	3,553	1,343	8000
4,720	1,180	8500	4,107	1,196	8500	3,113	1,031	8500
4,050	0,870	9000	3,853	1,053	9000	3,047	0,987	9000
5,420	1,560	9500	4,203	1,253	9500	4,200	1,877	9500
5,520	1,620	10000	5,237	1,945	10000	3,870	1,593	10000
4,950	1,310	10500	3,440	0,839	10500	3,323	1,175	10500
4,440	1,050	11000	4,137	1,214	11000	3,493	1,298	11000
4,700	1,180	11500	4,580	1,488	11500	3,547	1,338	11500
4,380	1,020	12000	4,910	1,710	12000	3,403	1,232	12000
4,890	1,270	12500	4,553	1,470	12500	3,700	1,456	12500
4,670	1,160	13000	4,790	1,627	13000	3,747	1,493	13000
2,890	0,440	13500	3,397	0,818	13500	3,407	1,235	13500
4,740	1,200	14000	3,747	0,996	14000	3,513	1,313	14000
4,780	1,220	14500	3,660	0,950	14500	3,290	1,152	14500
5,030	1,350	15000	3,953	1,108	15000	4,413	2,072	15000
5,450	1,580	15500	4,870	1,682	15500	3,753	1,499	15500
4,510	1,080	16000	3,797	1,022	16000	2,787	0,826	16000
2,880	0,440	16500	2,517	0,449	16500	1,920	0,392	16500
2,560	0,350	17000	2,037	0,294	17000	1,403	0,210	17000
2,080	0,230	17500	1,477	0,155	17500	0,890	0,084	17500
1,380	0,100	18000	0,960	0,065	18000	0,577	0,035	18000
0,890	0,040	18500	0,570	0,023	18500	0,000	0,000	18500
0,540	0,020	19000	0,490	0,017	19000	0,000	0,000	19000
0,000	0,000	19500	0,000	0,000	19500	0,000	0,000	19500
0,000	0,000	20000	0,000	0,000	20000	0,000	0,000	20000
0,000	0,000	20500	0,000	0,000	20500	0,000	0,000	20500

Tabela 18 - Levantamento da curva de carga $18,80\Omega$, $14,10\Omega = 9,40\Omega$.

	4,70Ω			2,35Ω			1,56Ω	
Tensão	Potência	Período	Tensão	Potência	Período	Tensão	Potência	Período
(V)	(W)	(s)	(V)	(W)	(s)	(V)	(W)	(s)
0.260	0.014	0 0	0.047	0.001	0 0	0.510	0.167	0 Ó
0.613	0.080	500	0.073	0.002	500	0.853	0.467	500
1.603	0.547	1000	0.513	0.112	1000	1.407	1.268	1000
2,363	1,188	1500	1,303	0,723	1500	1,310	1,100	1500
2,393	1,219	2000	1,240	0,654	2000	1,353	1,174	2000
1,710	0,622	2500	1,047	0,466	2500	1,090	0,762	2500
2,427	1,253	3000	1,103	0,518	3000	1,377	1,215	3000
1,870	0,744	3500	1,477	0,928	3500	1,477	1,398	3500
2,417	1,243	4000	1,223	0,637	4000	1,377	1,215	4000
2,557	1,391	4500	1,693	1,220	4500	1,487	1,417	4500
2,023	0,871	5000	1,247	0,661	5000	1,473	1,391	5000
1,993	0,845	5500	1,387	0,818	5500	1,597	1,634	5500
2,240	1,068	6000	1,353	0,779	6000	1,507	1,455	6000
2,427	1,253	6500	1,510	0,970	6500	1,647	1,738	6500
2,127	0,962	7000	1,607	1,098	7000	1,507	1,455	7000
2,747	1,605	7500	1,230	0,644	7500	1,343	1,157	7500
1,750	0,652	8000	1,467	0,915	8000	1,510	1,462	8000
2,490	1,319	8500	1,050	0,469	8500	1,443	1,335	8500
2,437	1,263	9000	1,603	1,094	9000	1,480	1,404	9000
2,460	1,288	9500	1,460	0,907	9500	1,590	1,621	9500
2,313	1,139	10000	1,213	0,626	10000	1,603	1,648	10000
1,873	0,747	10500	1,127	0,540	10500	1,517	1,475	10500
1,753	0,654	11000	1,027	0,449	11000	1,313	1,106	11000
1,890	0,760	11500	1,337	0,760	11500	1,587	1,614	11500
2,493	1,323	12000	1,630	1,131	12000	1,813	2,108	12000
2,623	1,464	12500	1,727	1,269	12500	1,750	1,963	12500
2,077	0,918	13000	1,727	1,269	13000	1,757	1,978	13000
2,160	0,993	13500	1,197	0,609	13500	1,313	1,106	13500
2,127	0,962	14000	1,613	1,108	14000	1,457	1,360	14000
2,243	1,071	14500	1,577	1,058	14500	1,607	1,655	14500
2,780	1,644	15000	1,440	0,882	15000	1,523	1,488	15000
2,623	1,464	15500	1,650	1,159	15500	1,653	1,752	15500
2,003	0,854	16000	1,377	0,806	16000	1,393	1,244	16000
1,143	0,278	16500	0,560	0,133	16500	0,813	0,424	16500
0,620	0,082	17000	0,000	0,000	17000	0,597	0,228	17000
0,000	0,000	17500	0,000	0,000	17500	0,000	0,000	17500
0,000	0,000	18000	0,000	0,000	18000	0,000	0,000	18000
0,000	0,000	18500	0,000	0,000	18500	0,000	0,000	18500
0,000	0,000	19000	0,000	0,000	19000	0,000	0,000	19000
0,000	0,000	19500	0,000	0,000	19500	0,000	0,000	19500
0,000	0,000	20000	0,000	0,000	20000	0,000	0,000	20000

Tabela 19 - Levantamento da curva de carga $4,7\Omega$, $2,35\Omega$ e $1,56\Omega$.

	1,17Ω	
Tensão	Potência	Período
(V)	(W)	(s)
0,270	0,062	0
0,490	0,204	500
0,930	0,736	1000
1,300	1,438	1500
1,220	1,267	2000
1,030	0,903	2500
1,300	1,438	3000
1,560	2,071	3500
1,080	0,993	4000
1,390	1,644	4500
0,880	0,659	5000
1,200	1,226	5500
1,340	1,528	6000
1,250	1,330	6500
1,200	1,226	7000
1,340	1,528	7500
1,420	1,716	8000
1,370	1,597	8500
1,150	1,126	9000
1,390	1,644	9500
1,540	2,018	10000
1,100	1,030	10500
1,470	1,839	11000
1,520	1,966	11500
1,120	1,068	12000
1,560	2,071	12500
0,950	0,768	13000
0,560	0,267	13500
1,200	1,226	14000
1,320	1,483	14500
1,370	1,597	15000
1,520	1,966	15500
1,200	1,226	16000
0,420	0,150	16500
0,370	0,117	17000
0,240	0,049	17500
0.270	0.062	18000
0.290	0.072	18500
0.000	0.000	19000
0.000	0.000	19500
0,000	0,000	20000

Tabela 20 - Levantamento da curva de carga 1,17 Ω .

APÊNDICE D - IMPORTAÇÃO DE DADOS ATRÁVES DO *TOOLBOX* DE IDENTIFICAÇÃO DO SISTEMA

Conforme visto na Seção 4.3, a importação do sinal criado foi realizada no *toolbox* de identificação do sistema no MATLAB através do campo *import data*, com a opção *time domain data*, selecionando um *sample time* de 0,5 s, tempo este que havia sido definido anteriormente como período de aquisição dos dados.





Fonte: (O autor, 2020).

Com base no sinal importado, utilizando no campo *estimate* a opção *function transfer models*, opção esta responsável por estimar a função de transferência do sinal de entrada com base no número de polos e zeros escolhidos, foram utilizadas diferentes combinações de zeros e polos para as estimativas das funções bem como suas aproximações.

APÊNDICE E - FUNÇÕES DE TRANSFERÊNCIAS LEVANTADS COM O TOOLBOX DE IDENTIFICAÇÃO DO SISTEMA

Figura 54 – Equações levantadas com a simulação do mode	lo.
---	-----

$M_{1p\text{or}} = \frac{24,59}{s+0.2821}$
$M_{2p1s} = \frac{15,1s+22,76}{s^2+0.08967s+0.2937}$
$M_{3p2x} = \frac{15s^2 + 22,65s + 0,08392}{s^3 + 0,8826s^2 + 0,2971s + 0,001407}$
$M_{4p,3x} = \frac{15,19s^3 + 23,42s^2 + 1,633s + 0,01463}{s^4 + 0,9473s^3 + 0,3531s^2 + 0,02151s + 0,0002152}$
$M_{5p4z} = \frac{14,96s^4 + 22,51s^3 + 0,792s^2 + 0,7315s + 0,003366}{s^5 + 0,8796s^4 + 0,3378s^3 + 0,03332s^2 + 0,009653s + 5,478e^{-5}}$
$M_{6p5x} = \frac{16,12s^5 + 19,62s^4 + 4,462s^3 + 0,73s^2 + 0,1239s + 0,00094}{s^6 + 0,8378s^5 + 0,4275s^4 + 0,07543s^3 + 0,01399s^2 + 0,001425s + 1,429e^{-5}}$
$M_{7p6z} = \frac{2,131s^6 + 107s^5 + 72,5s^4 + 99,86s^3 + 3,706s^2 + 3,13s + 0,01511}{s^7 + 4,646s^6 + 5,531s^5 + 4,176s^4 + 1,464s^3 + 0,1516s^2 + 0,04056s + 0,000244}$
$M_{8p7x} = \frac{-39.24s^7 + 237.2s^6 + 165s^5 + 71.28s^4 + 29.81s^3 + 6.309s^2 + 0.8468s + 0.1399}{s^8 + 31.17s^7 + 26.11s^6 + 15.12s^5 + 5.742s^4 + 1.811s^3 + 0.3343s^2 + 0.04596s + 0.005548}$
$M_{9p9s} = \frac{-20,12s^8 + 262,1s^7 + 130,3s^6 + 62,85s^5 + 22,53s^4 + 4,299s^3 + 0,6271s^2 + 0,07769s + 0,0005786}{s^9 + 11,69s^8 + 7,371s^7 + 3,922s^6 + 1,463s^5 + 0,3831s^4 + 0,07355s^3 + 0,009079s^2 + 0,001036s + 8,748e^{-6}}$
$M_{10p9z} = \frac{12.51s^9 + 34,79s^8 + 306,1s^7 + 210,9s^6 + 146,5s^5 + 37,29s^4 + 16,97s^3 + 1,263s^2 + 0,4033s + 0,003814}{s^{10} + 3,078s^9 + 16,49s^8 + 12,51s^7 + 9,035s^6 + 3,536s^5 + 1,152s^4 + 0,2976s^3 + 0,03222s^2 + 0,006143s + 5,547e^{-5}}$
$M_{11p10x} = \frac{-0.2138s^{10} + 164.6s^9 + 8.729s^8 + 31.41s^7 + 1.384s^6 + 1.287s^5 + 0.04375s^4 + 0.01533s^3 + 0.0002786s^2 + 4.297e^{-5}s + 1.157e^{-7}}{s^{11} + 6.615s^{10} + 1.669s^9 + 1.428s^8 + 0.07973s^7 + 0.07973s^6 + 0.01143s^5 + 0.001534s^4 + 0.001334s^3 + 8.06e^{-6}s^2 + 3.008e^{-7}s + 2.117e^{-9}}$
$M_{12p11x} = \frac{1,1122s^{11} + 122,5s^{10} + 86,43s^9 + 137,2s^8 + 52,39s^7 + 19,56s^6 + 6,826s^5 + 0,445s^4 + 0,2047s^3 - 0,002193s^2 + 0,001125s + 6,034e^{-6}}{s^{12} + 5,501s^{11} + 6,019s^{10} + 6,442s^9 + 3,652s^6 + 1,308s^7 + 0,5083s^6 + 0,0848s^5 + 0,01868s^4 + 0,00183s^3 + 0,0001848s^2 + 9,388e^{-7}s + 9,593e^{-9}s^{-1}}$
$M_{13p12x} = \frac{-21,8s^{12} + 401,7s^{11} + 60,81s^{10} + 391,8s^{9} + 70,43s^{8} + 59,29s^{7} + 10,76s^{6} + 1,895s^{5} + 0,3278s^{4} + 0,01098s^{3} + 0,001628s^{2} + 7,77e^{-5}s + 2,866e^{-7}s^{-1}s^{-$
$ M_{14p13x} = \frac{-17,18r^{13}+116,2s^{12}-76,37s^{11}+85,31s^{10}-62,11s^9+20,75s^6-18,47s^7+2,188s^6-2,146s^5+0,09978s^4-0,09081s^3+0,001648s^2-0,001255s+3,077e^{-6}-10,188s^{10}+8,88s^{13}+4,495s^{12}+7,388s^{11}+3,119s^{10}+2,163s^9+0,7906s^6+0,2799s^7+0,08345s^6+0,01651s^5+0,00344s^4+0,0004204s^3+4,806e^{-5}s^2+3,663e^{-6}s+2,2424e^{-6}-10,188s^{10}+10,188s^{10$

Fonte: (O autor, 2020).