

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Simulação em MATLAB/Simulink da Frenagem  
Regenerativa de um Motor Síncrono de Imãs Permanentes  
Aplicada ao Veículo da Equipe EcoVeículo da UNIFEI

Artur Átila Moraes

Itajubá, 2020

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Artur Átila Moraes

Simulação em MATLAB/Simulink da Frenagem  
Regenerativa de um Motor Síncrono de Imãs Permanentes  
Aplicada ao Veículo da Equipe EcoVeículo da UNIFEI

Dissertação submetida ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Ciência em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Automação e Sistemas Elétricos Industriais

Orientador: Prof. Dr. Luís Henrique de Carvalho Ferreira

Itajubá, 2020

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Artur Átila Moraes

Simulação em MATLAB/Simulink da Frenagem  
Regenerativa de um Motor Síncrono de Imãs Permanentes  
Aplicada ao Veículo da Equipe EcoVeículo da UNIFEI

# Agradecimentos

Agradeço primeiramente a minha família por ter me incentivado com amor e carinho durante toda minha jornada, acreditando sempre em mim, até mesmo quando eu não acreditava.

Agradeço a todos da comunidade da UNIFEI que de alguma forma vieram a compartilhar com esse trabalho, especialmente a todos envolvidos da equipe EcoVeículo que realizam um trabalho brilhante dentro e fora da oficina.

Agradeço também a todos do IESTI (Instituto de Engenharia de Sistemas e Tecnologia da Informação) que me acolheram desde o primeiro ano da faculdade, especialmente aos professores Dr. Tales, Dr. Gustavo e Dr. Odilon. Agradeço também aos amigos da microeletrônica, em especial ao Paulo e ao César, que me ajudaram com todos os percalços e dificuldades durante a pós graduação.

Gostaria de agradecer especialmente ao meu orientador, pela quarta vez, Dr. Luís Henrique, que sempre me abriu as portas para novos desafios.

Por fim, agradeço ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo auxílio financeiro que me foi concedido.

# Resumo

Este trabalho apresenta uma simulação em ambiente MATLAB/Simulink de um modelo baseado em um veículo elétrico (VE), E-Power V1, construído pela equipe EcoVeículo. Inicialmente, a história dos veículos elétricos é introduzida até chegar ao seu momento atual de alta relevância e demonstrando o motivo de ainda possuir a desvantagem de ter uma baixa autonomia. Baseado nisso, o trabalho é justificado propondo uma forma de recuperar energia através da frenagem regenerativa, utilizando como modelo o VE da equipe EcoVeículo. Assim, o trabalho demonstra os princípios básicos dos motores elétricos, focado no motor síncrono de ímãs permanentes. Também são demonstradas três técnicas (*single-switch*, *two-switches* e *three-switches*) de frenagem regenerativa e o equacionamento das principais forças que agem sobre o modelo. Por fim, são expostos os parâmetros utilizados na modelagem e a montagem da simulação através de blocos e funções em ambiente MATLAB/Simulink. Através da simulação, são apresentados os resultados da eficiência energética, o tempo de acomodação, o torque elétrico e o erro em regime permanente, sendo menor que 1% em todas as técnicas. Na conclusão, é discutida a possibilidade de, como um trabalho futuro, implementar a técnica *three-switches*, que teve maior êxito na recuperação de energia, atingindo 79,1% de eficiência energética com 3678W recuperados, além da vantagem de ser a única técnica *sensorless*. Dessa forma, o trabalho contribui com a equipe EcoVeículo, implementando a tecnologia de frenagem regenerativa em uma simulação do veículo elétrico E-Power V1 e mostrando a vantagem competitiva ao fazer uso da técnica.

**Palavras Chave:** Veículo Elétricos. Frenagem Regenerativa. Motor Síncrono de Ímãs Permanentes. Simulink/MATLAB.

# Abstract

This work presents a simulation in MATLAB/Simulink environment of a model based on an electric vehicle, E-Power V1, built by the EcoVeículo team. Initially, the history of electric vehicles is introduced until it reaches its current moment of high relevance and demonstrating the reason for still having the disadvantage of having a low autonomy. Based on this, the work is justified by proposing a way to recover energy through regenerative braking, using the VE model of the EcoVeículo team as a model. Thus, the work demonstrates the basic principles of electric motors, focused on the synchronous motor of permanent magnets. Three techniques (single-switch, two-switches and three-switches) of regenerative braking and the equation of the main forces acting on the model are also demonstrated. Finally, the parameters used in the modeling and assembly of the simulation through blocks and functions in MATLAB / Simulink environment are exposed. Through simulation, the results of energy efficiency, accommodation time, electrical torque and error in steady state are presented, being less than 1% in all techniques. In the conclusion, it is discussed the possibility of, as a future work, implementing the three-switches technique, which was more successful in energy recovery, reaching 79.1% of energy efficiency with 3678W recovered, in addition to the advantage of being the only technique sensorless. In this way, the work contributes to the EcoVeículo team by implementing regenerative braking technology in a simulation of the E-Power V1 electric vehicle and showing the competitive advantage when using the technique.

**Palavras Chave:** Electric Vehicle. Regenerative Braking. Permanent Magnet Synchronous Motor. Simulink/MATLAB.

# Sumário

<b>Lista de Símbolos</b> .....	8
<b>Lista de Figuras</b> .....	10
<b>Lista de Tabelas</b> .....	12
<b>1. Introdução</b> .....	13
1.1 Considerações Gerais.....	13
1.2 Justificativas.....	16
1.3 Objetivos.....	17
1.4 Organização do Trabalho.....	17
<b>2. Revisão Bibliográfica</b> .....	18
2.1 Princípios Básicos de Máquinas Elétricas.....	18
2.1.1 Taxonomia de Motores Síncronos de Imãs Permanentes.....	28
2.2 Modelo Planar.....	29
2.2.1 Força de Frenagem.....	30
2.2.1 Força Aerodinâmica.....	31
2.2.1 Força Inercial.....	31
2.2.1 Força de Resistência a Rolagem.....	33
2.2.1 Força Peso.....	34
2.3 Técnicas de Frenagem Regenerativa.....	34
2.3.1 Técnica <i>Single-Switch</i> .....	34
2.3.2 Técnica <i>Two-Switches</i> .....	36
2.3.1 Técnica <i>Three-Switches</i> .....	38

<b>3. Estudo de caso.....</b>	<b>40</b>
3.1 Definição de Parâmetros.....	40
3.1 Montagem da Simulação.....	44
<b>4. Resultados.....</b>	<b>49</b>
<b>5. Conclusões.....</b>	<b>56</b>
<b>Referências Bibliográficas.....</b>	<b>57</b>

## Lista de Símbolos

B	Campo magnético
$\beta$	Ângulo de inclinação da pista
BLDC	<i>Brushless Direct Current</i>
D	Diâmetro
E	Energia total
$\varepsilon$	Força contraeletromotriz
FEM	Força eletromotriz induzida
$\phi$	Fluxo magnético
F	Força
g	Constante gravitacional
I	Momento de inércia
i	Corrente elétrica
$K_\tau$	Constante de torque
L	Indutância
$\lambda$	Fluxo total
M	Indutância mútua
m	Massa
MSIP	Motor Síncrono de Imãs Permanentes
N	Número total de Enrolamentos
n	Relação de inércia
R	Resistência

$r$	Raio
$\tau$	Torque
$\theta_R$	Ângulo do rotor
$u$	Tensão aplicada
$v$	Velocidade
VE	Veículo elétrico
$\omega$	Velocidade angular
$x(t)$	Deslocamento
Y	Comprimento
Z	Impedância

## Lista de Figuras

1.1	Veículo elétrico <i>La Jamais Contente</i> (esquerda) e Gurgel Itaipu (direita).....	13
1.2	Vendas de 2011 a 2015 de veículos elétricos por região/país.....	13
1.3	Veículo elétrico E-Power V1.....	15
2.1	Demonstração de um gerador linear.....	19
2.2	Demonstração de um motor linear.....	22
2.3	Diagrama elétrico de um motor linear.....	22
2.4	Visão geral de um MSIP.....	23
2.5	Visão linear de um MSIP.....	24
2.6	MSIP de FEM trapezoidal (esquerda) e senoidal (direita).....	25
2.7	Representação da disposição das fases (esquerda) e do circuito elétrico (direita) de um MSIP trifásico.....	26
2.8	Motor de fluxo axial (esquerda) e fluxo radial (direita).....	28
2.9	Motor com rotor externo (esquerda) e rotor interno (direita).....	29
2.10	Diagrama de corpo livre.....	30
2.11	Sequência de acionamento dos transistores na técnica <i>single-switch</i> .....	35
2.12	Circuito equivalente da técnica <i>single-switch</i> durante o quadrante I (corrente azul quando PWM está em nível alto e corrente vermelha quando está em nível baixo).....	36
2.13	Sequência de acionamento dos transistores na técnica <i>two-switches</i> .....	37

2.14	Circuito equivalente do quadrante I da técnica <i>two-switches</i> (corrente azul quando PWM está em nível alto e corrente vermelha quando está em nível baixo).....	37
2.15	Sequência de acionamento dos transistores na técnica <i>three-switches</i> .....	38
2.16	Circuito equivalente do quadrante I da técnica <i>three-switches</i> (corrente azul quando PWM está em nível alto e corrente vermelha quando está em nível baixo).....	39
3.1	Circuito utilizado para calcular a impedância do motor elétrico.....	43
3.2	Visão geral da simulação em ambiente MATLAB/Simulink.....	45
3.3	Visão do modelo planar em ambiente MATLAB/Simulink.....	45
3.4	Visão do modelo de motor elétrico em ambiente MATLAB/Simulink.....	46
3.5	Visão do modelo de PID em ambiente MATLAB/Simulink.....	47
3.6	Visão da tabela verdade em ambiente MATLAB/Simulink.....	48
4.1	Torque elétrico durante a simulação.....	49
4.2	Velocidade do VE durante as simulações.....	50
4.3	Detalhe da FEM durante a frenagem regenerativa.....	50
4.4	Energia recuperada utilizando a técnica <i>single-switch</i> .....	51
4.5	Energia recuperada utilizando a técnica <i>two-switches</i> .....	51
4.6	Energia recuperada utilizando a técnica <i>three-switches</i> .....	52
4.7	Eficiência energética das técnicas utilizadas.....	53
4.8	Traçado da Shell Eco-marathon Brazil 2016, no kartódromo Granja Viana.....	54
4.9	Energia recuperada utilizando a técnica <i>three-switches</i> baseado no trecho de descida da Shell Eco-marathon Brazil 2016.....	54

## Lista de Tabelas

3.1	Massas e raios do tipo aro.....	41
3.2	Massas e raios do tipo disco.....	41

# 1 Introdução

## 1.1 Considerações Gerais

O primeiro veículo elétrico (VE) data de 1835, construído por Thomas Davenport e no decorrer daquele século muitos VEs foram adaptados para funcionarem em trilhos. Foi apenas no final daquele século, em 1899, que o primeiro veículo elétrico atingiu 100km/h. O recorde, estabelecido pelo belga Camille Jenatzy, foi feito no *La Jamais Contente*, um automóvel com uma aerodinâmica revolucionária [1].

No Brasil, foi apenas em 1974 que a Gurgel Motores S/A, fabricante brasileira de automóveis, do “homem de fibra” João Augusto Conrado do Amaral, apresentou no Salão de São Paulo o primeiro veículo elétrico brasileiro, o Gurgel Itaipu. Equipado com um motor elétrico de 3kW, era capaz de atingir 60km/h com uma autonomia de até 60km [2].

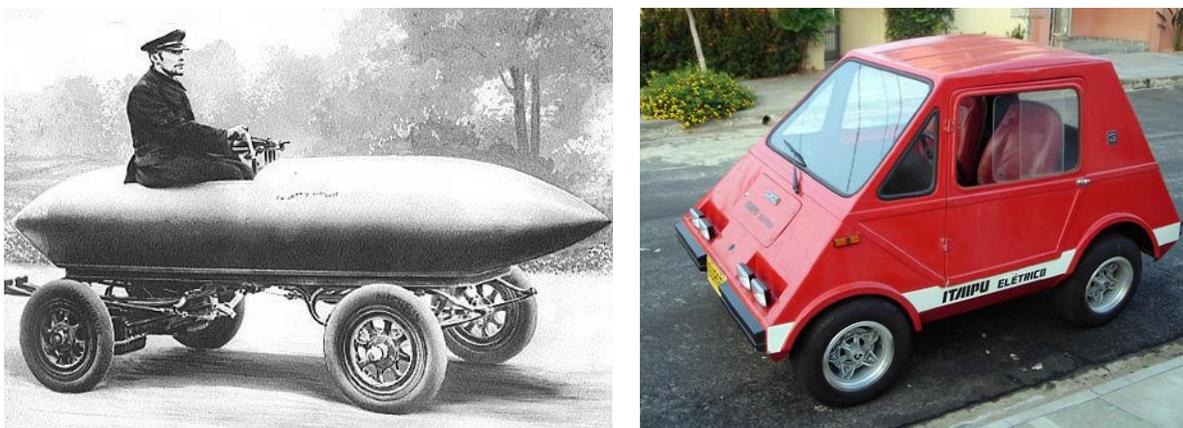


Figura 1.1: Veículo elétrico *La Jamais Contente* (esquerda) e Gurgel Itaipu (direita).

Apesar de no início do século XIX, diversos fabricantes apostarem sua produção em automóveis de propulsão elétrica, como a Baker Electric, Columbia Electric, e Detroit Electric, chegando a atingir 28% da frota dos Estados Unidos da América, os anos seguintes foram marcados pelo declínio desse tipo de propulsão, principalmente devido a descoberta de novas

jazidas de petróleo, barateando o custo da gasolina, e o advento da produção em massa de veículos a combustão, dominada por Henry Ford.

Entretanto, com a crescente preocupação com o aquecimento global, os veículos elétricos têm recebido muita atenção por serem uma alternativa aos tradicionais veículos de combustão interna. A Figura (1.2) reforça essa ideia na medida em que evidencia o aumento das vendas anuais de veículos elétricos na China, Canadá, Europa Ocidental, Japão e Estados Unidos entre os anos 2011 e 2015. O incremento nas vendas observado é expressivo, sendo o crescimento percentual durante o período retratado de mais de 1000% [3].

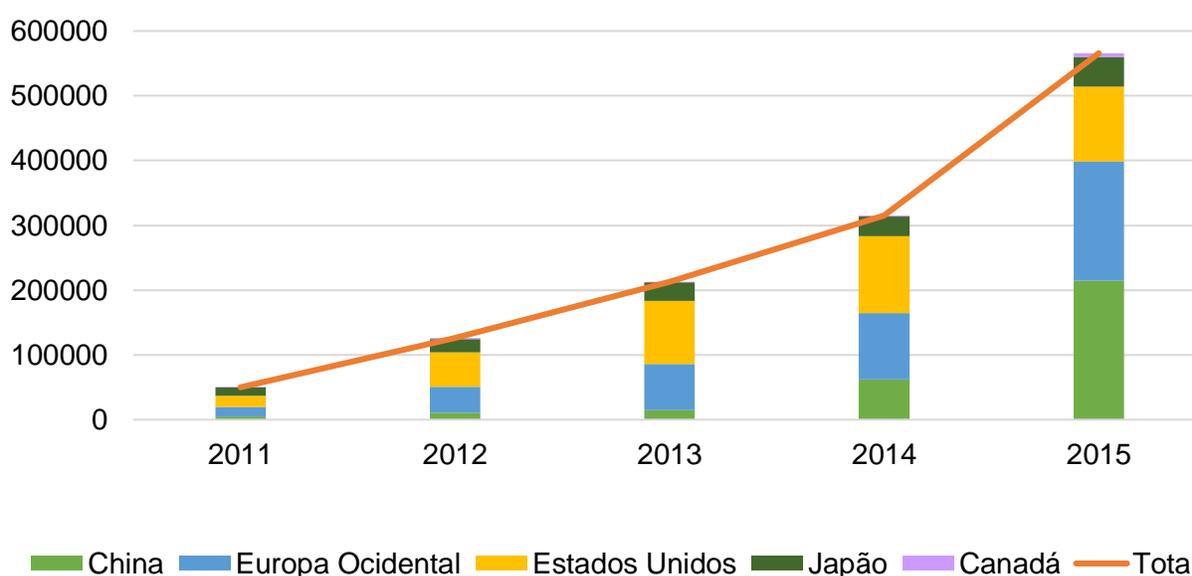


Figura 1.2: Vendas de 2011 a 2015 de veículos elétricos por região/país.

Junto a isso, diversas políticas ao redor do mundo estão sendo implantadas para acelerar o aumento da frota de VEs em relação aos veículos de combustão interna. Dois casos interessantes que valem serem citados são da Alemanha e do Brasil.

A Alemanha virou referência mundial em se tratando de políticas para diminuir a circulação de veículos a combustão, destinando 1,2 bilhão de euros para subsidiar a compra de veículos elétricos para atingir a marca de 1 milhão de carros elétricos até 2020 e 6 milhões até 2030 [4].

No Brasil, o arquipélago de Fernando de Noronha, determinou que a partir de 2022 nenhum veículo a combustão poderá entrar na ilha e a partir de 2030 eles não serão mais permitidos de circular, sendo o primeiro território brasileiro a adotar tais medidas [5].

Porém, apesar de terem sido inventados há mais de um século, os veículos elétricos ainda possuem a desvantagem da baixa autonomia.

Isso pode ser explicado através de uma simples comparação da densidade de energia volumétrica e densidade de energia por massa entre uma bateria e gasolina, fonte principal de energia de um veículo elétrico e de um veículo de combustão interna, respectivamente. Em valores aproximados, enquanto na bateria mais comum utilizada em veículos elétricos, íons de lítio, a densidade de energia volumétrica é 2,4 MJ/L, na gasolina é 35 MJ/L. Já a densidade de energia por massa na bateria é de 0,8 MJ/kg, enquanto na gasolina é 47 MJ/kg [6]. Assim, fica fácil entender como num mesmo espaço destinado para acomodar a energia que irá acionar o deslocamento de um veículo, a autonomia do veículo a combustão poderá ser maior.

Tendo em vista essa questão, uma das formas de aumentar essa autonomia é através da frenagem regenerativa, que é a transformação da energia cinética do veículo em energia elétrica durante uma frenagem feita pelo motor, atuando assim como gerador. Dessa forma, é possível incrementar a autonomia em até 15% ao recarregar a bateria durante esse processo de regeneração [7]. A frenagem regenerativa também é utilizada em outros sistemas, como trens elétricos, elevadores, patinetes elétricos e em alguns processos industriais.

Nesse contexto, deve-se considerar o sistema dinâmico de um VE, que é composto basicamente de uma bateria e um motor elétrico, sendo amplamente utilizado o motor síncrono de ímãs permanentes, comumente chamado de BLDC. Dentre as vantagens desse motor, podemos destacar a sua alta eficiência, alta velocidade, longevidade, baixa manutenção, melhores características de velocidade por torque, elevada densidade de potência e baixo nível de ruídos [8].

## 1.2 Justificativas

A partir de tais considerações, é possível unir a ideia de aumento da autonomia de um veículo elétrico com um grupo de competição da UNIFEI que tem como objetivo desenvolver um carro que atinja a maior distância percorrida com o menor consumo de energia possível.

Esse grupo de competição foi criado em 2002, com o nome da equipe EcoVeículo. Ela participa anualmente de uma competição de eficiência energética, chamada Shell Eco-marathon, que possui edições nacionais e internacionais, onde veículos devem percorrer um circuito determinado e, ao final da prova, a equipe que consumiu menos energia é declarada vencedora. A competição possui categoria distintas para veículos a combustão e veículos elétricos, sendo o último o foco desse trabalho.

Dessa forma, esse trabalho se justifica ao simular técnicas de frenagem regenerativa aplicadas a um modelo matemático baseado em um veículo elétrico, o E-Power V1, conforme mostrado na Figura 1.3, permitindo quantificar o ganho em eficiência energética, disponibilizando mais uma ferramenta para a equipe EcoVeículo.

Tal projeto configura-se como pesquisa de tecnologia e inovação e se insere ao PPG-E na linha de pesquisa de Controle e Automação de Processos.



Figura 1.3: Veículo elétrico E-Power V1.

### **1.3 Objetivos**

O objetivo principal do trabalho é desenvolver em ambiente MATLAB/Simulink uma simulação que se aproxime do modelo real do veículo elétrico da equipe EcoVeículo da UNIFEI. Essa simulação deve ser capaz de mostrar através dos resultados se a frenagem regenerativa é eficaz em diminuir o consumo de energia durante as provas, tornando a relação distância/energia maior quando se faz uso dessa técnica.

Para atingir esse objetivo, se faz necessário o estudo de máquinas elétricas, mais especificamente motores síncronos de ímãs permanentes, bem como o entendimento de técnicas de frenagem regenerativa aplicadas a esse tipo de motor.

Além disso, é necessário o estudo do modelo matemático de um veículo e as equações que representam as forças envolvidas no sistema, para que seja possível entender onde a energia é dissipada e como ela pode ser recuperada.

### **1.4 Organização do Trabalho**

Este trabalho está organizado em cinco capítulos, sendo o primeiro capítulo uma introdução ao assunto de veículos elétricos e a proposta dessa dissertação.

O segundo capítulo traz um estudo sobre os princípios básicos de máquinas elétricas com foco em máquinas síncronas de ímãs permanentes, uma análise das equações matemáticas que representam um veículo elétrico e a apresentação de técnicas de frenagem regenerativa.

No terceiro capítulo são apresentados os parâmetros utilizados na simulação e como eles foram calculados e mensurados, para em seguida demonstrar a montagem da simulação em ambiente MATLAB/Simulink.

No quarto capítulo, são apresentados os resultados da eficiência energética de cada uma das técnicas obtidas através da simulação.

Por fim, o último capítulo é dedicado as conclusões e possíveis trabalhos futuros.

## 2 Revisão Bibliográfica

### 2.1 Princípios Básicos de Máquinas Elétricas

Motores síncronos de ímãs permanentes são comumente chamados, na língua inglesa, de BLDC (Brushless Direct Current), que na tradução livre significa corrente direta sem escovas. Essa denominação se deve basicamente por ele utilizar uma comutação eletrônica, que provém de uma fonte de corrente contínua, ao invés da comutação ocorrer mecanicamente através das escovas.

Comparado com um motor de corrente contínua, ou com um motor de indução, um motor síncrono de ímãs permanentes (MSIP) possui muitas vantagens, podendo ser citadas: alta eficiência, alta velocidade, longevidade, baixa manutenção, melhores características de velocidade por torque, elevada densidade de potência e baixo nível de ruídos.

Porém, independente da nomenclatura dada ao motor, os princípios básicos de eletromagnetismo que regem o funcionamento de um motor elétrico permanecem o mesmo. Um dos princípios básicos da relação elétrica-mecânica é a Lei de Faraday.

A Lei de Faraday, ou Lei de Indução Eletromagnética, define que sempre que houver uma variação do fluxo magnético através de um laço de fio metálico, irá surgir nele uma força eletromotriz induzida (FEM) negativa. Esse comportamento é descrito na equação (1), onde  $\phi$  representa um fluxo produzido por um campo magnético  $B$  que atravessa perpendicularmente um plano de um enrolamento induzindo uma força eletromotriz negativa  $\varepsilon(t)$  [9].

$$\varepsilon(t) = -\frac{d}{dt}\phi_B \quad (1)$$

Caso esse mesmo plano tivesse  $N$  laços iguais, a equação (1) poderia ser reescrita como mostrado abaixo.

$$\lambda = N \cdot \phi \quad (2)$$

$$\varepsilon(t) = -N \cdot \frac{d}{dt} \phi = -\frac{d}{dt} \lambda \quad (3)$$

Para exemplificar, a Figura (2.1) representa um laço metálico ideal com um resistência  $R$  em série e uma haste que pode se deslocar para a direita. O laço é atravessado por um campo magnético constante. Ao aplicar uma força para deslocar a haste, o fluxo no laço varia, já que a área no qual o campo magnético atravessa aumenta. Essa variação induz uma FEM com potencial maior em A do que em B, gerando uma corrente que circula no sentido anti-horário, de acordo com a regra da mão direita. O exemplo demonstra de forma simplificada uma máquina elétrica linear operando como gerador. É importante notar que no exemplo não é descrita a origem do campo magnético. Em se tratando de motores síncronos de ímãs permanentes, o campo será proveniente do próprio ímã [10].

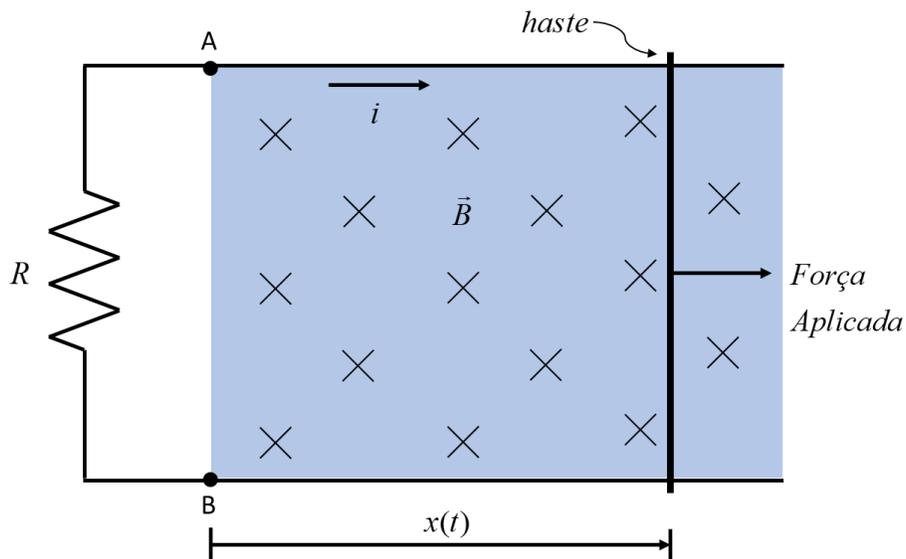


Figura 2.1: Demonstração de um gerador linear.

Através do exemplo, é possível calcular a força eletromotriz induzida. Considerando que a variação do fluxo é igual ao fluxo que atravessa o laço e, nesse caso,  $N = 1$ , temos a equação (4). Considera-se que a haste possui comprimento  $Y$  e o deslocamento causado pela força foi  $x(t)$ .

$$\lambda = N \cdot \phi = B \cdot Y \cdot x(t) \quad (4)$$

Logo, a tensão induzida é:

$$\varepsilon(t) = -\frac{d}{dt} \lambda = -\frac{d(B \cdot Y \cdot x(t))}{dt} = -B \cdot Y \frac{dx(t)}{dt} \quad (5)$$

Nota-se que a parcela  $\frac{dx(t)}{dt}$  por definição é velocidade. Logo, através da equação (6) é possível concluir que a força eletromotriz induzida é diretamente proporcional a velocidade da haste.

$$\varepsilon(t) = -B \cdot Y \cdot v \quad (6)$$

O segundo princípio básico que rege o funcionamento de um motor elétrico é a Força de Lorentz, definida pela equação (7). Ela descreve a força elétrica  $\vec{F}$  em uma partícula carregada eletricamente  $q$  se movendo a velocidade  $\vec{v}$  em um campo elétrico  $\vec{E}$  e campo magnético  $\vec{B}$  [11].

$$\vec{F} = q \cdot (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (7)$$

No caso de um motor elétrico, o campo elétrico é desconsiderado e a velocidade e o campo são considerados perpendiculares entre si, assim o produto vetorial pode ser tratado como um produto escalar, resultando na equação (8).

$$F = q \cdot v \cdot B \quad (8)$$

Trazendo ainda mais para o contexto de motores elétricos, quando o campo magnético é perpendicular a todo o comprimento  $Y$  do laço, é possível reduzir a equação (8) para a forma mostrada abaixo [10].

$$F = B \cdot Y \cdot i \quad (9)$$

Através da equação (9) é possível notar que a força elétrica é diretamente proporcional à corrente. Portanto, analisando novamente o exemplo da Figura 2.1, conclui-se pela Lei da Conservação de Energia que toda a energia mecânica é transformada em energia elétrica que é dissipada pelo resistor, como demonstra a equação (10). Nota-se que o sinal negativo foi removido da equação. Isso deve-se pelo fato dele ser apenas uma convenção da qual o autor escolhe se o sentido (horário ou anti-horário) é negativo. No caso desse texto, daqui para frente a tensão induzida será sempre positiva.

$$\mathcal{E} \cdot i = F \cdot v \quad (10)$$

Baseado nas equações apresentadas, é possível redesenhar o exemplo da Figura (2.1) de forma que, ao invés da máquina operar como gerador, uma tensão é aplicada ao laço para que ela funcione como motor, assim, a força que antes era aplicada, agora é desenvolvida.

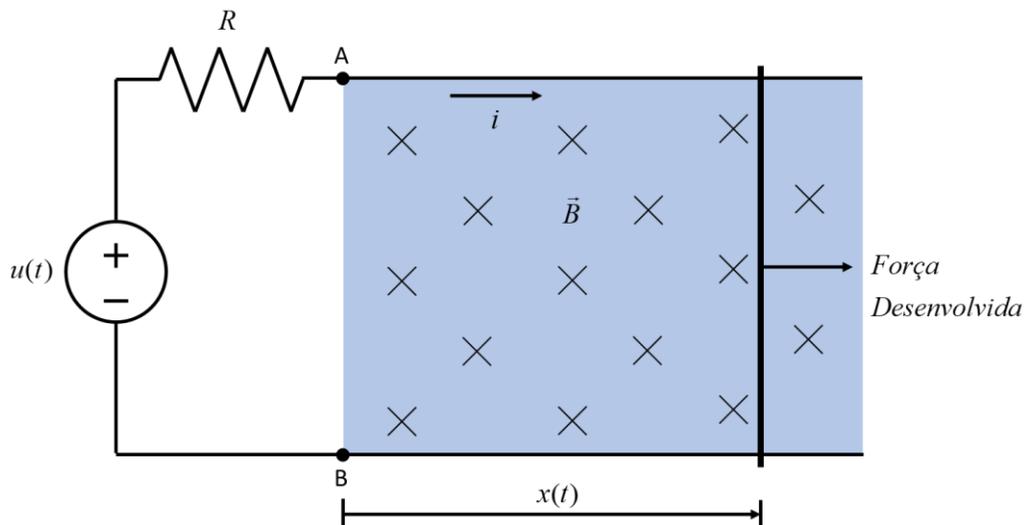


Figura 2.2: Demonstração de um motor linear.

Da Figura (2.2), temos o diagrama elétrico abaixo.

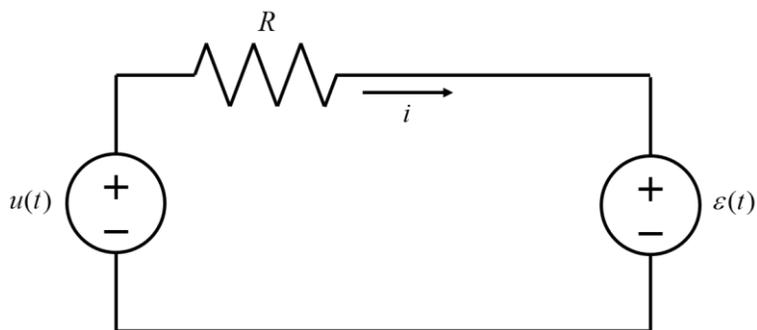


Figura 2.3: Diagrama elétrico de um motor linear.

O circuito elétrico acima se aproxima muito do circuito elétrico de uma fase de um motor, porém ainda falta a indutância. Para que isso seja possível, é necessário apresentar um exemplo onde o campo magnético seja proveniente de uma fonte conhecida e assim o enrolamento inserido dentro do motor seja transpassado pelo campo, ocorrendo a variação de fluxo e sofrendo do efeito de indutância.

Assim, a Figura (2.4) demonstra um motor síncrono de ímãs permanentes de apenas um enrolamento inserido no estator e um par de pólos. Os ímãs são radialmente magnetizados de forma que o campo magnético produzido por eles é constante por toda a sua extensão. A letra N representa que a face Norte está apontada para fora e o ímã com a letra S está com a face Sul voltada para fora. O símbolo  $\otimes$  e  $\odot$  representam o sentido da corrente no enrolamento entrando e saindo do papel, respectivamente. As linhas verdes mostram o circuito magnético constituído pelos ímãs e pelo enrolamento que são a conexão entre a parte mecânica e a parte elétrica dos motores. A seta indica o sentido de rotação do rotor quando um torque é criado devido a circulação da corrente e o ângulo do rotor em relação ao eixo imaginário do estator.

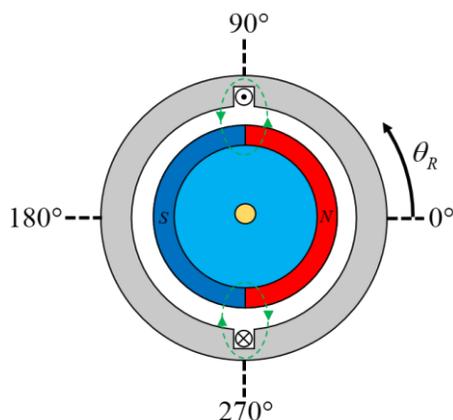


Figura 2.4: Visão geral de um MSIP.

Se fosse possível “desenrolar” o motor dessa figura de forma a deixá-lo linear, teríamos algo parecido com a Figura (2.5). Apesar do exemplo apresentar um fluxo ideal onde as perdas são negligenciadas, é possível observar que o formato do fluxo magnético no enrolamento depende da

posição do rotor. No gráfico,  $B_p$  representa a densidade de fluxo magnético máximo produzido pelos ímãs.

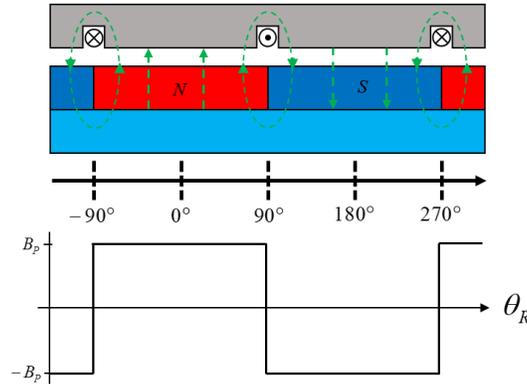


Figura 2.5: Visão linear de um MSIP.

Se o circuito elétrico da Figura (2.3) for analisado, comparando com o exemplo da Figura (2.5), é possível escrever uma equação genérica que represente a tensão em um MSIP de uma fase, adicionando a indutância do enrolamento do motor.

$$u(t) = i(t) \cdot R(t) + \frac{d}{dt} \lambda = i(t) \cdot R(t) + L \cdot \frac{di(t)}{dt} + \varepsilon(t) \quad (11)$$

A equação (12) define que a FEM no motor depende do fluxo do rotor  $\psi_R$ , que por sua vez depende da posição do rotor em relação ao estator  $\theta_R$ .

$$\varepsilon(t) = \frac{d\psi_R(\theta_R)}{dt} \quad (12)$$

A explicação que demonstra o circuito magnético, que envolve a relutância do rotor, estator, ímãs permanentes, relutância do espaço de ar entre rotor e estator etc., foge do escopo do trabalho e não será demonstrada.

No momento, é suficiente observar que o fluxo magnético possui um perfil de onda de acordo com o tipo construtivo da máquina, como exemplo da Figura (2.8)

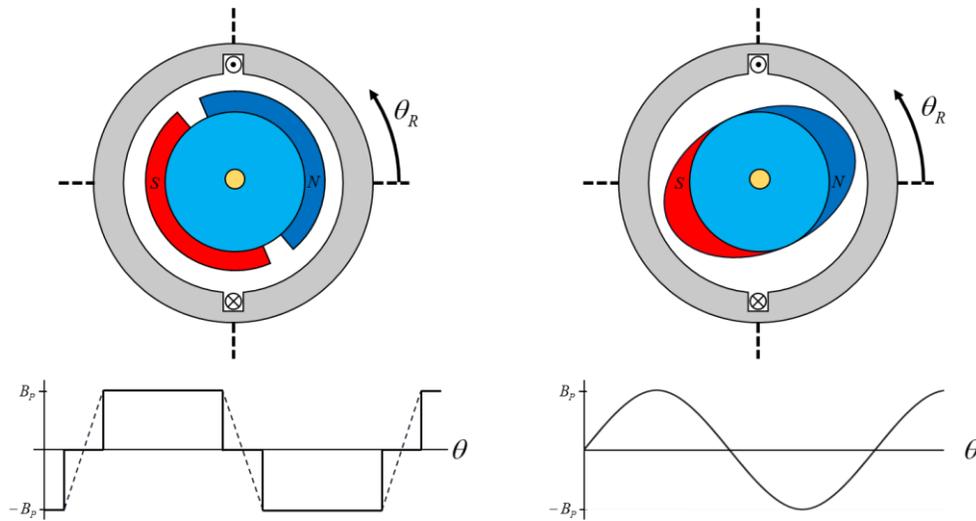


Figura 2.6: MSIP de FEM trapezoidal (esquerda) e senoidal (direita).

É possível escrever uma equação que descreva o fluxo magnético no estator de acordo com o ângulo do rotor do exemplo à direita da Figura (2.6). No caso do fluxo trapezoidal será apenas representado graficamente.

$$B(\theta_R) = B_p \cdot \sin(\theta_R) \quad (12)$$

Assim, se o torque produzido pelo exemplo da Figura (2.3) é composto pela força exercida pelos dois lados do enrolamento e pelo diâmetro  $D$  do enrolamento, fornecendo a equação (12), ainda podemos substituir nela a equação (9), dando a equação de torque dessa máquina.

$$\tau = 2 \cdot F \cdot \left( \frac{D}{2} \right) \quad (12)$$

$$\tau = 2 \cdot (N \cdot B) \cdot \left( \frac{D}{2} \right) \quad (13)$$

A mesma equação pode ser aplicada ao MSIP de fluxo senoidal da Figura (2.6), dando a seguinte equação.

$$\tau(\theta_R) = N \cdot D \cdot Y \cdot B_p \cdot \sin(\theta_R) \cdot i(t) \quad (14)$$

Os termos constantes podem ser substituídos por uma só constante, que será chamada constante de torque.

$$\tau(\theta_R) = K_\tau \cdot \sin(\theta_R) \cdot i(t) \quad (15)$$

Basicamente as equações que representam um máquina síncrona de imãs permanentes de fluxo senoidal de uma fase foram apresentadas pelas equações (11) e (15). Para prosseguir e mostrar as equações de um MSIP de fluxo senoidal de três fases, o exemplo da Figura (2.7) é apresentado. Nele, os enrolamentos são espaçados 120 graus entre si.

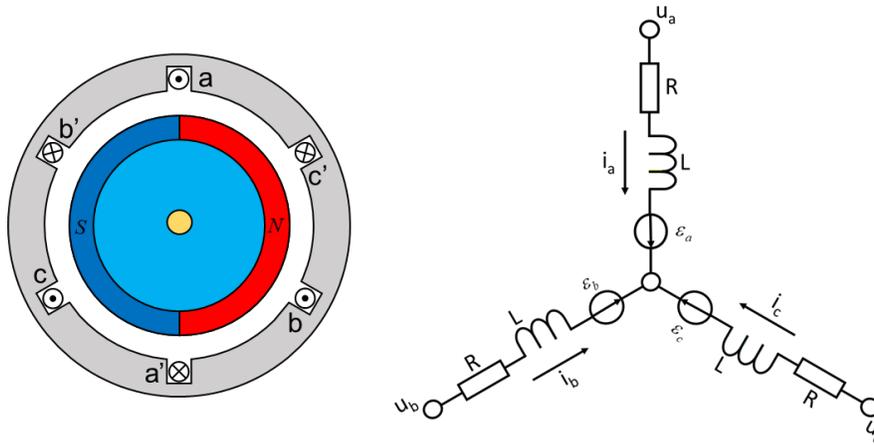


Figura 2.7: Representação da disposição das fases (esquerda) e do circuito elétrico (direita) de um MSIP trifásico.

A primeira equação que pode ser definida para esse exemplo sem prejuízos é baseada na conservação de energia [12]. Anteriormente a mesma equação foi apresentada para um movimento linear, agora ela é apresentada para um movimento angular. Assim, a força pode ser interpretada como torque  $\tau$ , e a velocidade linear, como velocidade angular  $\omega$ .

$$\tau \cdot \omega = \varepsilon_a \cdot i_a + \varepsilon_b \cdot i_b + \varepsilon_c \cdot i_c \quad (16)$$

Agora resta definir as equações das tensões em cada fase.

$$u_a = i_a \cdot R + \dot{\lambda}_a \quad (17)$$

$$u_b = i_b \cdot R + \dot{\lambda}_b \quad (18)$$

$$u_c = i_c \cdot R + \dot{\lambda}_c \quad (19)$$

O fluxo de cada fase também é definido pelo fluxo do rotor e sua posição, porém o que difere da equação de uma fase é que a presença de outras fases no mesmo circuito causam interferência entre elas. Essa interferência será chamada de indutância mútua e é representada por L subscrita da letra da fase onde a indutância mútua está sendo medida seguida da letra da fase que a está causando.

$$\dot{\lambda}_a = L_{aa} \cdot \dot{i}_a + L_{ab} \cdot \dot{i}_b + L_{ac} \cdot \dot{i}_c + \varepsilon_a \quad (20)$$

$$\dot{\lambda}_b = L_{ba} \cdot \dot{i}_a + L_{bb} \cdot \dot{i}_b + L_{bc} \cdot \dot{i}_c + \varepsilon_b \quad (21)$$

$$\dot{\lambda}_c = L_{ca} \cdot \dot{i}_a + L_{cb} \cdot \dot{i}_b + L_{cc} \cdot \dot{i}_c + \varepsilon_c \quad (22)$$

Como o motor é simétrico, as indutâncias mútuas podem ser substituídas por termos iguais, no caso é utilizado a letra M, sendo mais fácil a representação das equações em uma matriz.

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L & M & M \\ M & L & M \\ M & M & L \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{i}_a \\ \dot{i}_b \\ \dot{i}_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_a \\ \varepsilon_b \\ \varepsilon_c \end{bmatrix} \quad (23)$$

### 2.1.1 Taxonomia de Motores Síncronos de Imãs Permanentes

Uma máquina síncrona de imãs permanentes, de forma simplificada, possui um estator e um rotor, feito de aço laminado, acoplados por um eixo. O estator possui enrolamentos, na maioria dos casos, com três fases ligadas em estrela ou delta, sendo a primeira a mais comum. O rotor

possui ímãs permanentes, normalmente de NdFebB (Neodímio Ferro Boro) de elevada densidade de campo magnético [13].

Os MSIP podem ser de fluxo axial ou radial. Os motores de fluxo radial ainda podem ser derivados em rotor externo ou rotor interno. A Figura (2.8) e a Figura (2.9) mostram de forma simplificada essas variações.

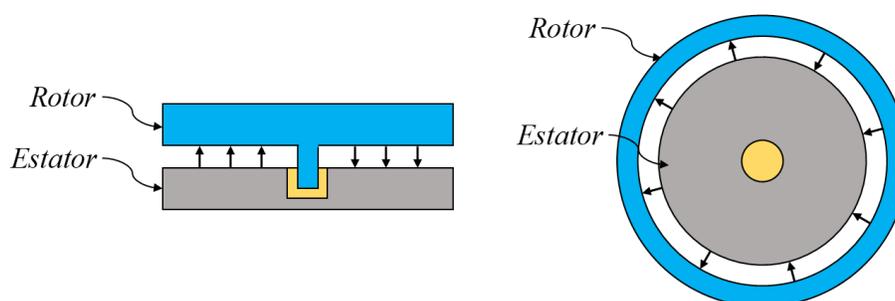


Figura 2.8: Motor de fluxo axial (esquerda) e fluxo radial (direita).

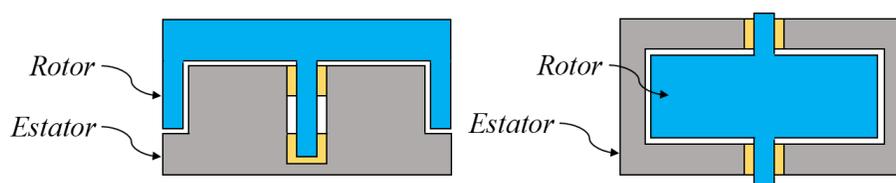


Figura 2.9: Motor com rotor externo (esquerda) e rotor interno (direita).

No estator, os enrolamentos podem ser concentrados ou distribuídos. Essa característica, junto com o formato dos ímãs determina se o formato da FEM será senoidal ou trapezoidal.

O estudo de caso nesse trabalho foca no MSIP de fluxo radial de formato trapezoidal com rotor externo, que é o tipo utilizado no veículo elétrico da equipe EcoVeículo.

## 2.2 Modelo Planar

As competições nas quais a equipe EcoVeículo participa ocorrem em pistas de corrida com um circuito predominantemente de retas, com poucas curvas. Essa escolha das pistas se deve principalmente pelo objetivo da competição, que é premiar a equipe que percorre uma determinada

distância com o menor consumo de energia possível. Se a pista tivesse muitas curvas, o traçado percorrido teria grande influência no consumo, tirando o foco do carro como objeto da competição e colocando mais atenção sobre o piloto.

Assim, esse trabalho é focado num modelo que descreve um objeto que pode se deslocar em um plano longitudinal com uma inclinação  $\beta$ , como se o veículo estivesse numa descida. Dessa forma, as forças que agem nesse modelo são apresentadas no diagrama de corpo livre da Figura 2.10.

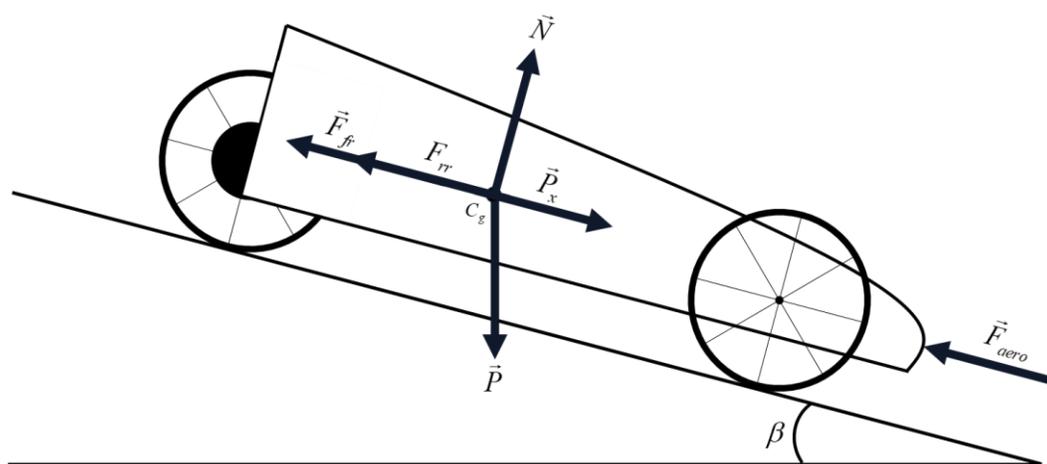


Figura 2.10: Diagrama de corpo livre.

A somatória de forças que age no modelo é descrita pela equação abaixo. No sistema descrito, são negligenciadas as perdas por calor, deformação dos materiais e demais perdas que não aparecem no equacionamento. Além disso, se faz necessário a adição da força inercial devido aos componentes girantes que resistem a mudança de aceleração [14].

$$F_{fr} + F_{aero} + F_i + F_{rr} = P_x \quad (24)$$

Os tópicos a seguir descrevem individualmente cada uma das forças apresentadas.

### 2.2.1 Força de Frenagem

A força de frenagem  $F_{fr}$  representa o torque contrário ao sentido de movimento do carro exercido pelo motor elétrico em modo gerador. Sua equação é definida pelo produto do torque do MSIP pelo raio da roda ao qual o motor está acoplado.

$$F_{fr} = \tau_{motor} \cdot r_{roda} \quad (25)$$

### 2.2.2 Força Aerodinâmica

A força aerodinâmica  $F_{aero}$  é a resultante devido ao movimento do veículo contra um fluido, no caso o ar, que exerce uma pressão sobre a área frontal do veículo, sendo  $\rho$  a densidade do ar,  $C_d$  o coeficiente de arrasto,  $A_f$  a área frontal do veículo e  $v_{VE}$  sua velocidade.

$$F_{aero} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_d \cdot A_f \cdot v_{VE}^2 \quad (26)$$

### 2.2.3 Força Inercial

A força inercial é o produto da aceleração do veículo pela massa equivalente  $m_e$ . A massa equivalente é uma relação de equivalência utilizada para expressar os efeitos da inércia de um componente rotativo em uma massa não rotativa equivalente [15].

$$F_i = a \cdot m_e \quad (27)$$

Para explicar essa relação, assume-se que um componente rotativo, por exemplo a roda do veículo, possui uma velocidade angular  $\omega_{roda}$  diretamente proporcional a velocidade linear  $v_{VE}$  do veículo, como mostrado na equação (28), sendo  $n$  a variável que representa essa relação, definida como relação de inércia.

$$n = \frac{\omega_{roda}}{v_{VE}} \quad (28)$$

Essa mesma velocidade linear, pode ser definida como um produto do raio da roda pela velocidade angular dela.

$$v_{VE} = r_{roda} \cdot \omega_{roda} \quad (29)$$

Como pode existir um componente rotativo  $x$  que possui velocidade angular  $\omega_x$  proporcional a velocidade angular da roda, é preciso definir essa relação de transmissão  $g_x$ .

$$\omega_x = g_x \cdot \omega_{roda} \quad (30)$$

Assim, substituindo (29) e (30) em (28), é possível notar que cada componente rotativo  $x$  possui uma relação de inércia  $n_x$  definida pela sua relação de transmissão  $g_x$  e o raio da roda  $r_{roda}$

$$n_x = \frac{g_x}{r_{roda}} \quad (31)$$

Agora é importante definir a energia total do sistema através da equação (32). Outra forma de escrever essa equação é através da equação (33), que ao ser substituída na equação anterior e assumindo que  $E$  pode ser definido como uma relação da massa equivalente, temos a equação (34).

$$E = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}I\omega^2 \quad (32)$$

$$E = \frac{1}{2}m_e v^2 \quad (33)$$

$$\frac{1}{2}m_e v^2 = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}In^2v^2 \quad (34)$$

Após simplificar a equação (34), é possível chegar na relação entre massa equivalente e a inércia dos componentes rotativos.

$$m_e = m + In^2 \quad (35)$$

#### 2.2.4 Força de Resistência a Rolagem

A força de resistência a rolagem  $F_{rr}$ , é a força contrária ao movimento devido ao contato dos pneus com a pista. Também chamado de atrito, ele é calculado através do produto da normal com o coeficiente de atrito.

$$F_{rr} = N \cdot C_a \quad (36)$$

Como o plano do diagrama é inclinado, a normal pode ser substituída pela componente da força peso perpendicular ao plano.

$$F_{rr} = m \cdot g \cdot C_a \cdot \cos(\beta) \quad (37)$$

### 2.2.5 Força Peso

A força peso  $P_x$  é a componente da força gravitacional  $P$  paralela ao plano, no sentido do movimento.

$$P_x = m \cdot g \cdot \sin(\beta) \quad (38)$$

## 2.3 Técnicas de Frenagem Regenerativa

As técnicas de frenagem regenerativa utilizadas nesse trabalho não necessitam de circuitos adicionais, sendo necessário apenas o próprio circuito de acionamento do motor, facilitando futuramente sua implementação no veículo elétrico da equipe EcoVeículo [16].

Essas técnicas são nomeadas de acordo com o número de transistores de potência acionados por estágio de comutação, sendo elas: *single-switch*, *two-switches* e *three-switches* [17].

Das três técnicas mencionadas, duas são consideradas *sensored* (tradução livre: com sensor), por necessitarem da informação da posição do rotor para seu correto funcionamento, e a

técnica que não necessita dessa informação, a *three-switches*, é considerada *sensorless* (tradução livre: sem sensor).

### 2.3.1 Técnica *Single-Switch*

A técnica *single-switch* consiste em manter a parte alta do circuito de potência desligada e acionar um transistor de potência da parte baixa por fase de comutação. Isso faz com que a corrente circule pelo diodo de livre circulação quando o sinal PWM está em nível alto. Quando o sinal PWM está em nível baixo, a corrente volta para a bateria pelos diodos de livre circulação. O gráfico da Figura 2.11 exemplifica o momento de acionamento de cada transistor de acordo com a posição do rotor. A linha pontilhada representa a força contraeletromotriz das fases, o padrão vermelho representa a corrente e a linha azul representa o sinal de acionamento. O mesmo padrão de cores será utilizado nas próximas figuras desses subtópicos.

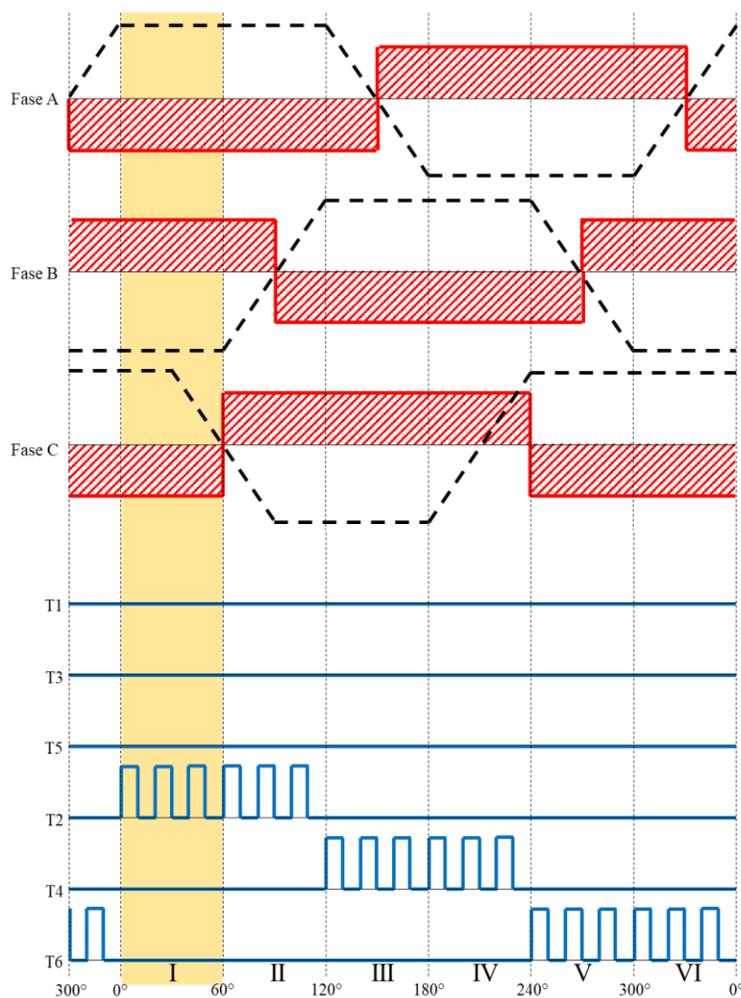


Figura 2.11: Sequência de acionamento dos transistores na técnica *single-switch*.

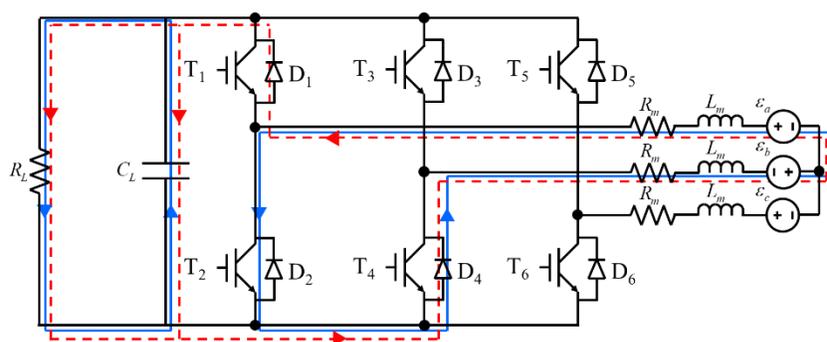


Figura 2.12: Circuito equivalente do quadrante I da técnica *single-switch* (corrente azul quando PWM está em nível alto e corrente vermelha quando está em nível baixo).

### 2.3.2 Técnica *Two-Switches*

A técnica *two-switches*, por sua vez, consiste em ligar um transistor da parte alta e um da parte baixa por fase da comutação. Enquanto o sinal PWM está em nível alto, a corrente circula pelos dois transistores fechados e, quando o sinal PWM está em nível baixo, a corrente volta para a bateria pelos diodos de livre circulação.

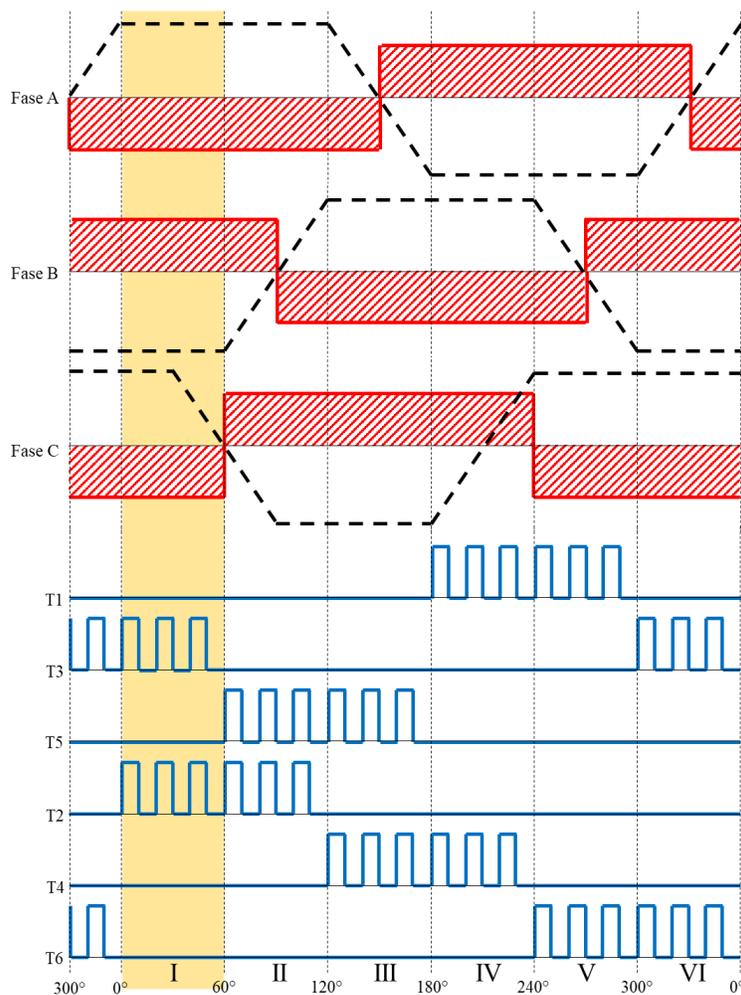


Figura 2.13: Sequência de acionamento dos transistores na técnica *two-switches*.

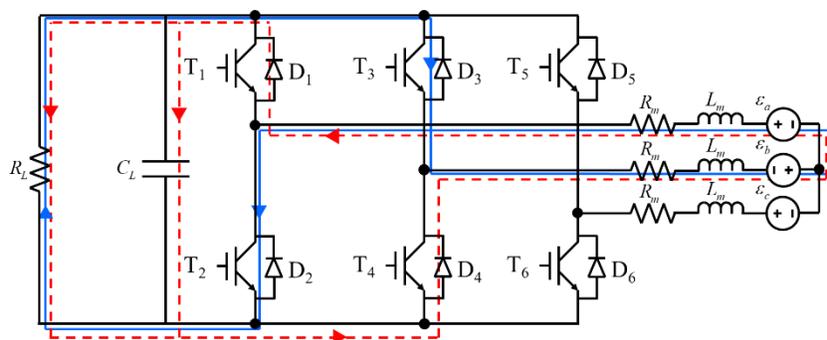


Figura 2.14: Circuito equivalente do quadrante I da técnica *two-switches* (corrente azul quando PWM está em nível alto e corrente vermelha quando está em nível baixo).

### 2.3.3 Técnica *Three-Switches*

A técnica *three-switches* é a única que não necessita da informação da posição do rotor. Nesse caso, os três transistores da parte baixa do circuito de potência são fechados juntos quando o sinal PWM está em nível alto. Quando o sinal PWM está em nível baixo, a corrente também volta pelos diodos de livre circulação, como nas técnicas anteriores, mas desta vez por um da parte baixa e dois da parte alta.

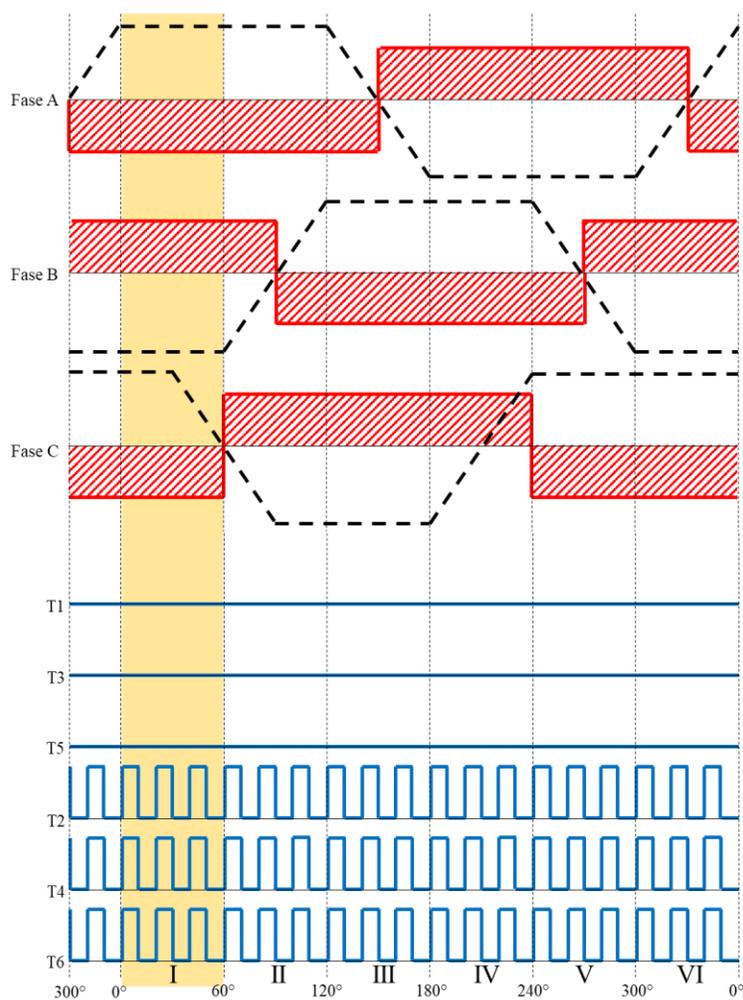


Figura 2.15: Sequência de acionamento dos transistores na técnica *three-switches*.

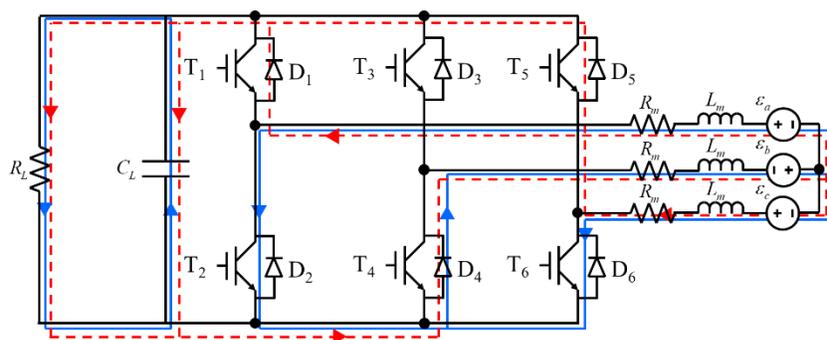


Figura 2.16: Circuito equivalente do quadrante I da técnica *three-switches* (corrente azul quando PWM está em nível alto e corrente vermelha quando está em nível baixo).

## 3 Estudo de Caso

Nesta parte do trabalho são apresentados os valores medidos, estimados e calculados que foram utilizados no modelo do veículo elétrico. Também é apresentada a montagem da simulação em MATLAB/Simulink.

### 3.1 Definição de Parâmetros

A equipe EcoVeículo constrói anualmente um veículo elétrico e um veículo a combustão. Parte do trabalho de construção é projetar e documentar o processo. Através dessa documentação, foi possível encontrar alguns parâmetros que foram utilizados nesse trabalho, como por exemplo a massa do veículo, a massa do piloto que conduziu o veículo durante as provas, motor elétrico utilizado, pneu etc.

Entretanto, mesmo com toda essa documentação, alguns parâmetros não foram anotados ou mesmo identificados por eles, assim parte desse trabalho foi medir, calcular, estimar ou mesmo procurar esses parâmetros.

Inicialmente, foi determinada a massa do veículo e a massa do piloto, que juntos totalizam 77.5kg. Em seguida, foram analisados as massas e raios das partes girantes, além de classificá-las entre aro, disco ou barra, para definir qual aproximação seria mais adequada para calcular o momento de inércia do objeto. É importante ressaltar que no veículo utilizado todas as partes girantes possuem mesma velocidade angular, portanto, a relação de inércia será a mesma para todas as partes.

Assim, os pneus e aros foram classificados como aros, sendo que o veículo possui 3 de cada. As massas e raios do tipo aro estão apresentadas na Tabela 3.1. Foram utilizados pneus da marca Schwalbe, modelo Ultremo ZX, e aros da marca Vzan, modelo Extreme BMX.

Tabela 3.1: Massas e raios do tipo aro.

Item	Massa (m)	Raio (r)
Pneu	329g	254mm
Aro	445g	245mm

O momento de inércia de um aro pode ser definido pela equação (39), sendo o momento de inércia total dos itens citados de 0,144kg.m<sup>2</sup>.

$$I_{aro} = m \cdot r^2 \quad (39)$$

O motor e discos de freios foram classificados como discos, sendo que o veículo possui um motor e dois discos. Suas massas e raios estão apresentados na Tabela 3.2. O momento de inércia de um disco pode ser definido pela equação (40). Os discos de freio utilizados são da marca Shuffeng e o motor utilizado é da marca Leaf, modelo 750W 48V 2012.

O momento de inércia total calculado do tipo disco é de 0,035kg.m<sup>2</sup>

Tabela 3.2: Massas e raios do tipo disco.

Item	Massa (m)	Raio (r)
Disco de freio	100g	160mm
Motor elétrico	6500g	122,5mm

$$I_{disco} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot r^2 \quad (40)$$

Por fim, os raios foram considerados como uma barra girante com o eixo de rotação no fim dela, tendo seu momento de inércia definido pela equação (41). Cada roda possui 36 raios, porém,

apenas duas rodas possuem raios completos, já que a roda traseira tem o centro ocupado pelo motor. Foram considerados raios genéricos com massa de 5g cada e comprimento de 200mm, num total de 72 raios. A inércia total do tipo calculado é de  $0,072\text{kg}\cdot\text{m}^2$ . Na equação (41), o comprimento do raio é representado por  $l$ .

$$I_{\text{barra}} = \frac{1}{3} \cdot m \cdot l^2 \quad (41)$$

Conhecido o raio da roda, a relação de inércia calculada é de  $3,94\text{m}^{-1}$ . Assim, com os valores de momento de inércia calculados para cada tipo foi possível calcular a massa equivalente do sistema, através da equação (35), sendo de  $81,27\text{kg}$ , um aumento de  $3,77\text{kg}$  em relação a massa original.

Em seguida, foi definida a força aerodinâmica do sistema, já previamente calculada pela equipe EcoVeículo. O valor mensurado da área frontal e o coeficiente de arrasto calculado são  $0,36\text{m}^2$  e  $0,25$ , respectivamente. A densidade do ar considerada foi de  $1,225\text{ kg/m}^3$ .

A força de resistência a rolagem necessita apenas do coeficiente de resistência a rolagem. Apesar da equipe não ter esse coeficiente, foi possível encontrar em um site especializado [18], que através do modelo e pressão utilizada nos pneus, que é de  $110\text{psi}$ , fornece o valor do coeficiente, que no caso é  $0,0085$ .

Por último, foi necessário medir a indutância e resistência das fases do motor, já que a folha de dados apresentada pelo fabricante Leaf, disponibiliza apenas a constante de torque, de  $1\text{Nm/A}$ . O número de par de pólos foi solicitado para o fabricante, que indicou possuir 46 pólos, ou seja, 23 pares de pólos.

A medição foi feita utilizando um gerador de funções, um osciloscópio e um resistor  $R_y$  de valor conhecido, medindo  $993,8\text{ Ohms}$  no intuito de solucionar o circuito abaixo. As pontas de prova do osciloscópio foram colocadas nos pontos A1 e A2 [19]. O gerador de função, que possui uma resistência  $R_g$  de  $50\text{ ohms}$  de saída, foi definido com  $100\text{kHz}$ ,  $2,5\text{V}_{\text{pp}}$  e uma onda senoidal.

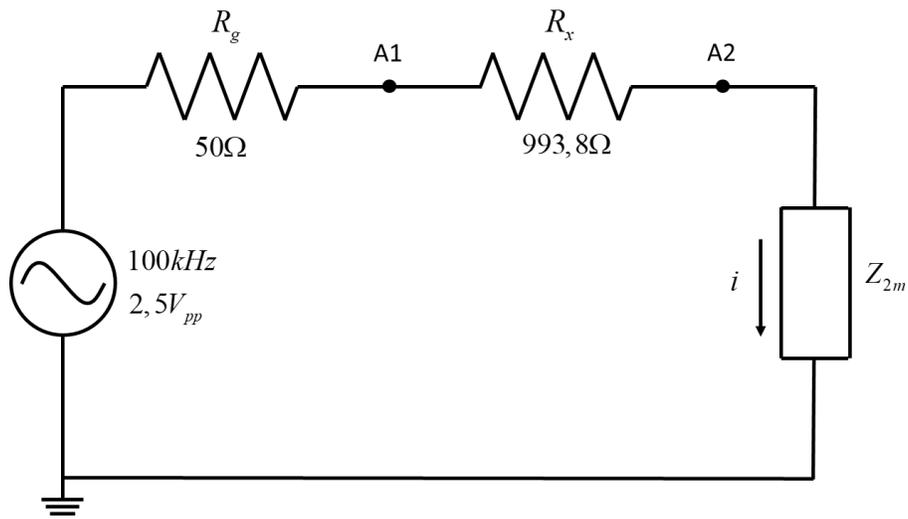


Figura 3.1: Circuito utilizado para calcular a impedância do motor elétrico.

Da lei de ohm, temos:

$$Z_{2m} = \frac{V_{A2}}{i} = \frac{V_{A2}}{V_{A1} - V_{A2}} \cdot R_x \quad (42)$$

Analisando na forma polar, temos a magnitude:

$$Z_{2m} = \frac{V_{A2} \cdot R_x}{\sqrt{V_{A1}^2 - 2 \cdot V_{A1} \cdot V_{A2} \cdot \cos \alpha + V_{A2}^2}} \quad (43)$$

E o ângulo da impedância:

$$\varphi = \alpha - \tan^{-1} \frac{-V_{A2} \cdot \sin \alpha}{V_{A1} - V_{A2} \cdot \cos \alpha} \quad (44)$$

Assim, substituindo as variáveis com os valores medidos, sendo  $\alpha$  a defasagem entre as tensões, a impedância na forma polar calculada é 6 ohms e 0,8 radiano.

Na forma retangular, a parte real representa a resistência da fase e a parte imaginária a indutância, como mostra a equação (45).

$$Z_{2m} \cdot \cos \varphi + j \cdot Z_{2m} \cdot \sin \varphi = R_{2m} + j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_{2m} \quad (45)$$

Como a frequência é conhecida, é possível calcular o valor da resistência e indutância das duas fases em série, sendo somente necessário dividir por 2 para encontrar o valor de cada fase. Assim, para o motor utilizado no projeto, a resistência calculada é 3 ohms e a indutância 180 $\mu$ H por fase.

## 3.2 Montagem da Simulação

A simulação foi desenvolvida utilizando MATLAB, um *software* interativo de alta performance voltado para o cálculo numérico. Nele, é possível escrever equações e utilizar blocos prontos que já contam com entradas para apenas colocar os valores de variáveis que descrevem melhor aquele componente, sendo mais comum isso através do Simulink, uma extensão baseada em diagrama de blocos.

Como o sistema a ser montado possui muitas equações, a organização se torna um fator importante para que fique mais fácil percorrer a simulação e enxergar uma separação clara entre sinais de entrada e saída. Para isso, o sistema foi dividido em blocos, como mostra a Figura (3.2).

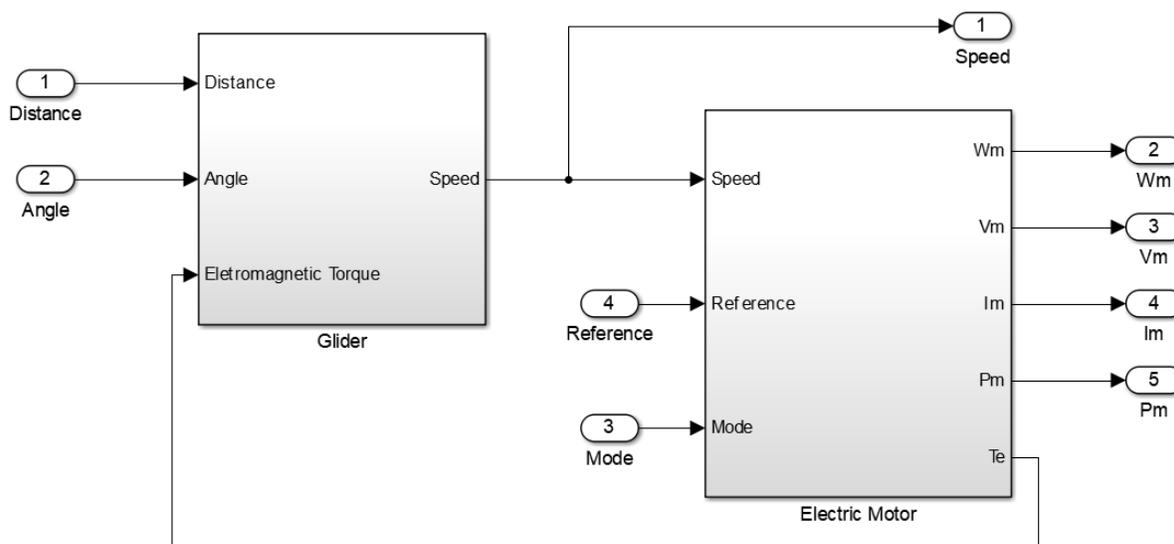


Figura 3.2: Visão geral da simulação em ambiente MATLAB/Simulink.

Dentro do bloco *glider* foram desenvolvidas as equações referentes ao modelo planar, como mostra a Figura (3.3).

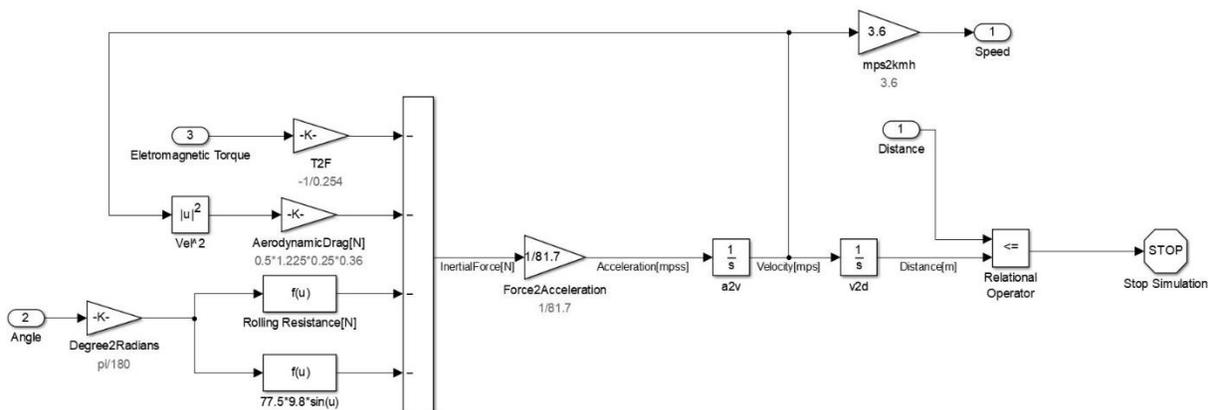


Figura 3.3: Visão do modelo planar em ambiente MATLAB/Simulink.

No bloco *electric motor* foram utilizados dois blocos fornecidos pela biblioteca do Simulink: Universal Bridge e Permanent Magnet Synchronous Machine, que representa a ponte trifásica e o motor síncrono de ímãs permanentes, respectivamente.

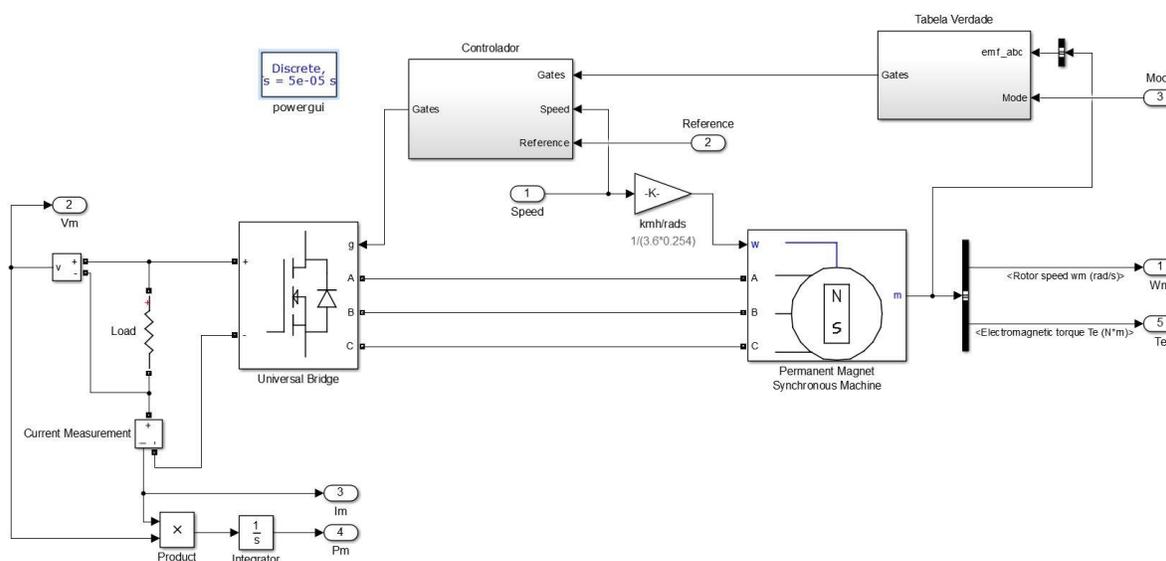


Figura 3.4: Visão do modelo de motor elétrico em ambiente MATLAB/Simulink.

O bloco referente ao BLDC permite definir os valores dos parâmetros do número de fases, par de pólos, indutância, resistência e constante de torque.

Ainda dentro do bloco *electric motor*, existem dois sub-blocos, Controlador e Tabela Verdade, referentes ao controlador proporcional e a tabela de sequência de comutação referente a cada técnica de frenagem regenerativa, respectivamente.

O cálculo da energia recuperada foi baseado no produto da tensão pela corrente que passam sobre a carga *Load* da Figura 3.4. Esse produto é igual a potência, que ao ser integrado, fornece a energia recuperada em Joules.

O bloco *Universal Bridge* contém os transistores de acionamento do motor.

O bloco *powergui* é exigido pelo Matlab para que a simulação com motor funcione.

O bloco Controlador, é responsável por controlar o sinal PWM de forma que quanto maior o *duty cycle*, maior a frenagem, tendo como referência a velocidade de 25km/h. Essa velocidade é a mesma na qual a equipe EcoVeículo tenta manter durante as provas, que é definida nas regras da competição. Nesse bloco, foi utilizado um tempo de amostragem de 0,001s e um valor de 100 para o controlador proporcional.

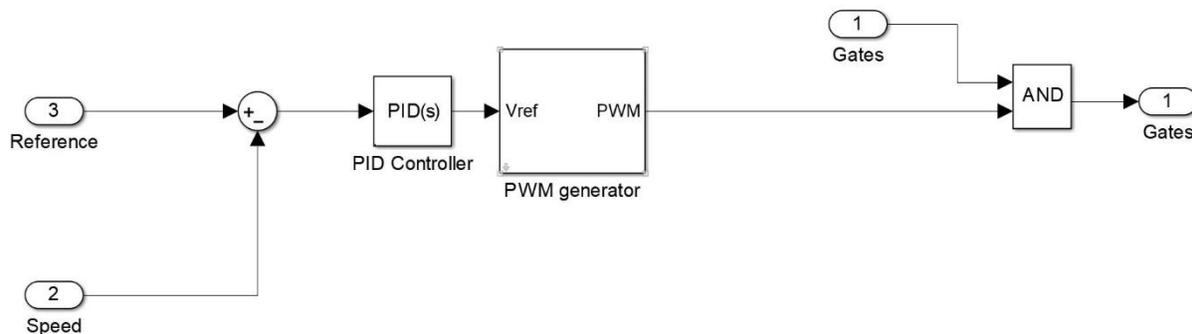


Figura 3.5: Visão do modelo de PID em ambiente MATLAB/Simulink.

O bloco tabela verdade, mostrado na Figura 3.6, é responsável por acionar na ordem correta os transistores de acordo com a técnica de frenagem regenerativa escolhida na simulação. O bloco recebe dois sinais de entrada. O sinal modo define qual será a técnica utilizada, 1, 2 ou 3, referente a técnica *single-switch*, *two-switches* ou *three-switches*, respectivamente, e a o sinal *emf\_abc* informa a posição do rotor.

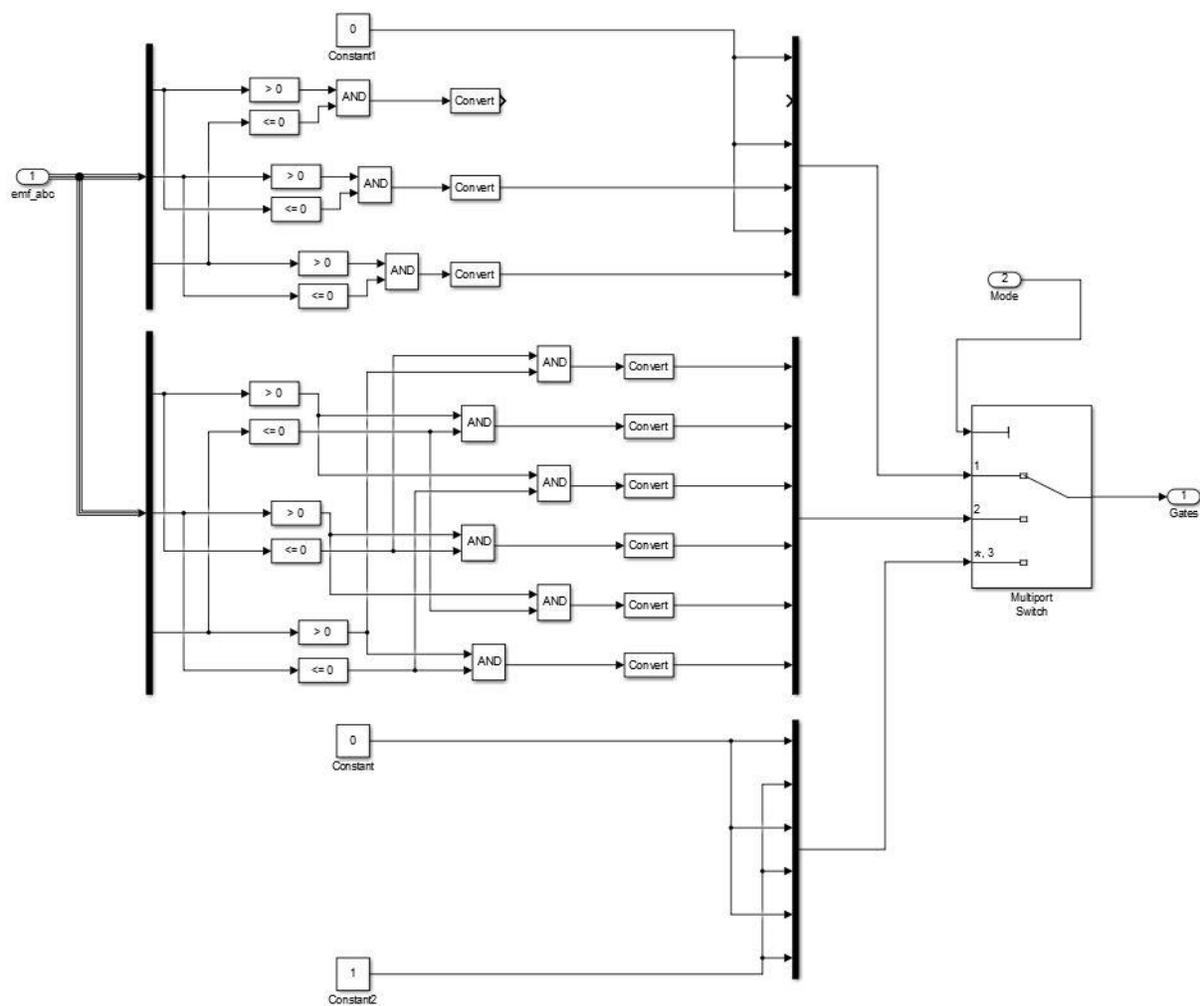


Figura 3.6: Visão da tabela verdade em ambiente MATLAB/Simulink.

## 4 Resultados

O cenário montado para simular o veículo elétrico em uma descida, considera uma inclinação de 5 graus durante 100 metros percorridos. Quando o veículo atinge 25km/h, o controle proporcional passa a atuar sobre a malha a fim de manter a velocidade estabelecida através da frenagem regenerativa. Na Figura (4.1) é possível notar o momento em que a frenagem passa a atuar fazendo o torque elétrico aumentar em magnitude. A figura representada utiliza a técnica *single-switch*.

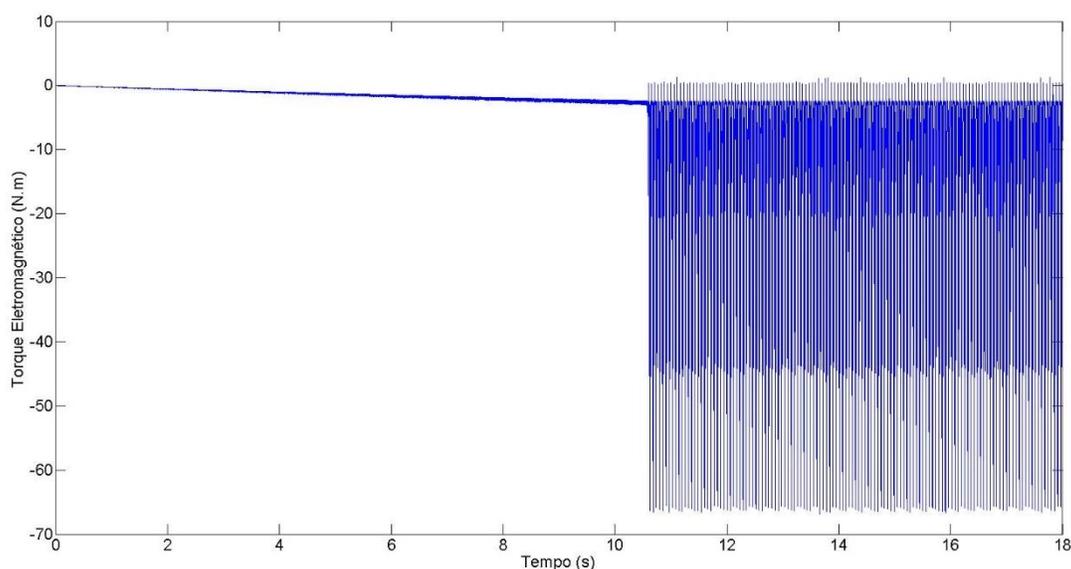


Figura 4.1: Torque elétrico durante a simulação.

Utilizando uma frequência de PWM de 2000 Hertz e uma amostragem de 1ms, o erro em regime permanente foi menor que 1% em todas as técnicas. A Figura (4.2) exemplifica isso mostrando a velocidade do veículo utilizando as três técnicas.

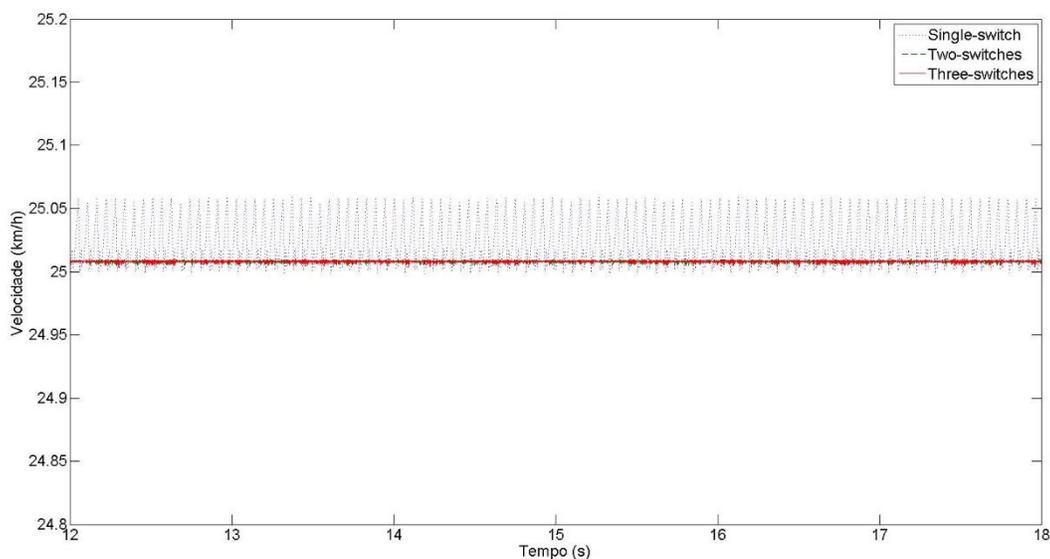


Figura 4.2: Velocidade do VE durante as simulações.

A Figura (4.3) mostra em detalhe a FEM de cada fase durante a frenagem.

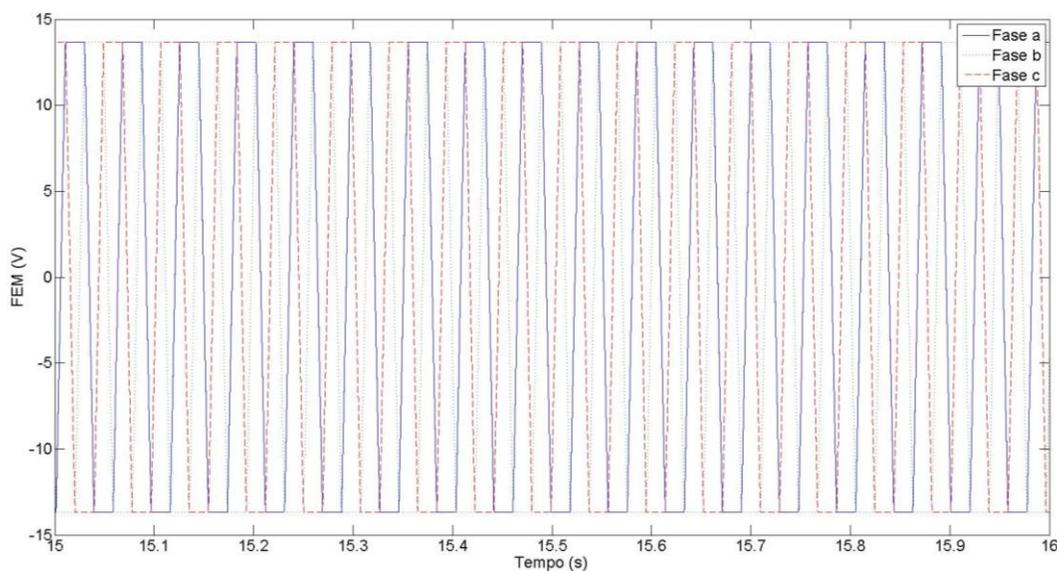


Figura 4.3: Detalhe da FEM durante a frenagem regenerativa.

A energia total recuperada em cada uma das técnicas é apresentada pela Figura (4.4), (4.5) e (4.6), referente a técnica *single-switch*, *two-switches* e *three-switches*, respectivamente. Foi

considerado como energia recuperada toda energia que passa pela carga resistiva, contabilizada através da integral do produto da tensão e corrente sobre a carga.

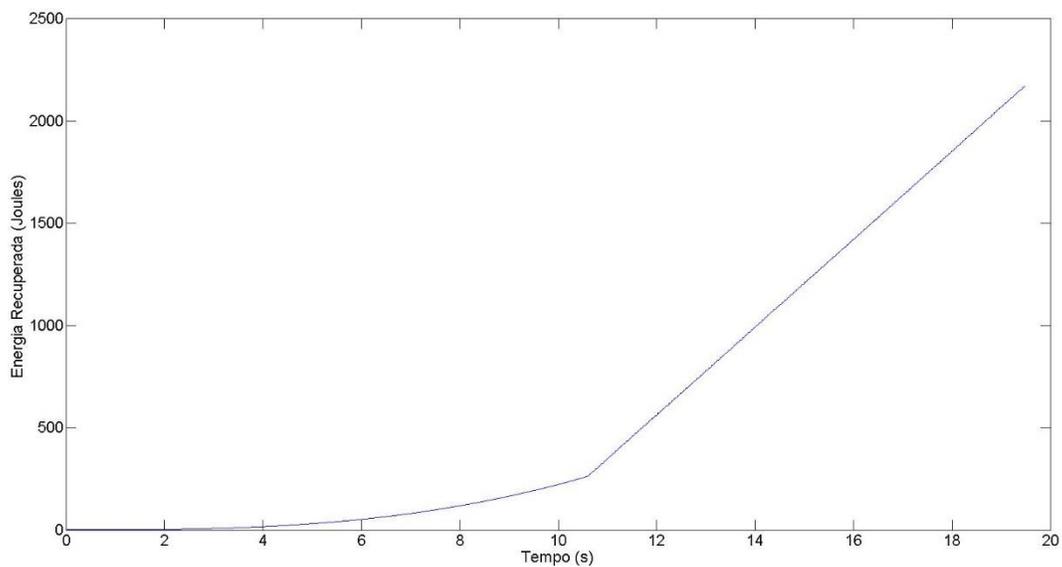


Figura 4.4: Energia recuperada utilizando a técnica *single-switch*.

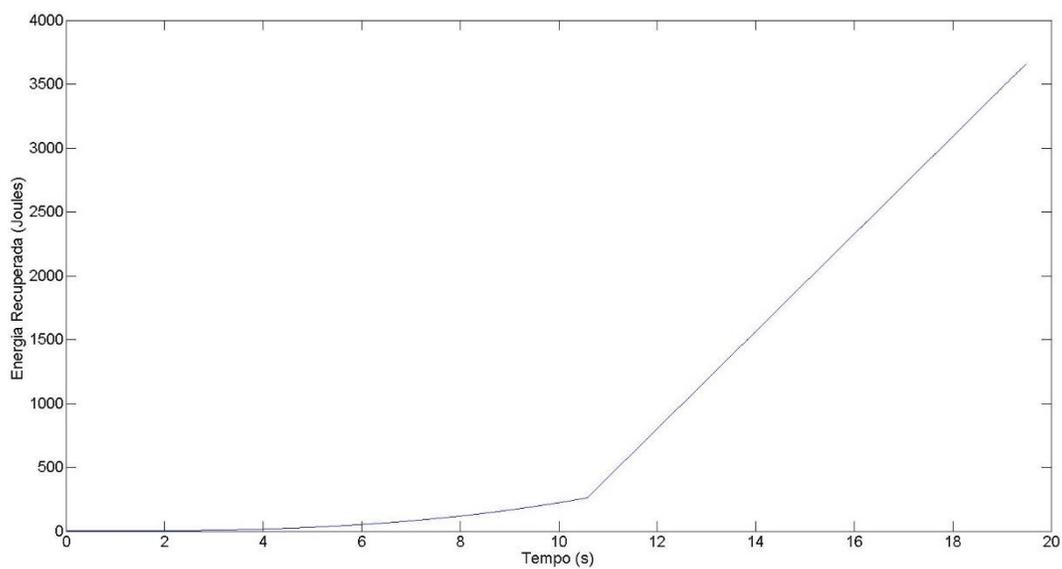


Figura 4.5: Energia recuperada utilizando a técnica *two-switches*.

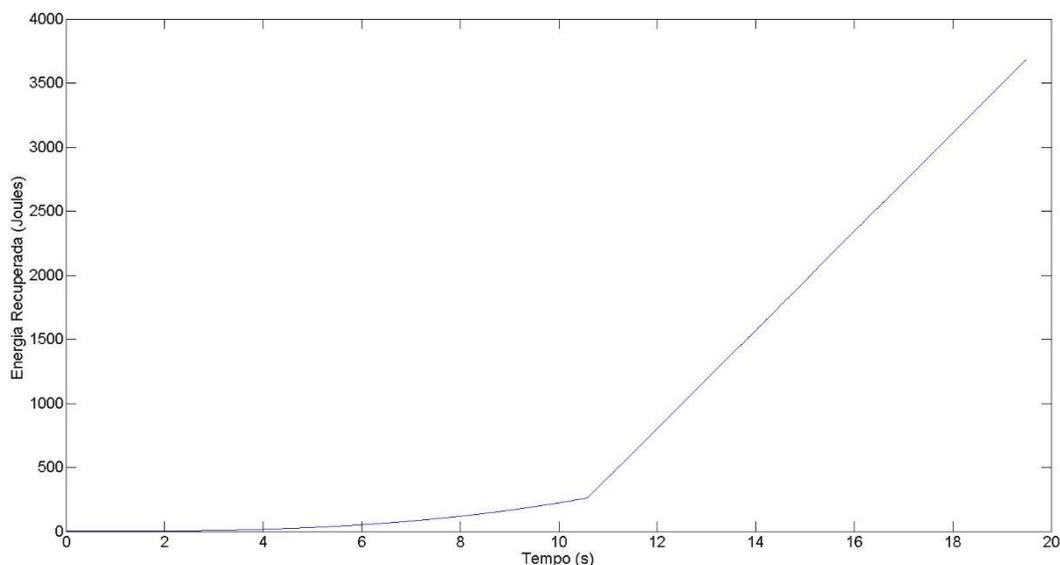


Figura 4.6: Energia recuperada utilizando a técnica *three-switches*.

Para calcular a porcentagem de energia recuperada, é necessário definir a energia inicial do sistema. Assim, inicialmente o sistema possui apenas energia potencial gravitacional, já que na simulação o veículo começa parado, no total de 6620J, aproximadamente. No final da simulação, o veículo não possui energia potencial gravitacional, mas possui energia cinética, definido pela equação (34), no total de 1970J, aproximadamente. Portanto, a energia dissipada durante a simulação é de 4650J.

A técnica *single-switch* recuperou 2171J, a técnica *two-switches* 3654J e a *three-switches* 3678W.

Através da Figura (4.7), pode-se notar que a técnica com maior eficiência energética foi energia foi a técnica *three-switches* com 79,1%. Foi considerado como eficiência energética a razão de energia recuperada pela energia dissipada.

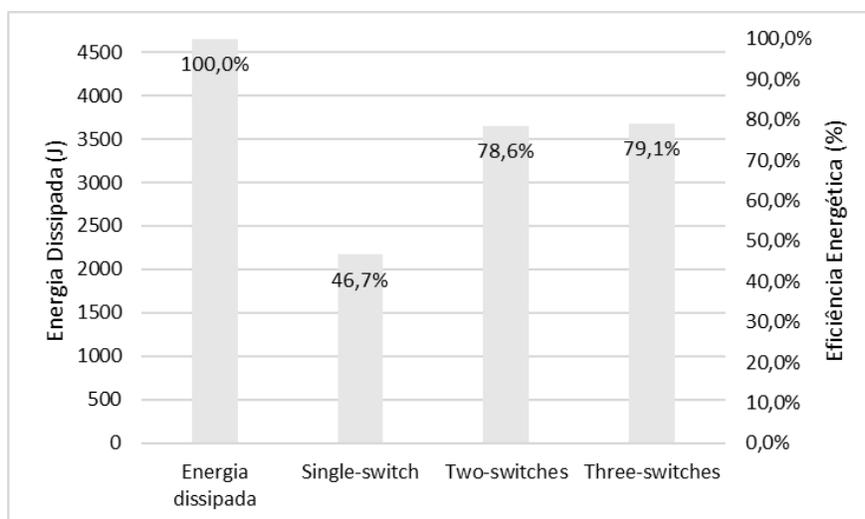


Figura 4.7: Eficiência energética das técnicas utilizadas.

Considerando que a competição Shell Eco-marathon Brazil 2016, possui trechos de descida e subida, é possível calcular quanto de energia poderia ser recuperada caso a técnica tivesse sido aplicada naquela competição.

A Figura (4.8) mostra o kartódromo Granja Viana, onde ocorreu a competição, com pontos marcando o traçado utilizado na corrida que mostram as variações de elevação. Através das marcações, foi possível medir aproximadamente a inclinação média negativa (5,6%) e a perda de elevação (17,2m). A distância percorrida pelo veículo em descida pode ser calculado pelo relação trigonométrica seno, que fornece uma hipotenusa de 176,26m.

Ao aplicar na simulação os valores de inclinação e distância, que no caso é a hipotenusa, a energia recuperada foi de 4729J, como mostra a Figura (4.9).



Figura 4.8: Traçado da Shell Eco-marathon Brazil 2016, no kartódromo Granja Viana.

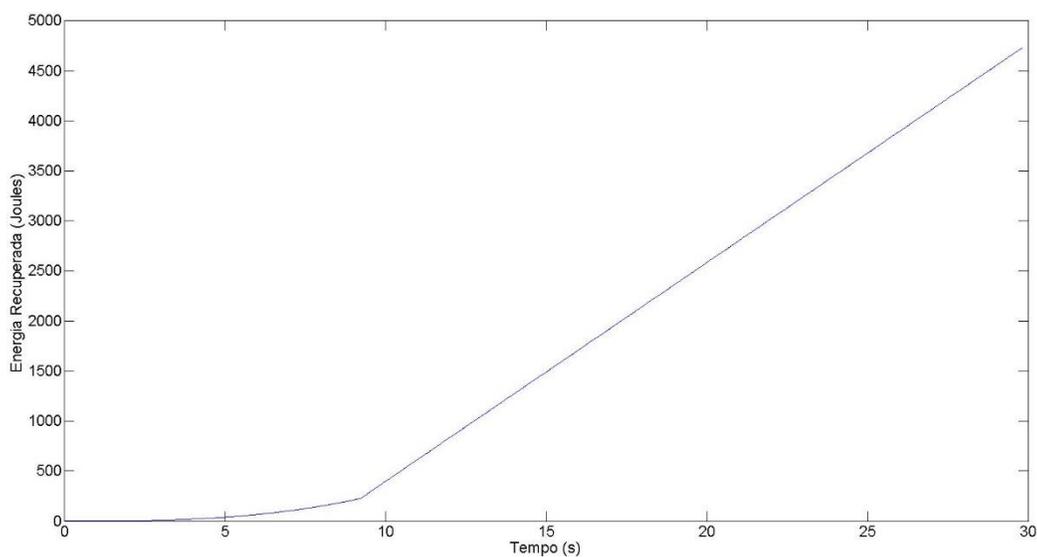


Figura 4.9: Energia recuperada utilizando a técnica *three-switches* baseado no trecho de descida da Shell Eco-marathon Brazil 2016.

Sabendo que a equipe EcoVeículo atingiu a marca de 139,36km/kWh nessa competição, ficando em primeiro lugar na categoria de veículo elétrico [20], é possível calcular qual seria a sua nova marca se utilizasse a técnica *three-switches* no trecho de descida. Para realizar esse cálculo,

é preciso saber que eram necessárias 15 voltas para a prova ser considerada completa, 14 voltas de 0,595km e 1 volta de 0,510km, totalizando 8,84km [21]. Todas as voltas continham o trecho de descida, inclusive a volta mais curta. Ainda é preciso considerar que no trecho de descida, o piloto não acionava o motor, não gastando energia. Portanto, a energia gasta por prova foi de 228,358kJ. Caso o VE utilizasse a técnica de frenagem regenerativa, ele recuperaria ao final de 15 voltas 70,935kJ. Sabendo que a energia recuperada no trecho de descida poderia ser reutilizada no restante da prova, ele gastaria por prova 157,423kJ. Portanto, a nova marca da equipe seria de 201,24km/kWh.

## 5 Conclusões

Neste trabalho procurou-se demonstrar o equacionamento do modelo de um veículo elétrico que utiliza um motor síncrono de ímãs permanentes e simular a frenagem regenerativa do mesmo durante uma descida utilizando diferentes técnicas.

Através do ambiente MATLAB/Simulink foi possível reproduzir as equações e aplicar de forma distinta as técnicas, além de quantificar a energia recuperada de cada uma dessas técnicas.

Foi demonstrado que a técnica *three-switches* obteve maior êxito para recuperar energia, atingindo 79,1% de eficiência energética com 3678J recuperados. Ainda é possível concluir que apesar da pequena diferença de eficiência energética quando comparada com a técnica *two-switches*, a técnica *three-switches* ainda possui a vantagem de ser considerada *sensorless*, ou seja, não necessita de um sensor que informe a posição do rotor.

Além disso, essa técnica também possui uma maior eficiência energética em um MSIP de FEM trapezoidal quando comparado com motores de FEM senoidal [22], reforçando a possibilidade de se utilizar essa técnica no VE da equipe.

O trabalho também contribui com a equipe EcoVeículo, implementando a tecnologia de frenagem regenerativa em uma simulação do VE E-Power V1 e mostrando a vantagem competitiva ao fazer uso da técnica *three-switches* na Shell Eco-marathon 2016.

Como trabalho futuro, propõe-se aplicar as técnicas nos veículos elétricos da equipe EcoVeículo e comparar as simulações com testes de campo.

## Referências Bibliográficas

- [1] David A. Kirsch, *“The Electric Vehicle and the Burden of History. New Brunswick,”* Rutgers University Press, 2000.
- [2] Washington da Costa, *“Metodologia para conversão de veículos equipados com motores a combustão interna para tração elétrica: aplicação de motor síncrono de ímã permanente com fluxo magnético radial a um furgão”*, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.
- [3] International Energy Agency, *“Global EV Outlook 2016: Beyond one million cars”*, IEA Publications, 2016.
- [4] Claudia Kemfert, *“Promoting Electric Vehicles in Germany via Subsidies – an Efficient Strategy?”*, CESifo DICE Report, Vol. 14, Iss. 4, pp. 65-70, 2016.
- [5] Paulo H. S. Câmara, *“Projeto de Lei Ordinária 306/2019”*, Pernambuco, 2019.
- [6] Michael Fischer, Mathew Werber, Peter V. Schwartz, *“Batteries: Higher energy density than gasoline?”*, Energy Policy, Vol. 37, Iss. 7, pp. 2639-2641, 2009.
- [7] Xiaohong Nian; Fei Peng; Hang Zhang, *“Regenerative Braking System of Electric Vehicle Driven by Brushless DC Motor”*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 61, pp. 5798-5808, 2014.
- [8] Padmaraja Yedamale, *“Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals”*, Microchip Technology Inc., 2003.
- [9] David Halliday, Robert Resnick, Jearl Walker, *“Física 3”*, Livros Técnicos e Científicos Editora, 4a Edição, Rio de Janeiro, 1984.

- [10] James R. Mevey, "*Sensorless Field Oriented Control of Brushless Permanent Magnet Synchronous Motors*", Kansas State University, Kansas, 2009.
- [11] Hugh D. Young, Roger A. Freedman, "*Física III - Eletromagnetismo*", Pearson, 10a Edição, São Paulo, 2004.
- [12] Dal Y. Ohm, "*Dynamic Model of PM Synchronous Motors*", Drivotech Inc., Virginia, 1997.
- [13] Evandro C. Goltz, "*Estudo de Máquina Elétrica de Fluxo Axial Aplicada a Sistema de Tração Automotiva com Acoplamento Direto e Frenagem Regenerativa*", Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2012.
- [14] Zongxuan Sun, Guoming Zhu, "Design and control of automotive propulsion systems", CRC Press, 2015.
- [15] Poria Fajri, Reza Ahmadi, Mehdi Ferdowsi, "*Equivalent vehicle rotational inertia used for electric vehicle test bench dynamic studies*", IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, pp. 4115-4120, 2012.
- [16] Igor P. Wiltuschinig, Aly. F. F. Filho, David G. Dorrell, "*A regenerative braking system using a Torus machine*", 2015 IEEE 24th International Symposium on Industrial Electronics, pp. 1435-1439, 2015.
- [17] Cheng-Hu Chen, Wen-Chun Chi, Ming-Yang Cheng, "*Regenerative braking control for light electric vehicles*", 2011 IEEE Ninth International Conference on Power Electronics and Drive Systems, pp. 631-636, 2011.
- [18] Jarno Bierman, "*Road Bike Tire Test: Schwalbe Ultremo ZX*", Bicycle Rolling Resistance, 2014, Disponível em: <<https://www.bicyclerollingresistance.com/road-bike-reviews/schwalbe-ultremo-zx-evolution-2014>>. Acesso em 1 de julho de 2020.

- [19] “*Oscilloscope Measurement Lab: Measuring Impedance and Capacitance*”, Tektronix, 2013.
- [20] Shell, “*Shell Eco-Marathon Brazil 2016, Official Rules, Chapter 2*”, Brasil.
- [21] Shell, “*Shell Eco-Marathon Brazil 2016, Final Results*”, Brasil.
- [22] Artur Á. Moraes, Luís H. C. Ferreira, “*Energy Efficiency of Regenerative Braking Applied in Sinusoidal and Trapezoidal PMSM*”, XIII Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica (CBQEE), São Paulo, 2019.