

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS**

Augusto Hay Mussi de Andrade

**Uma proposta de frenagem regenerativa para máquina
sem escovas de corrente contínua.**

São Carlos

2017

Augusto Hay Mussi de Andrade

**Uma proposta de frenagem regenerativa para máquina
sem escovas de corrente contínua.**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Elétrica com Ênfase em Sistemas de Energia e Automação, da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientadora: Prof^a. Dra. Vilma Alves de Oliveira

**São Carlos
2017**

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

H923u Hay Mussi de Andrade, Augusto
Uma proposta de frenagem regenerativa para máquina
sem escovas de corrente contínua / Augusto Hay Mussi de
Andrade; orientadora Vilma Alves de Oliveira. São
Carlos, 2017.

Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica com
ênfase em Sistemas de Energia e Automação) -- Escola de
Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo,
2017.

1. Frenagem Regenerativa. 2. Motor. 3. Máquina. 4.
Sem escovas. 5. Corrente Contínua. 6. Ponte Trifásica
Inversora. 7. Veículo Elétrico. 8. PWM. I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: Augusto Hay Mussi de Andrade

Título: “Uma proposta de frenagem regenerativa para máquina sem escovas de corrente contínua”

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado
em 30 / 11 / 2017,

com NOTA 9,0 (NOVE, ZERO), pela Comissão Julgadora:

Profa. Titula Vilma Alves de Oliveira - Orientadora - SEL/EESC/USP

Prof. Dr. Ricardo Quadros Machado - SEL/EESC/USP

Mestre Rodolpho Vilela Alves Neves - SEL/EESC/USP

Coordenador da CoC-Engenharia Elétrica - EESC/USP:
Prof. Associado Rogério Andrade Flauzino

*Dedico este trabalho aos meus pais José Carlos e Márcia, à minha irmã Danielle e a
minha namorada Renata.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus e a N. sr^a de Aparecida por prover o necessário para sempre seguir em frente nessa jornada.

Aos meus pais José Carlos de Andrade e Márcia R. H. M. de Andrade por me darem condições de ter uma educação de qualidade e pelo amor dado desde meu primeiro suspiro.

À minha irmã Danielle H. M. de Andrade, pelo companheirismo e fraternidade.

À minha namorada Renata Gelain de Souza, por me apoiar, por me fornecer amparo emocional e psicológico durante esses árduos anos de graduação.

Aos meus avôs e avós, meus tios e tias, primos e primas por me estimular durante as conversas sobre essa fase da minha vida.

À Profa. Dra. Vilma Alves de Oliveira por possibilitar que esse tema fosse explorado, por me orientar durante esse trabalho, durante a iniciação científica e por todo apoio concedido.

Ao engenheiro Cesar Domingues por todo apoio técnico, sugestões e prestatividade durante este projeto.

Ao companheiro de projeto e amigo Josias Blos por ter se dedicado de forma exemplar à execução do projeto, além de ter contribuído de muitas maneiras para que este trabalho fosse executado.

Ao Prof. Dr. Ricardo Quadros Machado pelas sugestões e por conceder recursos para execução deste trabalho.

Aos colegas do Laboratório de Controle (LAC) Elmer Gamboa, Rodolpho Vilela, Heitor Mercaldi e Rayza Araújo pelos diálogos e suporte.

Aos colegas do Laboratório de Fontes Alternativas de Potência, Rafael Magossi e Plínio Ferreira pelo auxílio e sugestões.

Ao grupo extra curricular EESC USP FÓRMULA SAE, por contribuir para uma formação de engenharia mais sólida e por ajudar desenvolver habilidades que somente a graduação não seria capaz de fornecer. Ao grupo extra curricular ESSCuderia Mileage pela parceria com o LAC para fomentação de novos trabalhos acadêmicos que possam trazer retornos para ambas as partes.

Aos amigos Rafael Puppi, Pedro Noveletto, Aurelio Martins, Rodrigo Canali, Vinicius Paes, Julio Sender, Nicolas Rorato, Gustavo Setti, Lucas Francato, Heitor Takeu, Marco covielo, Renato Beltrão e Henrich Caeiro que ajudaram a construir a República

Saudosa Maloca, na qual deixou a vida mais leve e feliz durante esses anos de graduação. Aos amigos intercambistas que moraram na Saudosa Maloca Edgar Garcia, Irving Delgado, Sebastian Duarte, Oliver Tamayo, Abdi Montalvo e Romain Ferreira. À todos participantes do grupo Amigos da Saudosa e ao companheiro de apartamento Edson Zancheta.

Aos amigos Gabriel Negrelli, Eduardo Tanizaka, Guilherme Chiqueti, Bruno de Oliveira e Kae Augusto por terem formado um verdadeiro time em busca de um objetivo em comum.

Aos colegas de turma Marco Aurélio, Rodrigo Lima e Lucas Soares.

Aos meus amigos do grupo Slap on the face e Amigos da rua 21 pela convivência e suporte.

À secretária do departamento de engenharia elétrica, Jussara Ramos, por sua solicitude e disposição.

Ao governo Dilma Rousseff, ao Ministério da Educação e a CAPES por proporcionar um intercâmbio acadêmico, antes jamais imaginado por mim.

À Universidade de São Paulo pela concessão de bolsa de iniciação científica, no Programa Unificado de Bolsas e por conceder recursos para uma formação de qualidade.

*“If you want to find the secrets of the universe, think in terms of Energy, Frequency and
Vibration”
Nikola Tesla*

RESUMO

ANDRADE, A. H. M. **Uma proposta de frenagem regenerativa para máquina sem escovas de corrente contínua.** 2017. 89p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

Este trabalho apresenta o estudo e implementação da regeneração de energia por meio de frenagem de um motor de corrente contínua sem escovas, sem inserção de chaves de potência ou conversores adicionais. Para isso, discute-se as abordagens teóricas da frenagem regenerativa, além de técnicas de acionamento e levantamento de parâmetros elétricos e mecânicos da máquina. O sistema completo foi inicialmente simulado em ambientes computacionais como o Matlab, Simulink e Simscape e em seguida implementado na prática usando conjuntos de circuitos de potência e de sinal permitindo tanto a operação da máquina no modo motor como no modo de regeneração de energia via frenagem elétrica. Com o sistema implementado, foi possível verificar satisfatoriamente o modo de operação de frenagem regenerativa, levantar faixas de funcionamento em que a energia regenerada é maior de acordo com a aplicação do ciclo de trabalho nas chaves da ponte inversora e fazer análises de casos utilizando a frenagem regenerativa.

Palavras-chave: Frenagem Regenerativa. Motor. Máquina sem escovas. Corrente contínua. Ponte trifásica inversora. Veículo elétrico. PWM. dsPIC.

ABSTRACT

ANDRADE, A. H. M. **A regenerative braking proposal for a brushless DC machine.** 2017. 89p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

This work presents the study and the implementation of braking energy regeneration of a brushless DC motor, without the insertion of additional switches or power converters. For this, the theoretical approaches of the regenerative braking, as well as power driver techniques and of electrical and mechanical parameters identification of the machine are discussed. The complete system was initially simulated in computational environments such as Matlab, Simulink and Simscape and then implemented in practice using power and signal circuitry for both operation in motor mode and power regeneration mode via electric braking . With the system running, it was possible to verify the regenerative braking mode satisfactorily, estimate the operation ranges in which the energy amount regeneralized is higher according to duty cycle applied and carry out analysis of cases using regenerative braking.

Keywords: Regenerative brake. Motor. Machine. Brushless. Direct current. Three fase bridge inverter. Electric vehicle. PWM. dsPIC.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Representação do motor CC. Retirado de CVEL (2011).	27
Figura 2.2 – Representação da máquina BLDC e sinais de saída dos sensores Hall. Adaptado de Brown (2002).	28
Figura 2.3 – Configuração ponte trifásica.	29
Figura 2.4 – Sistema simplificado em que Q_x e Q_u podem ser quaisquer número ímpar, de 1 a 5 e Q_y e Q_v podem ser quaisquer número par, de 2 a 6, desde que diferentes entre si. Como exemplo pode-se citar $Q_x = Q_1$, $Q_u = Q_3$, $Q_y = Q_2$ e $Q_v = Q_4$, caracterizando a comutação entre fase A e B.	30
Figura 2.5 – Sentido da corrente no modo motor.	30
Figura 2.6 – Armazenamento da energia nas bobinas da máquina.	32
Figura 2.7 – Direcionamento da energia armazenada.	32
Figura 2.8 – Forma de onda de corrente, tensão contra eletro-motriz e sequência de acionamento dos MOSFETS. Adaptado de Chen et al. (2011).	33
Figura 2.9 – MOSFETs pares ligados em 30 graus elétricos. Adaptado de Chen et al. (2011).	34
Figura 2.10 – MOSFETs pares desligados em 30 graus elétricos. Adaptado de Chen et al. (2011).	34
Figura 2.11 – MOSFETs pares ligados em 60 graus elétricos. Adaptado de Chen et al. (2011).	34
Figura 2.12 – MOSFETs pares ligados em 60 graus elétricos. Adaptado de Chen et al. (2011).	34
Figura 2.13 – Diagrama da máquina BLDC, representado por blocos.	37
Figura 3.1 – Representação de um sistema de redução mecânica planetária Planetary... (2014).	40
Figura 3.2 – representação modelo simulink.	42
Figura 3.3 – Respostas do ensaio degrau aplicado entre fases: (a) sinal PWM, (b) velocidade do motor BLDC, (c) corrente total e (d) tensão aplicada entre fases correspondente à variação do PWM.	43
Figura 3.4 – Comparação entre as respostas simulada e experimental usando parâmetros da Tabela 3.4. a) curvas de velocidade e b) curvas de corrente.	44
Figura 3.5 – Comparação entre respostas simulada e experimental usando a resposta ao degrau de velocidade e corrente como entradas à ferramenta PE, estimando todos parâmetros. a) curvas de velocidade e b) curvas de corrente.	46
Figura 3.6 – Representação ponte trifásica inversora e máquina BLDC.	47
Figura 3.7 – Representação comando do BLDC.	47

Figura 3.8 – Representação do bloco que faz a alternância entre modo motor e regeneração.	48
Figura 3.9 – Representação da corrente de partida.	49
Figura 3.10–Representação da malha de controle dupla para modo motor.	49
Figura 3.11–Representação da corrente e tensão de regeneração.	50
Figura 4.1 – Representação das principais partes do sistema.	51
Figura 4.2 – Representação da máquina utilizada.	52
Figura 4.3 – Foto da placa de sinal implementada.	54
Figura 4.4 – Representação de blocos da placa de sinal.	54
Figura 4.5 – Foto da placa de potência implementada.	56
Figura 4.6 – Representação de blocos da placa de potência.	57
Figura 4.7 – Foto das placas de sinal e de potência montadas.	58
Figura 4.8 – Foto da bancada de testes.	58
Figura 5.1 – Verificação forma de onda da corrente e tensão de regeneração.	61
Figura 5.2 – Representação das ondas de tensão e corrente capturadas para o ciclo de trabalho $\delta = 0.6$, técnica de 3 <i>switches</i> : a) sem capacitor b) com capacitor de 2200 μF	62
Figura 5.3 – Gráfico de energia regenerada de acordo com o PWM aplicado para a técnica de 3 <i>switches</i> , sem e com capacitor de 2200 μF	63
Figura 5.4 – Representação das ondas de tensão e corrente capturadas para o ciclo de trabalho $\delta = 0.6$, técnica de 1 <i>switch</i> : a) sem o capacitor b) com capacitor de 2200 μF	64
Figura 5.5 – Representação das ondas de tensão e corrente capturadas para o ciclo de trabalho de $\delta = 0.2$, técnica de 1 <i>switch</i>	65
Figura 5.6 – Gráfico de energia regenerada de acordo com o PWM aplicado e técnica de 1 <i>switch</i>	65
Figura A.1–Esquemático placa de potência - Contribuição do Eng. Cesar Domingues	76
Figura B.1–Esquemático placa de sinal - contribuição de Josias Blos e Eng. Cesar Domingues	78
Figura C.1–Exemplo de armazenamento dos valores que serão utilizados na ferramenta.	79
Figura C.2–Exemplo de entradas e saídas a serem indicadas.	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Tabela de esquemas possíveis para acionamento no modo motor em que δ indica o sinal de PWM que é aplicado naquele MOSFET, $\bar{\delta}$ significa o oposto de δ , ou seja, o tempo complementar. 0 significa que o referido elemento está desligado e 1 ligado, durante o período do PWM.	29
Tabela 2.2 – Exemplo de leitura do sensor Hall e tabela de configuração equivalente para modo motor.	31
Tabela 2.3 – Ordem de acionamento no modo regeneração	33
Tabela 2.4 – Ordem de acionamento modo regeneração, estratégia de 3 switches. . .	35
Tabela 3.1 – Configurações para captura de velocidade e corrente.	42
Tabela 3.2 – Configurações para captura de tensão e corrente.	42
Tabela 3.3 – Configuração para captura do PWM com acelerador fornecendo tensão de referência máxima.	42
Tabela 3.4 – Estimativa inicial dos parâmetros.	44
Tabela 3.5 – Estimativa via PE.	45
Tabela 4.1 – Principais características e parâmetros da bateria utilizada: modelo Unipower, fabricante UNICOBA.	52
Tabela 4.2 – Principais características da máquina BLDC modelo 100SX Rear Disc+7S. . .	53
Tabela 4.3 – Características do microcontrolador dsPIC33FJ128MC802.	55
Tabela 4.4 – Modelo e fabricante dos principais componentes da placa de sinal. . . .	55
Tabela 4.5 – Principais valores de datasheet do diodo de roda livre MUR440 do fabricante On Semiconductors.	55
Tabela 4.6 – Principais valores de datasheet do MOSFET IRFB3207 da International Rectifier.	57
Tabela 4.7 – Características do osciloscópio (Agilent Technologies, InfiniiVision MSO-X 2014A, 100Mhz) e configurações para captura de tensão e corrente. . .	59
Tabela F.1 – Documentação de problemas durante testes.	88
Tabela F.2 – Continuação da tabela de documentação de problemas durante testes. .	89

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BLDC	- Brushless Direct current
FR	- Frenagem regenerativa
PWM	- Pulse Width Modulation
DC	- Direct Current
CC	- Corrente Contínua
MOSFET	- Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
LAIE	- Laboratório Aberto para Inovação e Empreendedorismo
PCB	- Printed Circuit Board
dsPIC	- Digital Signal Peripheral Interface Controller
PE	- Parameter Estimation
EPAM	- Erro Percentual Absoluto Médio
RMS	- Root Mean Square (Valor Quadrático Médio)
SI	- Sistema Internacional de Medidas
RPM	- Rotação Por Minuto
LAC	- Laboratório de Controle
LFAPE	- Laboratório de Fontes Alternativas e Processamento de Energia

LISTA DE SÍMBOLOS

\in	- Pertence
Q_x e Q_u	- Representação dos MOSFETs ímpares, desde que diferentes entre um e o outro.
Q_y e Q_v	- Representação dos MOSFETs pares, desde que diferentes entre um e o outro
δ	- Ciclo de trabalho
$\bar{\delta}$	- Ciclo de trabalho complementar
R_a, R_b e R_c	- Resistência das fases a, b e c, respectivamente
R	- Resistência entre duas fases
L_a, L_b e L_c	Indutância das fases a, b e c, respectivamente
L	- Indutância entre duas fases
M	- Indutância mútua
i_a, i_b e i_c	- Corrente da fase A, B e C, respectivamente
i_{AB}	- Corrente entre as fases A e B
e_a, e_b e e_c	- Tensão contra eletro-motriz da fase A
V_{AB}	- Tensão entre as fases A e B
K_{ea}	- Constante de tensão contra eletro-motriz da fase A
K_e	- Constante de tensão contra eletro-motriz da entre fases
K_{ta}	- Constante de torque da fase A
K_t	- Constante de torque entre fases
τ	- Torque mecânico
τ_{el}	- Torque elétrico
ω	- Velocidade angular
J	- Momento de inércia do motor e da carga

B	- Coeficiente de atrito equivalente dos rolamentos do eixo do rotor e perdas na carga
red	- Redução mecânica
NPP	- Número de par de polos
F_h	- Frequência do pulso detectado
n_m	- Velocidade da máquina em RPM
E	- Energia
W	- Potência
V_{fonte}	- Tensão da fonte
I_{fonte}	- Corrente que entra ou sai da fonte de alimentação
$E_{partida}$	- Energia de partida da máquina
E_m	- Energia média em regime
	$[E_{FR}]$ - Energia total regenerada
$\Delta s_{partida}$	- Tempo em que a corrente leva desde seu pico até sua acomodação
Δs_{regime}	- Tempo em que a corrente fica em regime em uma janela amostral

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	25
2	MÁQUINA BRUSHLESS BLDC	27
2.1	Acionamento do modo motor	28
2.2	Acionamento do modo regeneração	30
2.3	Modelagem dinâmica	35
3	IDENTIFICAÇÃO DE PARÂMETROS E SIMULAÇÕES	39
3.1	Redução mecânica	39
3.2	Número de par de polos	40
3.3	Estimação de parâmetros	41
3.3.1	Obtenção da resposta de velocidade e corrente ao ensaio degrau.	41
3.3.2	Estimativas de 'R', 'L', 'B', 'J', 'Kt' e 'Ke'	43
3.4	Modelo de simulação das principais partes do sistema	46
4	MATERIAIS E METODOLOGIA PARA A PARTE PRÁTICA	51
4.1	Alimentação e máquina BLDC	51
4.2	Placa de sinal	53
4.3	Placa de potência	55
4.4	Métodos	58
5	RESULTADOS EXPERIMENTAIS	61
5.1	Forma de onda da corrente regenerada	61
5.2	Condição para maior regeneração de energia	61
5.2.1	3 switches	61
5.2.2	1 switch	63
5.3	Estimativa de energia regenerada durante um percurso	65
6	CONCLUSÃO	69
	REFERÊNCIAS	71
	APÊNDICES	73
	APÊNDICE A – ESQUEMÁTICO PLACA DE POTÊNCIA	75
	APÊNDICE B – ESQUEMÁTICO PLACA DE SINAL	77

APÊNDICE C – DICAS PARA EXECUÇÃO DO PE	79
APÊNDICE D – S-FUNCTION PARA LÓGICA DE CHAVEAMENTO	81
APÊNDICE E – MAPA DE PINOS	85
APÊNDICE F – DOCUMENTAÇÃO DE PROBLEMAS ENFRENTADOS DURANTE TESTES	87

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, os motores elétricos são amplamente utilizados, desde aplicações industriais, como acionamentos de motores para processos de manufatura de bens de consumo, até aplicações domésticas, como, por exemplo, liquidificadores e freezers. Sua grande utilização deve-se, sobre tudo, por suas vantagens, já que estes conseguem ter grande densidade de potência, eficiência elevada, ter versatilidade de acordo com o tipo de projeto (podem atuar também como geradores) e geralmente são de baixo custo ([CHAPMAN, 2013](#); [OLIVEIRA et al., 2015](#)).

Apesar de serem amplamente utilizados nas mais diversas aplicações desde sua invenção, seu uso em aplicações automobilísticas, quando comparado com outros tipos de motores, como por exemplo o motor à combustão, pode ser considerado relativamente recente. Isso se deve à evolução do conceito de sustentabilidade, discussão sobre impactos ambientais dos automóveis movidos à combustíveis fósseis em comparação a utilização de energia elétrica como fonte propulsora e a avanços tecnológicos de componentes (redução de tamanho e massa dos motores elétricos, das baterias e criação de novas tecnologias) ([HUA et al., 2013](#)).

Para automóveis elétricos, um dos componentes que mais evoluíram tecnologicamente e atualmente é alvo de estudos de aplicações neste setor é o motor. Verifica-se duas vertentes de tecnologias de motores aplicados a veículos elétricos: os motores de indução e os motores de ímã permanente sem escovas de corrente contínua (BLDC Motor, das iniciais em inglês). Enquanto o primeiro vem sendo utilizado em veículos movidos totalmente por sua ação e também em carros mais pesados (carros de utilização pessoal), o segundo é mais utilizado em veículos híbridos ou mais leves (carros de utilização pessoal híbridos e carros utilitários, como os de shoppings) ou ainda aplicados em veículos de alta performance, utilizando geralmente um motor em cada roda como por exemplo a Mercedes Benz modelo AMG SLS ([MERCEDES-BENZ, 2012](#)).

Neste projeto utiliza-se uma máquina BLDC em um protótipo elétrico de alta eficiência. A fim de aumentar a eficiência do protótipo, propõe-se a implementação de regeneração de energia, via frenagem. Assim, será possível reaproveitar a energia da frenagem da máquina, redirecionando-a para a bateria, durante a desaceleração do protótipo. Para atingir esse objetivo, serão estudados formas de atingir a regeneração de energia, métodos mais eficazes para o chaveamento da ponte trifásica inversora, na qual permitirá a reversão de corrente, obtenção do modelo, parâmetros elétricos e mecânicos da máquina e por fim implementação e verificação de tais técnicas.

2 MÁQUINA BRUSHLESS DE ÍMÃ PERMANENTE DE CORRENTE CONTÍNUA

A máquina BLDC se assemelha à máquina de corrente contínua (CC), já que o princípio construtivo de ambas são parecidos. Simplificadamente, tanto na máquina BLDC quanto no modelo de máquina CC que utiliza ímã permanente, ambas utilizam bobinas que interagem com o campo magnético do ímã, resultando no movimento (WILTUSCHNIG, 2013). Na máquina CC são utilizados dispositivos para energizar a bobina, para que o campo magnético desta possa interagir com o do ímã. Esses dispositivos são chamados de escovas (brushes), que podem ser vistos na Figura 2.1. Já a máquina BLDC, basicamente, se diferencia da máquina CC por não possuir escovas, assim, é necessário uma configuração eletrônica para fazer a comutação das bobinas de forma ordenada. A Figura 2.2 ilustra as bobinas a serem energizadas para funcionamento da máquina.

Como é necessário fazer a comutação ordenadamente, se faz necessário saber a posição do rotor para que as próximas bobinas possam ser energizadas. Como neste caso o motor utilizado é trifásico, são posicionados sensores de efeito Hall defasados de 120 graus em seu posicionamento no estator, para que possa ser determinada a posição do rotor (MORAES, 2015). A combinação de respostas obtidas pelos sensores Hall são lidas pelo o microcontrolador que gera sinais para o acionamento das bobinas correspondentes. Um exemplo de combinação do sinal de saída dos sensores Hall pode ser visto na Figura 2.2, representado por sequência binária de acordo com o setor em que rotor se encontra.

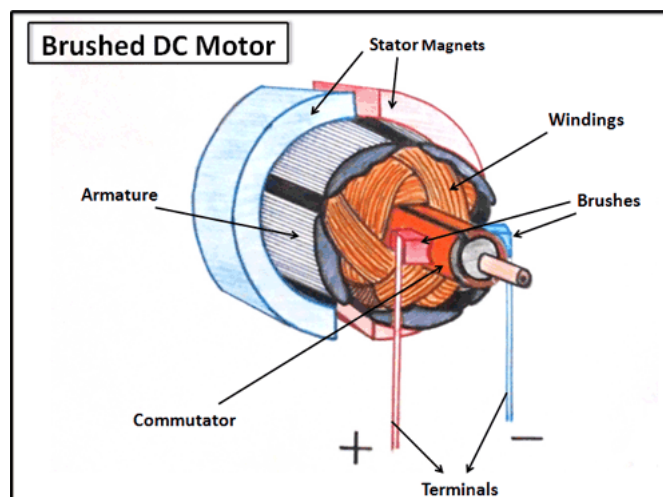


Figura 2.1: Representação do motor CC. Retirado de CVEL (2011).

Por fim, pode-se destacar algumas vantagens e desvantagens da máquina BLDC em relação à máquina CC. Como vantagem, devido a não utilização de escovas, a necessidade de manutenção nesses elementos caem drasticamente, reduzindo custos com esse fator e diminuindo número de paradas para tal. Além disso, por não ter escovas, não há desgastes

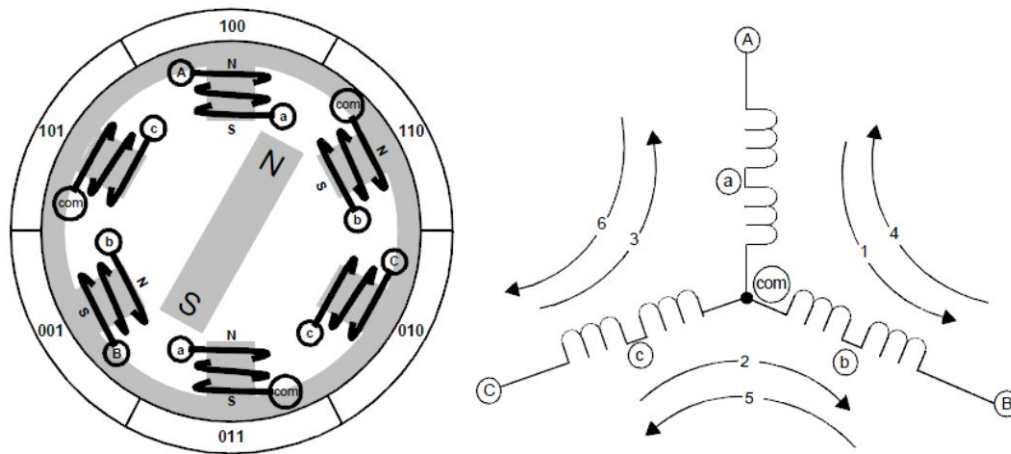


Figura 2.2: Representação da máquina BLDC e sinais de saída dos sensores Hall. Adaptado de [Brown \(2002\)](#).

mecânicos, ruídos significativos e queda de tensão neste elemento, fazendo com que a durabilidade da máquina seja maior, tornando seu acionamento silencioso e mais eficiente. Outra vantagem a ser destacada é sua relativa constância de torque em relação a variação de velocidade. Por último, destaca-se a maior eficiência da máquina BLDC quando comparada com à máquina CC ([RIPPEL, 2007](#); [DELGADO, 2010](#)).

Por outro lado, devido ao tipo de material que o ímã dos BLDCs atuais são constituídos (terras raras, como o neodímio), a sua eletrônica requerida para acionamento e também implementação de controle, o preço final da máquina costuma ser mais alto quando comparado à máquina CC. Porém, devido às grandes vantagens oferecidas pela máquina BLDC, seu uso é bem diversificado e amplamente difundido.

2.1 Acionamento do modo motor

Para que a máquina BLDC seja capaz de movimentar o protótipo, é necessário acionar a máquina no modo motor. Nesta configuração, o objetivo é comutar as fases de tal forma que será fornecido o máximo de torque para o eixo em que a máquina é acoplada, para que o sistema consiga acelerar e ganhar velocidade.

Devido a necessidade de controlar a ordem em que as bobinas são energizadas e por não possuir escovas, a comutação do BLDC é feita eletronicamente. Para isso, utiliza-se a configuração de ponte inversora trifásica (Figura 2.3, na qual cada fase da máquina é conectada em um braço da ponte). Dessa forma, para o acionamento da máquina no modo motor é necessário fazer com que a corrente da fonte atravesse duas fases das três possíveis. Para isso, existem diferentes técnicas para o acionamento. Em [Oliveira et al.](#)

(2015) são discutidos 3 formas, na qual permitem o acionamento do modo motor. Devido ao acionamento ser sempre entre duas fases, o sistema pode ser simplificado pela Figura 2.4. Os esquemas de acionamento são mostrados na Tabela 2.1. Para este trabalho, foi escolhido o esquema 3, já que em Oliveira et al. (2015) os autores afirmam que a corrente para este modo tem menos ripples do que as outras técnicas. Um exemplo pode ser visto a seguir, onde a comutação de fases será de acordo com os sinais obtidos dos sensores Hall de posição da Tabela 2.2 o que resultará em um sinal de saída para acionamento dos semicondutores do circuito (este trabalho utiliza MOSFETs). Por exemplo, quando se obtém o sinal das combinações do Hall, no sistema decimal, igual a 1 (Hall 1 = 1, Hall 2 = 0 e Hall 3 = 0) é necessário acionar Q_1 com δ e Q_2 com $\bar{\delta}$ e Q_4 sempre ligado (1), fazendo com que a corrente atravessa a fase A e B. Na Figura 2.5 é possível verificar o sentido da corrente neste caso.

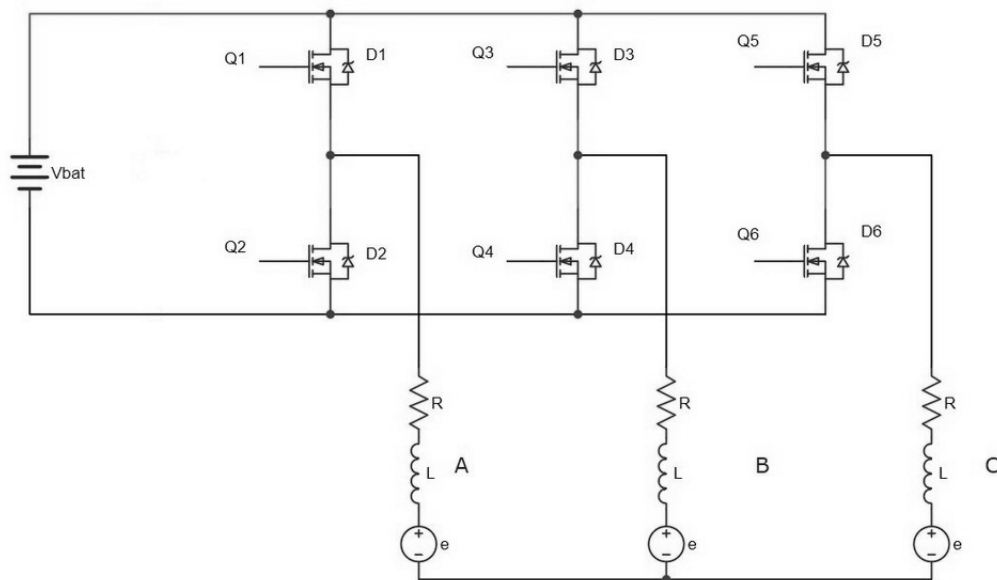


Figura 2.3: Configuração ponte trifásica.

Tabela 2.1: Tabela de esquemas possíveis para acionamento no modo motor em que δ indica o sinal de PWM que é aplicado naquele MOSFET, $\bar{\delta}$ significa o oposto de δ , ou seja, o tempo complementar. 0 significa que o referido elemento está desligado e 1 ligado, durante o período do PWM.

Esquema	M_x	M_y	M_u	M_v
1	δ	0	0	δ
2	δ	0	0	1
3	δ	$\bar{\delta}$	0	1

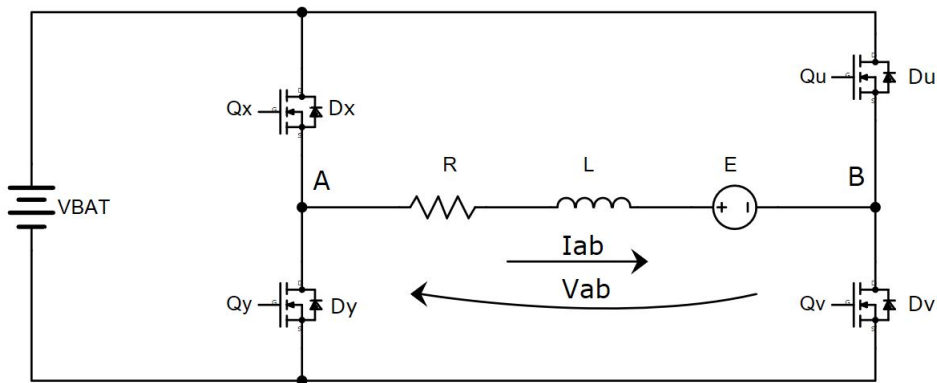


Figura 2.4: Sistema simplificado em que Q_x e Q_u podem ser quaisquer número ímpar, de 1 a 5 e Q_y e Q_v podem ser quaisquer número par, de 2 a 6, desde que diferentes entre si. Como exemplo pode-se citar $Q_x = Q_1$, $Q_u = Q_3$, $Q_y = Q_2$ e $Q_v = Q_4$, caracterizando a comutação entre fase A e B.

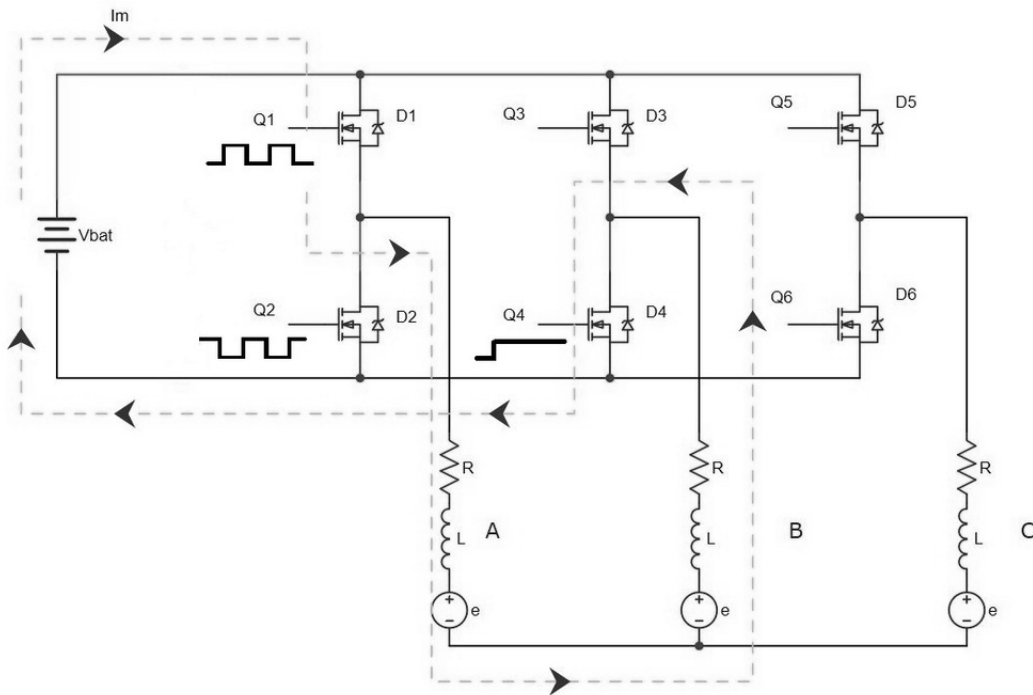


Figura 2.5: Sentido da corrente no modo motor.

2.2 Acionamento do modo regeneração

Tabela 2.2: Exemplo de leitura do sensor Hall e tabela de configuração equivalente para modo motor.

Modo Motor						
Hall 3	0	0	0	1	1	1
Hall 2	0	1	1	0	0	1
Hall 1	1	0	1	0	1	0
Nº Equivalente decimal	1	2	3	4	5	6
Fases	+A	+C	+A	+B	+B	+C
	-B	-B	-C	-A	-C	-A
PWM (δ)	Q1	Q5	Q1	Q3	Q3	Q5
PWM Complementar ($\bar{\delta}$)	Q2	Q6	Q2	Q4	Q4	Q6
Ativo (1)	Q4	Q4	Q6	Q2	Q6	Q2

Durante um percurso de um carro convencional é normal que este acelere, chegue na velocidade desejada e, depois de certo tempo, desacelere, mudando para uma velocidade desejada menor que a anterior. Usualmente, esta perda de velocidade é feita através de um dispositivo mecânico (tambor ou disco do freio) que força a perda de velocidade por atrito. Toda energia usada para realizar a diminuição de velocidade é transformada em calor e não é aproveitada. A proposta da frenagem regenerativa (FR) é também diminuir a velocidade da máquina, porém através da aplicação da energia cinética do veículo no eixo da máquina, forçando-a a trabalhar no modo de geração, reduzindo a velocidade do carro e redirecionando parte da energia para um elemento armazenador (ultra-capacitores, baterias ou volantes de inércia) (DREHER; ROSA, 2014). Neste caso, são utilizadas baterias de chumbo ácido como elementos armazenadores de energia.

Para acionamento da regeneração é necessário inverter o sentido da corrente, fluindo da máquina BLDC para a bateria. Porém, em alguns casos a tensão induzida na armadura da máquina pode não ter a amplitude necessária para resultar na inversão, sendo necessário elevar tal tensão. Dessa forma, alguns fabricantes de carros e bicicletas elétricas utilizam um buck-boost extra ao sistema para conseguir gerenciar a regeneração, porém, tal método implica em mais componentes ao sistema, tornando-o mais caro e mais pesado (CHEN et al., 2011).

De acordo com Chen et al. (2011), Cui et al. (2011), Dreher e Rosa (2014) e Hua et al. (2013) é possível aumentar a tensão induzida, segundo princípio do conversor boost, utilizando componentes eletrônicos já implementados na ponte inversora, bem como elementos passivos armazenadores, tais como indutores do enrolamento do motor (Figura 2.3).

Para isso, é necessário aplicar um ciclo de trabalho em um dos MOSFETs pares da ponte (inferiores) afim de que possa ser armazenada energia nos enrolamentos da máquina (indutor) e em seguida direcionar a energia para a bateria. O processo, exemplificado para duas fases, pode ser visto nas Figuras 2.6 e 2.7. A ordem de acionamento no modo

regeneração pode ser visto na Tabela 2.3. Além disso, em [Chen et al. \(2011\)](#) é apresentado uma outra forma de acionamento que possibilita a regeneração. Neste método, conforme tabela 2.4 todos os MOSFETs inferiores (pares) são acionados simultaneamente com o mesmo sinal de PWM, o que possibilita uma forma de onda de corrente regenerada contínua. Ainda, de acordo com [Chen et al. \(2011\)](#), este método não necessita de conhecimento de posição do rotor (utilização do sensores Hall), já que com a própria dinâmica da corrente consegue-se direcioná-la à bateria. A Figura 2.8 ilustra a forma de onda da corrente, tensão contra eletro-motriz, de acordo com o PWM aplicado. Neste trabalho, serão abordados ambas as técnicas de acionamento da FR, afim de compará-las em suas características.

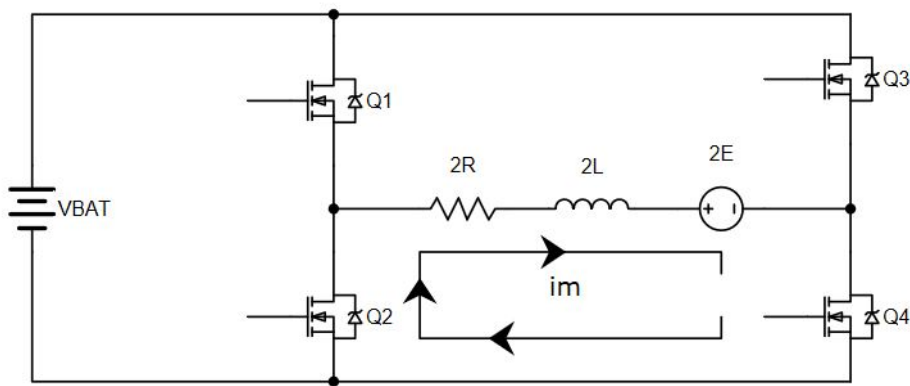


Figura 2.6: Armazenamento da energia nas bobinas da máquina.

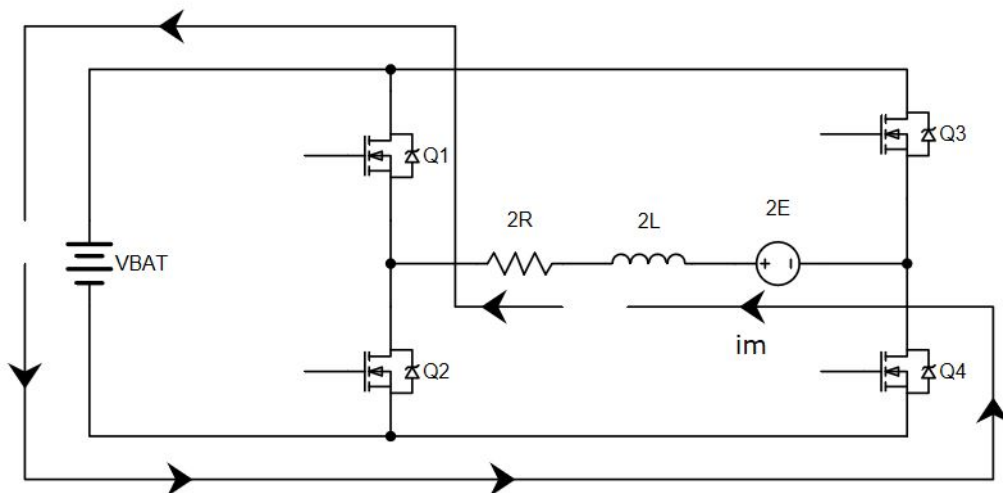


Figura 2.7: Direcionamento da energia armazenada.

Tabela 2.3: Ordem de acionamento no modo regeneração

Hall 3	0	0	0	1	1	1
Hall 2	0	1	1	0	0	1
Hall 1	1	0	1	0	1	0
Nº Equivalente decimal	1	2	3	4	5	6
Fases	+A	+C	+A	+B	+B	+C
	-B	-B	-C	-A	-C	-A
PWM	Q2	Q6	Q2	Q4	Q4	Q6

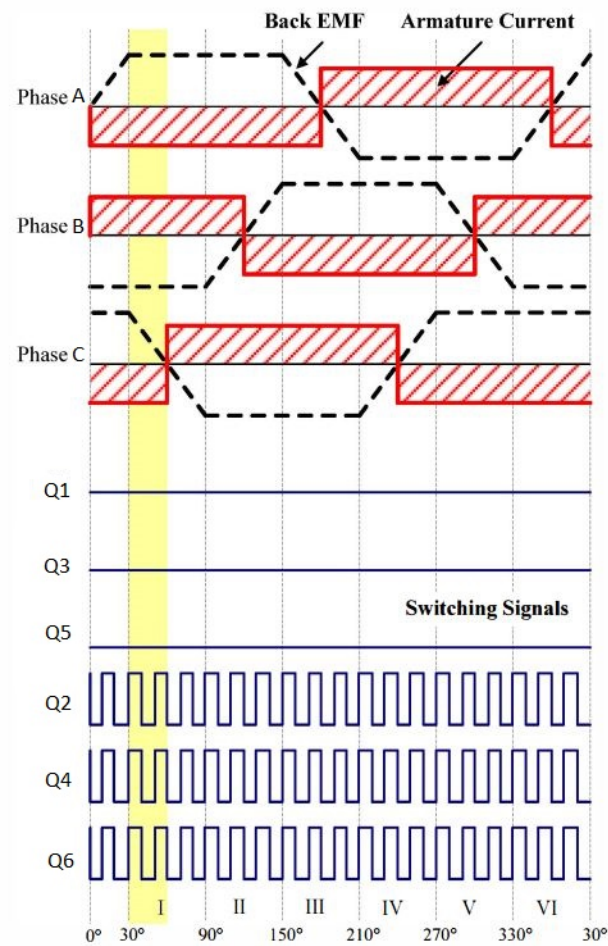


Figura 2.8: Forma de onda de corrente, tensão contra eletro-motriz e sequência de acionamento dos MOSFETS. Adaptado de [Chen et al. \(2011\)](#).

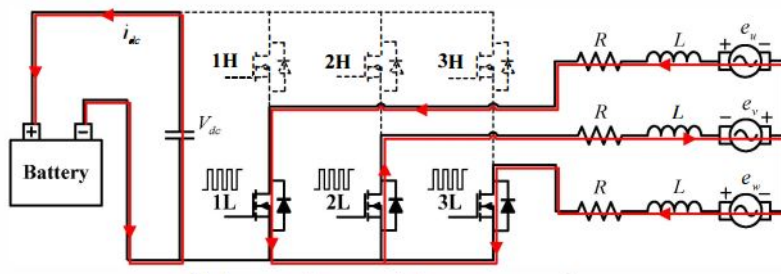


Figura 2.9: MOSFETs pares ligados em 30 graus elétricos. Adaptado de [Chen et al. \(2011\)](#).

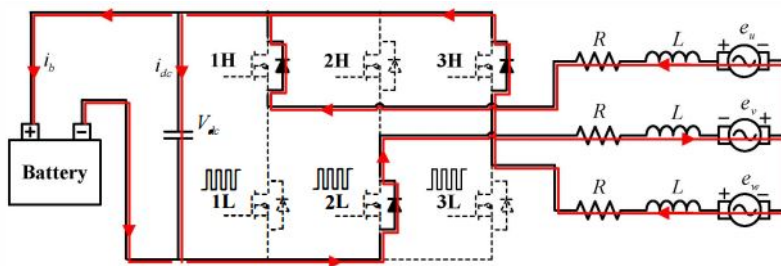


Figura 2.10: MOSFETs pares desligados em 30 graus elétricos. Adaptado de [Chen et al. \(2011\)](#).

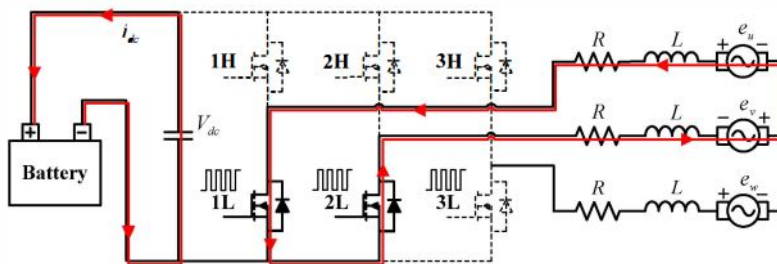


Figura 2.11: MOSFETs pares ligados em 60 graus elétricos. Adaptado de [Chen et al. \(2011\)](#).

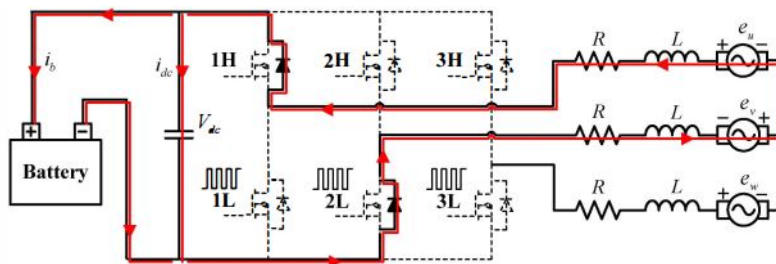


Figura 2.12: MOSFETs pares ligados em 60 graus elétricos. Adaptado de [Chen et al. \(2011\)](#).

Tabela 2.4: Ordem de acionamento modo regeneração, estratégia de 3 switches.

Hall 3	0	0	0	1	1	1
Hall 2	0	1	1	0	0	1
Hall 1	1	0	1	0	1	0
Nº Equivalente decimal	1	2	3	4	5	6
Fases	+A	+C	+A	+B	+B	+C
	-B	-B	-C	-A	-C	-A
PWM	Pares	Pares	Pares	Pares	Pares	Pares

2.3 Modelagem dinâmica

Para que seja possível realizar simulações do sistema estudado é necessário fazer um levantamento do modelo eletro-mecânico da máquina, estimando, assim, seus coeficientes. Por se tratar de um motor comutado via acionamento eletrônico, seu acionamento é feito entre duas fases por vez, resultando em equações equivalentes às de um motor CC (OLIVEIRA et al., 2016).

Dessa forma, utilizando o diagrama eletromecânico da máquina brushless (Figura 2.4), pode-se levantar as equações que descrevem o sistema de acordo com (2.1) a (2.9) (OLIVEIRA et al., 2015; CHEN et al., 2000).

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & R_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L_a - M & 0 & 0 \\ 0 & L_b - M & 0 \\ 0 & 0 & L_c - M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

$$\begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} = \omega_e \begin{bmatrix} K_{ea} \\ K_{eb} \\ k_{ec} \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Considerando as fases equilibradas e idênticas, tem-se que R_a , R_b e R_c são iguais entre si, bem como L_a , L_b e L_c . Dessa forma, tem-se:

$$R = 2 \cdot R_a \quad (2.3)$$

$$L = 2 \cdot (L_a - M) \quad (2.4)$$

$$K_e = 2 \cdot K_{ea} \quad (2.5)$$

$$K_t = 2 \cdot K_{ta} \quad (2.6)$$

em que R_a , L_a , K_e e K_t são, respectivamente, a resistência, indutância, constante contra eletromotriz e constante de torque da fase A; R , L , k_e , K_t representam os valores associados entre duas fases e M representa a indutância mútua. As equações dinâmicas são:

$$V_{AB} = Ri_{AB} + L \frac{di_{AB}}{dt} + K_e \omega_e \quad (2.7)$$

$$T_{el} = K_t i_{AB} \quad (2.8)$$

$$J \frac{d\omega}{dt} + B\omega + T_L - T_{el} = 0. \quad (2.9)$$

em que

V_{AB} : Tensão entre os pontos A e B

i_{AB} : corrente de fase

R : Resistência entre fases

L : Indutância dentre fases

k_e : Constante elétrica entre fases

ω : Velocidade angular do eixo da máquina

T_{el} : Torque elétrico gerado pela máquina

T_L : Torque da carga

J : Momento de inércia do motor e da carga

B : Coeficiente de atrito equivalente dos rolamentos do eixo do rotor e perdas na carga

Manipulando (2.7) no domínio da frequência e isolando a corrente, obtém-se:

$$i_{AB} = \frac{V_{AB} - k_e \omega_e}{R + Ls} \quad (2.10)$$

e, manipulando (2.8) no domínio da frequência e (2.9), obtém-se:

$$\omega = \frac{i_{AB} k_t - T_L}{B + Js} \quad (2.11)$$

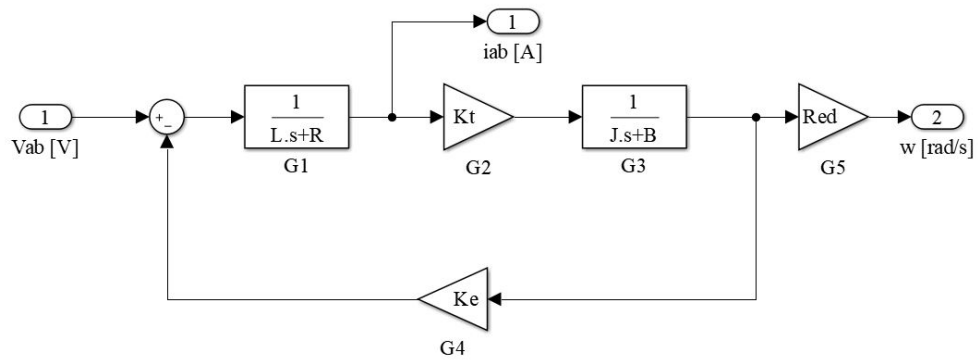


Figura 2.13: Diagrama da máquina BLDC, representado por blocos.

Assim, é possível representar o modelo eletromecânico da máquina através de (2.10) e (2.11) (ver Figura 2.13). Vale ressaltar que a velocidade do eixo do motor é diferente da velocidade da roda e essa diferença deve-se à uma redução mecânica, via engrenagens. No diagrama da Figura 2.13, esse fator é representado por ‘Red’.

3 IDENTIFICAÇÃO DE PARÂMETROS E SIMULAÇÕES

Obter os valores dos parâmetros do modelo do motor BLDC com certa confiabilidade permite a reconstrução do sistema via simulações. Para isso, existem, basicamente, dois caminhos a serem tomados: ensaios elétricos e mecânicos ou estimativa de parâmetros via teoria da estimação.

O primeiro caminho consiste na realização de diversos ensaios, baseados em arranjos elétricos e mecânicos para determinação dos parâmetros. Esse, costuma resultar em valores próximos do real quando executado de maneira controlada, com atenção, com critérios bem definidos e com equipamentos bem calibrados. Porém, muitas vezes, tais ensaios retornam valores com erros demasiadamente elevados, que podem prejudicar o andamento do projeto. Além disso, ensaios específicos para levantamento de cada tipo de parâmetro pode consumir um tempo relativamente alto.

Já o método da teoria da estimação paramétrica, consiste em encontrar os valores dos parâmetros ou ganhos, baseado em dados medidos empiricamente que contém componentes randômicos. Para obter a aproximação desejada, um estimador utiliza métodos, como por exemplo, mínimos quadrados não linear, gradiente descendente e outros, afim de se obter os valores requisitados até chegar em um valor mínimo para a função custo (soma dos quadrados dos erros). Isso permite que diversos parâmetros possam ser obtidos de uma só vez, com boa precisão, economizando tempo e agregando em confiabilidade (MATHWORKS, 2017; MONTGOMERY et al., 2010).

Neste trabalho será utilizado principalmente o método da teoria de estimação paramétrica, via softwares computacionais SIMULINK e MATLAB, utilizando a ferramenta ‘Parameter Estimation’ (PE), para estimar ‘R’, ‘L’, ‘B’, ‘J’, ‘Kt’ e ‘Ke’. Porém, para estimar quantidades de pares de polos e redução mecânica, serão feitos ensaios elétricos ou verificação física.

3.1 Redução mecânica

Durante a utilização do motor notou-se que a velocidade da roda era diferente da velocidade teórica calculada. A hipótese discutida mais plausível para tal, é que a máquina possuía uma redução mecânica, via engrenagens. Para confirmar, tal hipótese, foi necessário abrir o motor e conferir. Essa informação é importante, pois permite corrigir a velocidade do modelo do BLDC, conforme Figura 2.13 e ainda utiliza-se tal fator para encontrar número de polo do motor.

Assim, o motor (Marca Aikema, modelo 100SX, 36 V e 350 W) foi aberto e verificou-se que existe um sistema de redução chamada de planetária, na qual uma engrenagem

no centro, acoplada ao eixo do motor, chamada de pequena solar, é conectada a outras 3 engrenagens, chamadas de planetas, que por sua vez, os dentes destas engrenagens conectam-se a uma última engrenagem maior, a grande solar, conforme Figura 3.1. Dessa forma, encontrou-se que a redução tem uma proporção de 1:12,52, ou seja, a cada uma volta da engrenagem grande solar, a pequena solar necessita dar 12,52 voltas.



Figura 3.1: Representação de um sistema de redução mecânica planetária [Planetary...](#) (2014).

3.2 Número de par de polos

Sabe-se que o sensor hall interno ao motor, utilizado para detecção da posição do rotor, acusa somente o polo norte do ímã ou polo sul, dependendo do seu tipo. Assim, nota-se que em uma volta completa da máquina, o sensor hall irá gerar uma quantidade de pulso relacionado ao número de par de polo. Sabendo disso, para estimar o número de par de polos, utilizou-se da seguinte lógica:

- mede-se a frequência com que um sensor é acionado. Esse valor é dado em hertz, indicando quantas vezes esse sinal foi medido por segundo;
- multiplica-se por 60 vezes, para ser indicado em minutos;
- divide-se pela velocidade em RPM;
- existindo redução, divide-se o valor encontrado pela mesma.

No trabalho de [Moraes \(2015\)](#) foi realizado um ensaio com a mesma máquina, na qual obteve-se a frequência do sinal do hall igual a 400 Hz , a uma velocidade de 240

RPM. Utilizando da redução obtida na secção anterior, obtém-se o número de par de polos denotado *NPP* usando a expressão:

$$NPP = \frac{60 F_h}{Red n_m} \quad (3.1)$$

em que $F_h = 400$ é a frequência de pulso detectado do hall, $n_m = 240$ é a velocidade da máquina em RPM e $Red = 12,52$ é valor da redução mecânica entre velocidade do eixo e velocidade da roda. Assim, encontram-se 8 pares de polos, ou seja, 16 polos ao total.

Para confirmar o número de polos, aproveitando que o motor estava aberto para levantamento da redução (conforme Seção 3.1), foi possível contar manualmente a quantidade de polos existentes, marcando o primeiro polo, girando o pinhão da engrenagem pequena solar e contando a quantidade de ímãs que se passaram pela fenda de acesso. O resultado foi exatamente igual ao calculado, ou seja, 16 polos ao total.

3.3 Estimação de parâmetros

Para levantamento dos parâmetros mencionados, é necessário criar o modelo do sistema em algum software computacional, no qual este deverá responder a um ou vários sinais de entrada, retornando uma ou mais saídas, de acordo com o modelo. Em seguida, fornecer a trajetória de entrada e saída, para que o software possa, por meio de iterações matemáticas, convergir a valores dos parâmetros definidos que se aproximem da trajetória da curva medida com menor erro quadrático possível.

Neste trabalho, foi utilizado o modelo do motor BLDC, de acordo com a Figura 3.2, na qual sua entrada é a tensão de fase (número 3 na Figura 3.2) e as saídas são caracterizadas pela corrente de fase e velocidade angular da roda (número 1 e 2 na Figura 3.2). Dentro do bloco ‘Motor BLDC’ está representado o modelo do motor conforme Figura 2.13. Após o diagrama criado, especifica-se cada valor de acordo com o estimado previamente.

3.3.1 Obtenção da resposta de velocidade e corrente ao ensaio degrau.

Para obtenção do gráfico de velocidade e corrente em resposta ao ensaio degrau aplicado, na qual são utilizados na ferramenta PE, foi necessário aplicar de uma só vez a tensão máxima possível à máquina e registrar a forma de onda da velocidade e corrente. Para isso, configurou-se o acelerador do controlador para máxima tensão de referência, em seguida gerou-se uma interrupção via sensor hall para o motor partir. Assim, foi possível registrar o comportamento dos parâmetros desejados, partindo de velocidade nula até sua velocidade de equilíbrio para a tensão aplicada.

Para capturar as respostas ao degrau de velocidade e corrente, foi utilizado o osciloscópio Agilent Technologies, InfiniiVision MSO-X 2014A, 100 Mhz do laboratório InteGradEESC com as características mostradas nas Tabelas 3.1 e 3.2. Para medir a

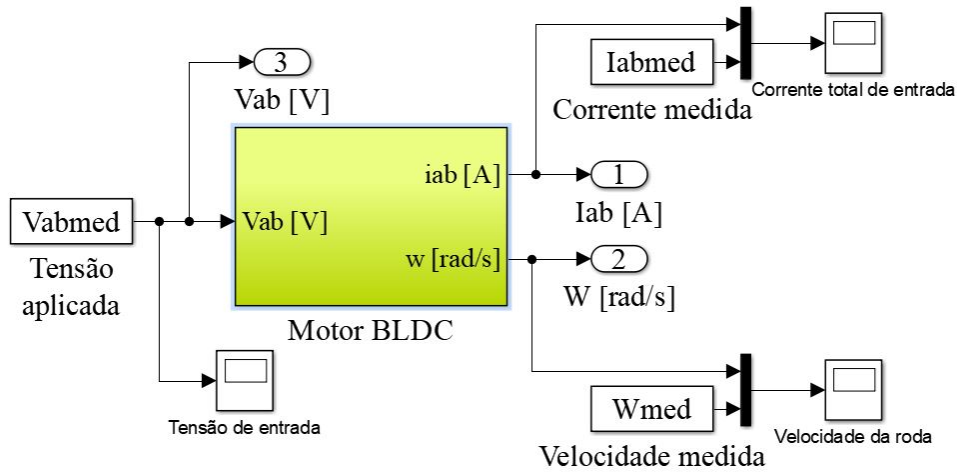


Figura 3.2: representação modelo simulink.

corrente foi utilizado uma ponta de corrente do Laboratório de Fontes Alternativas e Processamento de Energia (LAFAPE), Marca Yokogawa, modelo 701934, com terra isolado e ganho de 1 V/ 1 A.

Tabela 3.1: Configurações para captura de velocidade e corrente.

Tempo/Div	100ms	-
Aquisição	50kSa/s	Alta Resolução
Canal	Parâmetro	V/divisão
1	Corrente	5.40
2	Velocidade	0.5

Tabela 3.2: Configurações para captura de tensão e corrente.

Tempo/Div	100ms	-
Aquisição	50kSa/s	Alta Resolução
Canal	Variável	V/divisão
3	Corrente	5.40
4	Tensão	2

Tabela 3.3: Configuração para captura do PWM com acelerador fornecendo tensão de referência máxima.

Tempo/Div	50 μ s	-
Aquisição	50MSa/s	Alta resolução
Canal	Parâmetro	V/divisão
1	PWM	5.40

Apesar do osciloscópio ter 4 canais, foi necessário fazer as capturas separadamente, pois os terras deste osciloscópio não são isolados (exceto a ponta de corrente), o que poderia ocasionar um mal funcionamento do circuito de potência/sinal e potencial risco de ocasionar um curto circuito.

As curvas obtidas são mostradas no conjunto de Figura 3.3. Vale ressaltar que a reconstrução da forma de onda da tensão aplicada já está corrigida de acordo com ciclo de trabalho do PWM mostrado na Figura 3.3, de 50 % ($t = 126 \mu s$ e $t_{on} = 63 \mu s$).

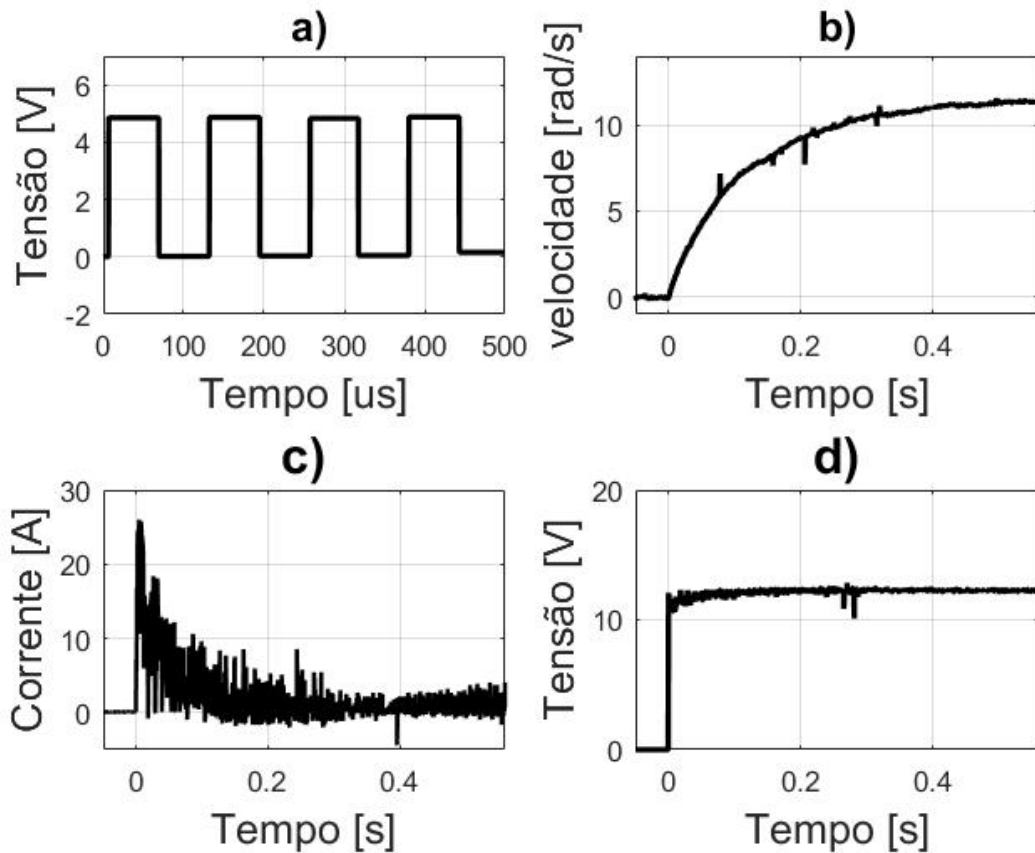


Figura 3.3: Respostas do ensaio degrau aplicado entre fases: (a) sinal PWM, (b) velocidade do motor BLDC, (c) corrente total e (d) tensão aplicada entre fases correspondente à variação do PWM.

3.3.2 Estimativas de ‘R’, ‘L’, ‘B’, ‘J’, ‘Kt’ e ‘Ke’

Para simulações iniciais, utilizou-se os valores de ‘R’, ‘L’, ‘B’, ‘J’, ‘Kt’ e ‘Ke’ obtidos em ensaios individuais, conforme Tabela 3.4. Ainda, utilizando todas as variáveis no Sistema Internacional de Medidas (SI), tem-se que $Kt = Ke = K$ (SMITH, 2015). Assim, obtiveram-se as respostas de corrente e tensão conforme as curvas da Figura 3.4.

Tabela 3.4: Estimativa inicial dos parâmetros.

Parâmetro	Valor	Unidade
R	250,1	$m\Omega$
L	250.2	μH
B	0.00001	(N.m.s)
J	0.0001	($kg.m^2$)
$K_t = K_e = K$	0,075	N.m/A e V/rad/s

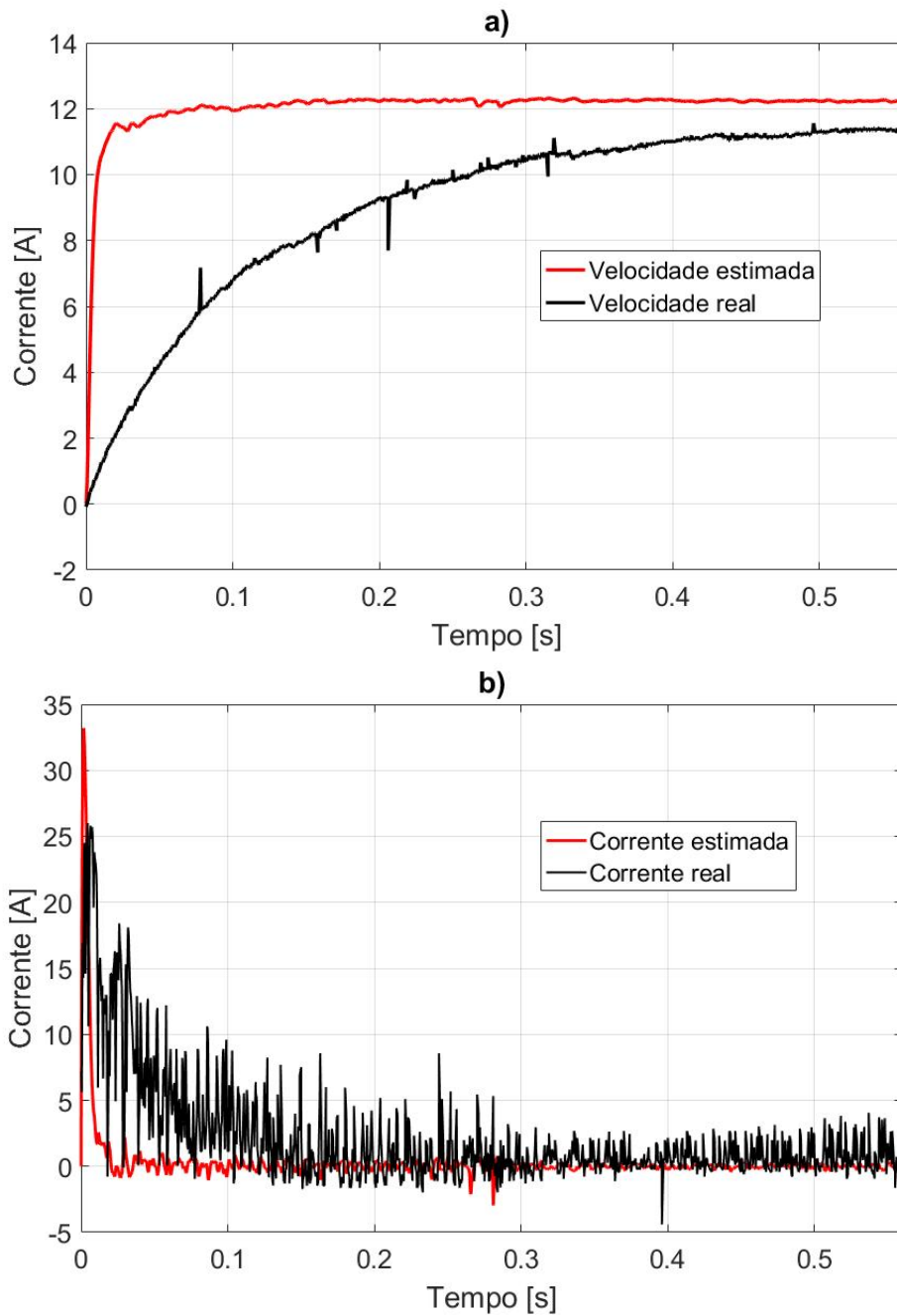


Figura 3.4: Comparação entre as respostas simulada e experimental usando parâmetros da Tabela 3.4. a) curvas de velocidade e b) curvas de corrente.

Dessa forma, percebe-se que as estimativas iniciais não resultaram em uma saída compatível com a resposta de corrente e de velocidade real. Para que seja possível obter valores estimados mais condizentes com a realidade, faz-se a estimativa via PE (ver tutorial e dicas no Apêndice C).

Após fornecer à ferramenta PE os valores de velocidade angular e corrente em resposta ao degrau, capturados conforme descrito na Seção 3.3.1, os valores de ‘R’, ‘L’, ‘B’, ‘J’ e ‘K’ foram estimados pela ferramenta, gerando o gráfico de saída do modelo de acordo com as curvas da Figura 3.5. Para isso, estimou-se primeiramente os parâmetros elétricos, resistência e indutância entre fases, bem como a constante K. Posteriormente, estimou-se os parâmetros mecânicos, atrito viscoso e momento de inércia para obter a resposta de velocidade.

Ao observar a gráfico de velocidade (curva ‘a’ da Fig 3.5), percebe-se que os parâmetros estimados conseguem retornar uma resposta de velocidade próximo ao esperado, mesmo não estando o mais otimizado possível, já que seu desvio médio absoluto (DMA) entre as duas curvas é de 3,5 %. Quanto à corrente (curva ‘b’ da Fig 3.5), percebe-se que o pico da curva real chega próximo à 25 A, enquanto o valor de pico simulado retorna um valor de 23 A. Além disso, o valor de corrente RMS medido real, em regime, é de 1,08 A, já para o valor em regime da curva simulada ficou por volta de 0,94 A, ficando próxima da real. Ainda, percebe-se visualmente que a dinâmica da curva simulada consegue acompanhar bem a dinâmica da curva real. Dessa forma, considera-se satisfatório os resultados dos parâmetros estimados. Os valores podem ser vistos na Tabela 3.5.

Tabela 3.5: Estimativa via PE.

Parâmetro	Valor	Unidade
R	467,78	$m\Omega$
L	312,0	μH
B	0,00000141	(N.m.s)
J	0,00173	($kg.m^2$)
$K_t = K_e = K$	0,087	N.m/A e V/rad/s

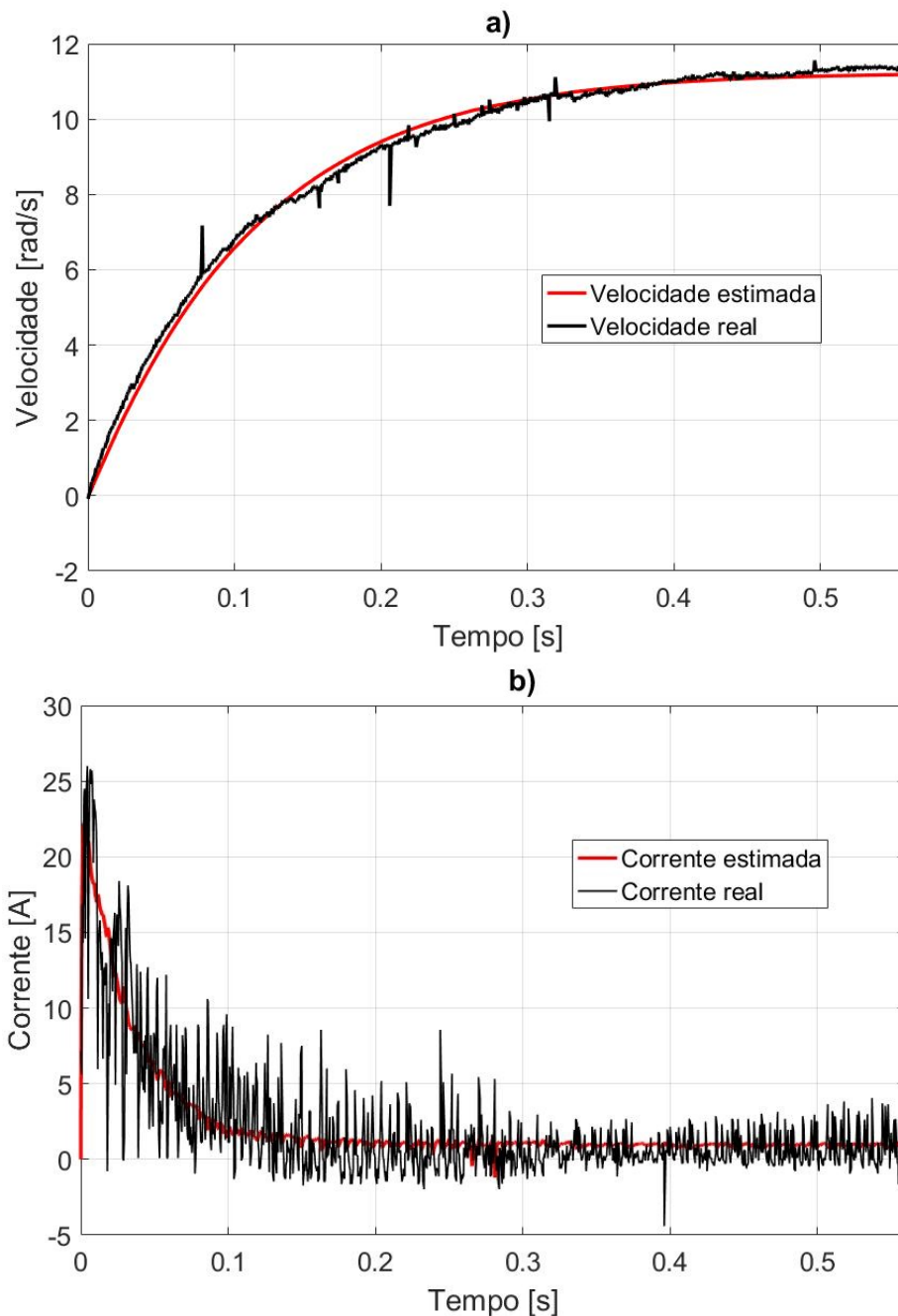


Figura 3.5: Comparação entre respostas simulada e experimental usando a resposta ao degrau de velocidade e corrente como entradas à ferramenta PE, estimando todos parâmetros. a) curvas de velocidade e b) curvas de corrente.

3.4 Modelo de simulação das principais partes do sistema

Com a finalidade de simular as principais partes do sistema em funcionamento, incluindo a ponte trifásica e comando, foi implementado o modelo para simulação em softwares integrados: Simulink, Matlab e SimScape. Do SimScape foram utilizados blocos padrões para implementar a ponte trifásica inversora (utilizando MOSFETs) e a máquina BLDC, conforme Figura 3.6.

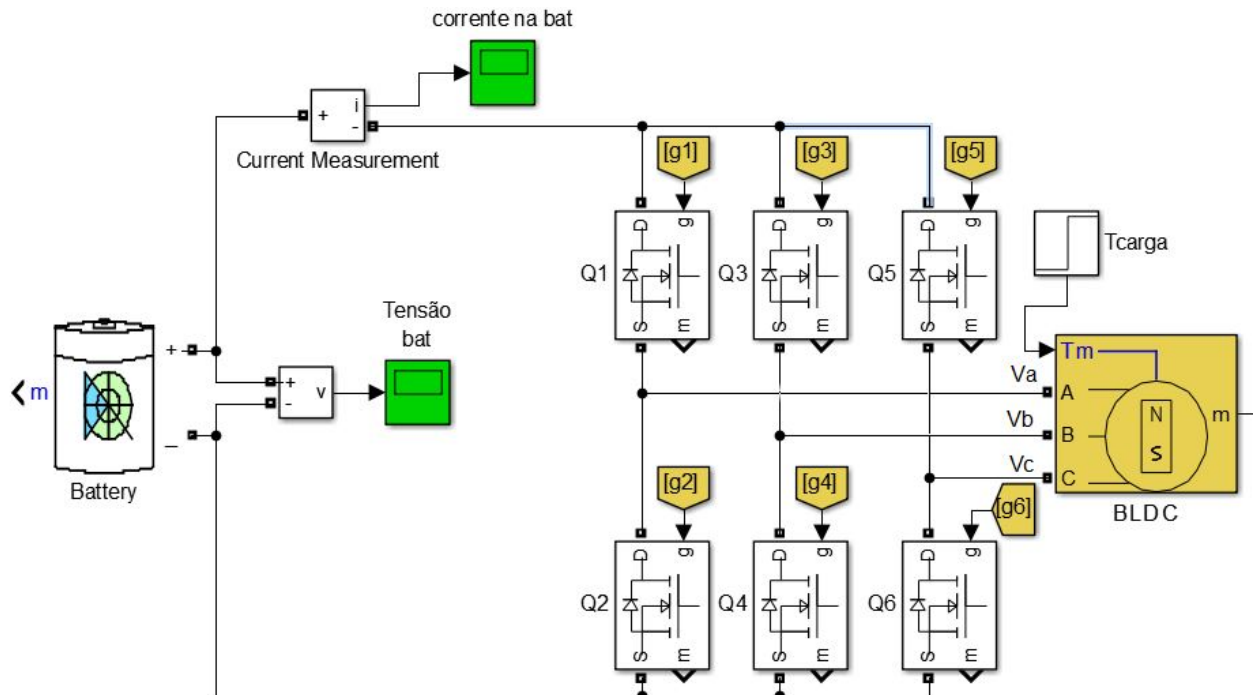


Figura 3.6: Representação ponte trifásica inversora e máquina BLDC.

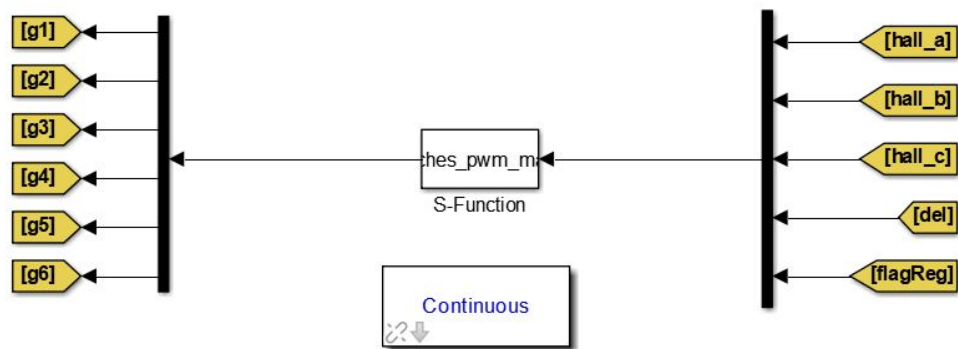


Figura 3.7: Representação comando do BLDC.

No Matlab, a parte de comando foi implementada via transferência de código para bloco no ambiente computacional do Simulink chamado 'S-function'. Nesse ambiente foi

escrito o código que faz a lógica de acionamento tanto do modo motor, quanto do modo de regeneração. O código pode ser visto no Apêndice D. No Simulink, os blocos de comando foram arranjados de acordo com a Figura 3.7. As entradas são o sinal de posição dos sensores Hall (A, B e C), sinal de PWM e sinal que indica o momento da regeneração. As saídas são sinais que vão diretamente para os gates dos MOSFETs.

Ainda no Simulink, foi implementada uma lógica que escolhe qual modo a máquina irá operar (Figura 3.8), deixando passar o sinal de ação para modo motor ou regeneração. Em seguida, o sinal entra em um bloco gerador de PWM que, por sua vez, vai para a ‘S-function’.

Para melhor controlar a velocidade do motor e garantir o atendimento de restrições de corrente é implementado uma estrutura de controle de malha dupla de acordo com diagrama apresentado em Oliveira et al. (2015). Tal estrutura de controle de malha dupla foi projetada no ambiente Simulink conforme Figura 3.10.

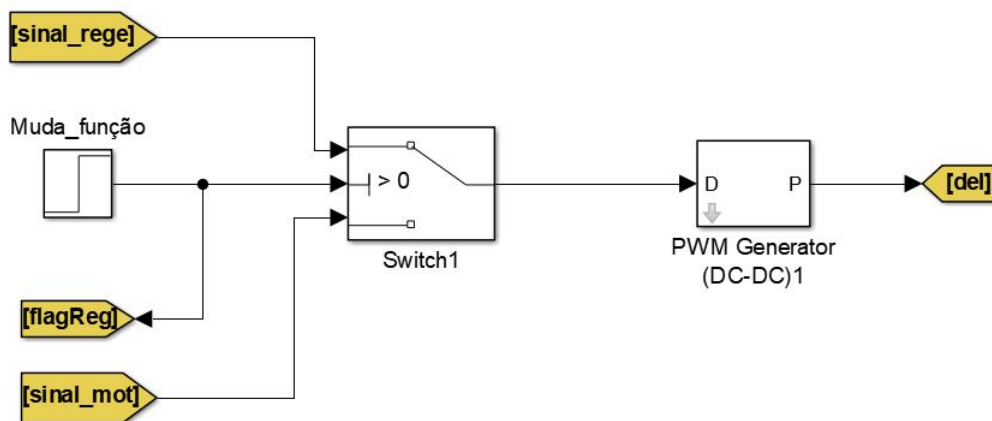


Figura 3.8: Representação do bloco que faz a alternância entre modo motor e regeneração.

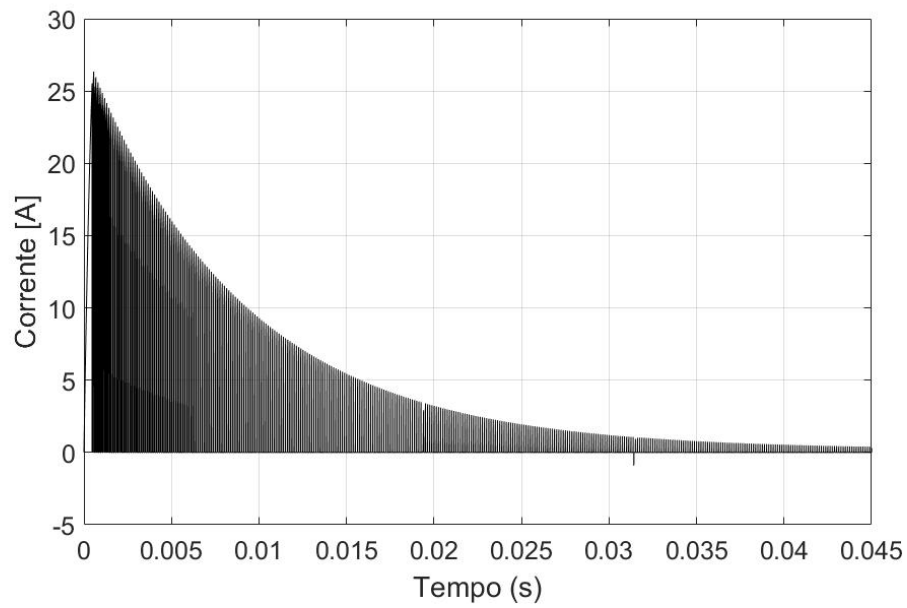


Figura 3.9: Representação da corrente de partida.

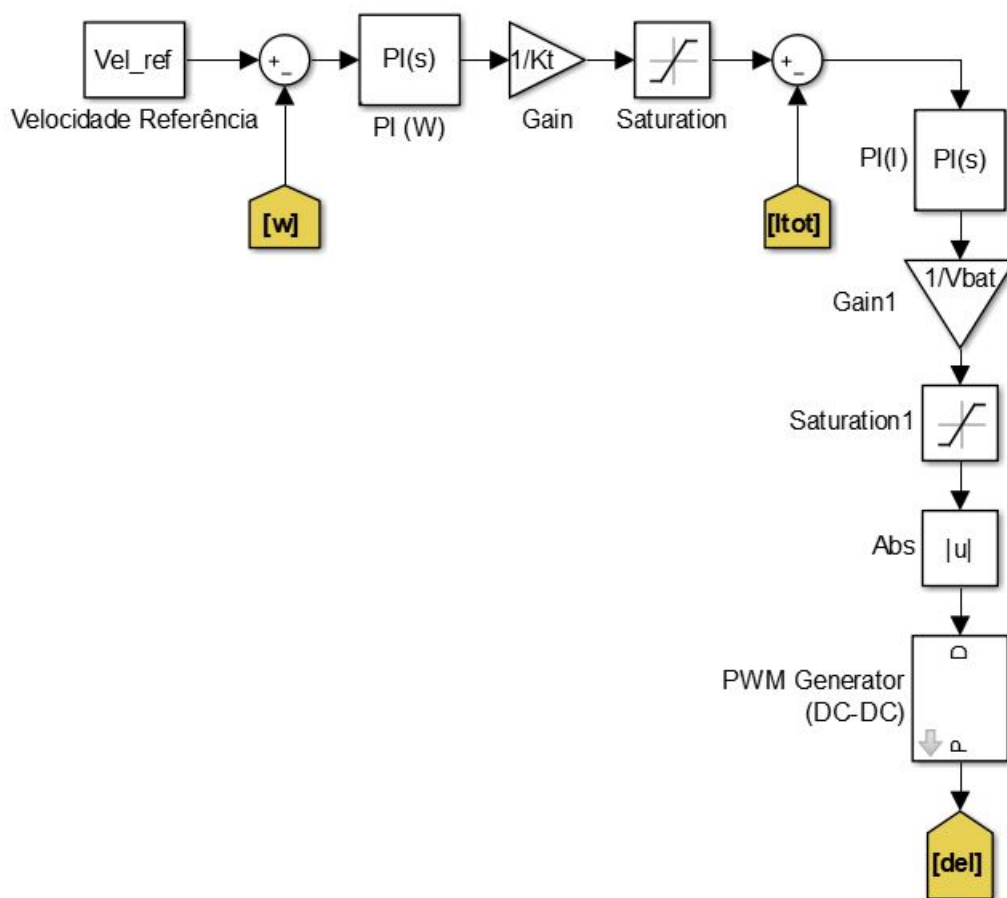


Figura 3.10: Representação da malha de controle dupla para modo motor.

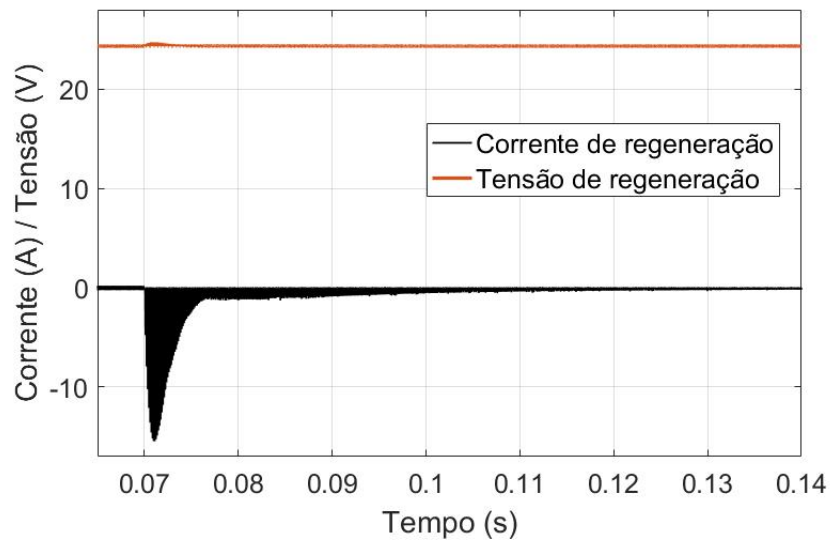


Figura 3.11: Representação da corrente e tensão de regeneração.

Os valores obtidos para o modelo da máquina BLDC mostrados na Tabela 3.5 foram utilizados para simular o sistema. É possível verificar o bom funcionamento da lógica de chaveamento, já que a máquina BLDC responde à entrada requisitada, nesse caso por volta de 11,7 rad/s (cerca de 112 RPM) e tem magnitudes de corrente de partida (Figura 3.9) parecida conforme levantada nas Figuras 3.3 e 3.5. Além disso, é possível verificar e prever a forma de onda da corrente e tensão durante a regeneração (ver Figura 3.11).

4 MATERIAIS E METODOLOGIA PARA A PARTE PRÁTICA

Para que seja possível o estudo e verificação da frenagem regenerativa na prática é necessário a implementação de um sistema de potência e sinal para gestão de acionamento da máquina. Para isso, o sistema foi estruturado de acordo com o diagrama da Figura 4.1, onde um conjunto de bateria de Chumbo-Ácido alimenta a placa de sinal que, por sua vez, recebe sinais externos (acelerador) e da máquina (sensor Hall). Em seguida, são enviados sinais para os componentes da placa de potência a qual acionam a máquina de acordo com o modo desejado. Assim, nas Seções 4.1 - 4.3, os elementos que compõe cada um dos blocos da Figura 4.1 são brevemente apresentados.

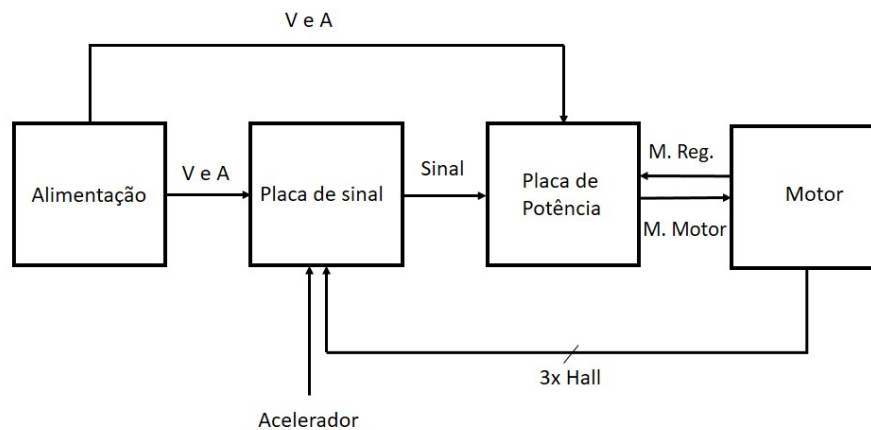


Figura 4.1: Representação das principais partes do sistema.

4.1 Alimentação e máquina BLDC

O bloco de alimentação do sistema é composto por duas baterias em série (UNICOBA, modelo Unipower), de 12 V nominais cada, totalizando 24 V nominais. Apesar do motor ser de 36 V nominais, optou-se por uma tensão de bateria menor do que a nominal, por precaução, já que o sistema iria ser utilizado no protótipo da equipe EESCuderia Mileage, na competição ‘Shell Eco-marathon 2017’, poucos dias após os testes aqui apresentados. A principal função deste componente é fornecer tensão e corrente para alimentação de todos os componentes dos sistema, desde o menor resistor até aos enrolamentos motor. Outras características da bateria podem ser vistas na Tabela 4.1

Tabela 4.1: Principais características e parâmetros da bateria utilizada: modelo Unipower, fabricante UNICOBA.

Tipo	Selada, regulada por válvula
Célula	Chumbo-ácido
Tensão nominal	12 V
Capacidade	7 Ah

Quanto a máquina BLDC, foi utilizada neste projeto o modelo 100SX, da fabricante Aikema, de 36 V e 350 W. Sua representação pode ser vista na Figura 4.2 e suas características na Tabela 4.2



Figura 4.2: Representação da máquina utilizada.

Tabela 4.2: Principais características da máquina BLDC modelo 100SX Rear Disc+7S.

Parâmetro	Valor	Unidade
Tensão	36	V
Potência	350	W
Redução mecânica	1:12,51	-
Quantidade de polos	16	Polos
Rated efficiency	80%	-

4.2 Placa de sinal

A placa de sinal é basicamente formada por abaixadores de tensão, microcontrolador, buffer, sensor de velocidade e opto acopladores (ver placa implementada na Figura 4.3).

Assim, essa placa é responsável por receber sinais externos e do motor para que esse seja processado por um microcontrolador e disparado para a placa de potência. Porém, para que haja um isolamento entre ambas placas e para que ruídos gerados pela placa de potência e pelo o motor não interfiram no recebimento e processamento do sinal, são utilizados circuitos opto acopladores. Ainda, para que os componentes principais da placa de sinal fossem totalmente isolados da placa de potência, foi utilizado o conversor 1:1 DC - DC com terra isolado da marca RE-0505S, da fabricante RECOM.

A placa de sinal pode ser representada pelo diagrama de blocos da Figura 4.4, em que recebe 5 Volts de entrada (mesmo terra da bateria, chamado de +5 VA), passando para o conversor DC-DC com terra isolado (com terra diferente da bateria, chamado +5 VB). Em seguida a alimentação é abaixada para 3,3 V, para que possa fornecer tensão ao microcontrolador. Assim, esse componente recebe os sinais externos e dos sensores Hall do motor, processa e envia o sinal de PWM de acordo com o modo equivalente. Como o sinal de saída do microcontrolador é de 3,3 V e os optos acopladores trabalham em 5 V, é necessário passar por um buffer para que haja o condicionamento deste sinal. Em seguida, o opto acoplador isola e envia o sinal para os *gate drivers*, na placa de potência.

Vale ressaltar que o microcontrolador escolhido para essa aplicação foi o dsPIC33FJ128MC802, fabricado pela *Microchip*. Essa versão do dsPIC possui 8 saídas geradoras de PWM, o que facilita seu uso em aplicações que envolvem motores. Quanto a frequência do PWM, o autor [Moraes \(2015\)](#) afirma que a frequência do PWM deve ser ao menos 10 vezes maior que a frequência de rotação o motor e para esse caso, escolheu-se uma frequência de 8 kHz. Mais características do microcontrolador pode ser visto na Tabela 4.3. Os modelos e fabricantes dos componentes utilizados na placa de sinal podem ser vistos na Tabela 4.4.

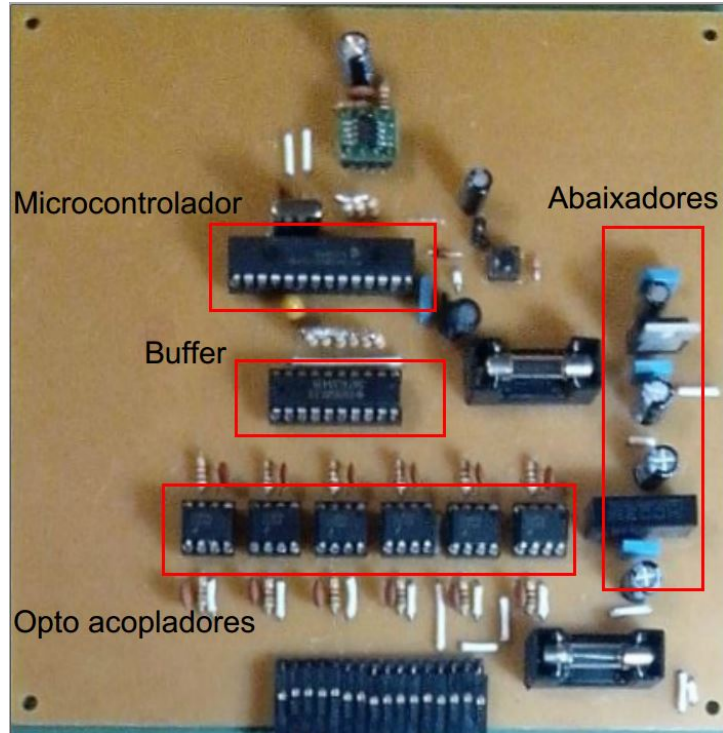


Figura 4.3: Foto da placa de sinal implementada.

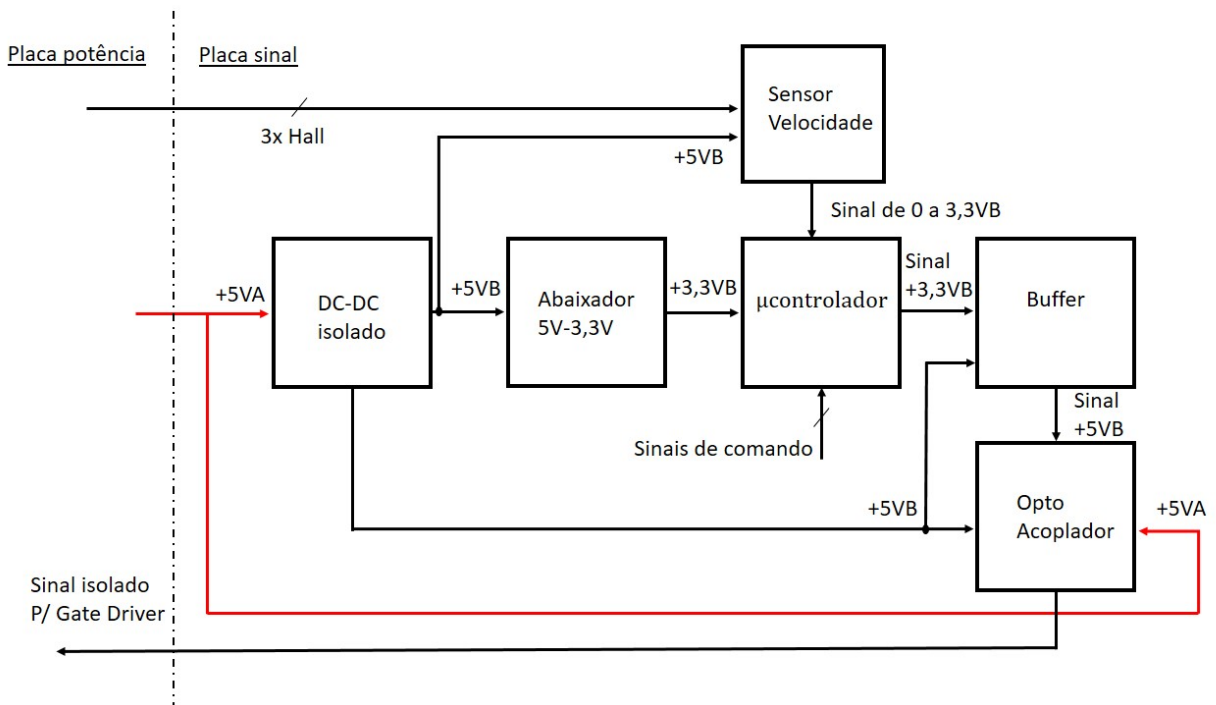


Figura 4.4: Representação de blocos da placa de sinal.

Tabela 4.3: Características do microcontrolador dsPIC33FJ128MC802.

Encapsulamento	SDIP
Memória <i>flash</i> de programa	128Kbytes
Conversor analógico-digital	6 pinos — 16-bit
Módulo PWM <i>Motor Control</i>	6 saídas complementares ou independentes
UART	2 módulos
CPU	40 MIPS 16-bit

Tabela 4.4: Modelo e fabricante dos principais componentes da placa de sinal.

Componente	Modelo	Fabricante
Buffer	74LS541N	Texas Instruments
Opto acoplador	6N137	VISHAY
Sensor de velocidade	MC33039	ON Semiconductor
Conversor DC-DC isolado	RE-0505S	RECOM
Abaixador de 5V para 3,3V	UAM78m33	Texas Instruments

4.3 Placa de potência

A placa de potência, por sua vez, tem função de receber diretamente o fornecimento de energia da fonte de alimentação e distribuir entre os demais componentes do sistema de acordo com sinais de comando vindos da placa de sinal. Ainda, essa placa abriga MOSFETs e diodos de roda livre (elementos da ponte trifásica inversora), componentes principais de potência responsáveis pela interface direta entre bateria e máquina. Além desses dois componentes, a placa de potência abriga abaixadores de tensão e *gate drivers*. A implementação da placa de potência pode ser vista na Figura 4.5.

Quanto aos modelos dos componentes utilizados na ponte trifásica inversora, foram utilizados diodos de roda livre ultra-rápidos do modelo MUR440, que são fabricados pela *On Semiconductor*, com valores de 50 ns de tempo de recuperação reversa (ver outros valores de folha de dados na Tabela 4.5).

Tabela 4.5: Principais valores de datasheet do diodo de roda livre MUR440 do fabricante On Semiconductors.

Parâmetro	Valor	Unidade
Tensão reversa	400	V
Corrente de pico	110	A
Corrente nominal	4	A
Tempo de recuperação reversa	75	ns
Tempo de recuperação frontal	50	ns

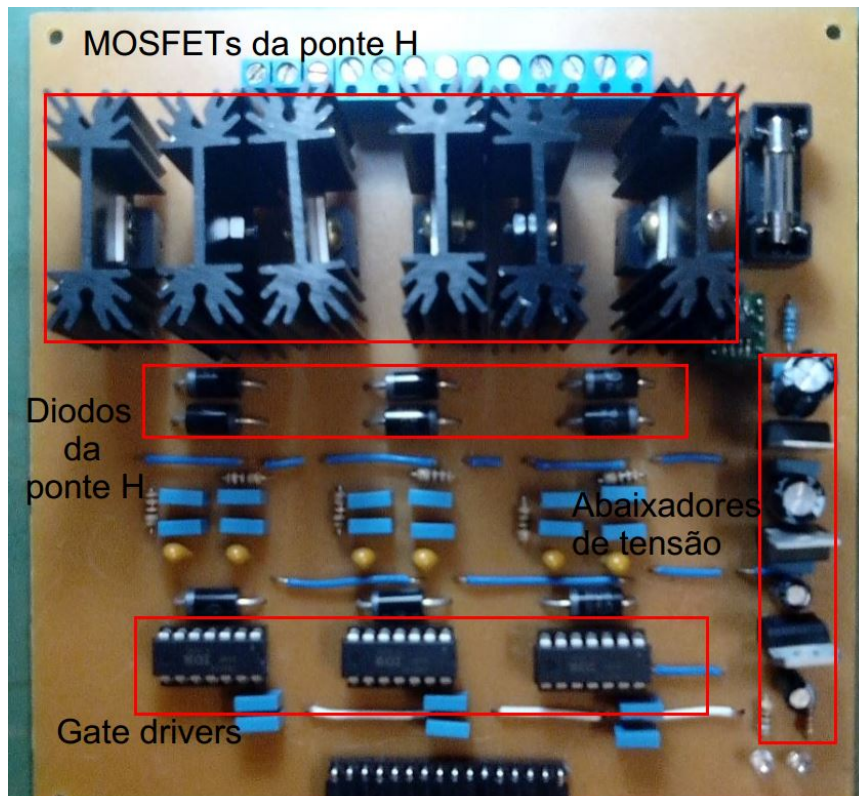


Figura 4.5: Foto da placa de potência implementada.

Os diodos de roda livre desempenham função importante, pois permitem extinguir a tensão reversa com agilidade de uma carga indutiva (enrolamento do rotor da máquina) que são induzidas quando este tipo de carga é chaveado. Além disso, fornecem um caminho para a corrente quando há regeneração. Já os MOSFETs utilizados são de modelo IRFB3207, fabricados pela *International Rectifier*, com resistência interna de $3,6\text{ m}\Omega$, o que contribui para uma melhor eficiência da ponte trifásica inversora e, consecutivamente, do sistema, já que toda corrente drenada para a máquina passa por esses componentes. Outras características do IRFB3207 podem ser vistas na Tabela 4.6.

Quanto ao *gate driver*, sua função é receber pequenos sinais de entrada referentes ao PWM e comandar os gates dos MOSFETs de potência de acordo com o ciclo de trabalho definido pelo microcontrolador. O modelo utilizado é o IR2110, fabricado pela *International Rectifier*, capaz de comandar dois MOSFETs ao mesmo tempo (High e Low de um braço de uma ponte trifásica).

A placa de potência pode ser simplificada representada pelo diagrama de blocos da Figura 4.6, onde o elemento abaixador de tensão LM2575 (fabricante *Texas Instruments*, que suporta tensão máxima de entrada de até 45 V), recebe a tensão de entrada e abaixa para 15 V. Esse nível de tensão (15 V) é utilizado no *gate driver* para condicionar o sinal dos gates dos MOSFETs. Em seguida, a tensão é abaixada mais uma vez por um LM7805, fabricado pela Unisonic Technologies, na qual essa tensão também

é utilizada pelo o *gate driver*, além de ser enviada à placa de sinal. Já os *gates drivers* recebem os sinais isolados de PWM providos do opto acoplador e acionam os MOSFETs para que estes possam ser chaveados de acordo com a lógica a ser executada e com o sinal de referência dos halls. Com isso, a corrente pode ser drenada da bateria para a máquina BLDC.

Tabela 4.6: Principais valores de datasheet do MOSFET IRFB3207 da International Rectifier.

Parâmetro	Valor	Unidade
Resistência Drain -Source	3,6	$m\Omega$
Tensão máxima drain - source	75	V
Máxima corrente pulsada	720	A
Corrente nominal (25 °)	180	A
Tensão máxima gate-source	+/-20	V

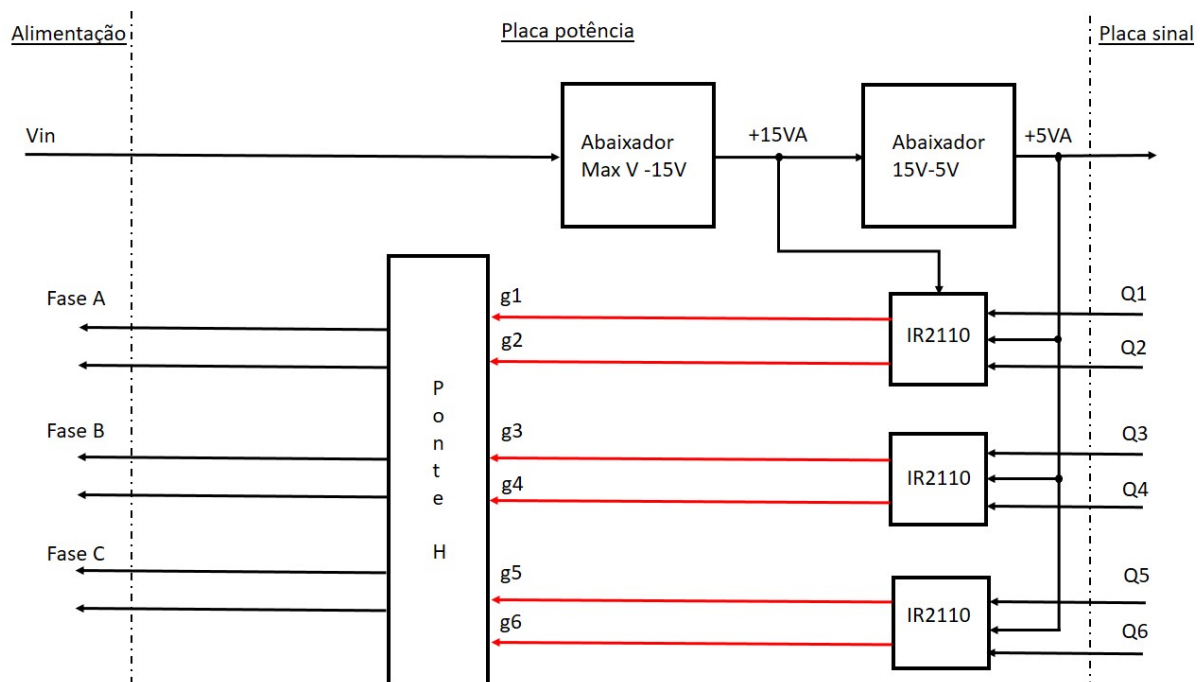


Figura 4.6: Representação de blocos da placa de potência.

Por fim, pode se observar na Figura 4.7 as placas de sinal e de potência montadas em sua forma final, antes de ser embarcada no protótipo. Ainda, o sistema montado para testes em bancada pode ser observado na Figura 4.8.

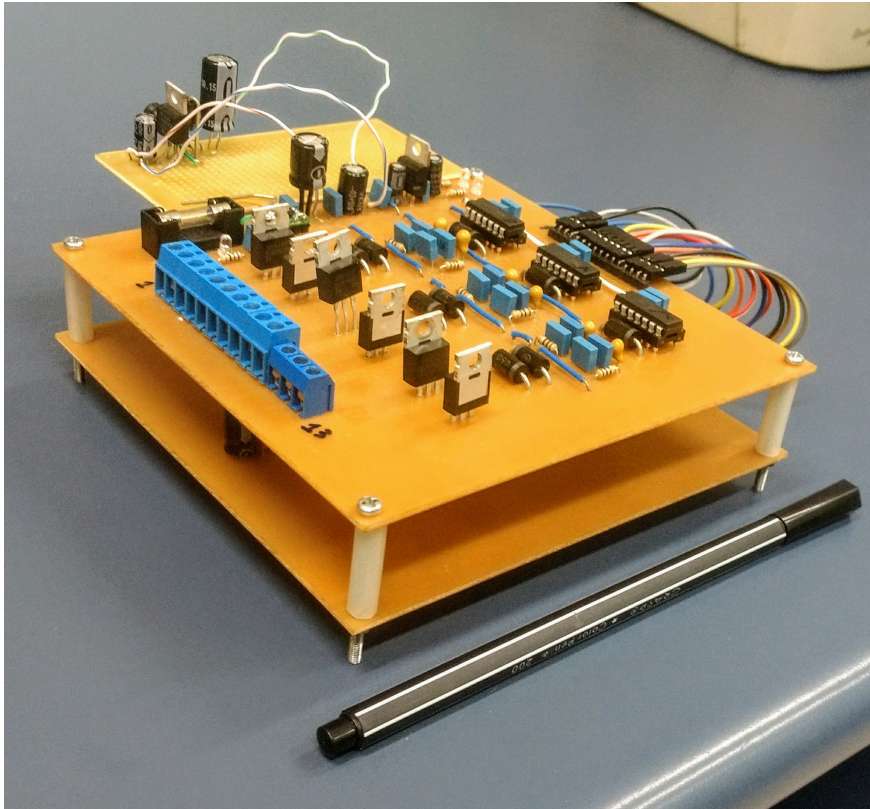


Figura 4.7: Foto das placas de sinal e de potência montadas.

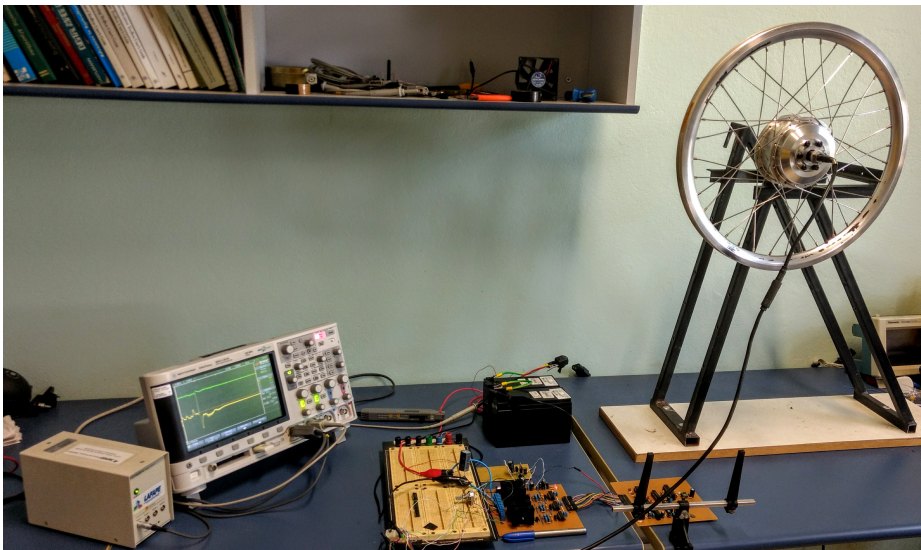


Figura 4.8: Foto da bancada de testes.

4.4 Métodos

Primeiramente, com a finalidade de verificar a frenagem regenerativa, programou-se o microcontrolador para acionar a máquina no modo motor durante 10 segundos, com acelerador na máxima tensão de referência (PWM de 95 %) e em seguida alternou-se para o modo de regeneração.

Com a frenagem verificada, manteve-se o acionamento do modo motor durante 10 segundos para que a máquina pudesse chegar em velocidade estável, passou-se a variar o PWM na faixa de 10 % até 95 % e foram registradas as formas de onda da tensão e da corrente, com configuração de captura conforme Tabela 4.7, para que depois pudesse ser calculada a energia total regenerada, conforme:

$$E = W\Delta s \quad (4.1)$$

em que W é o produto de tensão e corrente no tempo:

$$W = V_{fonte}I_{fonte} \quad (4.2)$$

em que V_{fonte} é a tensão da fonte de alimentação e I_{fonte} é a corrente que entra ou sai da fonte de alimentação.

Tabela 4.7: Características do osciloscópio (Agilent Technologies, InfiniiVision MSO-X 2014A, 100Mhz) e configurações para captura de tensão e corrente.

Tempo/Div	25ms	-
Aquisição	200kSa/s	Resolução Normal
Canal	Parâmetro	V/divisão
1	Corrente	4.30
2	Velocidade	2

Com isso, será possível verificar uma faixa de valores de PWM em que a energia regenerada é maior que em outras faixas. Além disso, capturou-se a forma de onda da corrente e tensão para a partida e para operação em regime. Com isso, utilizando ainda a Equação 4.1, é possível estimar a energia consumida de acordo com o tempo, para que posteriormente possa ser comparada o caso de um percurso sem FR e outro com FR.

Para fazer a estimativa da energia consumida durante um percurso fictício estável (em que não há variação no terreno e nem na carga), é necessário estimar a energia consumida pela máquina na partida e em regime, utilizando as curvas de cada modo capturadas pelo osciloscópio. Para estimativa de corrente de partida é necessário verificar o tempo em que a corrente leva desde seu pico até sua acomodação ($\Delta s_{partida}$) e calcular a energia consumida nesse intervalo usando:

$$E(partida) = V_{fonte}I_{fonte}\Delta s_{partida}. \quad (4.3)$$

A energia média consumida por segundo, correspondente à operação em regime, pode ser calculada utilizando:

$$E_m = \frac{E(regime)}{\Delta s_{regime}} \quad (4.4)$$

em que Δs_{regime} é a variação de tempo em que a corrente fica em regime na janela amostral e o valor de $E(regime)$ é dado por:

$$E(regime) = V_{fonte} I_{fonte} \Delta s_{regime}. \quad (4.5)$$

Assim, a energia total $E(t)$ para um dado tempo t , em segundos, pode ser calculado conforme:

$$E(t) = E(1) + (t - 1)E(regime). \quad (4.6)$$

A estimativa feita para a energia do percurso de regeneração denotada E_r segue o mesmo raciocínio, porém subtrai a energia total regenerada denotada $E(FR)$ como segue:

$$E_r(t) = E(1) + (t - 1)E(2) - E(FR). \quad (4.7)$$

5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

5.1 Forma de onda da corrente regenerada

Com o sistema montado em bancada, com condições descritas na Seção 4.4 foi possível verificar na prática a forma de onda da corrente e da tensão, conforme Figura 5.1.

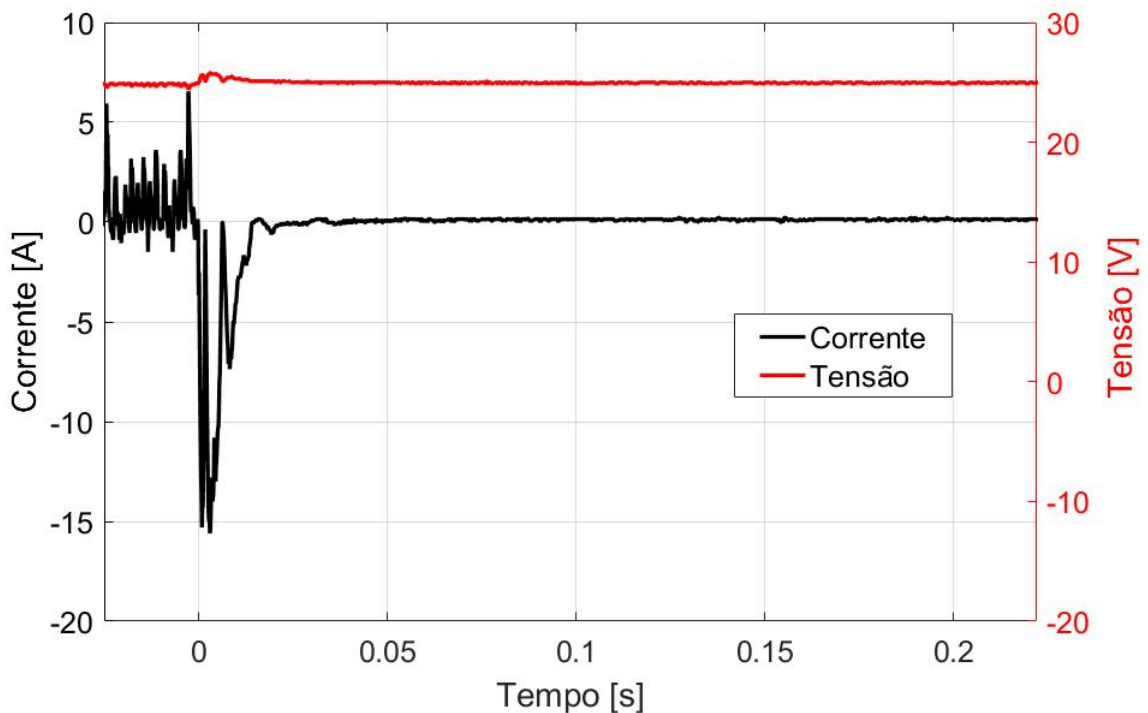


Figura 5.1: Verificação forma de onda da corrente e tensão de regeneração.

Com isso, percebe-se que a forma de onda de ambas condizem com a simulação feita e mostrada na Figura 3.11, já que os níveis de corrente e tensão alcançaram valores próximos uns dos outros, para uma mesma condição.

5.2 Condição para maior regeneração de energia

A partir de então, passa-se para o próximo passo: capturar a resposta de corrente e tensão para diversos ciclos de PWM, sem e com capacitor de entrada ($2200 \mu\text{F}$), para a técnica de 3 *switches* e 1 *switch*. Então, ao final, verifica-se qual condição que proporciona uma melhor regeneração.

5.2.1 3 *switches*

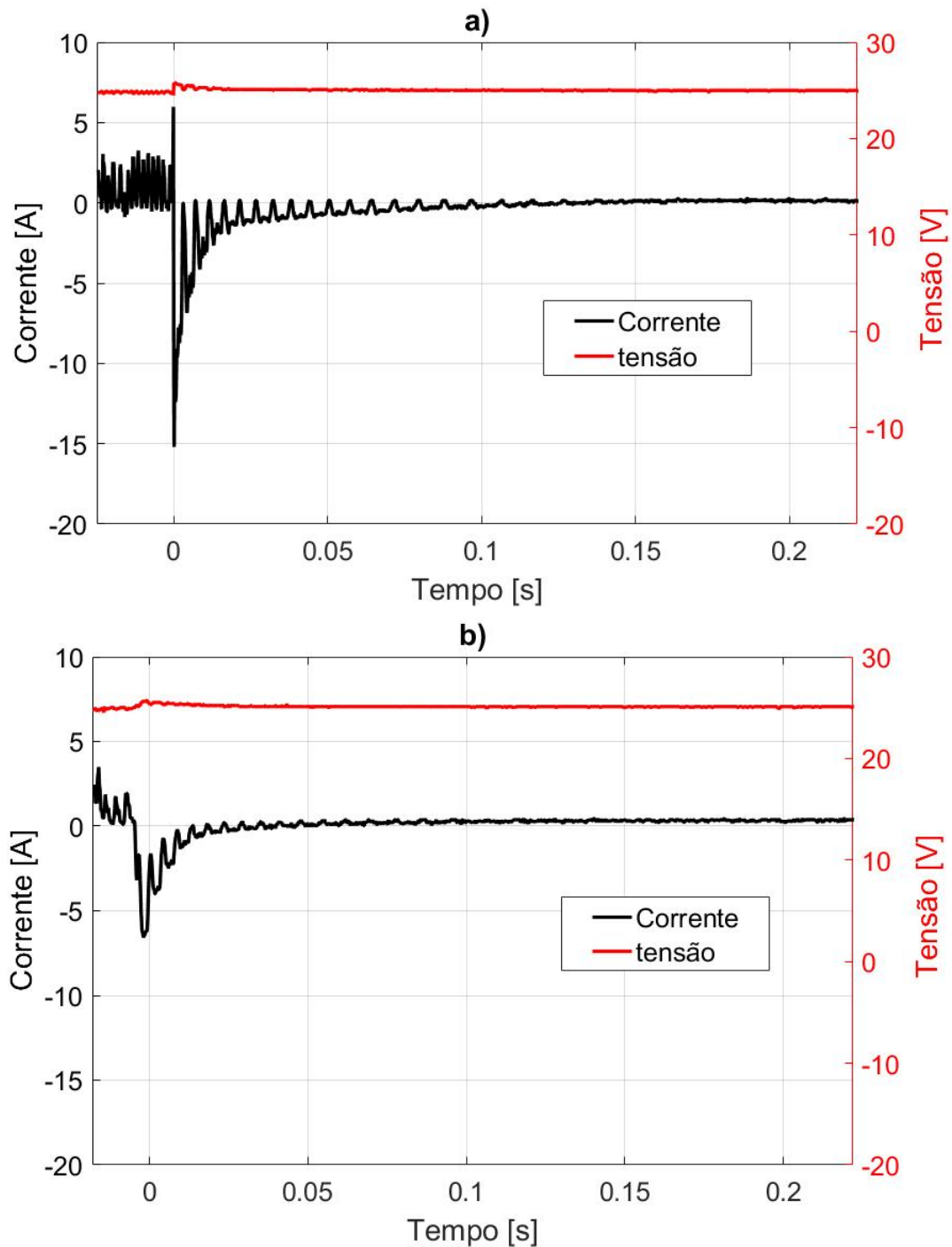


Figura 5.2: Representação das ondas de tensão e corrente capturadas para o ciclo de trabalho $\delta = 0.6$, técnica de 3 *switches*: a) sem capacitor b) com capacitor de $2200 \mu F$.

A técnica aqui utilizada é explicada na Seção 2.2, em que os três MOSFETs pares são chaveados simultaneamente. As formas de ondas sem capacitor e com capacitor podem ser vistas na Figura 5.2.

Os valores de regeneração capturados podem ser vistos a seguir na Figura 5.3 para o caso sem capacitor e com capacitor de $2200 \mu F$ em paralelo com a fonte.

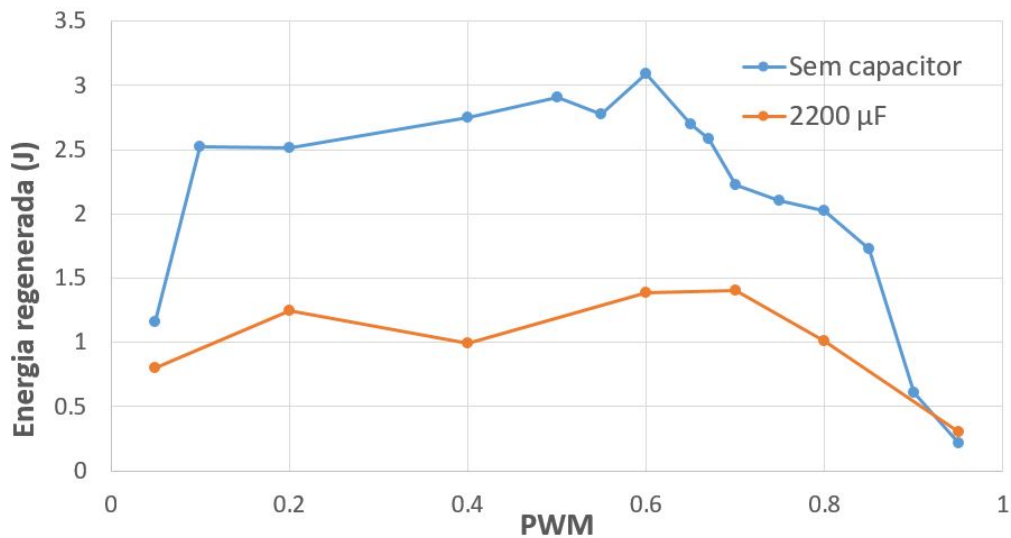


Figura 5.3: Gráfico de energia regenerada de acordo com o PWM aplicado para a técnica de 3 *switches*, sem e com capacitor de 2200 μF .

Dessa forma, é possível verificar que sem o capacitor em paralelo com a fonte de entrada (bateria) consegue-se um valor maior de energia regenerada, conforme curva azul da Figura 5.3. Porém, ao utilizar o capacitor, verifica-se uma curva mais contínua. Além disso, é possível observar que de $\delta = 0,1$ até $\delta = 0,6$ para o caso sem capacitor e $\delta = 0,2$ até $\delta = 0,7$ com capacitor, há uma faixa mais vantajosa para trabalhar em que uma quantidade maior de energia é regenerada.

5.2.2 1 *switch*

A técnica aqui utilizada é explicada na Seção 2.2, em que somente um MOSFET par é chaveado, de acordo a posição do rotor. As formas de ondas sem e com capacitor podem ser vistas na Figura 5.4. Assim como para a regeneração utilizando a técnica de 3 *switches*, quando utiliza-se a técnica de 1 *switch* sem capacitor a energia regenerada é maior, como pode ser visto nas curvas da Figura 5.6. Porém, ainda como no caso anterior, quando utiliza-se o capacitor a forma de onda da corrente e tensão apresenta-se mais contínua.

Em geral, para as curvas da Figura 5.6, verifica-se um resultado parecido com a energia regenerada quando é utilizada a técnica de 3 *switches*, em que comparando-se os valores absolutos de regeneração ambos apresentam similaridades. Mas, utilizando a técnica de 3 *switches* percebe-se uma constância maior para a faixa de PWM entre $\delta = 0,1$ até $\delta = 0,8$. Para a técnica de 1 *switch*, no modo sem capacitor, verifica-se a constância entre $\delta = 0,1$ até $\delta = 0,65$. Já o pico de energia regenerada foi quando utilizou-se $\delta = 0,2$ (Figura 5.5) para técnica de 1 *switch*.

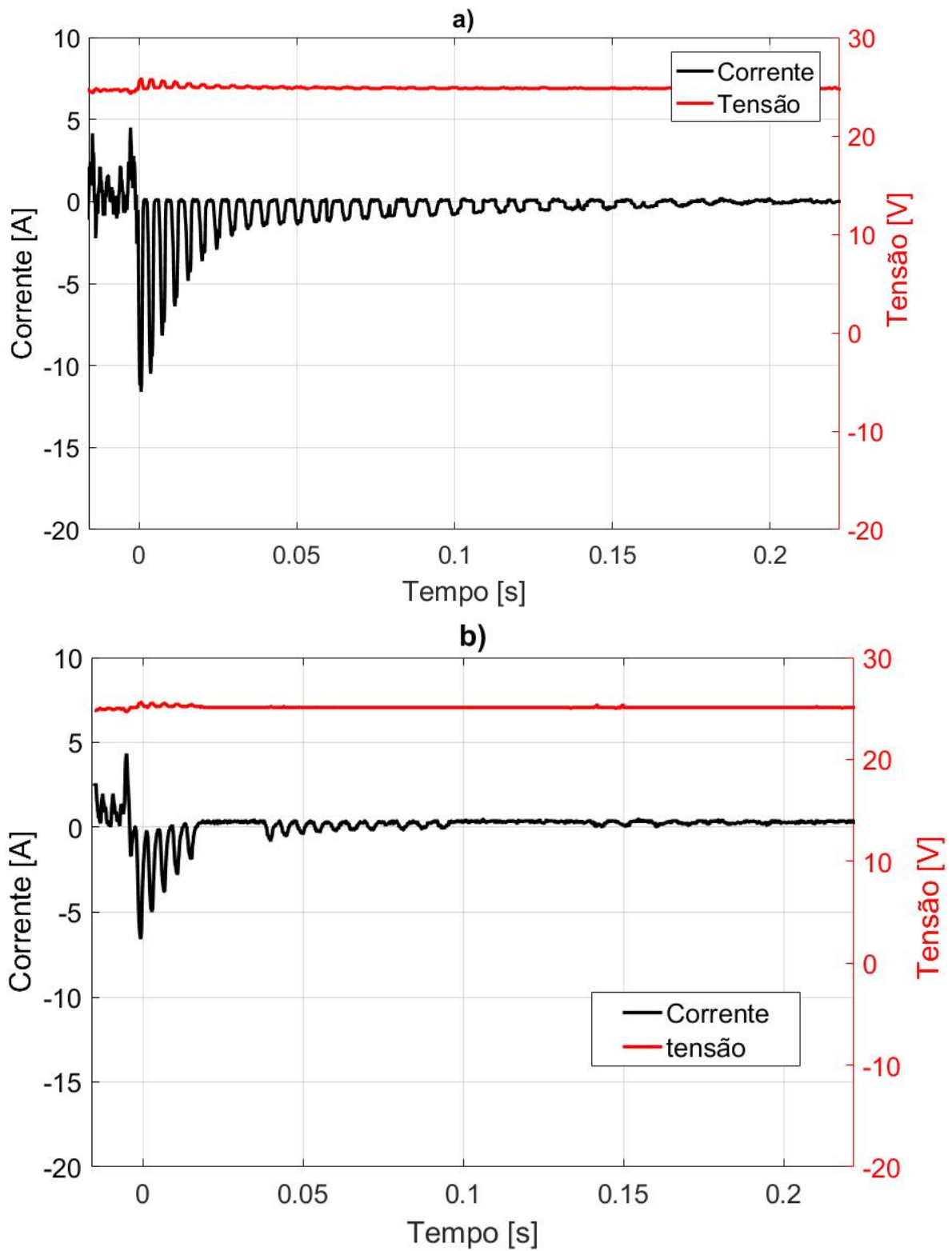


Figura 5.4: Representação das ondas de tensão e corrente capturadas para o ciclo de trabalho $\delta = 0.6$, técnica de 1 switch: a) sem o capacitor b) com capacitor de $2200 \mu F$.

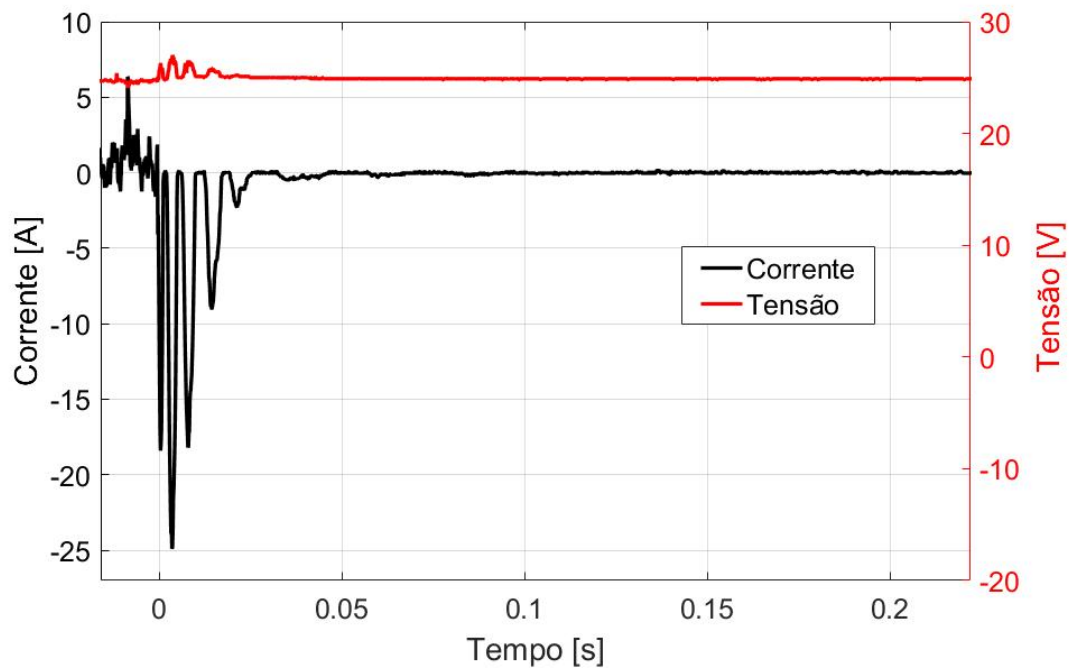


Figura 5.5: Representação das ondas de tensão e corrente capturadas para o ciclo de trabalho de $\delta = 0,2$, técnica de 1 switch.

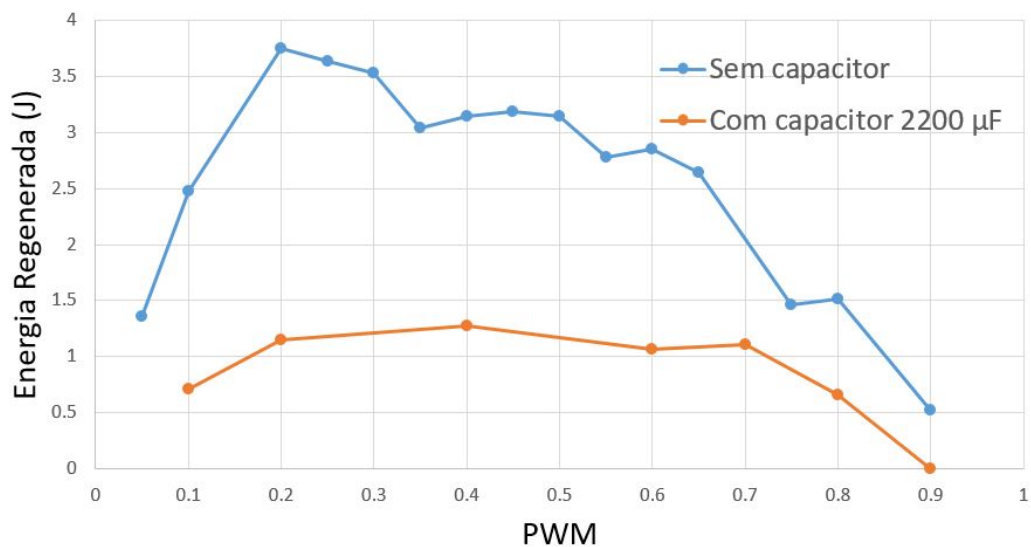


Figura 5.6: Gráfico de energia regenerada de acordo com o PWM aplicado e técnica de 1 switch.

5.3 Estimativa de energia regenerada durante um percurso

Para ser possível avaliar o desempenho da regeneração de energia é necessário criar uma simulação de funcionamento sem e com a FR, e posteriormente avaliar a porcentagem regenerada nesse percurso. Para isso, define-se que a máquina irá operar no modo motor durante 10 segundos para um ciclo de trabalho máximo ($\delta = 0,95$) e em seguida há uma

frenagem completa, para um caso sem a FR e outro com a FR (sem capacitor) com ciclo de trabalho de regeneração de $\delta = 0,2$ (δ para o qual obtém-se maior valor de energia regenerado, utilizando técnica de 1 *switch*, sem capacitor). Então, o valor de energia gasto no percurso é calculado para ser possível a comparação, conforme Seção 4.4.

Dessa forma, obtém-se:

$$E(\text{pico}) = 27,68 \text{ J} \quad (5.1)$$

e

$$E_m = 20,17 \text{ J/s.} \quad (5.2)$$

Sabendo que o pico de corrente observado durou 0,120 s, é possível calcular a energia gasta no primeiro segundo de tempo. Além disso, com o valor de energia média gasta por segundo (5.2) é possível calcular a energia gasta para 10 segundos:

$$E(1) = 27,67 + 0,880(20,17) = 45,42 \text{ J} \quad (5.3)$$

$$E(10) = 45,431 + (10 - 1)(20,17) = 226,95 \text{ J.} \quad (5.4)$$

E, considerando a FR para $\delta = 0,2$, obtém-se 3,75 J de energia regenerada. Para o percurso, tem-se:

$$E_r(10) = 226,961 - 3,75 = 223,21 \text{ J} \quad (5.5)$$

o que representa uma economia de energia de **1,65 %**.

Outra análise que pode ser feita é em comparação ao consumo do protótipo da equipe EESCuderia Mileage, o Faísca. Esse protótipo detém o recorde nacional da Maratona Universitária da Eficiência Energética, com consumo de 42.492,00 J em 6,4 Km na competição de 2013, o que lhe dá a marca de **542,21 km/kWh**.

Supondo que a FR, aqui apresentada, estivesse sendo utilizada nesse protótipo e que a cada 1 km houvessem 10 oportunidades concluídas de frenagem regenerativa, totalizando 64 no fim do percurso, estima-se que ao final do trajeto de 6,4 km seria consumidos 42.258,4 J, o que aumentaria o range de distância percorrida por kWh do protótipo para **545,217 km/kWh**.

Pode não parecer muito, mas em competições tão acirradas, como a Maratona Universitária da Eficiência Energética, em que toda economia de energia pode fazer a diferença de desempenho para equipe, aplicações como da FR pode ser decisiva para a classificação final.

A título de comparação, na mesma edição em que a EESCuderia Mileage alcançou o melhor desempenho nacional que perdura até os dias de hoje, a equipe segundo colocada - Equipe do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, com o veículo

Ecofet - teve seu consumo de 42.651,00 J para os mesmos 6,4 km. Supondo que essa equipe utilizasse a FR em 64 ocasiões e a EESCuderia Mileage não, o consumo iria cair para **42.411,88 J**, sendo suficiente para ter tomado o **primeiro lugar e o recorde nacional** da EESCuderia Mileage.

6 CONCLUSÃO

O trabalho abordou princípios de funcionamento da FR, técnicas para seu funcionamento, estimativas de parâmetros da máquina BLDC, simulação de funcionamento do sistema completo, bem como verificação da FR na prática e levantamento da energia regenerada de acordo com o ciclo de trabalho δ utilizado. A implementação da FR se mostrou viável para o caso, já que nenhum elemento extra foi necessário para a implementação de tal modo, uma vez que todos componentes eletrônicos necessários já estavam em uso para o acionamento da máquina no modo motor.

Verificou-se que a utilização da técnica de 1 *switch* possibilitou uma energia regenerada maior, para as mesmas faixas de PWM aplicadas, quando comparado com a técnica de 3 *switch*. Além disso, para ambos os casos, verificou-se que a não utilização de um capacitor em paralelo com a fonte de alimentação implica em uma maior energia regenerada. Porém, isso acarreta em uma operação no modo descontínuo de corrente, o que é mitigado com a utilização do capacitor. Ainda, verificou-se que a região com maior pico de energia regenerada é por volta de $\delta = 0,6$ para a técnica de 3 *switches* e de $\delta = 0,2$ para a técnica de 1 *switch*.

Quanto a análise da FR utilizada em um percurso estimado, verificou-se a economia de energia na ordem de 1,65 %, porém esse valor irá variar de acordo com a quantidade de frenagens requisitadas, bem como com a trajetória total do percurso. Além disso, estimou-se que uma possível utilização do modo de FR no protótipo faísca, da equipe EESCuderia Mileage aumentaria o desempenho do carro de 542,21 km/kWh para 545,21 km/kWh, acarretando em um acréscimo de 3 km em distância percorrida com a mesma quantidade de energia. Ainda, foi mostrado que em protótipos de alta eficiência ou em competições onde o foco é o consumo energético, a utilização da FR pode ser decisiva quanto a classificação final da equipe.

Para trabalhos futuros propõe-se estudo da FR com volante de inércia para uma representação mais fiel da FR em relação ao protótipo, além da própria implementação embarcada no carro. Sugere-se também, o estudo de viabilidade para utilização de baterias de Lítio para acionar a máquina no modo motor e absorver a energia regenerada da frenagem. Ainda, recomenda-se o estudo e aplicação de sistemas de proteção para garantir a segurança desta bateria. Outra sugestão, seria utilizar uma técnica de acionamento mista, em que utiliza-se a característica de grandes picos para baixos PWMs e uma maior faixa de regeneração, com amplitudes menores, para PWMs acima de 0.4, para ambos os casos. Por fim, sugere-se o estudo e implementação de um conversor bidirecional extra para elevar ainda mais a tensão na regeneração. Quanto as placas de potência e sinal, sugere-se um melhor arranjo dos MOSFETs de potência, para que eles possam manter

uma distância segura um dos outros, já que o contato entre dois desses componentes pode gerar curto-circuito, uma vez que o dreno é comum ao seu encapsulamento. Ainda para as placas, propõe-se otimização física de seu projeto, tornando-as mais compactas.

REFERÊNCIAS

- BROWN, W. **AN857 - Brushless DC Motor Control Made Easy**. 2002.
- CHAPMAN, S. J. **Electric Machinery Fundamentals**. 5^a. ed. N.Y: The McGraw-Hill Companies, 2013.
- CHEN, C.-H.; CHI, W.-C.; CHENG, M.-Y. Regenerative braking control for light electric vehicles. In: **2011 IEEE Ninth International Conference on Power Electronics and Drive Systems**. Tainan, Taiwan: IEEE, 2011.
- CHEN, H. C. et al. Robust current control for brushless DC motors. **IEE Proceedings - Electric Power Applications**, v. 147, p. 503–512, 2000.
- CUI, W.; ZHANG, H.; MA, Y.-L.; ZHANG, Y.-J. Regenerative braking control method and optimal scheme for electric motorcycle. In: **International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives**. Málaga, Spain: IEEE, 2011.
- CVEL. **Brushed DC Motor**. 2011. Disponível em: <<http://www.cvel.clemson.edu/auto/actuators/motors-dc-brushed.html>>.
- DELGADO, A. C. **Algoritmo para Frenagem Regenerativa de uma Máquina Síncrona de Imã Permanente**. 2010. Dissertação (Mestrado) — UNICAMP, 2010. Dissertação de mestrado acadêmico, Unicamp.
- DREHER, J. R.; ROSA, A. da. Frenagem regenerativa aplicada em motores brushless dc utilizados em veículos elétricos. In: **Seminário de pesquisa e extensão e inovação do IFSC**. Chapecó, Santa Catarina: SEPEI, 2014.
- HUA, C.-C.; KAO, S.-J.; FANG, Y.-H. Design and implementation of a regenerative braking system for electric bicycles with a DSP controller. In: **2013 1st International Future Energy Electronics Conference (IFEEEC)**. Tainan, Taiwan: IEEE, 2013.
- MATHWORKS. **Parameter estimation help documentation**. 2017. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/help/slido/parameter-estimation.html>>.
- MERCEDES-BENZ. **552 kW (751 hp).1000 nM and a plug**. 2012. Disponível em: <http://www.mercedes-amg.com/email/en/pl/2012/928/pl_specialMailing09122012_en.html>.
- MONTGOMERY, D. C.; C., R. G.; HUBELE, N. F. **Engineering Statistics**. 5^a. ed. São Carlos, São Paulo, Br: USP, 2010.
- MORAES, R. N. **Aplicação de dsPIC no acionamento e controle de um motor brushless CC de um carro elétrico**. São Carlos, São Paulo, Br: USP, 2015. Monografia (Graduação), Escola de Engenharia de São Carlos. Disponível em: <<http://www.tcc.sc.usp.br/tce/disponiveis/18/180450/tce-16022016-114004/?&lang=br>>.
- OLIVEIRA, C. M. R.; MONTEIRO, J. R. B. A.; AGUIAR, M. L. Sliding mode control of brushless dc motor speed with chattering reduction. In: **2015 IEEE 24th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)**. Buzios, Rio de Janeiro: IEEE, 2015.

OLIVEIRA, V. A.; AGUIAR, M. L.; VARGAS, J. B. **Engenharia de controle: fundamentos de controle**. Rio de Janeiro, RJ: Elsevier, 2016.

PLANETARY reducer from metallic gear. 2014.

Disponível em: <<https://www.dreamstime.com/stock-illustration-planetary-reducer-metallic-gear-white-background-image42702222>>.

RIPPEL, W. **Induction Versus DC Brushless Motors**. 2007. Diretor da Empresa Tesla.

Disponível em: <<https://www.tesla.com/blog/induction-versus-dc-brushless-motors>>.

SMITH, E. **Brushless Motor Kv Constant Explained**. 2015. Disponível em:

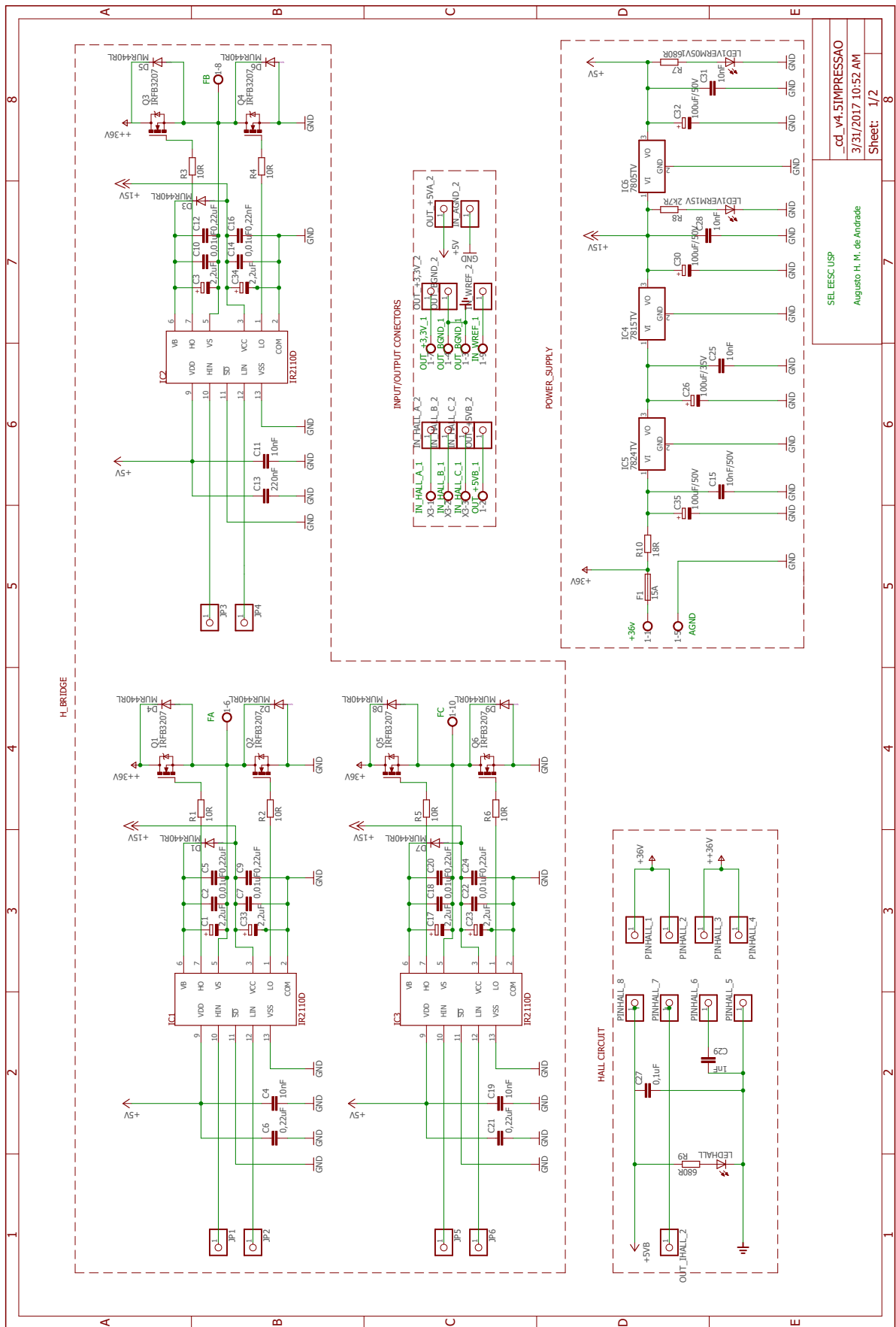
<<http://learningrc.com/motor-kv/>>.

WILTUSCHNIG, I. P. **Uma proposta de sistema de frenagem regenerativa para uma máquina sem escovas de fluxo magnético axial**. 2013. Dissertação (Mestrado) — UNICAMP, 2013. Dissertação de mestrado acadêmico, Unicamp.

Apêndices

APÊNDICE A – ESQUEMÁTICO PLACA DE POTÊNCIA

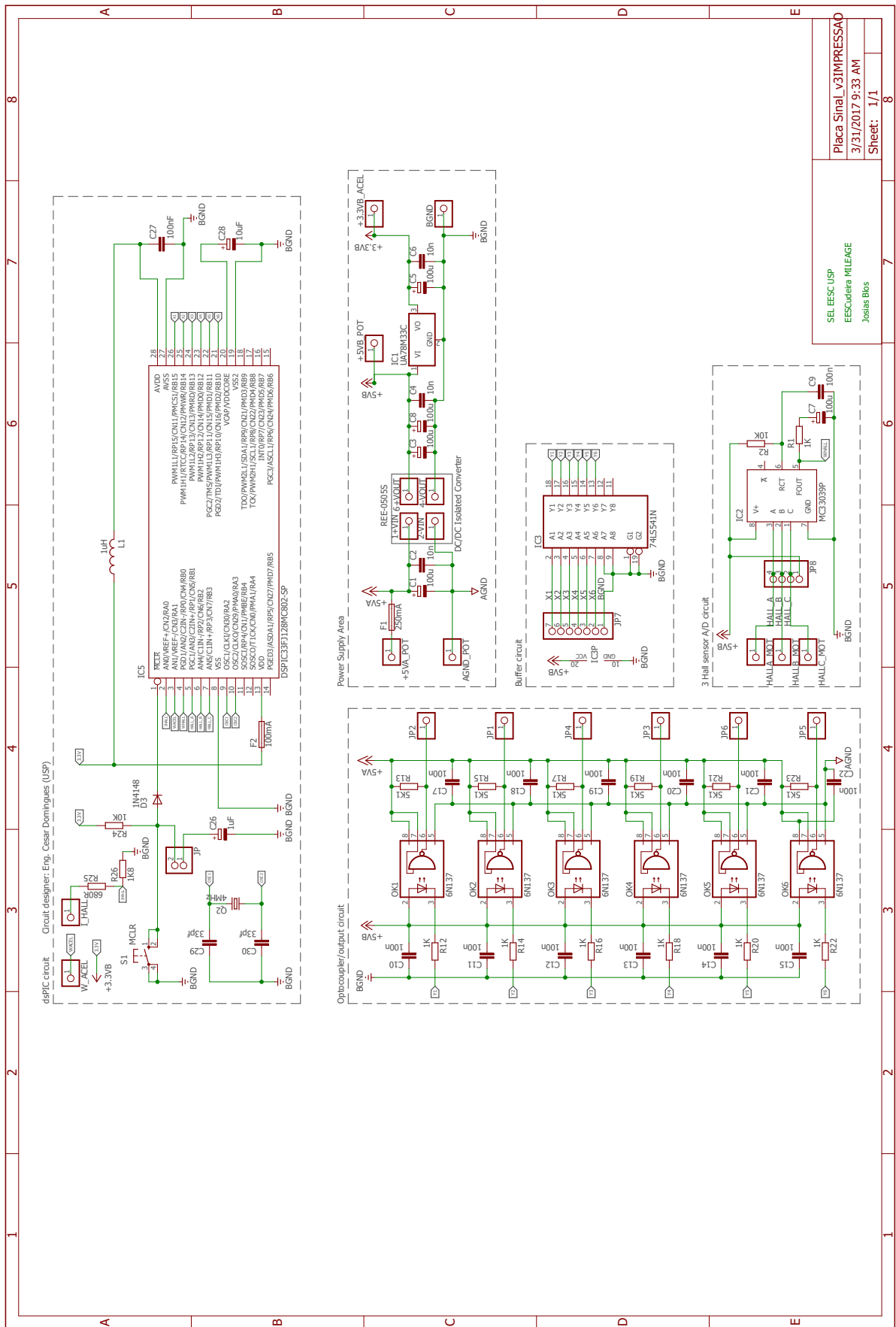
Figura A.1: Esquemático placa de potência - Contribuição do Eng. Cesar Domingues



SEL EESC USP	cd_v4.5IMPRESSAO
Augusto H. de Andrade	3/31/2017 10:52 AM
	Sheet: 1/2

APÊNDICE B – ESQUEMÁTICO PLACA DE SINAL

Figura B.1: Esquemático placa de sinal - contribuição de Josias Blos e Eng. Cesar Domingues



APÊNDICE C – DICAS PARA EXECUÇÃO DO PE

Abaixo, algumas dicas para utilização da ferramenta Parameter Estimation. A forma aqui descrita não é única maneira de se executar o procedimento.

1. Carregue o arquivo que contém os dados das entradas e saídas do modelo (geralmente .csv ou .txt). Armazene as entradas e saídas em outras variáveis de fácil acesso, como por exemplo na Figura C.1

```
load('Vetores03112017.csv')

tempo = Vetores03112017(:,1); %armazena tempo
Ia = Vetores03112017(:,2); %armazena corrente
Vel = Vetores03112017(:,3)/0.158; %vel corrigida p cte de velocidade
Va = Vetores03112017(:,4)*0.9047; %V corrigida por PWM

Wmed=[tempo Vel];      %Velocidade medida do degrau rad/s
Vamed=[tempo Va];     %Tensao de armadura Volts
Iamed=[tempo Ia];     %Corrente de armadura Volts
```

Figura C.1: Exemplo de armazenamento dos valores que serão utilizados na ferramenta.

2. Monte o modelo. Exemplos: Figuras 2.13 e 3.2;
3. Insira blocos 'inport' para indicar uma entrada e 'outport' para indicar uma saída.
4. Na página inicial do SIMULINK, clique em -> 'Analysis' -> 'Parameter Estimation'
5. Clicar em 'Select Parameter' e selecionar os parâmetros desejados
6. Altere o limite inferior para que seu mínimo estimado seja maior que zero.
7. Clique em 'New Experiment'. Caso tenha sido satisfeito o passo 3, a ferramenta irá identificar a quantidade de entradas e saídas automaticamente, do contrário, deverá ser indicado manualmente. Em seguida entre com o nome do vetor que será utilizado em cada campo e clique em 'ok'. Obs: os vetores devem ser de mesmas dimensões.
8. Clique em ->'Add plot' -> 'Exp_1'
9. Clique em 'Plot model response'

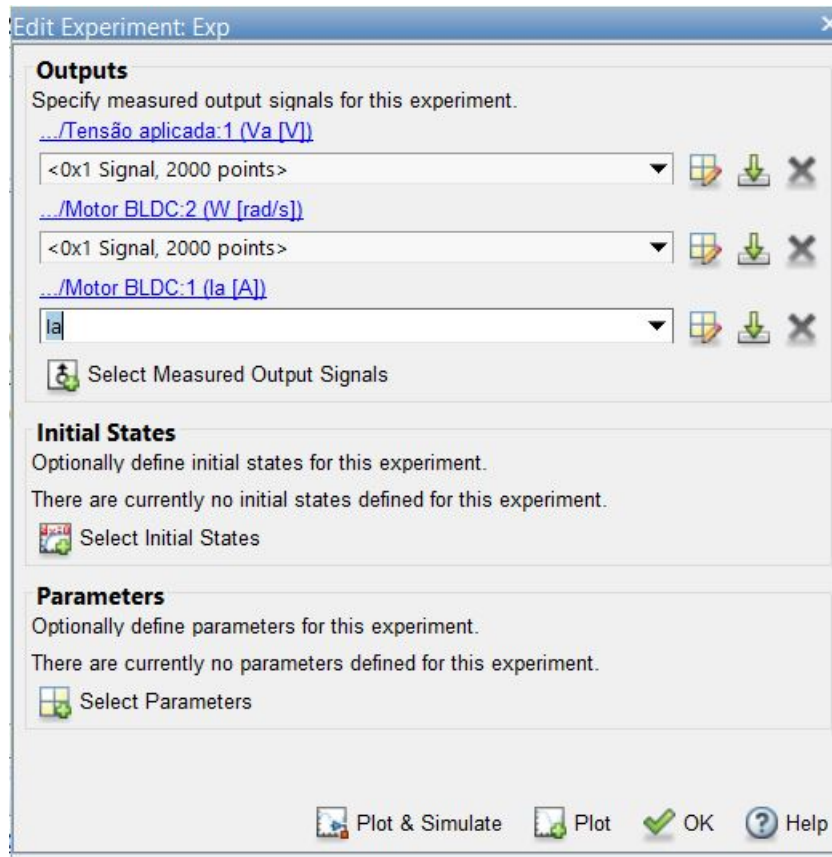


Figura C.2: Exemplo de entradas e saídas a serem indicadas.

10. Selecione a função custo de aproximação: soma do erro ao quadrado ou soma do erro absoluto.
11. Clique em 'More options' e selecione a tolerância de erro e método de otimização.
12. Por fim, clique em 'Estimate Parameter'.
13. Em seguida será visto o plot do modelo inicial, sobreposto pelo o plot das respostas. Conforme o programa define um novo valor para os parâmetros, os gráficos de saídas são atualizados instantaneamente.

APÊNDICE D – S-FUNCTION PARA LÓGICA DE CHAVEAMENTO

```

function [sys,x0] = modo_motor_2switches_pwm_mais_1_sempre_ativo(t,x,u,flag)
global T
switch flag,

case 0, % Inicialização das variáveis
sys    = [0 6 6 5 0 0]; % 6 estados discretos (GATES)
                                % 6 saída   (GATES)
                                % 3 entrada (SENSORES HALL)

x0     = 0; % valores iniciais dos estados
T      = 1e-7; % tempo de amostragem

case 2, % Update das variáveis

    % Nomeando as entradas
    hall_1 = u(1); % sensor hall 1
    hall_2 = u(2); % sensor hall 2
    hall_3 = u(3); % sensor hall 3
    del    = u(4); % PWM
    flagReg = u(5);

    pos = hall_1*2^2 + hall_2*2 + hall_3+10*flagReg;

    delbarra = 1 - del;

switch pos
case 1
    GATES = [0 0 0 1 del delbarra];
case 2
    GATES = [0 1 del delbarra 0 0];
case 3
    GATES = [0 1 0 0 del delbarra];
case 4

```

```

        GATES = [del delbarra 0 0 0 1];
case 5
        GATES= [del delbarra 0 1 0 0];
case 6
        GATES = [0 0 del delbarra 0 1];

% estratégia de regeneração com apenas %1 switch
%   case 11
%           GATES = [0 0 0 del 0 0];
%   case 12
%           GATES = [0 del 0 0 0 0];
%   case 13
%           GATES = [0 del 0 0 0 0];
%   case 14
%           GATES = [0 0 0 0 0 del];
%   case 15
%           GATES= [0 0 0 del 0 0];
%   case 16
%           GATES = [0 0 0 0 0 del];

%estratégia de regeneração via 3 switches
case 11
        GATES = [0 del 0 del 0 del];
case 12
        GATES = [0 del 0 del 0 del];
case 13
        GATES = [0 del 0 del 0 del];
case 14
        GATES = [0 del 0 del 0 del];
case 15
        GATES = [0 del 0 del 0 del];
case 16
        GATES = [0 del 0 del 0 del];

% % %
```

```
end

%

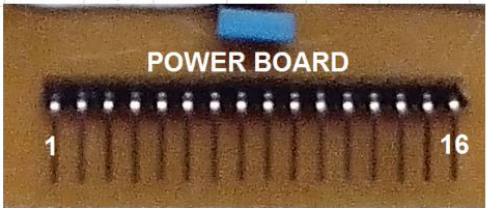
sys    = GATES;

case 3, % Saída
sys    = x;

case 4, % Próximo instante de Tempo  $\sim(t+T)$ 
ns     = t/T;
sys    = (1 + floor(ns + 1e-13*(1+ns)))*T;
end
end
```

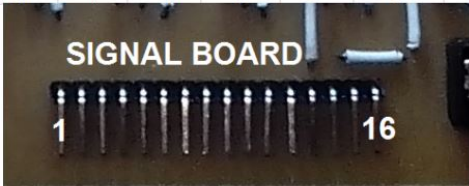

APÊNDICE E – MAPA DE PINOS

Pin Bar Power Board (interboard communication)																
Pin #	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Name	Hall_C	Hall_B	Hall_A	3,3V+	WREF	JP5	JP6	JP3	JP4	JP1	JP2	BGND	IHALL	AGND	5VA+	5VB+
IN or OUT?	O	O	O	I	O	I	I	I	I	I	I	I	O	O	O	I



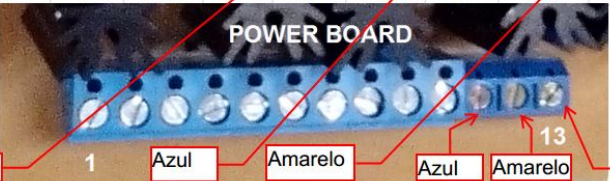
POWER BOARD

Pin Bar Signal Board (interboard communication)																
Pin #	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Name	Hall_C	Hall_B	Hall_A	3,3V+	WREF	JP5	JP6	JP3	JP4	JP1	JP2	BGND	IHALL	AGND	5VA+	5VB+
IN or OUT?	I	I	I	O	I	O	O	O	O	O	O	O	I	I	I	O



SIGNAL BOARD

Connector Bar Power Board (external communication)													
Pin #	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Name	36VA+	5VB+	BGND	BGND	AGND	VS1	3,3V+	VS2	WREF	VS3	Hall_A	Hall_B	Hall_C
Commentary	(+)Battery	For BLDC	Hall sensors	For throttle	(-)Battery	For BLDC	For throttle	For BLDC	From throttle	For BLDC	From BLDC		
IN or OUT?	I	O	O	O	I	O	O	O	I	O	I	I	I



POWER BOARD

**APÊNDICE F – DOCUMENTAÇÃO DE PROBLEMAS ENFRENTADOS
DURANTE TESTES**

Tabela F.1: Documentação de problemas durante testes.

		N referência
Problema	Queima do capacitor de $100\mu\text{F}$ e do abaixador de tensão LM7815.	
Causa	Inversão de polaridade da bateria devido a mistura de cor de cabos do polo positivo e polo negativo.	1
Solução	Padronizar cores de cabos e seguir o padrão.	
Problema	Queima da trilha do adaptador do sensor de corrente ACS779 20.	2
Causa	Ao ocorrer o problema de n ^o de referência 1, acabou levando a este problema, devido ao surto de tensão/ corrente ocorrido.	
Solução	Padronizar cores de cabos e seguir o padrão estabelecido/Soldar o componente diretamente na placa.	
Problema	Forma de onda de tensão, no modo de regeneração não correspondente aos níveis que deveria ser, de acordo com simulação (excedendo em 10V).	3
Causa	Utilização da fonte de tensão controlada como fonte de alimentação. Tal equipamento se opõe a corrente reversa.	
Solução	Utilização da bateria ao invés da fonte controlada.	
Problema	Queima do abaixador de tensão LM7815.	4
Causa	Não se sabe ao certo, porém devido ao problema n ^o 3, os surtos de tensão ocorridos durante regeneração pode ter estressado eletricamente o componente	
Solução	Substituição do componente e utilização da bateria ao invés da fonte controlada.	
Problema	Queima do <i>gate driver</i> IR2110.	5
Causa	Surto de corrente/tensão na queima do LM7815	
Solução	Substituição do componente e utilização da bateria ao invés da fonte controlada.	
Problema	Ruídos na máquina no modo motor.	6
Causa	Terra do osciloscópio é comum para todos os canais, o que gera mal funcionamento.	
Solução	Utilizar somente um canal do osciloscópio. obs: Ponta de corrente pode ser utilizada em conjunto, pois seu terra é isolado	

Tabela F.2: Continuação da tabela de documentação de problemas durante testes.

Problema	Ruídos na máquina no modo motor e cheiro de componente queimado.	7
Causa	Resistor de entrada para abaixar a tensão, na qual existia no projeto inicial, estava recebendo uma potência maior do que seu máximo permitido.	
Solução	Troca do resistor, juntamente com o LM7824 e LM7815 por um LM2575, pois este último componente suporta tensão de até 45V tem saída de 15V	
Problema	LM7824 parava de funcionar após alguns minutos.	8
Causa	Componente esquentava muito.	
Solução	Troca pelo LM2575.	
Problema	Motor não acionava	9
Causa	Microcontrolador não lê interrupção dos sensores hall.	
Solução	Inserção de resistores de pull down (entre referência e gnd)	
Problema	Máquina com pequenas falhas ao ligar ou não ligava.	10
Causa	Ordem de conexão dos sensores hall ou mal contato devido protoboard.	
Solução	Conectar na ordem correta (ver apêndice E). Eliminar protoboard e embarcar resistores de pulldown.	
Problema	Motor não mudava de velocidade	11
Causa	Trilha que leva sinal do potenciômetro para placa de sinal estava interrompida.	
Solução	Jumper do potenciômetro até pino que leva para a placa de sinal.	
Problema	Ruído durante funcionamento e cheiro de queimado.	12
Causa	Jumper utilizado no problema n °11 escapou e tocou em algum(s) pino(s) de alimentação. Ocasinou queima de 2 MOSFETs, 1 IR2110 e trilha do ACS 779	
Solução	Trocar componentes queimados e arrumar trilha do problema N °11.	