

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

Josias Blos

Controle de motor *brushless* CC embarcado com partida  
em rampa

São Carlos

2018



**Josias Blos**

**Controle de motor *brushless* CC embarcado com partida  
em rampa**

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: Profa. Vilma Alves de Oliveira

**São Carlos  
2018**



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.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

B83c           Blos, Josias  
                  Controle de motor brushless CC embarcado com  
                  partida em rampa / Josias Blos; orientadora Vilma Alves  
                  de Oliveira. São Carlos, 2018.

                  Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica com  
                  ênfase em Sistemas de Energia e Automação) -- Escola de  
                  Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo,  
                  2018.

                  1. Motor BLDC. 2. Motor de corrente contínua sem  
                  escovas. 3. Sistema embarcado. 4. Controle discreto.  
                  5. Partida em rampa. 6. dsPIC. 7. Veículo elétrico. 8.  
                  Eficiência energética. I. Título.

# FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: Josias Blos

Título: "Controle de motor brushless CC embarcado com partida em rampa"

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado  
em 02/03/2018,

com NOTA 8,0 (Oito, zero), pela Comissão Julgadora:

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

*Prof. Dr. Manoel Luís de Aguiar - SEL/EESC/USP*

*Prof. Associado Luis Carlos Passarini - SMM/EESC/USP*

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

*Este trabalho é dedicado aos integrantes da EESCuderia Mileage,  
como um incentivo à eficiência e sustentabilidade no âmbito da mobilidade elétrica.*

*À Profa. Vilma, como uma pequena contribuição ao aprimoramento constante  
do seu ensino de Engenharia de Controle no Departamento de Engenharia Elétrica  
da Escola de Engenharia de São Carlos.*





## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por compartilhar do Seu fôlego de vida, mostrar a Sua salvação no Senhor Jesus Cristo e dar-me direção na caminhada.

Agradeço muito aos meus pais Itiberê e Marisa, pela formação baseada em valores eternos do Reino, mais valiosos que qualquer bem material, bem como seu sacrifício para dar o melhor para seus filhos. À minha irmã Tamar, seus sábios e fraternos conselhos como irmã mais experiente foram essenciais para mim em muitos momentos, mesmo os mais difíceis. Aos irmãos e irmãs da Comunidade Cristã de São Carlos, Igreja Luterana e Fonte de Vida de Araçatuba, por seu amor demonstrado através do suporte em oração, conselhos e compreensão quando a comunicação foi limitada em períodos de provas, trabalhos e demais projetos, que não foram poucos durante a minha graduação. Sou abençoado por Deus, por ter esta família que são vocês.

Sou muito grato à Profa. Vilma, por sua orientação próxima, compreensão das minhas limitações, por ser um exemplo de docente dedicada ao ensino sólido de engenharia, por todos os seus conselhos e experiência na execução deste trabalho, bem como sua supervisão no PIBIC/CNPq, e pelo acesso concedido às estruturas e recursos do InteGradEESC e LAC.

Ao meu amigo e companheiro de projeto Augusto, por tantos dias e noites de trabalho árduo naquela bancada do LAC, pelo ânimo, paciência e determinação na execução deste projeto.

Ao Eng. César, por seus conhecimentos e conselhos na execução dos ensaios, nos treinamentos de EAGLE e CCS e revisão do projeto das placas do controlador.

Aos professores Passarini e Jaime, por seus conselhos na estruturação do software e fixação dos componentes nas placas, dada sua grande experiência em eletrônica embarcada. Não me esquecerei que o Prof. Passarini com muito afincou auxiliou na impressão, corrosão e término da última placa de potência do controlador, ficando pronta a tempo para a competição da Shell Eco-marathon Brasil de 2017.

Ao Prof. Manoel, pelos conselhos na elaboração dos ensaios e aprimoramento da estrutura de controle.

Ao Prof. Ricardo, que aconselhou sobre os conversores CC/CC chaveados, a estabilidade térmica do controlador, e também por fornecer acesso à estrutura do LAFAPE e recursos.

Aos técnicos Rui, Odair, Rosenberg e Petruccio, que contribuíram na criação das estruturas para os ensaios e na confecção das placas.

Aos companheiros do LAC: Elmer, Heitor, Rayza, Mauricio, Rodolpho e Elian pelas boas conversas e sugestões valiosas.

Aos meus colegas e amigos do Alojamento: Sindélio, Bruno, Fernando e muitos outros, por todo o apoio.

Ao colega Renato, por ter transmitido o conhecimento e sua prática prévia no controle de velocidade do motor.

À técnica administrativa Jussara, pelo solicitude na finalização burocrática deste trabalho.

À loja CaAndMa, que patrocinou a criação do primeiro controlador embarcado do protótipo Venturo.

Ao Prof. José Marcos pelo acesso e uso das estruturas do LASEL.

Ao CNPq, pela bolsa de Iniciação Científica (PIBIC) e à Universidade de São Paulo, pelo excelente ensino proporcionado.

Agradeço também à toda Equipe EESCuderia Mileage, pela paciência, ânimo e voto de confiança na criação do controlador, pela amizade e trabalho árduo noites adentro na oficina. Ao diretor e amigo Hermano, pelo projeto e impressão 3D da case do controlador.

Este trabalho não teria êxito sem o auxílio de vocês.

*“Em seu coração o homem planeja o seu caminho, mas o Senhor determina os seus passos.”*

*(Provérbios 16.9, NVI)*



## RESUMO

BLOS, J. **Controle de motor *brushless* CC embarcado com partida em rampa.** 2018. 68p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

Este trabalho apresenta um sistema embarcado de controle de um motor de corrente contínua sem escovas, com finalidade de fazer a partida em rampa, controlar a velocidade e limitar a corrente do motor utilizado na tração de um veículo protótipo de alta eficiência energética. Foram executados vários ensaios em bancada, e o modelo matemático do motor foi determinado com o auxílio de programas computacionais MATLAB e Simulink. Este modelo foi imprescindível na escolha da estrutura de controle da velocidade e limitação da corrente. Com o projeto e confecção das placas de sinal e potência em circuito impresso, foi possível implementar em *dsPIC* a lógica de controle e fazer a partida em rampa com carga, obtendo resultados muito similares aos de controladores comerciais. Como diferencial, se destacam o melhor desempenho energético deste sistema embarcado em comparação aos comerciais, e a possibilidade de alterar a lógica de controle de acordo com os modos de operação planejados, ou seja, a partida em rampa, regulação de velocidade ou frenagem regenerativa.

**Palavras-chave:** Motor BLDC. Motor de corrente contínua sem escovas. Sistema embarcado. Controle discreto. Partida em rampa. *dsPIC*. Veículo elétrico. Eficiência energética.



## ABSTRACT

BLOS, J. **Embedded control system of a brushless DC motor with soft-starter**. 2018. 68p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

This work presents an embedded system that controls a brushless DC motor, with the purpose of making the soft-stater, speed control and current limiting when the motor is used to drive an high efficiency electrical prototype vehicle. Several workbench tests were made, and the motor mathematical model was determined with the help of MATLAB and Simulink software. This model was essencial when choosing the speed control and current limiting structures. With the design and construction of the signal and power printed circuit boards it was possible to implement the control logic into a dsPIC. That enabled the use of a soft-stater strategy and the results were very similiar to the obtained with the commercial controllers. As a differential, it is possible to emphasize the energy performance of this system, better than the commercial ones, and the possibility to change the logic of control according to the modes of operation planned, that is, soft-starter, speed regulation or regenerative braking.

**Keywords:** BLDC motor. Brushless direct current motor. Embedded system. Discrete control. Soft starter. dsPIC. Electric vehicle. Energy efficiency.





## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Dinâmica da velocidade (amarelo) e corrente (verde) na partida com o controlador comercial, motor do Mileage, bateria de Li-Ion com 39V. Fonte: Autoria própria. . . . .	28
Figura 2.2 – Diagrama de blocos do sistema embarcado de controle do motor BDLC. Fonte: Autoria própria. . . . .	29
Figura 3.1 – Esquemático elétrico da primeira versão da placa de sinal. Fonte: Autoria própria com contribuição do Eng. César Domingues. . . . .	32
Figura 3.2 – Esquemático elétrico da primeira versão placa de potência. Fonte: Autoria de Augusto H. M. Andrade com contribuição do Eng. César Domingues. . . . .	33
Figura 3.3 – Layout da primeira versão da placa de sinal. Fonte: Autoria própria com contribuição do Eng. César Domingues. . . . .	34
Figura 3.4 – Layout da primeira versão da placa de potência. Fonte: Autoria de Augusto H. M. Andrade com contribuição do Eng. César Domingues. . . . .	34
Figura 3.5 – Primeira placa de sinal. Fonte: Autoria própria. . . . .	35
Figura 3.6 – Primeira placa de potência. Fonte: Autoria de Augusto H. M. Andrade. . . . .	35
Figura 3.7 – Esquemático da última versão da placa de sinal. Fonte: Autoria própria. . . . .	37
Figura 3.8 – Esquemático da última versão da placa de potência. Fonte: Autoria própria com contribuição de Augusto H. M. de Andrade. . . . .	38
Figura 3.9 – Layout da última placa de sinal. Fonte: Autoria própria. . . . .	39
Figura 3.10 – Layout da última versão da placa de potência. Fonte: Autoria própria. . . . .	39
Figura 3.11 – Última placa de sinal. Fonte: Autoria própria com contribuição de membros da EESCuderia Mileage. . . . .	40
Figura 3.12 – Última placa de sinal, com detalhe das trilhas e acabamento. Fonte: Autoria própria com contribuição de membros da EESCuderia Mileage. . . . .	40
Figura 3.13 – Última placa de potência. Fonte: Autoria própria com contribuição do Prof. Passarini e membros da EESCuderia Mileage. . . . .	41
Figura 3.14 – Última versão do controlador montado em case impressa em 3D. Fonte: Autoria própria com contribuição de Hermano Esch. . . . .	42
Figura 4.1 – Mecanismo de medida, visto de frente. Fonte: (BLOS et al., 2017), com contribuição do técnico Rui Berto e Prof. Manoel. . . . .	44
Figura 4.2 – Mecanismo de medida, visto lateralmente. Detalhe das diferentes posições em que foram feitas as medições. Fonte: (BLOS et al., 2017), com contribuição do técnico Rui Berto e Prof. Manoel. . . . .	44
Figura 4.3 – Modelo do motor BLDC, representado por blocos (ANDRADE, 2017). . . . .	45
Figura 4.4 – Bancada de testes no LAC. Fonte: (ANDRADE, 2017). . . . .	46

Figura 4.5 – Detalhe da montagem com os rolamentos onde foi apoiada a roda do motor. Fonte: Autoria própria com contribuição de Rui Berto. . . . .	47
Figura 4.6 – Protótipo Venturo com carga. Detalhe dos calços nas rodas dianteiras. Fonte: Autoria própria. . . . .	48
Figura 4.7 – Instrumentos utilizados no Ensaio de Partida em Rampa com Carga. Fonte: Autoria própria. . . . .	48
Figura 4.8 – Controlador comercial utilizado no Ensaio de Partida em Rampa com Carga. Fonte: Autoria própria. . . . .	49
Figura 5.1 – Família de curvas torque versus corrente. Fonte: (BLOS et al., 2017) . .	52
Figura 5.2 – 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 (ANDRADE, 2017). . .	52
Figura 5.3 – Comparação entre respostas simulada e experimental usando a resposta ao degrau de velocidade e corrente como entradas para a ferramenta PE, estimando todas as constantes. a) Curvas de velocidade e b) Curvas de corrente (ANDRADE, 2017). . . . .	53
Figura 5.4 – Dinâmica da corrente total de entrada (amarelo) e tensão de entrada (verde) na partida direta, $\delta$ de 95% a vazio, 183 RPM em regime, motor LAC, bateria de Chumbo-ácido com 25,4V. Fonte: Autoria própria. . .	54
Figura 5.6 – Tensão de entrada (vermelho) e corrente total de entrada (verde) na partida em rampa a vazio com janela de 3 segundos, bateria de Chumbo-ácido com 25V. Fonte: Autoria própria. . . . .	55
Figura 5.5 – Tensão de entrada (vermelho) e corrente total de entrada (verde) na partida em rampa a vazio com janela de 5 segundos, fonte de bancada de 28V. Fonte: Autoria própria. . . . .	55
Figura 5.7 – Tensão de entrada (vermelho) e corrente da ponte inversora (verde) na partida em rampa a vazio com janela de 3 segundos, fonte de bancada de 28V. Fonte: Autoria própria. . . . .	56
Figura 5.8 – Tensão de entrada (vermelho) e corrente da ponte inversora (verde) na partida em rampa a vazio com janela de 3 segundos, bateria de Chumbo-ácido com 25V. Fonte: Autoria própria. . . . .	56
Figura 5.9 – Tensão de entrada (vermelho) e corrente da ponte inversora (verde) na partida em rampa a vazio com janela de 100 ms, fonte de bancada de 28V. Fonte: Autoria própria. . . . .	57
Figura 5.10 – Tensão de entrada (vermelho) e corrente da ponte inversora (verde) na partida em rampa a vazio com janela de 100 ms, bateria de Chumbo-ácido com 25V. Fonte: Autoria própria. . . . .	57

Figura 5.11–Tensão de entrada (vermelho) e corrente da ponte inversora (verde) na partida em rampa a vazio com janela de 20 ms, fonte de bancada de 28V. Fonte: Autoria própria. . . . .	58
Figura 5.12–Tensão de entrada (vermelho) e corrente da ponte inversora (verde) na partida em rampa a vazio com janela de 20 ms, bateria de Chumbo-ácido com 25V. Fonte: Autoria própria. . . . .	58
Figura 5.13–Tensão de entrada (vermelho) e corrente total de entrada do controlador desenvolvido (verde) na partida em rampa com carga, janela de 3,5 s, 3 baterias de Chumbo-ácido com 37,7V. Fonte: Autoria própria. . . . .	60
Figura 5.14–Tensão de entrada (vermelho) e corrente total de entrada do controlador comercial (verde) na partida em rampa com carga, janela de 3,5 s, 3 baterias de Chumbo-ácido com 37V. Fonte: Autoria própria. . . . .	60
Figura 5.15–Dinâmica da corrente total de entrada do controlador desenvolvido na partida em rampa com carga, janela de 5 s, bateria de Lí-Ion com 41,78V. Fonte: Autoria própria. . . . .	62
Figura 5.16–Dinâmica da corrente total de entrada do controlador comercial na partida em rampa com carga, janela de 3,5 s, bateria de Lí-Ion com 41,78V. Fonte: Autoria própria. . . . .	62
Figura 5.17–Detalhe do <i>dead-time</i> entre sinais de PWM complementares de um mesmo braço da ponte inversora. Fonte: Autoria própria. . . . .	63



## LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1 – Parâmetros série obtidos no ensaio com a ponte RLC com o cabo de conexão . . . . .	51
Tabela 5.2 – Parâmetros série obtidos no ensaio com a ponte RLC sem o cabo de conexão . . . . .	51
Tabela 5.3 – Estimativa dos parâmetros do modelo do motor via PE (ANDRADE, 2017). . . . .	53
Tabela 5.4 – Valores da partida em rampa do protótipo Venturo com o controlador desenvolvido sendo alimentado por baterias de Chumbo-ácido . . . . .	59
Tabela 5.5 – Valores da partida em rampa do protótipo Venturo com o controlador comercial sendo alimentado por baterias de Chumbo-ácido . . . . .	60
Tabela 5.6 – Valores da partida em rampa do protótipo Venturo obtidos com o controlador comercial e o desenvolvido sendo alimentados por bateria de Lítio-íon (41,78V) e inclinação de $+3,5^\circ$ . . . . .	61



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

$\delta$	- Ciclo de Trabalho
A/D	- Analógico-Digital (conversor)
ABS	- Acrilonitrila Butadieno Estireno
BLDC	- Brushless Direct Current (motor)
CA	- Corrente Alternada
CC	- Corrente Contínua
CI	- Componente Integrado
CCS	- Custom Computer Services (compilador)
CNPq	- Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
DC	- Direct Current
dsPIC	- Digital Signal Peripheral Interface Controller
LAC	- Laboratório de Controle
LFAPE	- Laboratório de Fontes Alternativas e Processamento de Energia
LASEL	- Laboratório Aberto para Inovação e Empreendedorismo
MATLAB	- Matrix Laboratory (software)
MOSFET	- Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
PCB	- Printed Circuit Board
PE	- Parameter Estimation (software)
PI	- Proporcional-integral (tipo de controlador paramétrico)
PIBIC	- Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica
PLA	- Ácido Polilático
PWM	- Pulse Width Modulation
RPM	- Rotação Por Minuto
VE	- Veículo Elétrico





## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO . . . . .	25
2	CONTROLE E ACIONAMENTO . . . . .	27
2.1	Acionamento em Rampa ( <i>Soft-starter</i> ) . . . . .	27
2.2	Configuração do Controlador . . . . .	28
3	CONFECÇÃO DAS PLACAS DO CONTROLADOR EMBARCADO	31
3.1	Primeira Versão das Placas . . . . .	31
3.2	Última Versão das Placas . . . . .	36
3.3	Impressão 3D da Case do Controlador . . . . .	42
4	ENSAIOS REALIZADOS . . . . .	43
4.1	Ensaio com Ponte RLC . . . . .	43
4.2	Ensaio para Obtenção de Torque Estático do Motor . . . . .	43
4.3	Estimação de Parâmetros . . . . .	45
4.4	Ensaio de Partida Direta a Vazio . . . . .	45
4.5	Ensaio de Partida em Rampa a Vazio . . . . .	46
4.6	Ensaio de Partida em Rampa com Carga . . . . .	47
5	RESULTADOS DOS ENSAIOS E DISCUSSÃO . . . . .	51
5.1	Ensaio com Ponte RLC . . . . .	51
5.2	Ensaio para Obtenção de Torque Estático do Motor . . . . .	51
5.3	Estimação de Parâmetros . . . . .	52
5.4	Ensaio de Partida Direta a Vazio . . . . .	54
5.5	Ensaio de Partida em Rampa a Vazio . . . . .	54
5.6	Ensaio de Partida em Rampa com Carga . . . . .	59
5.6.1	Alimentação por bateria de Chumbo-ácido . . . . .	59
5.6.2	Alimentação por bateria de Lítio-íon . . . . .	61
5.7	Desafios na Implementação da Lógica de Controle e Suas Soluções	63
6	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS . . . . .	65
	REFERÊNCIAS . . . . .	67



## 1 INTRODUÇÃO

No cenário atual, busca-se cada vez mais a eficiência e o melhor uso de recursos energéticos. Miller (2008) escreve que um veículo elétrico (VE) tem eficiência entre o tanque (bateria) à propulsão na roda de aproximadamente 80%, enquanto que um veículo convencional de combustão interna apresenta em média, apenas 14%. Como resultado disso o desenvolvimento de VEs é bastante estimulado e bem aceito em termos tecnológicos, como escrevem Larminie e Lowry (2004), Erjavec e Arias (2007) e Ehsani et al. (2010). Husain (2011) por fim arremata dizendo que os VEs são os únicos veículos possíveis de ter zero emissão de gases poluentes.

Dada sua característica construtiva, o motor de corrente contínua sem escovas (*BLDC*, da sigla inglesa) é adequado para aplicações como veículos elétricos, uma vez que: é o mais eficiente entre todos os motores elétricos, é muito compacto, pequeno e leve por usar ímãs de terras-raras, apresenta facilidade de controle (em comparação aos motores CA) e de refrigeração, baixa manutenção e portanto, grande longevidade e confiabilidade, além de curva constante entre torque e velocidade quando variada a tensão de alimentação. Possui arranjo de ímãs permanentes no rotor, fazendo com que seu acionamento seja realizado pela comutação eletrônica das três fases que alimentam as bobinas do estator. E isto faz com que este tipo de motor também tenha um custo elevado de fabricação e de montagem do controlador-inversor, apresente desmagnetização caso seja exposto à altas temperaturas por longos períodos, necessite de atenção especial no caso de curto-circuito da ponte inversora, além de ter limitação em atingir velocidades muito superiores à nominal (EHSANI et al., 2010). A modelagem dinâmica desse motor pode ser encontrada em Oliveira et al. (2016).

O trabalho teve como objetivo implantar e embarcar um controlador de um motor *BLDC*, com a finalidade de controlar seu torque quando usado na tração de um veículo elétrico monoposto de alta eficiência energética construído pela equipe EESCuderia Mileage, que tem velocidade ajustável pelo motorista. A proposta de criar este controlador vem também da necessidade de criar um sistema próprio para a competição internacional de eficiência energética que a equipe compete, a Shell Eco-marathon.

A configuração de controle definida é composta de uma malha que gera a rampa de corrente para o motor, e conseqüentemente o torque. Os sinais de entrada para o microcontrolador *dsPIC* são a velocidade e corrente total do motor, provenientes dos sensores tipo Hall. A saída de corrente para o motor é executada por uma ponte inversora trifásica, composta de transistores de efeito de campo (*MOSFETs*) e diodos de roda-livre.

Muitas das escolhas de componentes e estruturas de controle foram balizadas visando a eficiência: o motor diretamente acoplado ao eixo da roda traseira do veículo, dispensando

uso de transmissão; os componentes da ponte trifásica, que possuem baixíssima resistência de condução; os reguladores CC/CC chaveados de tensão das placas, apresentando alto rendimento, entre outras escolhas (HUSAIN, 2011).

O presente trabalho está organizado como segue. No Capítulo 2, seguindo essa introdução, são comentadas as principais técnicas descritas em artigos de controle aplicadas no acionamento de motores *BLDC* com regulação de corrente, além de ser detalhada a estratégia escolhida para o acionamento do motor e configuração do controlador. No Capítulo 3 são mostrados os esquemáticos e layout das placas de potência e sinal/controle do sistema embarcado, e também descritas as dificuldades encontradas na dissipação térmica e fixação dos componentes, bem como as soluções encontradas. No Capítulo 4 estão descritos os diversos ensaios para levantamento e estimação dos parâmetros do motor, para validação do acionamento em rampa na partida do motor a vazio e com carga, além de ensaios que comparam o controlador desenvolvido com seu par comercial. Os resultados dos ensaios e sua discussão estão contidos no Capítulo 5. No último capítulo são feitas as conclusões e sugeridos trabalhos futuros para melhoria do controlador, tanto no software quanto na estrutura física.

## 2 CONTROLE E ACIONAMENTO

As diversas técnicas de controle e acionamento descritas em Tan e Ho (1999), Zhao e Yang (2011), Rodriguez e Emadi (2006), Desai e Emadi (2005), Chen et al. (2000), Chen et al. (2009), Xia et al. (2016) foram estudadas. Em Zhao e Yang (2011) foram utilizados controladores paramétricos do tipo PI com uma técnica de medição de corrente com apenas um sensor proposta em Tan e Ho (1999). Já em Rodriguez e Emadi (2006), Desai e Emadi (2005), Chen et al. (2000), Chen et al. (2009), Xia et al. (2016), foram amostrados os valores de corrente em duas fases do motor, enquanto que em Rodriguez e Emadi (2006), Desai e Emadi (2005) foi utilizada uma técnica de controle digital por meio de portas lógicas e comparadores ao passo que Chen et al. (2000) utilizaram técnicas de controle robusto, ainda Chen et al. (2009) fizeram uso de controle híbrido, e em Xia et al. (2016) foram utilizadas as técnicas de controle adaptativo e por modos deslizantes.

Na maior parte dos trabalhos atuais de pesquisa e desenvolvimento nesta área, constatou-se que há uso de técnicas avançadas de controle, justificadas principalmente pela necessidade de uma ação rápida que reduza o tempo de acomodação da velocidade do motor, bem como uma ação robusta o suficiente para enfrentar bruscas variações de torque no eixo do motor, como por exemplo, em uma situação de ultrapassagem com o veículo elétrico. Entretanto, conhecida a aplicação que é de tração elétrica com aceleração não abrupta e leve variação de carga ao longo do percurso, pode-se lançar mão de técnicas mais simples de controle, tais como os controladores paramétricos do tipo proporcional-integral (PI) e até mesmo a malha aberta, como é o caso desta implementação com rampa de corrente.

### 2.1 Acionamento em Rampa (*Soft-starter*)

A dinâmica da corrente do controlador comercial do motor pesquisado foi observada e é mostrada na Figura 2.1. Notou-se claramente uma rampa de corrente na partida do motor, e a partir desta observação, foi projetada uma estratégia de rampa na implementação do controlador embarcado.

Essa estratégia, também denominada *soft-starter*, é muito consolidada no acionamento de motores *BLDC* (EHSANI et al., 2010), pois reduz a corrente de pico, além de evitar a desmagnetização dos ímãs permanentes, uma vez que não há aplicação brusca de campo magnético, mas sim gradual.

Para implementar este acionamento, foi criado um contador em código inserido no *dsPIC* que, de 50 em 50 milissegundos incrementa o valor do ciclo de trabalho ( $\delta$ ) do *PWM* conforme a necessidade de uma resposta mais lenta ou mais rápida. Assim, quando

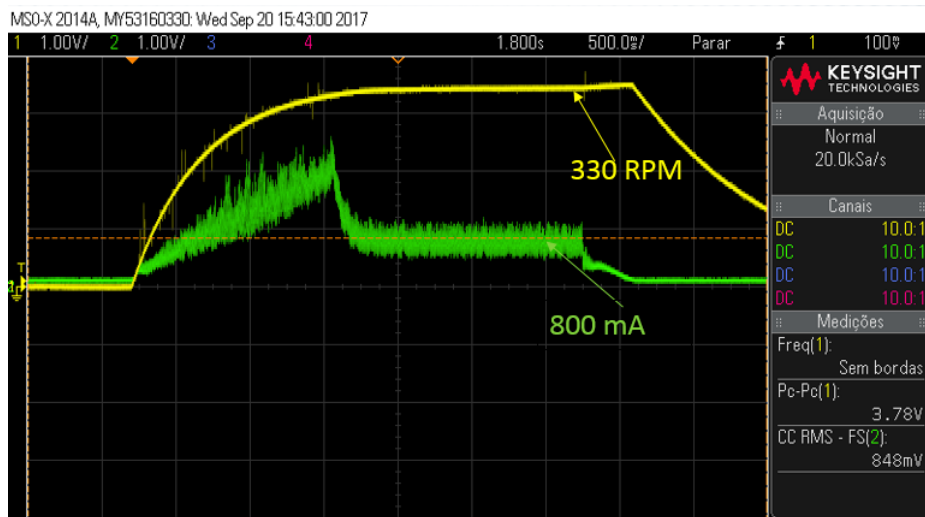


Figura 2.1: Dinâmica da velocidade (amarelo) e corrente (verde) na partida com o controlador comercial, motor do Mileage, bateria de Li-Ion com 39V. Fonte: Autoria própria.

parte-se do repouso e deseja-se desenvolver uma partida mais rápida usa-se um valor de incremento maior no ciclo de trabalho, além de ser possível aumentar o valor inicial de  $\delta$  na rampa.

Durante o percurso do carro, o microcontrolador compara o valor atual do acelerador do piloto (em termos percentuais) com o ciclo de trabalho aplicado sobre a ponte trifásica, também normalizado entre 0 e 100 por cento. Caso o valor lido do acelerador seja inferior ao  $\delta$  atual, este valor torna-se o novo  $\delta$ ; caso o valor lido seja superior, então é feita a rampa, incrementando  $\delta$  até atingir o valor desejado pelo piloto.

Saindo do algoritmo de acionamento, o valor do ciclo de trabalho é então transformado em uma sequência de pulsos elétricos por um gerador *PWM* interno do microcontrolador, e distribuído para fazer o acionamento dos *MOSFETs* que compõem a ponte trifásica, conforme a posição em que se encontra o motor.

## 2.2 Configuração do Controlador

O controlador foi implementado em duas placas, conforme descrito na [Figura 2.2](#). A alimentação das placas é proveniente de uma bateria de Lítio-íon do veículo, e passa pelos reguladores de tensão, conversores CC/CC chaveados, na placa de potência que rebaixarão o nível de tensão de entrada que varia de 42V a 28V para 15V e 5V. Essa tensão alimentará os circuitos opto-isoladores na saída da placa de sinal, bem como os *gate drivers*, CIs que fazem o disparo dos transistores da placa de potência.

Já o microcontrolador, amplificador, conversor A/D e sensor de corrente utilizarão uma malha de terra diferente do restante do circuito na sua alimentação, uma vez que carregam sinal de controle, que pode sofrer perturbação se misturado com sinal de potência.

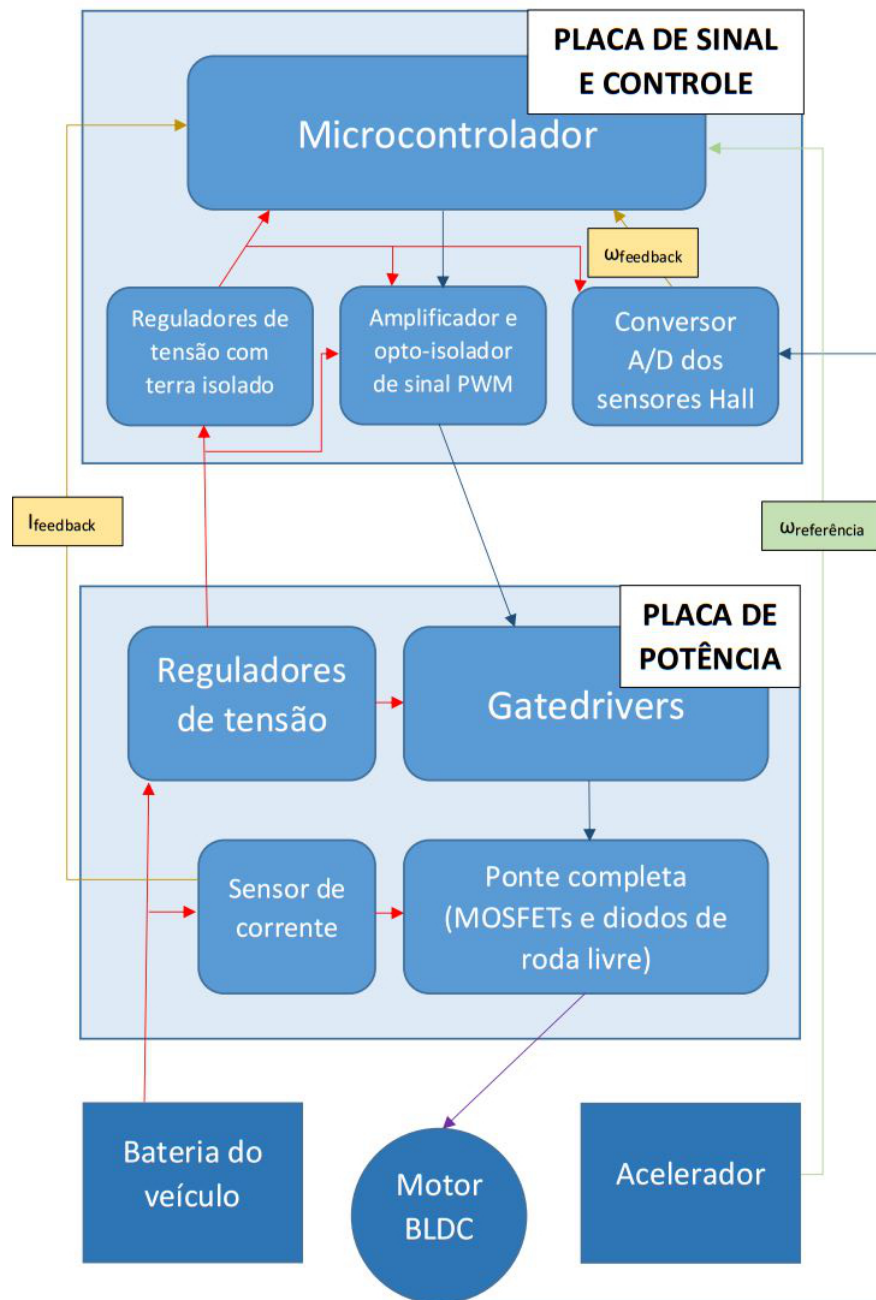


Figura 2.2: Diagrama de blocos do sistema embarcado de controle do motor BDLC. Fonte: Autoria própria.

Essa perturbação é principalmente advinda dos *gate drivers* que não são isolados, uma vez que utilizam capacitores de *bootstrap*, técnica desenvolvida para garantir a tensão de disparo entre porta-fonte dos transistores utilizados na ponte inversora trifásica. Assim, a placa de potência fornece a alimentação para a placa de sinal, juntamente com o valor atual de corrente total do motor amostrado pelo devido sensor, enquanto que a placa de sinal envia a alimentação para o sensor de corrente e os sinais *PWM* devidamente isolados de acionamento dos transistores.





### 3 CONFEÇÃO DAS PLACAS DO CONTROLADOR EMBARCADO

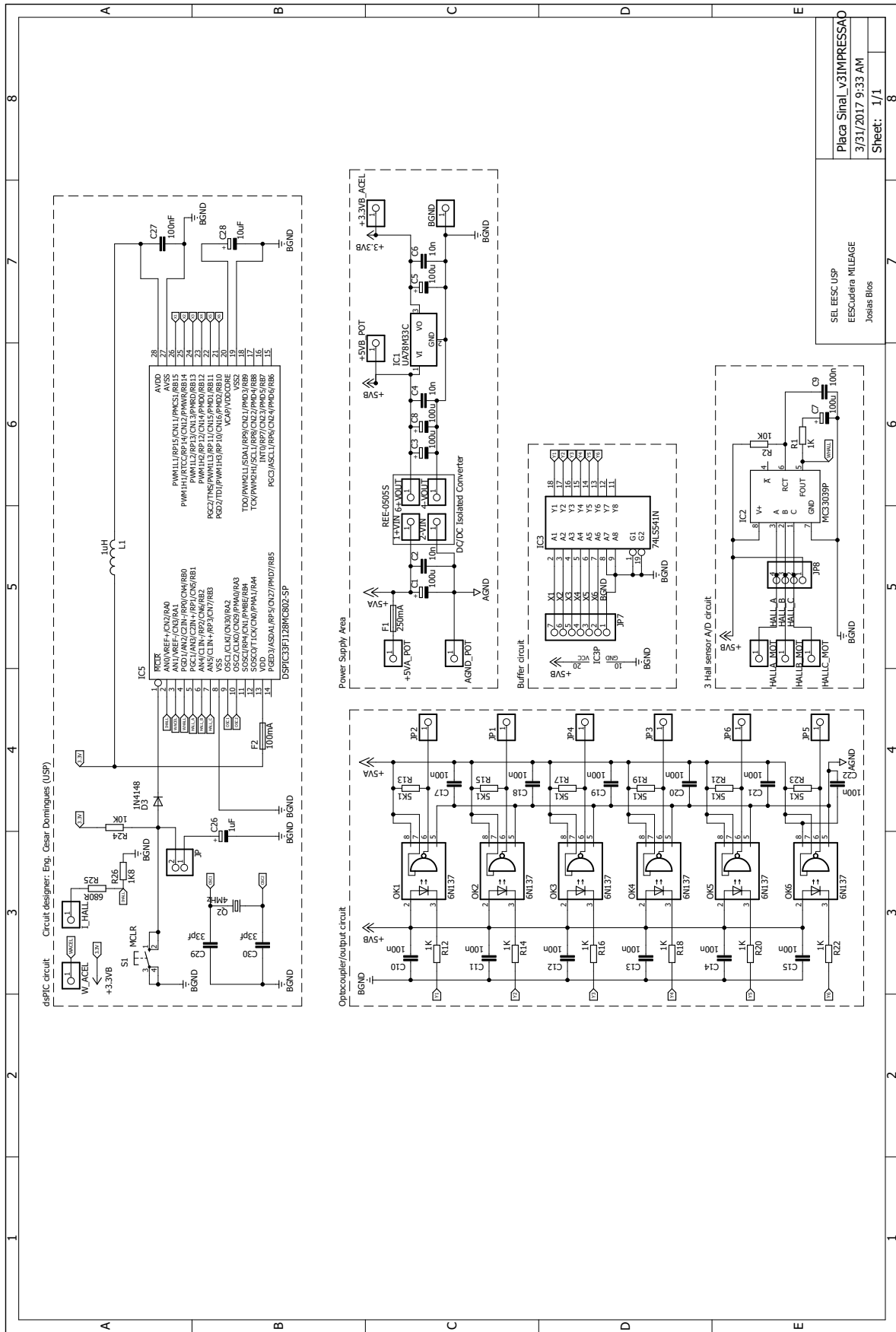
No trabalho anterior, o controlador se apresentava em três seções diferentes (MORAES, 2015). Isso ocasionava problemas na detecção de ruídos, dificultando encontrar a causa, principalmente por existir uma parte do circuito em protoboard. Nesse trabalho, o controlador era alimentado por três fontes diferentes de energia: a bateria de Lítio-íon e dois canais de uma fonte de bancada provendo 15V para a placa de interface do *dsPIC* e 20V para a placa de potência. Para que o controlador pudesse ser embarcado e tivesse ruídos reduzidos, foi necessário alterar sua topologia, de maneira a ser alimentado por uma única fonte: a bateria do carro.

Na placa de potência houve alteração nos *MOSFETs* que compõem a ponte inversora trifásica, pois os anteriores (IRFP450) têm máxima corrente contínua no dreno de 14A, conforme o *datasheet* da *International Rectifier*. Os novos *MOSFETs* IRFB3207 têm capacidade de conduzir continuamente correntes de até 180A, o que é muito superior ao que o motor drena. Porém, a escolha desse modelo é justificada pela baixa resistência em condução dreno-fonte  $R_{DS(on)}$ , que é tipicamente de 3,6  $m\Omega$ , valor mais de cem vezes menor que o do componente anterior. Assim, a dissipação de energia em forma de calor é minimizada, aumentando a eficiência do controlador.

A criação dos layout e a confecção das placas de sinal/controlador e potência usadas neste trabalho foi feita a partir de esquemáticos gerados no software EAGLE, da Autodesk®. Ressalta-se que as placas, de face simples, foram projetadas de maneira a trabalhar sobrepostas uma à outra, reduzindo a área do controlador embarcado. Após o projeto das placas, foi feita a impressão térmica das trilhas por meio de papel tipo *transfer* e corrosão das placas de cobre com ácido perclorato de ferro.

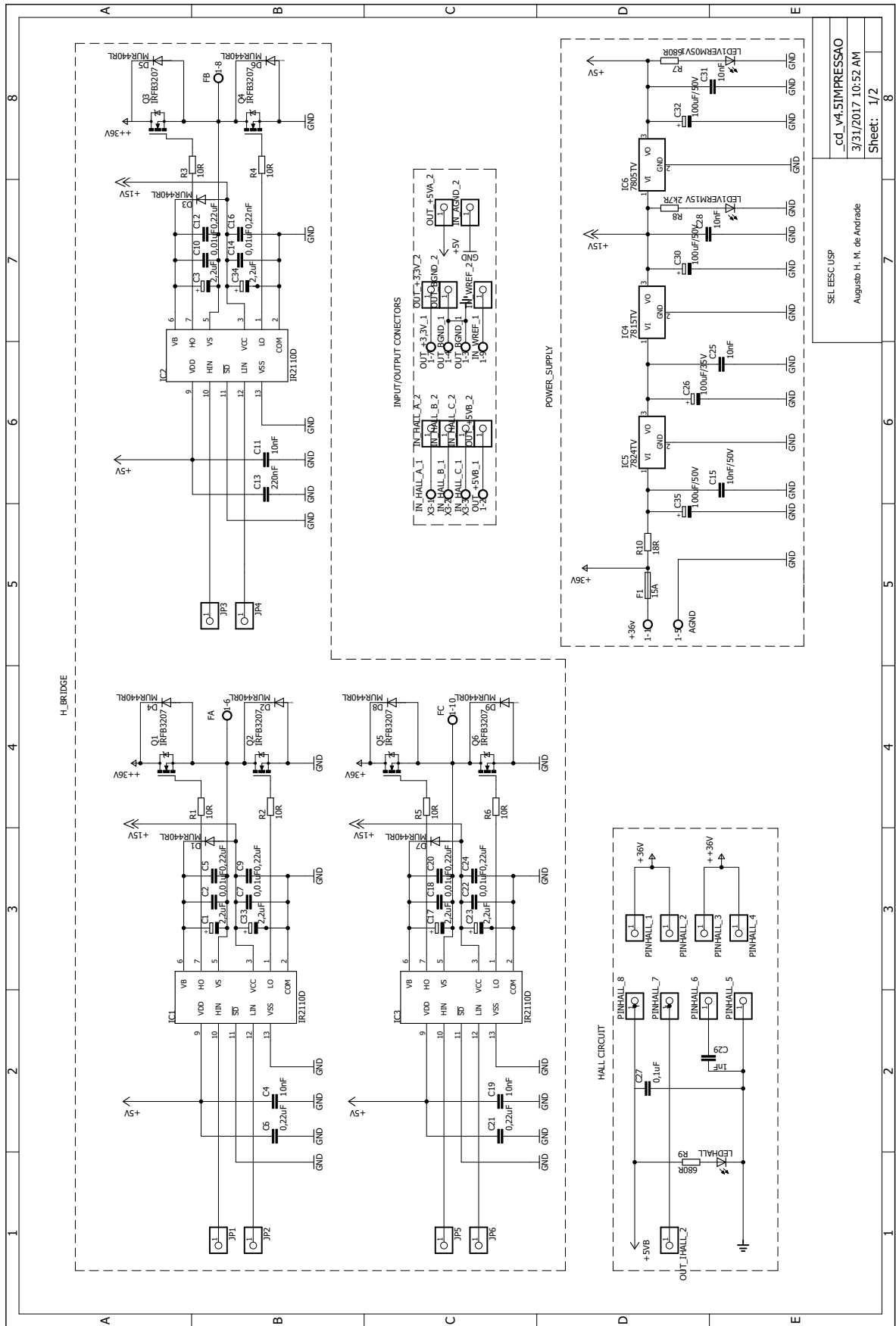
#### 3.1 Primeira Versão das Placas

Os esquemáticos das ligações entre componentes das primeiras placas de sinal e potência são mostrados nas Figura 3.1 e Figura 3.2, respectivamente. Os layout das trilhas e posições dos componentes seguem nas Figura 3.3 e Figura 3.4. As fotos das primeiras placas são as Figura 3.5 e Figura 3.6.



7/19/2017 7:51 PM f=0.75 C:\Users\Josias Blos\Dropbox\Controlador BLDC\Eagle\Esquematicos\Sinal\Placa Sinal\_v3IMPRESSAO.sch (Sheet: 1/1)

Figura 3.1: Esquemático elétrico da primeira versão da placa de sinal. Fonte: Autoria própria com contribuição do Eng. César Domingues.



SEL/EESC-USP  
 Augusto H. M. de Andrade  
 \_cd\_v4.5IMPRESSAO  
 3/31/2017 10:52 AM  
 Sheet: 1/2

Figura 3.2: Esquemático elétrico da primeira versão placa de potência. Fonte: Autoria de Augusto H. M. Andrade com contribuição do Eng. César Domingues.

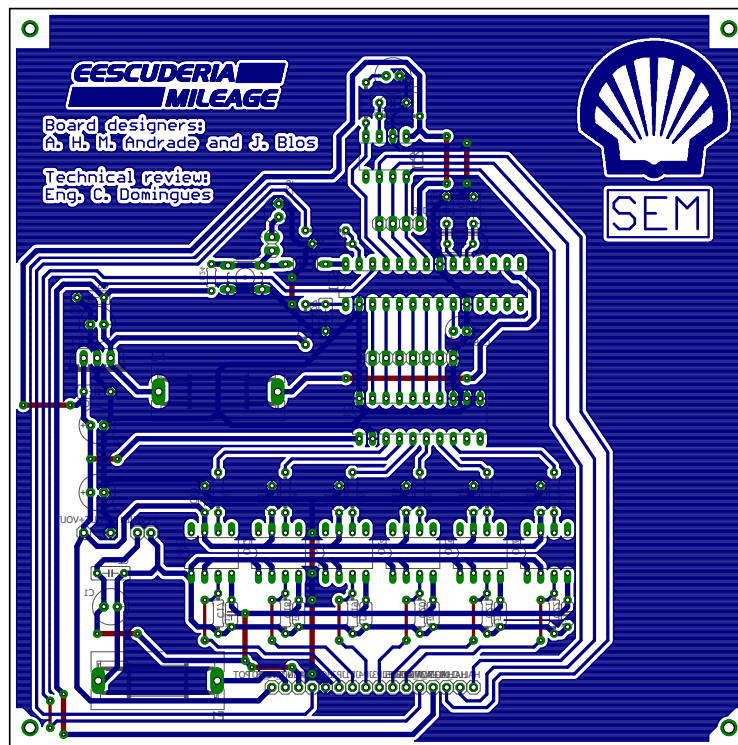


Figura 3.3: Layout da primeira versão da placa de sinal. Fonte: Autoria própria com contribuição do Eng. César Domingues.

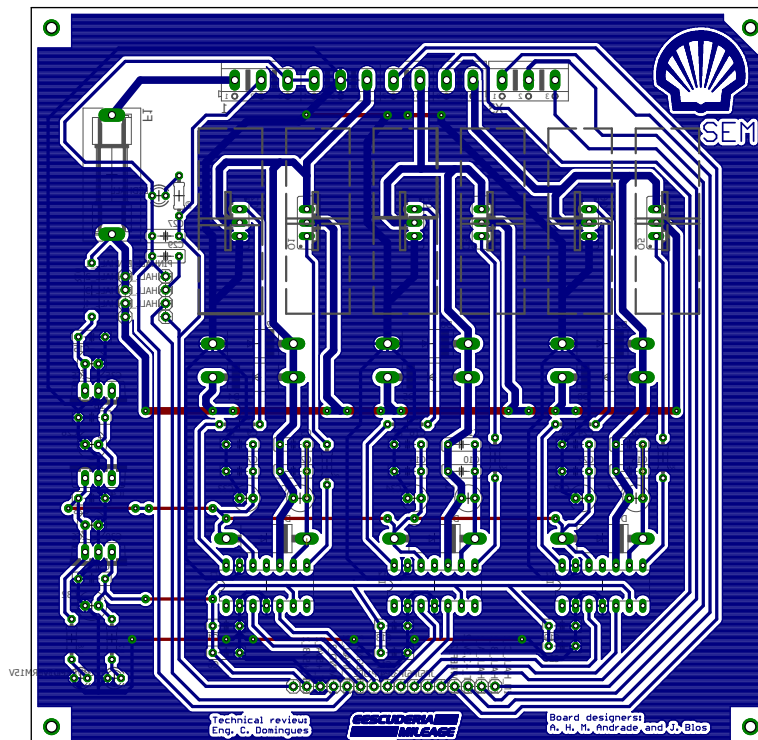


Figura 3.4: Layout da primeira versão da placa de potência. Fonte: Autoria de Augusto H. M. Andrade com contribuição do Eng. César Domingues.

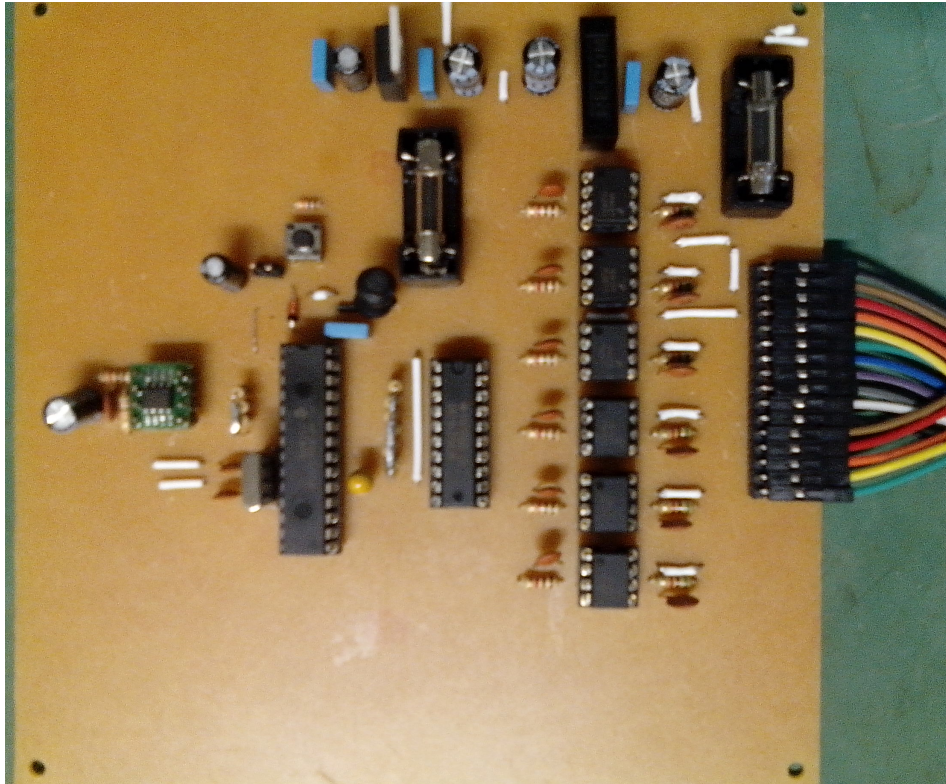


Figura 3.5: Primeira placa de sinal. Fonte: Autoria própria.

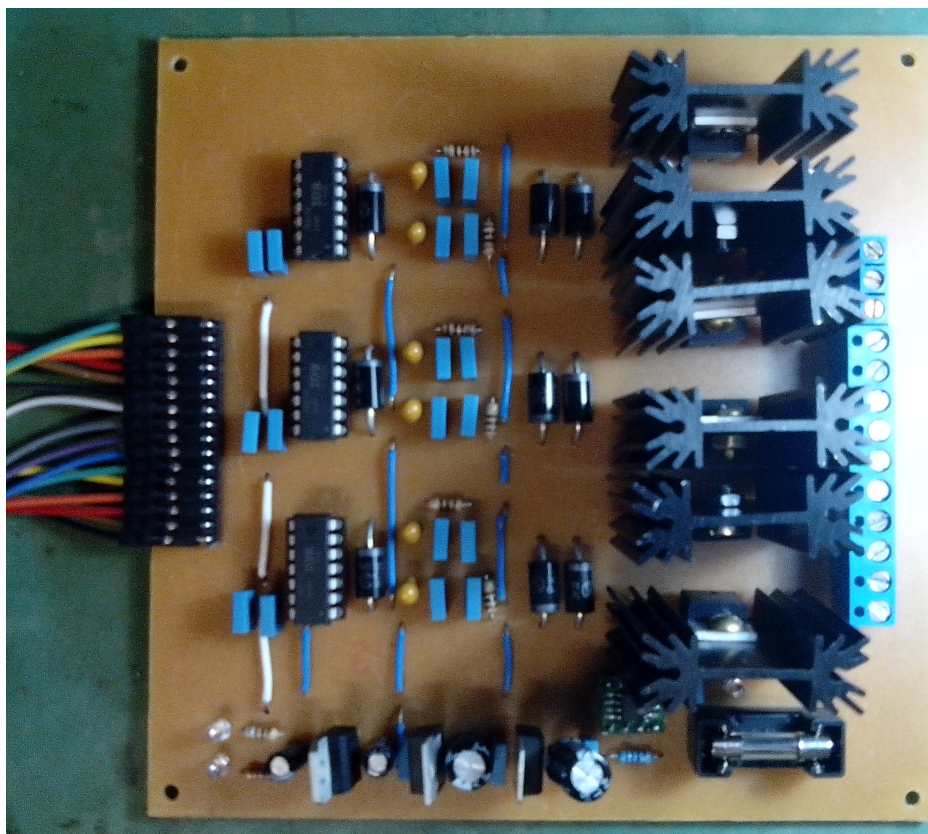


Figura 3.6: Primeira placa de potência. Fonte: Autoria de Augusto H. M. Andrade.

Quando as placas foram montadas e alimentadas com tensão proveniente de fonte de bancada (modelo Minipa MPL-3303M), notou-se um aquecimento dos componentes responsáveis pela redução da tensão de 42V - tensão máxima da bateria de Lí-Ion - para 24V, 15V, 5V e 3,3V, uma vez que eram **reguladores lineares** do tipo LM78xx e um resistor de potência. Esse problema térmico ocasionava o *shutdown* dos reguladores em menos de 10 minutos. Como solução provisória, foi feito o uso de ventilação forçada, por meio de um *cooler* de baixa potência (1W). Assim, com as primeiras versões das placas do controlador já foi possível implementar a lógica de controle, ainda que o controlador estivesse utilizando 8W apenas para sua energização.

### 3.2 Última Versão das Placas

Com vistas a melhorar as primeiras placas, foram feitos novos esquemáticos e layout, de maneira a sanar os problemas térmicos e de segurança, fixando os dissipadores dos *MOSFETs*, pois a trepidação do carro faria com que os terminais dos transistores fossem submetidos a esforço mecânico, terminando por inutilizar a ponte de potência.

Ainda foram adicionados: resistores de *pull-down* nas trilhas dos sinais dos sensores de posição Hall do motor, mantendo a tensão em no máximo 3,3V; uma trilha conectando um pino do *dsPIC* ao barramento de saída do controlador, para receber um botão tátil; e capacitores eletrolíticos de tanque, na entrada da placa de potência para estabilizar a tensão de alimentação.

Os esquemáticos das últimas versões das placas seguem nas [Figura 3.7](#) e [Figura 3.8](#), já os layout dos componentes e trilhas são mostrados nas [Figura 3.9](#) e [Figura 3.10](#), e as fotos são as [Figura 3.11](#), [Figura 3.12](#) e [Figura 3.13](#).

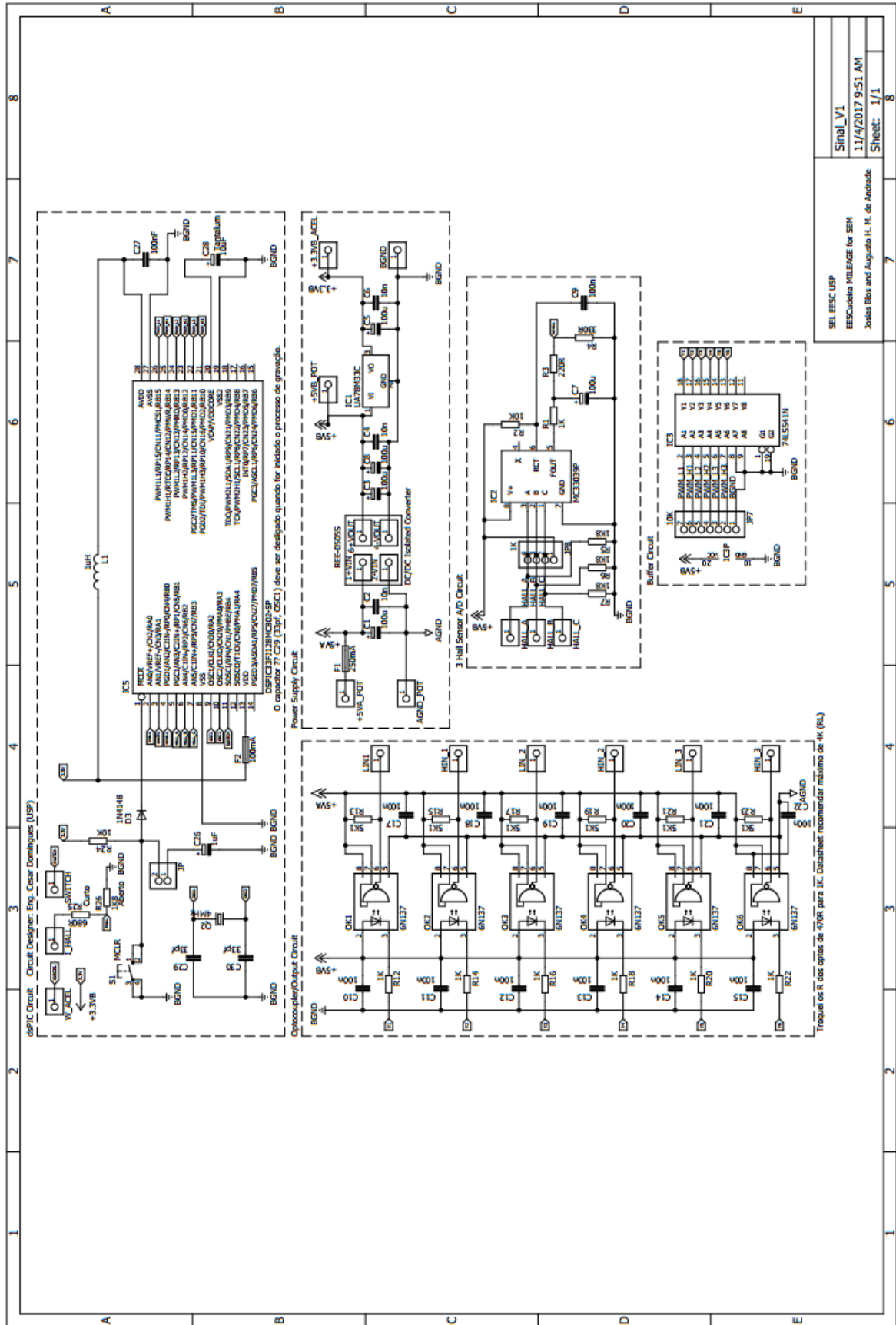
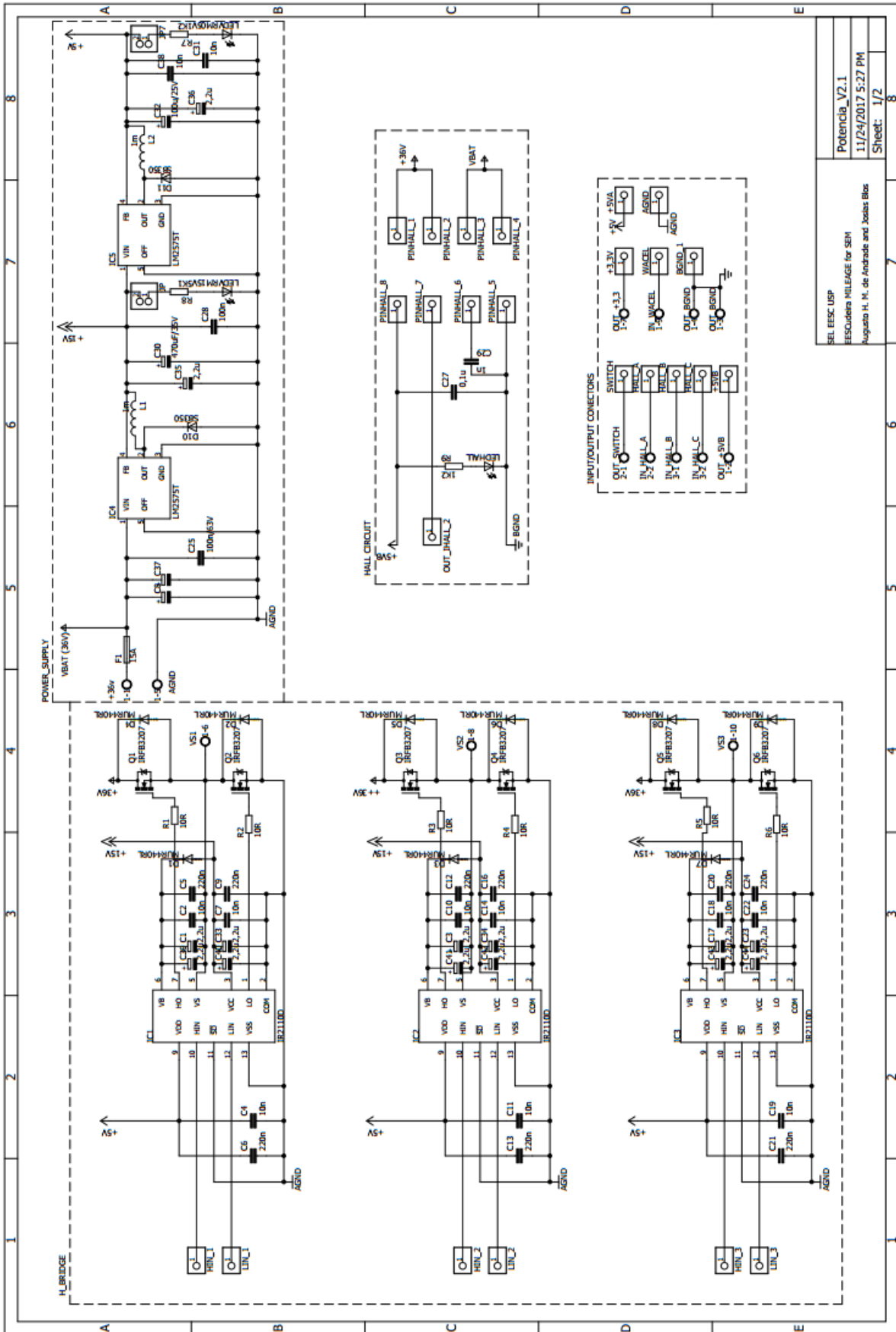


Figura 3.7: Esquemático da última versão da placa de sinal. Fonte: Autoria própria.



SEL EESC USP	Potencia_V2.1
ESCOLA MILAGE for SEN	11/24/2017 5:27 PM
Augusto H. M. de Andrade and Josias Bias	Sheet: 1/2

Figura 3.8: Esquemático da última versão da placa de potência. Fonte: Autoria própria com contribuição de Augusto H. M. de Andrade.



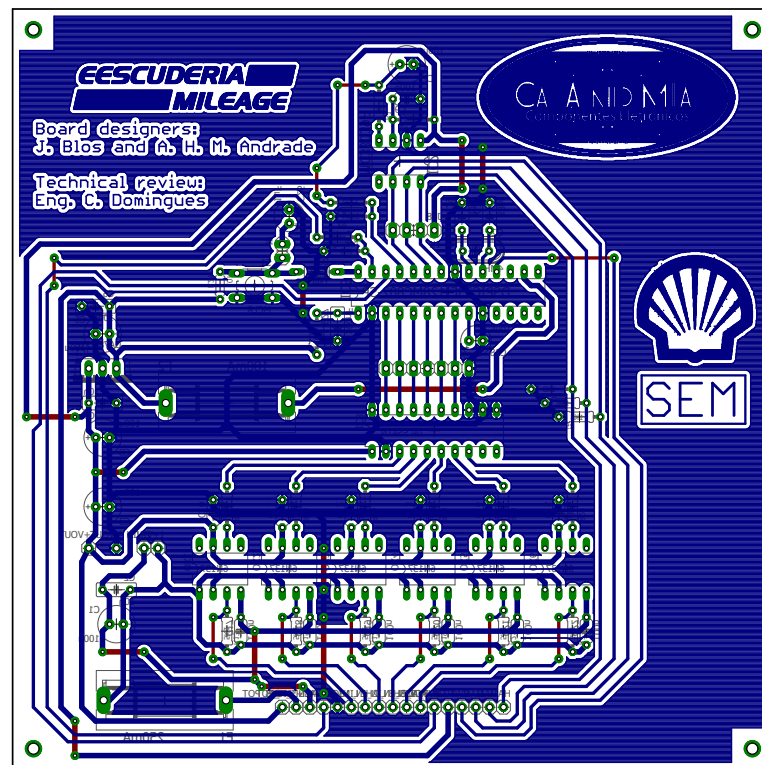


Figura 3.9: Layout da última placa de sinal. Fonte: Autoria própria.

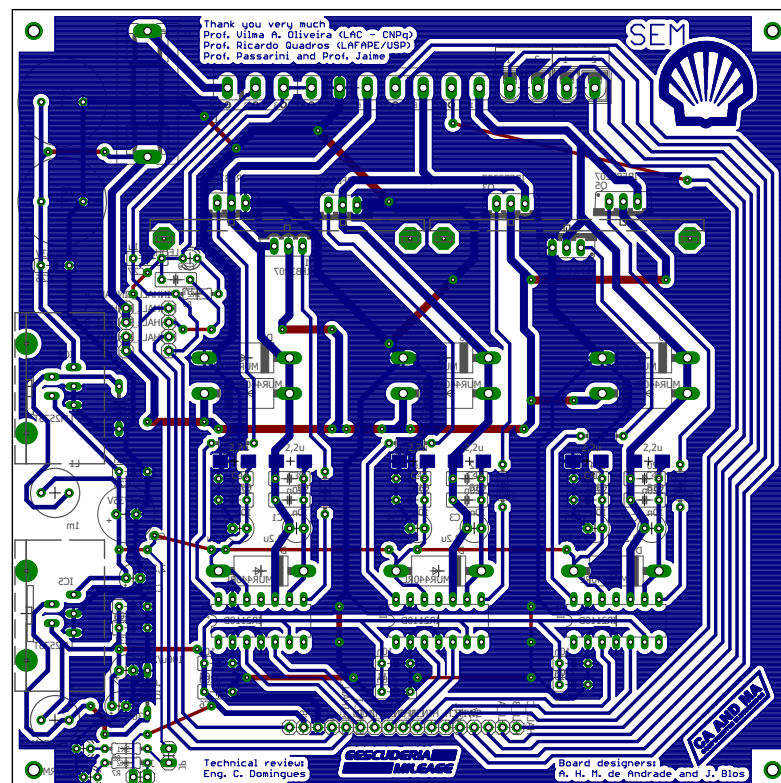


Figura 3.10: Layout da última versão da placa de potência. Fonte: Autoria própria.

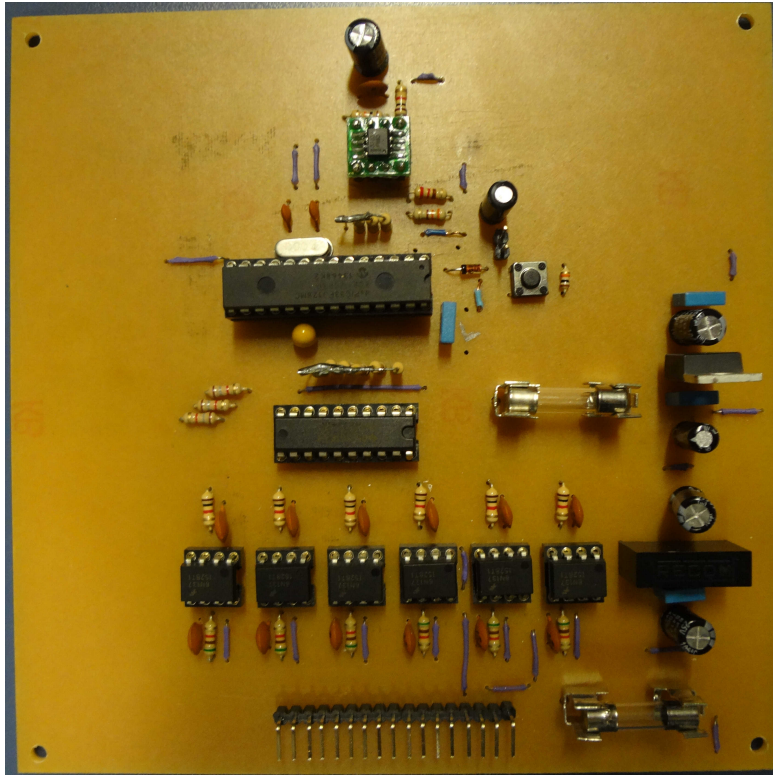


Figura 3.11: Última placa de sinal. Fonte: Autoria própria com contribuição de membros da EESCuderia Mileage.

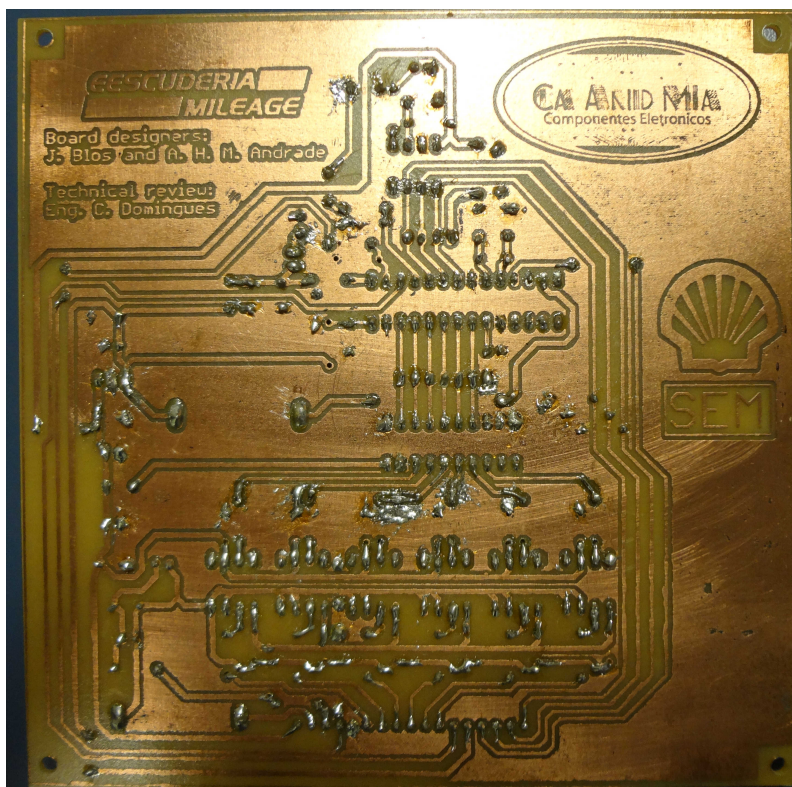


Figura 3.12: Última placa de sinal, com detalhe das trilhas e acabamento. Fonte: Autoria própria com contribuição de membros da EESCuderia Mileage.

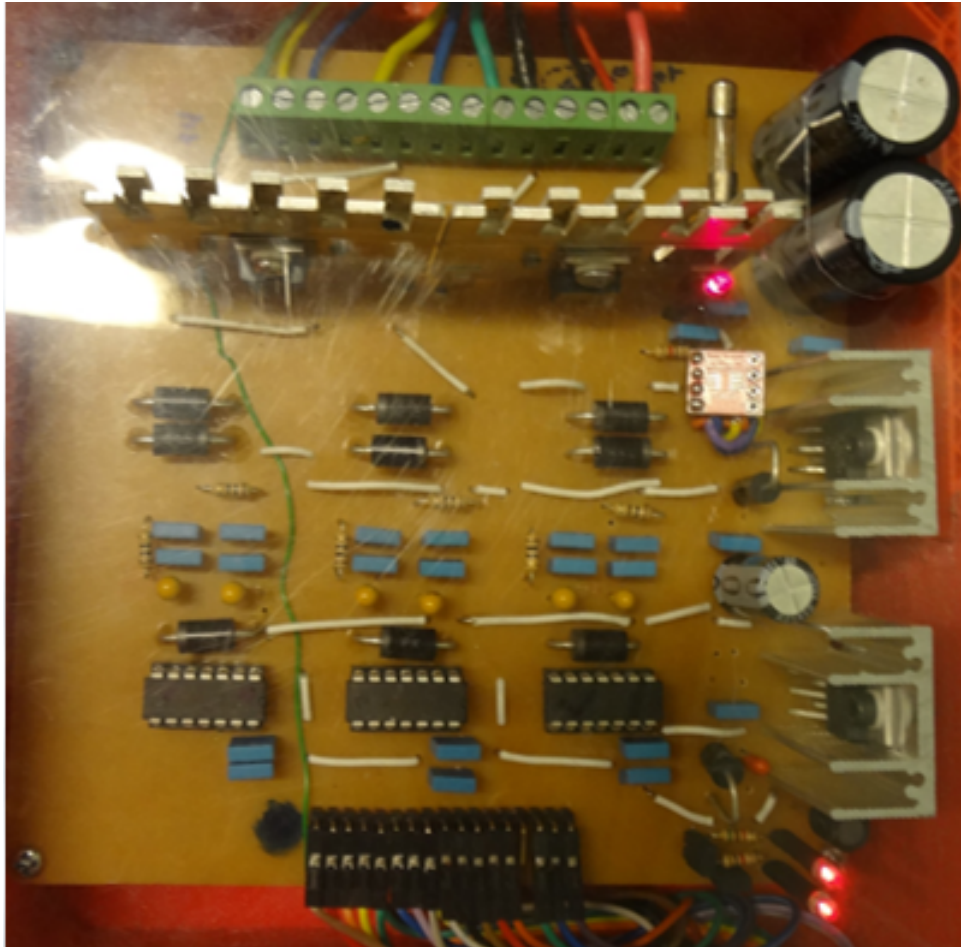


Figura 3.13: Última placa de potência. Fonte: Autoria própria com contribuição do Prof. Passarini e membros da EESCuderia Mileage.

Como resultado da criação das novas placas, obteve-se um controlador termicamente estável, com consumo médio de 2,36W em *stand-by*, analisado numa faixa de tensão de alimentação entre 28V e 41,7V, que é mais eficiente em comparação ao comercial, que apresenta consumo superior a 4W nas mesmas condições. Uma razão para esse ganho em eficiência, quando comparadas às versões anteriores, é a escolha de componentes conversores de tensão CC/CC chaveados (LM2575) em contraste com os reguladores lineares, que dissipavam a tensão excedente em forma de calor. Também, observa-se que o ruído constatado foi muito menor, especialmente na placa de sinal (Figura 3.12).

Cabe ainda mencionar a dificuldade enfrentada ao se transferir o layout da última placa de potência do papel de *transfer* para a placa de cobre. A EESCuderia Mileage estava às vésperas de ir ao Rio de Janeiro para a competição brasileira da Shell Eco-marathon, e a única alternativa encontrada foi o uso de ferro de passar roupa, em vez da prensa térmica. Até o presente momento a placa continua funcionando sem problemas.

### 3.3 Impressão 3D da Case do Controlador

Para comportar as placas do controlador montadas, uma case foi projetada pelo diretor do Mileage, Hermano Esch, e impressa em ABS e PLA no Núcleo de Manufatura Avançada (NUMA) da Escola de Engenharia de São Carlos. Na foto da [Figura 3.14](#), pode-se notar que a case foi impressa em quatro partes especialmente projetadas com encaixes e unidas com cianoacrilato, por não se ter uma mesa de impressão do tamanho da case.

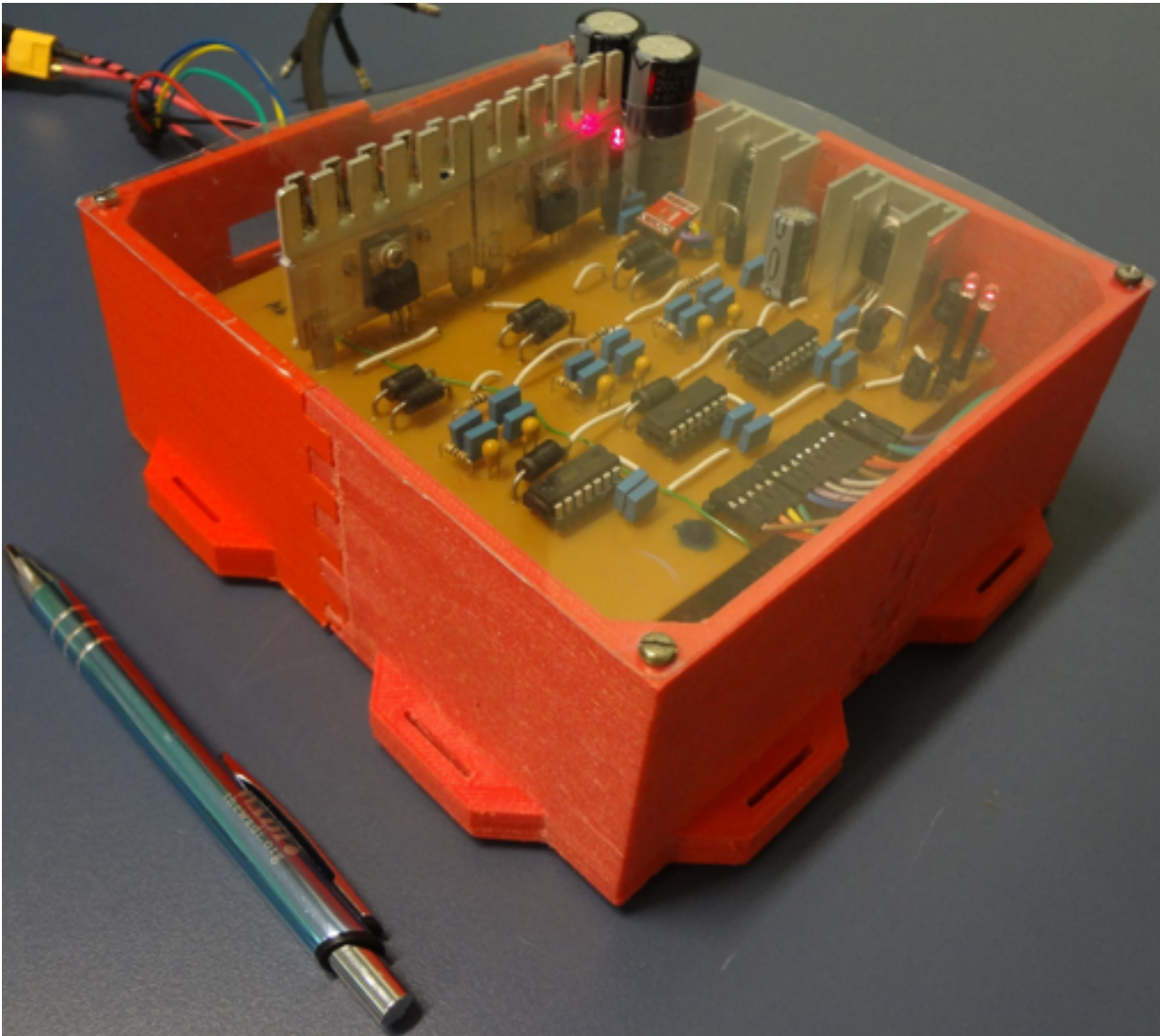


Figura 3.14: Última versão do controlador montado em case impressa em 3D. Fonte: Autoria própria com contribuição de Hermano Esch.

## 4 ENSAIOS REALIZADOS

Para projetar eficazmente a partida em rampa é necessário o conhecimento do modelo da planta do motor a ser controlada. Para levantamento dos parâmetros elétricos de resistência e indutância entre fases do motor uma ponte RLC de bancada foi utilizada.

Durante a execução do trabalho, notou-se a necessidade de criar um mecanismo para medição da constante de torque do motor, levantando uma família de curvas de torque *versus* corrente para cada par de fases ativas. Por fim, foram feitos diversos ensaios em bancada e com o protótipo Venturo para avaliar o desempenho do controle e da partida em rampa, tanto a vazio quanto com carga.

### 4.1 Ensaio com Ponte RLC

Este ensaio serviu como referência para levantar a indutância e resistência elétrica médias de cada fase do motor, uma vez que foi feito com uma ponte RLC, equipamento aferido de bancada, modelo RLC-600 da GlobalSpecialties, disponível no LASEL. Foram medidos os valores série e paralelo de resistência, indutância e capacitância do motor *BLDC* com e sem o cabo de conexão do motor (chicote).

### 4.2 Ensaio para Obtenção de Torque Estático do Motor

O mecanismo de bancada descrito em [Blos et al. \(2017\)](#) construído para este ensaio foi composto de uma célula de carga da Lutron modelo FG-5000 foi fixada conforme a [Figura 4.1](#), observando-se o alinhamento do eixo do motor com o elemento sensível da célula.

Por meio de uma fonte de tensão contínua da marca Minipa e modelo MPL-3303M, foi aplicada corrente elétrica variando de 0A a 6,3A, em passos de 200mA de cada vez entre cada par das três fases do motor e alterando-se o sentido da corrente no par após atingido limite de 6,3A. O ensaio foi repetido para diversas posições de ângulo do eixo do rotor ([Figura 4.2](#)) e para cada posição variou-se o par de fases ativas. Isso foi necessário para verificar a ocorrência de força no sentido oposto ao da rotação convencional do motor.

Foram registrados os valores de força medidos para cada valor de corrente, que multiplicados pela distância do eixo do motor ao ponto de aplicação da carga na célula, resultaram no torque desenvolvido pelo motor.

Três configurações foram determinadas, resultantes da combinação entre fases do motor: a configuração de número 1 foi feita entre as fases azul e verde, a de número 2 entre as fases azul e amarela, e a 3 entre as fases amarela e verde. Destaca-se que o motor estava na temperatura ambiente em todas as configurações.



Figura 4.1: Mecanismo de medida, visto de frente. Fonte: (BLOS et al., 2017), com contribuição do técnico Rui Berto e Prof. Manoel.



Figura 4.2: Mecanismo de medida, visto lateralmente. Detalhe das diferentes posições em que foram feitas as medições. Fonte: (BLOS et al., 2017), com contribuição do técnico Rui Berto e Prof. Manoel.

### 4.3 Estimação de Parâmetros

Para que a lógica de controle seja eficaz, é necessário identificar o modelo da planta a ser controlada (Figura 4.3). Após uma extensa busca de formas de levantar as constantes mecânicas momento de inércia 'J' e atrito viscoso 'B' por meio de ensaios, foi encontrada uma maneira versátil como solução: a estimação de parâmetros por meio do Simulink.

Esta forma necessita de um modelo criado no espaço do Simulink, com os parâmetros a ser estimados bem definidos, e de curvas coletadas experimentalmente do modelo real. De posse destes requisitos, usa-se o menu *Parameter Estimation* (PE).

Assim, foram estimados os valores médios das constantes elétricas entre fases indutância 'L', resistência 'R', da constante de torque 'Kt', e das constantes mecânicas momento de inércia 'J' e atrito viscoso 'B' por meio desta ferramenta do MATLAB. Ressalta-se que, ao utilizar todas as constantes no SI, têm-se  $K_t = K_e = K$ , e que a constante  $R_{ed}$  deve-se à redução mecânica planetária de dois estágios interna do motor, de valor constatado de 12,5, após abrir o motor. Ainda, deixa-se claro que esta etapa foi realizada em conjunto com o estudante Augusto H. M. de Andrade, por tratar de informação relevante a ambos os projetos. Para informações mais detalhadas das etapas seguidas na estimação, sugere-se a consulta ao TCC do estudante (ANDRADE, 2017), que propõem uma estratégia de frenagem regenerativa para a mesma máquina utilizada neste trabalho .

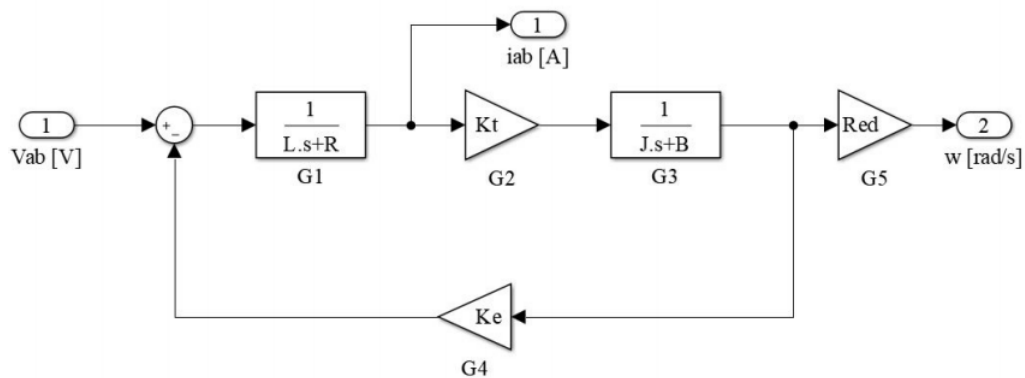


Figura 4.3: Modelo do motor BLDC, representado por blocos (ANDRADE, 2017).

### 4.4 Ensaios de Partida Direta a Vazio

Na bancada mostrada na Figura 4.4, com o motor sem nenhuma carga, a alimentação do controlador foi proveniente de duas baterias de Chumbo-ácido da marca UNICOBA, modelo Unipower, de tensão nominal 12V e capacidade de 7Ah, que associadas em série, apresentavam tensão em circuito aberto de aproximadamente 25V. Esta tensão foi aplicada com ciclo de trabalho ( $\delta$ ) quase unitário diretamente sobre as fases do motor que foi acionado pelo controlador desenvolvido.

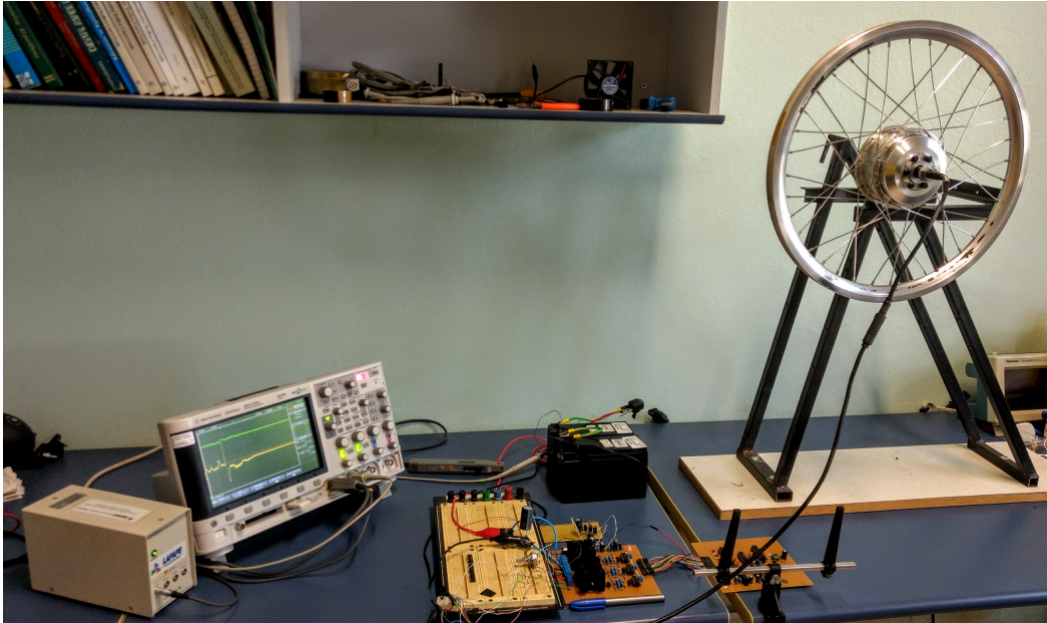


Figura 4.4: Bancada de testes no LAC. Fonte: (ANDRADE, 2017).

Concomitantemente, foram medidas a tensão e corrente de entrada no controlador (com um osciloscópio do InteGradEESC da marca Agilent Technologies, modelo MSO-X 2014A, 100MHz, 2GSa/s, 4 canais e com uma ponta de prova de corrente do LAFAPE, marca Yokogawa e modelo 701933 de 50MHz), buscando-se determinar os valores das correntes de pico e média em regime, e o afundamento máximo de tensão. Também foi capturada a corrente que entrava na ponte trifásica inversora, com a finalidade de observar seu comportamento.

Dado que a resistência dos enrolamentos do motor é bem baixa, a corrente de pico tende a valores muito superiores ao nominal do motor, o que pode danificar seriamente os ímãs permanentes e enrolamentos. Portanto, este ensaio foi reproduzido pouquíssimas vezes.

#### 4.5 Ensaio de Partida em Rampa a Vazio

Com mesma metodologia de aquisição de dados do Ensaio de Partida Direta, este ensaio porém se diferenciou no fato de que possuía dois cenários com fontes diferentes de energia. No primeiro, a fonte de bancada da marca Minipa, modelo MPL-3303M forneceu 28V através dos canais 1 e 2 associados em paralelo, com corrente máxima de 6,3A. O segundo cenário é o mesmo utilizado na Partida Direta (duas baterias de Chumbo-ácido em série).

Mas a diferença crucial no acionamento foi que, em vez de aplicar a tensão com  $\delta$  alto, o ciclo de trabalho inicial foi de 50%, sendo incrementado a cada 50 milissegundos, em valores de 2% em 2%.



## 4.6 Ensaios de Partida em Rampa com Carga

Na oficina da EESCuderia Mileage, o protótipo Venturo foi carregado com 48kg de lastro - um valor aproximado para o peso do piloto - a roda com o motor foi colocada sobre dois eixos cilíndricos paralelos apoiados por mancais, que giram livremente (conforme [Figura 4.5](#)), ainda foi-se variando a inclinação do eixo longitudinal do carro ([Figura 4.6](#)) por meio de calços colocados sob as rodas dianteiras, buscando-se assim uma maior aproximação da exigência real do motor, e conseqüentemente, do controlador embarcado.

Com o auxílio de um tacômetro óptico da Minipa, modelo MDT-2238A e fita refletora, a velocidade angular (em RPM) em regime foi registrada, e conhecido o valor do raio da roda (24cm), foi calculada a velocidade (em km/h) que o protótipo estaria desenvolvendo.

Os instrumentos de medição que constam na [Figura 4.7](#) foram os mesmos detalhados na [seção 4.4](#). A alimentação do controlador foi feita de duas formas. A primeira com associação em série de 3 baterias de Chumbo-ácido de mesma marca e modelo que os ensaios descritos anteriormente, resultando em aproximadamente 37,7V em circuito aberto. Já a segunda, com a mesma bateria de Lítio-íon do protótipo Venturo, da fabricante chinesa Bote Power, modelo TP-S3608, com 36V nominal e 8Ah de capacidade, configuração 10S4P, com cerca de 3kg, apresentando tensão em circuito aberto de 41,78V, indicando estar totalmente carregada.



Figura 4.5: Detalhe da montagem com os rolamentos onde foi apoiada a roda do motor.  
Fonte: Autoria própria com contribuição de Rui Berto.

Foram colocadas numa tabela os valores medidos de corrente (em Ampère) de pico e média em regime, valores de tensão (em Volt) inicial, de pico, afundamento máximo em relação à inicial e média em regime. Com os valores médios em regime, foi possível calcular a potência média (em Watt) que o controlador necessita para manter o motor em regime para cada inclinação.



Figura 4.6: Protótipo Venturo com carga. Detalhe dos calços nas rodas dianteiras. Fonte: Autoria própria.

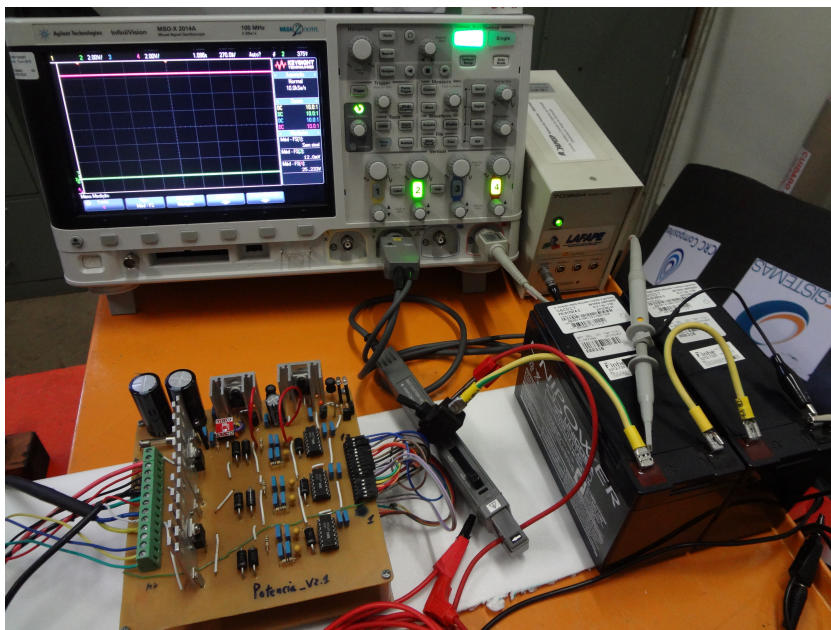


Figura 4.7: Instrumentos utilizados no Ensaio de Partida em Rampa com Carga. Fonte: Autoria própria.

Posteriormente, cada perfil de inclinação e tipo de alimentação foi repetido para um controlador comercial genérico de motor *BLDC* utilizado em bicicletas elétricas para acionar um motor de 36V, 350W, de fabricante chinesa, modelo KT26WS-790-D, mostrado na [Figura 4.8](#).



Figura 4.8: Controlador comercial utilizado no Ensaio de Partida em Rampa com Carga.  
Fonte: Autoria própria.



## 5 RESULTADOS DOS ENSAIOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Ensaio com Ponte RLC

Os resultados do ensaio com a ponte RLC são apresentados nas Tabelas 5.1 e 5.2.

Tabela 5.1: Parâmetros série obtidos no ensaio com a ponte RLC com o cabo de conexão

Configuração	R [ $m\Omega$ ] por fase	L [ $\mu H$ ] por fase
1	115,5	100,2
2	110	88,3
3	119	105,5

Tabela 5.2: Parâmetros série obtidos no ensaio com a ponte RLC sem o cabo de conexão

Configuração	R [ $m\Omega$ ] por fase	L [ $\mu H$ ] por fase
1	63,5	99,5
2	62,5	87,9
3	64,5	105,1

Analisando os resultados das Tabelas 5.1 e 5.2, observa-se que o motor tem um bom equilíbrio dos valores de resistência entre as suas fases, sendo esses também pequenos - ordem de centena de  $m\Omega$  - o que contribui para uma maior eficiência, visto que não há grandes perdas por efeito Joule. Também, observa-se que o cabo de conexão é responsável por mais de 50% do valor de resistência do conjunto, o que pode vir a ser melhorado com o uso de condutores com menor resistividade ou com o aumento da área de seção transversal dos mesmos. Já a indutância se mostrou quase que insignificante, da ordem de centena de  $\mu H$ , fazendo com que o motor se comporte quase que um sistema de primeira ordem.

Observou-se ainda neste ensaio que os valores de resistência, indutância e capacitância não mudam significativamente com relação à posição em que se encontram o estator e rotor.

### 5.2 Ensaio para Obtenção de Torque Estático do Motor

Com os dados para diferentes posições do rotor obteve-se a média das curvas. Não foi encontrada uma relação linear no intervalo medido, mas três intervalos [0-0,8] A, [1-2,8] A e [3-6,3] A, com relações aproximadamente lineares (conforme Figura 5.1) com inclinações 0,33 N.m/A, 1,12 N.m/A e 0,17 N.m/A, respectivamente. Esse comportamento pode ser devido à acomodação interna das engrenagens de náilon que compõem a redução mecânica planetária entre o eixo do motor e o rotor.

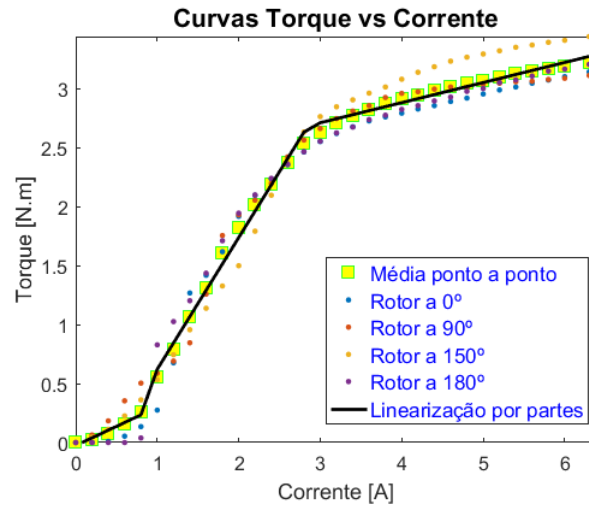


Figura 5.1: Família de curvas torque versus corrente. Fonte: (BLOS et al., 2017)

### 5.3 Estimação de Parâmetros

Primeiramente, foram capturadas as curvas de tensão e corrente aplicadas, e a resposta de velocidade (conforme Figura 5.2), num ensaio ao degrau com tensão de bateria de 25V e *duty cycle* de 50%.

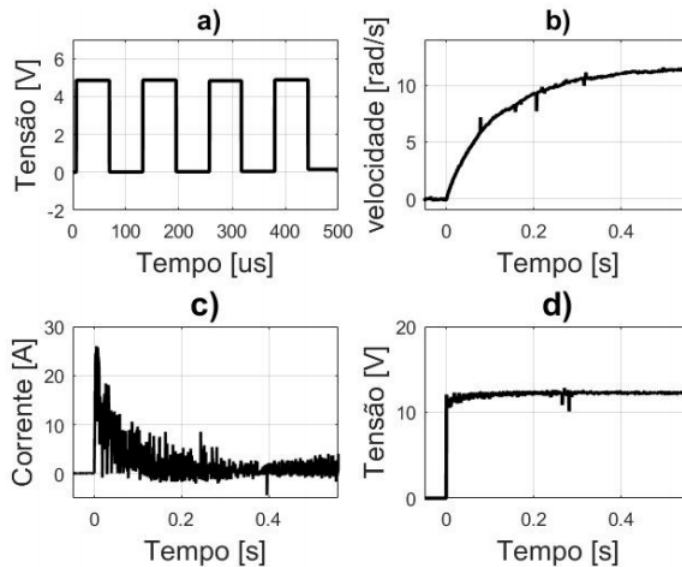


Figura 5.2: Respostas do ensaio degrau aplicado entre fases: (a) Sinal PWM, (b) velocidade do motor BLDC, (c) corrente total e (d) tensão aplicada entre fases correspondente à variação do PWM (ANDRADE, 2017).

A primeira estimativa feita foi a dos parâmetros elétricos, quando foram utilizadas as curvas (b), (c) e (d) simultaneamente na estimação. A segunda estimativa foi a dos parâmetros mecânicos, utilizando as curvas (b) e (c) apenas.

Os resultados dos valores estimados de cada constante seguem na Tabela 5.3.

Tabela 5.3: Estimativa dos parâmetros do modelo do motor via PE (ANDRADE, 2017).

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

Observando os gráficos da velocidade e corrente na [Figura 5.3](#), constata-se que os parâmetros estimados retornam uma resposta e dinâmica simulada muito próxima à real.

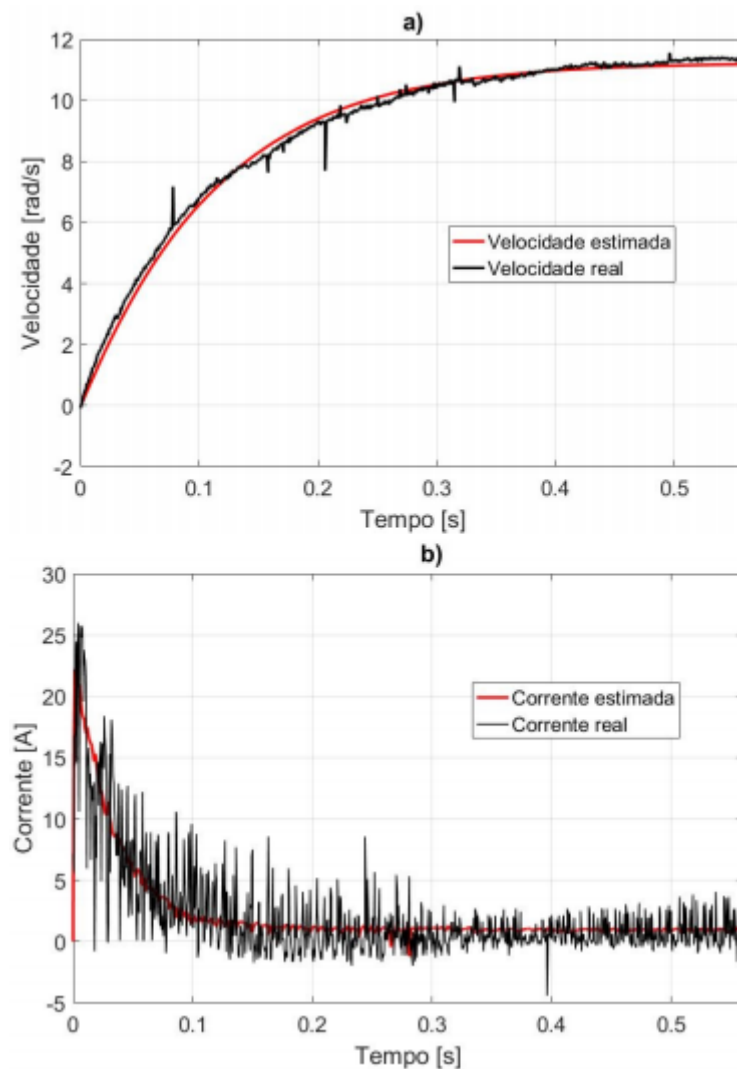


Figura 5.3: Comparação entre respostas simulada e experimental usando a resposta ao degrau de velocidade e corrente como entradas para a ferramenta PE, estimando todas as constantes. a) Curvas de velocidade e b) Curvas de corrente (ANDRADE, 2017).

## 5.4 Ensaios de Partida Direta a Vazio

A Figura 5.4 mostra a tensão e corrente de entrada do controlador na partida direta do motor sem carga.

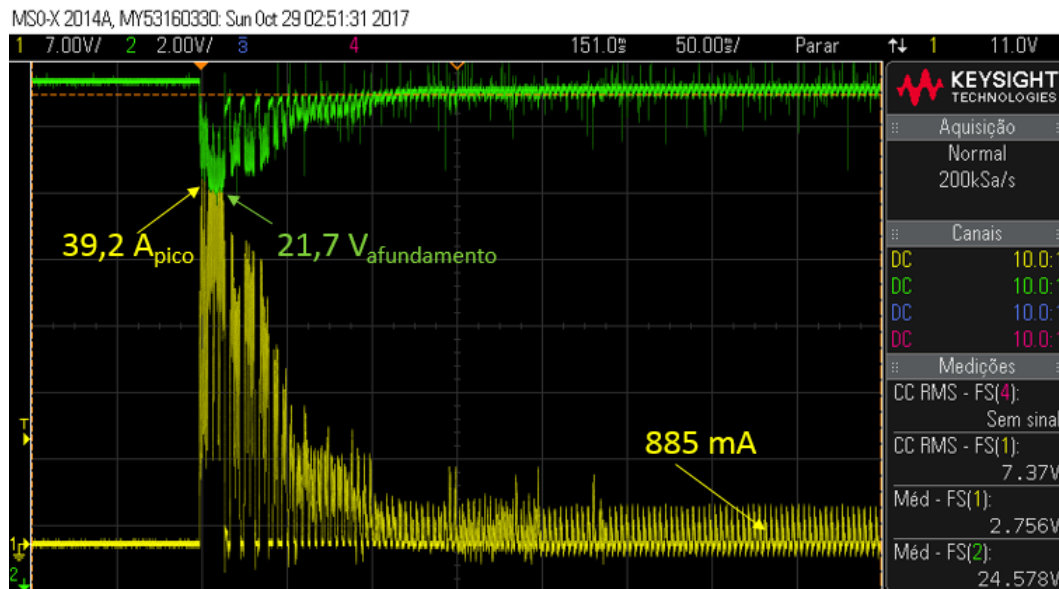


Figura 5.4: Dinâmica da corrente total de entrada (amarelo) e tensão de entrada (verde) na partida direta,  $\delta$  de 95% a vazio, 183 RPM em regime, motor LAC, bateria de Chumbo-ácido com 25,4V. Fonte: Autoria própria.

Como mostrado, a partida direta eleva a corrente para quase 40A, devido à aplicação de quase toda a tensão da bateria (25V) diretamente sobre a resistência dos enrolamentos do motor, que é bem baixa. Este valor de pico só não foi maior porque a bateria de Chumbo-ácido não suportou tal demanda de corrente, o que se evidencia pelo afundamento de quase 4V.

Durante a execução deste ensaio, observou-se ainda que se o motor opera sem carga, a forma de onda da corrente é característica de modo descontínuo, enquanto que se o motor tem alguma carga, mesmo que pequena, a corrente pouco entrava em modo descontínuo.

Como consequência deste resultado, o acionamento em partida direta foi descartado para esta aplicação. Além de que o motor estava operando em vazio. Caso houvesse carga nominal para tração do protótipo, o valor de pico seria possivelmente de intensidade e duração maiores.

## 5.5 Ensaios de Partida em Rampa a Vazio

Nas Figuras 5.5 e 5.6 são mostradas a tensão e corrente total de entrada do controlador após implementação da estratégia de rampa, com alimentação da fonte de bancada e das baterias, respectivamente. O tempo de subida foi de 1 segundo.



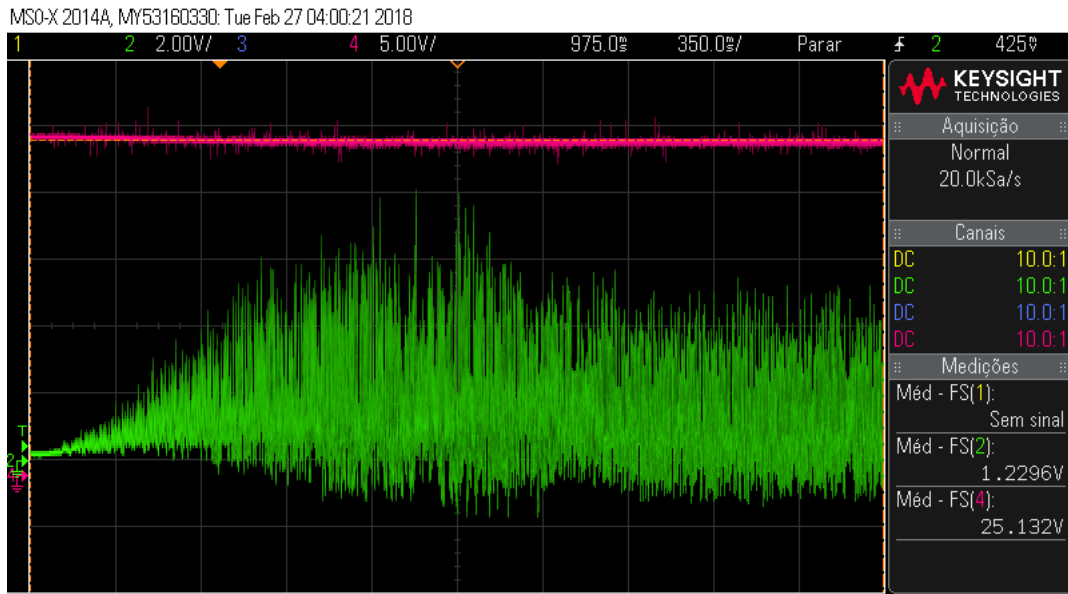


Figura 5.6: Tensão de entrada (vermelho) e corrente total de entrada (verde) na partida em rampa a vazio com janela de 3 segundos, bateria de Chumbo-ácido com 25V. Fonte: Autoria própria.

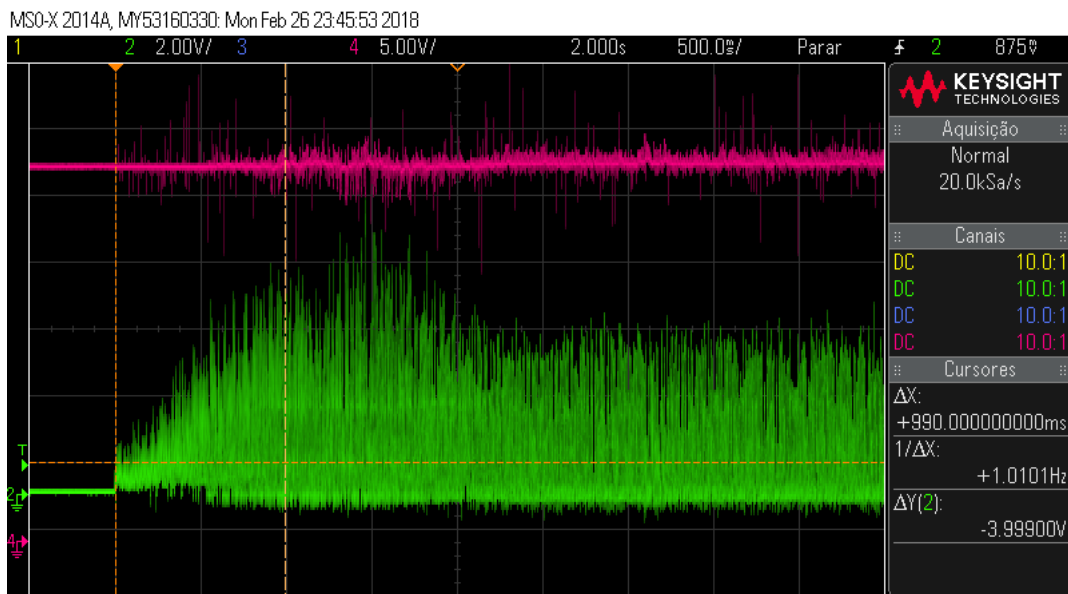


Figura 5.5: Tensão de entrada (vermelho) e corrente total de entrada (verde) na partida em rampa a vazio com janela de 5 segundos, fonte de bancada de 28V. Fonte: Autoria própria.

Ainda que os gráficos foram capturados em janelas diferentes de tempo, nota-se duas diferenças principais: a curva de tensão na fonte apresentou mais ruído em comparação à bateria, porém quase não se notou afundamento; já a curva de corrente da bateria entrou em modo de condução descontínuo após a rampa, enquanto que a curva de corrente da fonte, não apresentou valores negativos. Isto deve-se a um bloqueio interno na fonte, que

impede o retorno de corrente. As Figuras 5.7 – 5.12 mostram a tensão e corrente de entrada da ponte de potência do controlador após implementação da estratégia de rampa, em janelas de 3 segundos, 100 e 20 milissegundos.

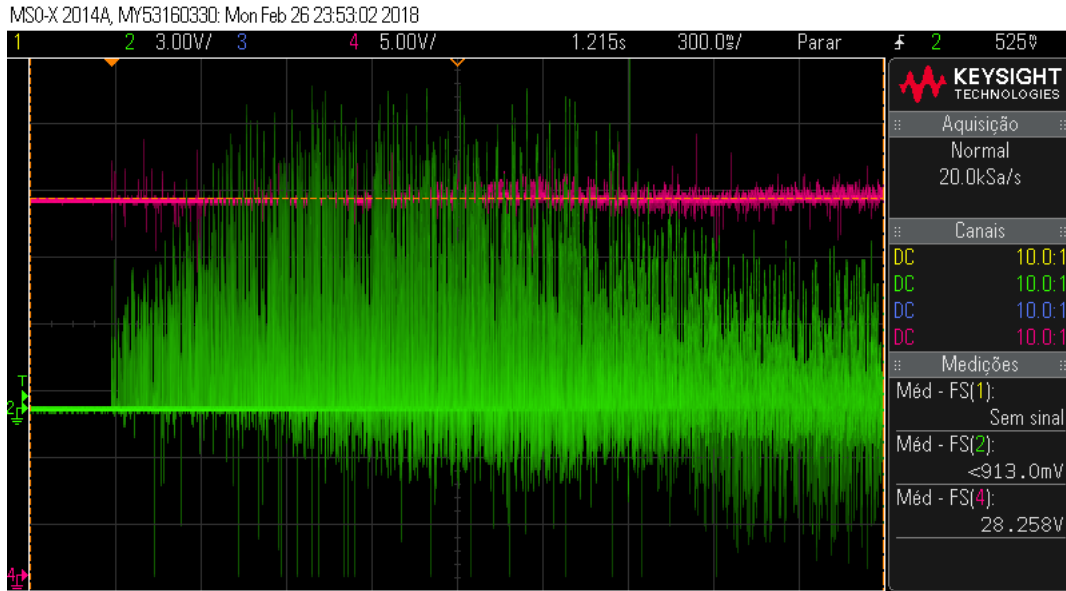


Figura 5.7: Tensão de entrada (vermelho) e corrente da ponte inversora (verde) na partida em rampa a vazio com janela de 3 segundos, fonte de bancada de 28V. Fonte: Autoria própria.

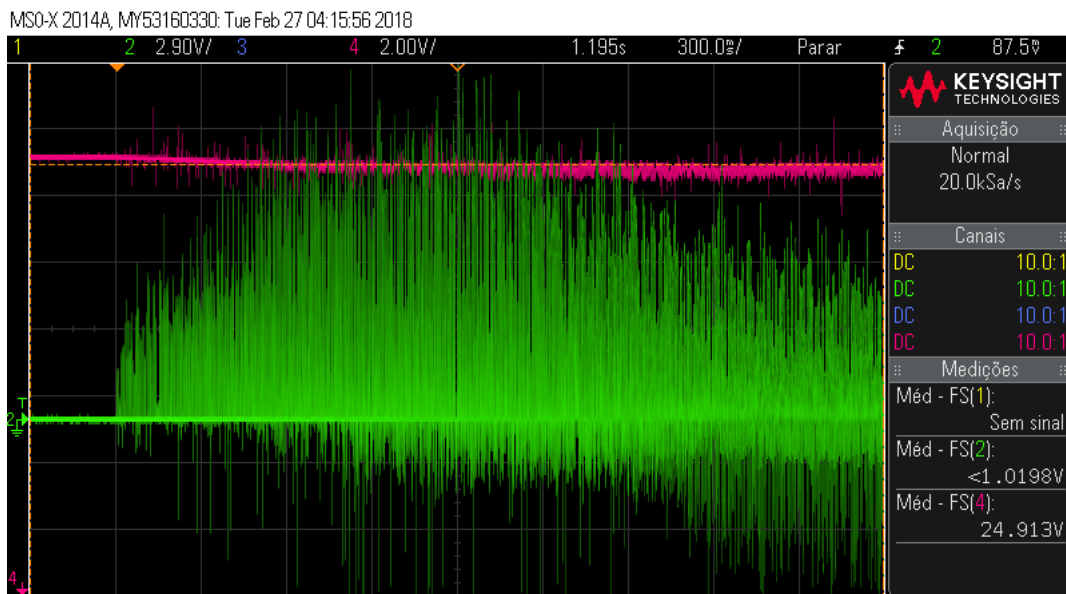


Figura 5.8: Tensão de entrada (vermelho) e corrente da ponte inversora (verde) na partida em rampa a vazio com janela de 3 segundos, bateria de Chumbo-ácido com 25V. Fonte: Autoria própria.

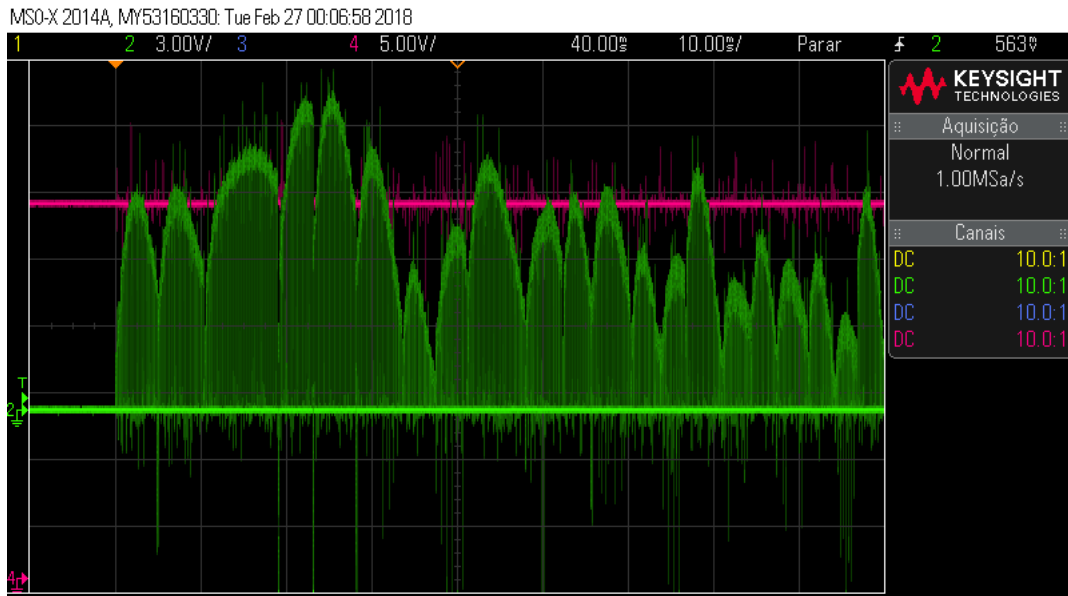


Figura 5.9: Tensão de entrada (vermelho) e corrente da ponte inversora (verde) na partida em rampa a vazio com janela de 100 ms, fonte de bancada de 28V. Fonte: Autoria própria.

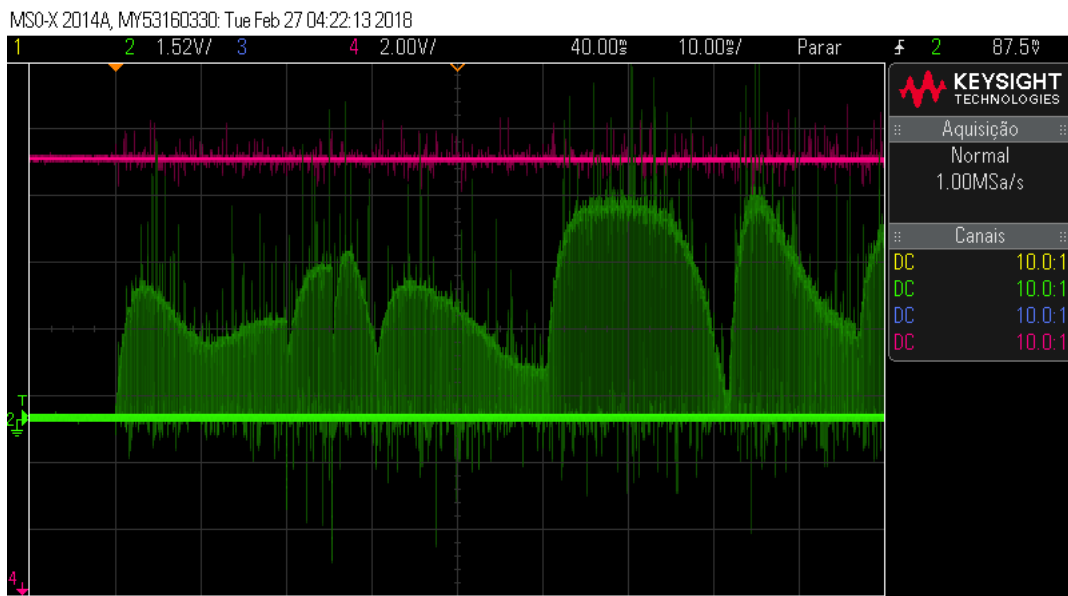


Figura 5.10: Tensão de entrada (vermelho) e corrente da ponte inversora (verde) na partida em rampa a vazio com janela de 100 ms, bateria de Chumbo-ácido com 25V. Fonte: Autoria própria.

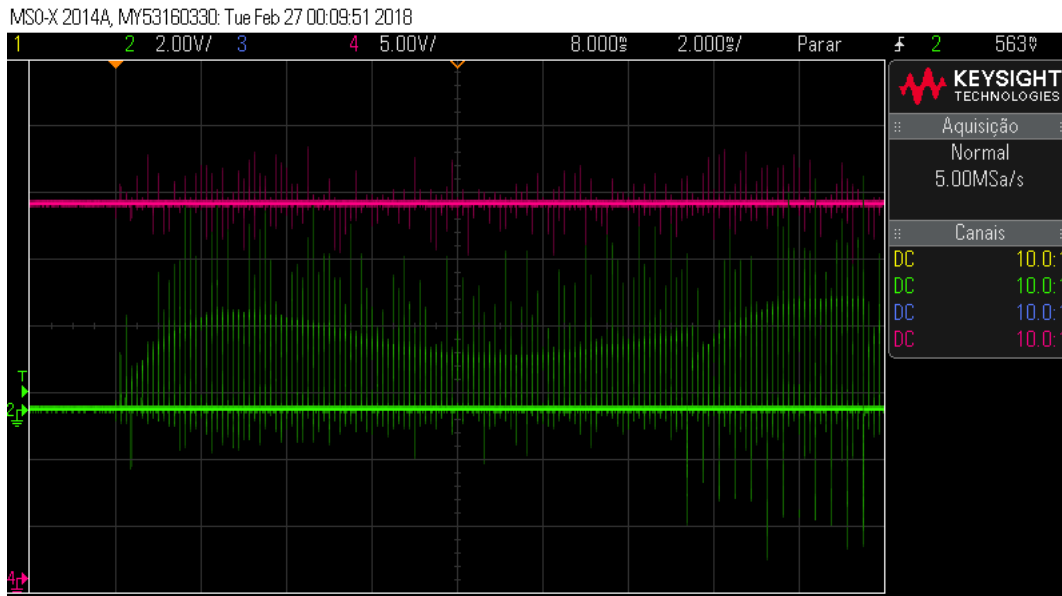


Figura 5.11: Tensão de entrada (vermelho) e corrente da ponte inversora (verde) na partida em rampa a vazio com janela de 20 ms, fonte de bancada de 28V. Fonte: Autoria própria.

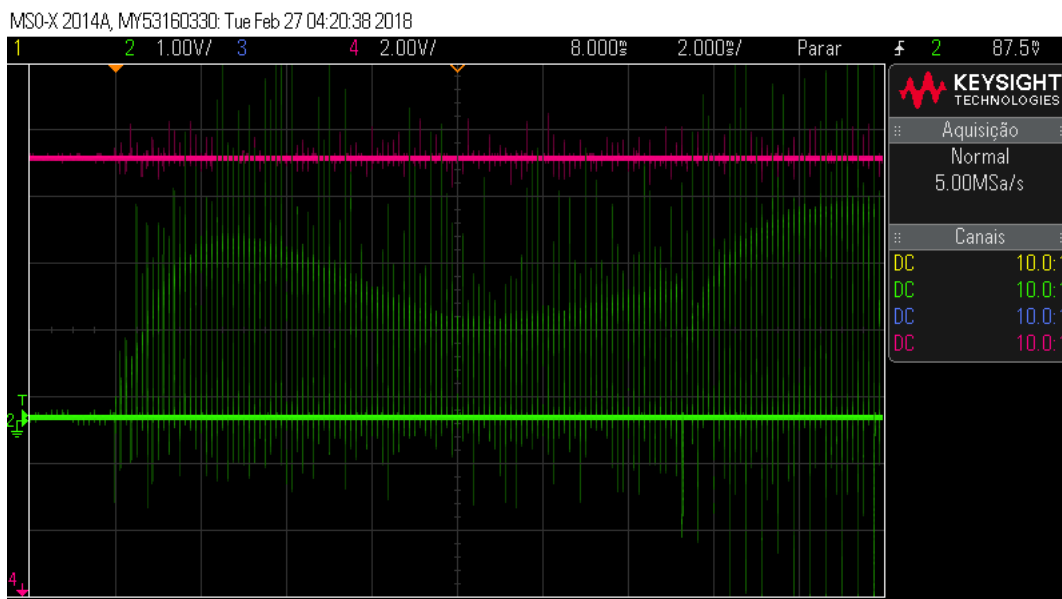


Figura 5.12: Tensão de entrada (vermelho) e corrente da ponte inversora (verde) na partida em rampa a vazio com janela de 20 ms, bateria de Chumbo-ácido com 25V. Fonte: Autoria própria.

Não se notam grandes diferenças nas curvas de tensão e corrente de entrada da ponte de potência. As diferenças aparentes são dadas pelas resoluções verticais de cada canal, que foram diferentes para cada fonte de alimentação. Com a diminuição da janela temporal, é possível ver mais detalhadamente o comportamento da corrente que passa pela

ponte inversora trifásica: claramente não contínua e seccionada de acordo com a frequência do PWM, que é de 8kHz.

## 5.6 Ensaios de Partida em Rampa com Carga

### 5.6.1 Alimentação por bateria de Chumbo-ácido

As Figuras 5.13 e 5.14 mostram a tensão de entrada e corrente total de entrada capturadas quando o motor partiu em rampa com carga sendo acionado pelo controlador desenvolvido, e pelo comercial, respectivamente. A mesma ordem de apresentação é utilizada nas Tabelas 5.4 e 5.5, que sumarizam os valores medidos. Ambas figuras e tabelas são referentes à alimentação vinda da associação em série de 3 baterias de Chumbo-ácido.

Tabela 5.4: Valores da partida em rampa do protótipo Venturo com o controlador desenvolvido sendo alimentado por baterias de Chumbo-ácido

<b>Controlador Desenvolvido - Partida em rampa (Chumbo-ácido)</b>								
$\angle(^{\circ})$	Vel.(km/h)	$I_{pk}$ (A)	$\bar{I}_{reg}$ (A)	$V_0$ (V)	$\bar{V}_{reg}$ (V)	$V_{pk}$ (V)	$\Delta V_{afund}$ (V)	$\overline{Pot}_{reg}$ (W)
+3,5	25,61	15,34	<b>6,01</b>	37,60	<b>35,25</b>	43,51	2,75	<b>211,9</b>
0,0	25,70	14,90	<b>6,21</b>	37,63	<b>34,89</b>	45,17	4,45	<b>216,7</b>
-3,5	25,61	14,70	<b>5,90</b>	37,46	<b>34,80</b>	44,43	5,01	<b>205,3</b>

Nas Tabelas 5.4 e 5.5 os valores de partida são definidos como segue:

- $\angle$  - Ângulo de inclinação do eixo longitudinal do protótipo, positivo sendo subida ( $^{\circ}$ );
- Vel. - Velocidade linear do protótipo (calculada) (km/h);
- $I_{pk}$  - Pico de corrente (A);
- $\bar{I}_{reg}$  - Corrente média em regime (A);
- $V_0$  - Tensão inicial antes da partida (V);
- $\bar{V}_{reg}$  - Tensão média em regime (V);
- $V_{pk}$  - Pico de tensão (V);
- $\Delta V_{afund}$  - Afundamento máximo de tensão (V);
- $\overline{Pot}_{reg}$  - Potência média exigida em regime (W).

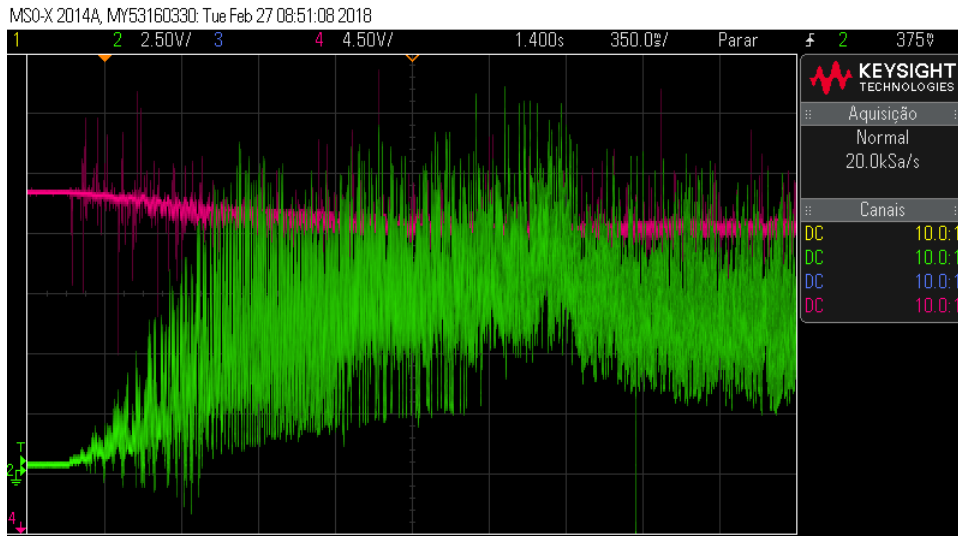


Figura 5.13: Tensão de entrada (vermelho) e corrente total de entrada do controlador desenvolvido (verde) na partida em rampa com carga, janela de 3,5 s, 3 baterias de Chumbo-ácido com 37,7V. Fonte: Autoria própria.

Tabela 5.5: Valores da partida em rampa do protótipo Venturo com o controlador comercial sendo alimentado por baterias de Chumbo-ácido

Controlador Comercial - Partida em rampa (Chumbo-ácido)								
$\angle(^{\circ})$	Vel.(km/h)	$I_{pk}$ (A)	$\bar{I}_{reg}$ (A)	$V_0$ (V)	$\bar{V}_{reg}$ (V)	$V_{pk}$ (V)	$\Delta V_{afund}$ (V)	$Pot_{reg}$ (W)
+3,5	24,88	12,66	<b>5,64</b>	37,07	<b>34,55</b>	38,08	4,50	<b>194,86</b>
0	25,33	12,59	<b>5,12</b>	37,01	<b>34,72</b>	37,13	4,33	<b>177,77</b>
-3,5	25,33	12,13	<b>5,09</b>	37,07	<b>34,77</b>	37,07	3,66	<b>176,98</b>

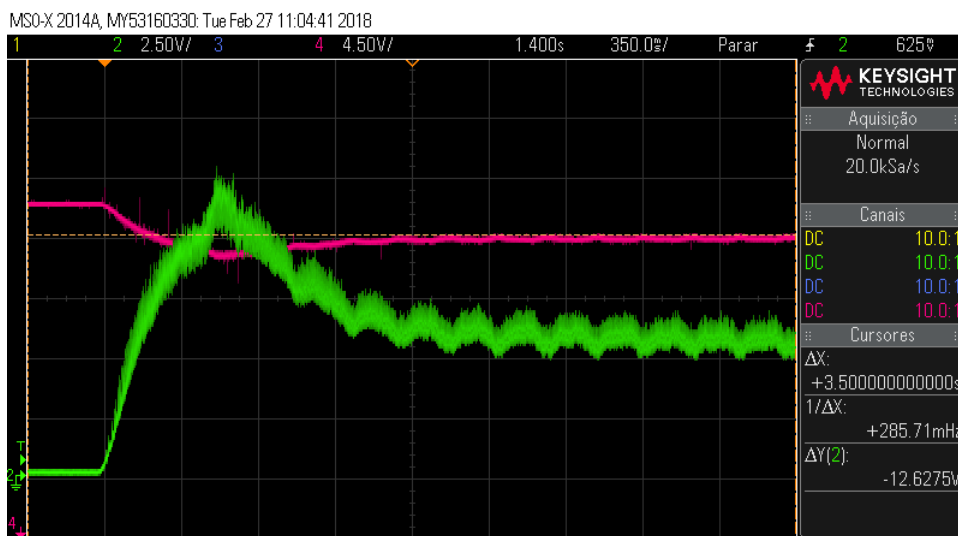


Figura 5.14: Tensão de entrada (vermelho) e corrente total de entrada do controlador comercial (verde) na partida em rampa com carga, janela de 3,5 s, 3 baterias de Chumbo-ácido com 37V. Fonte: Autoria própria.

Analisando o ganho percentual entre a potência média em regime para os dois controladores, observa-se que o controlador comercial é 13,3% mais eficiente que o desenvolvido. Porém, se for considerado que a tensão inicial dos ensaios com o controlador desenvolvido foi 1,4% maior, o que eleva a potência sensivelmente, comparação retorna um valor de aproximadamente 12% de eficiência relativa. Assim, o controlador comercial se mostrou **12% mais eficiente** que o controlador desenvolvido quando alimentados com baterias de Chumbo-ácido com tensão de circuito aberto de aproximadamente 37V.

Observando os dois gráficos, é possível notar também que a corrente do controlador comercial tem dinâmica mais comportada que o desenvolvido, com variação (*ripple*) e ruído menores.

### 5.6.2 Alimentação por bateria de Lítio-íon

O ensaio de partida em rampa, com ambos os controladores comercial e desenvolvido sendo alimentados pela mesma bateria de Lítio-íon do protótipo Venturo têm seus resultados descritos na [Tabela 5.6](#).

Tabela 5.6: Valores da partida em rampa do protótipo Venturo obtidos com o controlador comercial e o desenvolvido sendo alimentados por bateria de Lítio-íon (41,78V) e inclinação de +3,5°

Comparação entre os controladores - Partida em rampa (Lítio-íon)						
	$W_{reg}$ (RPM)	$V_{reg}$ (km/h)	$t_{ss}$ (s)	$t_r$ (s)	$I_{pk}$ (A)	$\bar{I}_{reg}$ (A)
<b>Comercial</b>	321	29,04	1,4	0,6	14,72	<b>6,17</b>
<b>Desenvolvido</b>	320	28,95	2,45	2	18,94	<b>5,52</b>

Na Tabela 5.6 os valores de partida são definidos como segue:

- $W_{reg}$  - Velocidade angular da roda em regime (RPM);
- $V_{reg}$  - Velocidade linear do protótipo (calculada) (km/h);
- $t_{ss}$  - Tempo de acomodação da corrente, até regime (seg.);
- $t_r$  - Tempo de subida da corrente, até o pico (seg.);
- $I_{pk}$  - Pico de corrente (A);
- $\bar{I}_{reg}$  - Corrente média em regime, calculada em janela superior a 2 seg. (A).

Estes valores foram obtidos da dinâmica das correntes de entrada total de cada um dos controladores, mostradas nas [Figura 5.15](#) e [Figura 5.16](#).

Uma vez que a bateria de Lítio-íon foi a mesma para os dois ensaios, e apresenta taxa de descarga mais constante que as baterias de Chumbo-ácido, e conseqüentemente

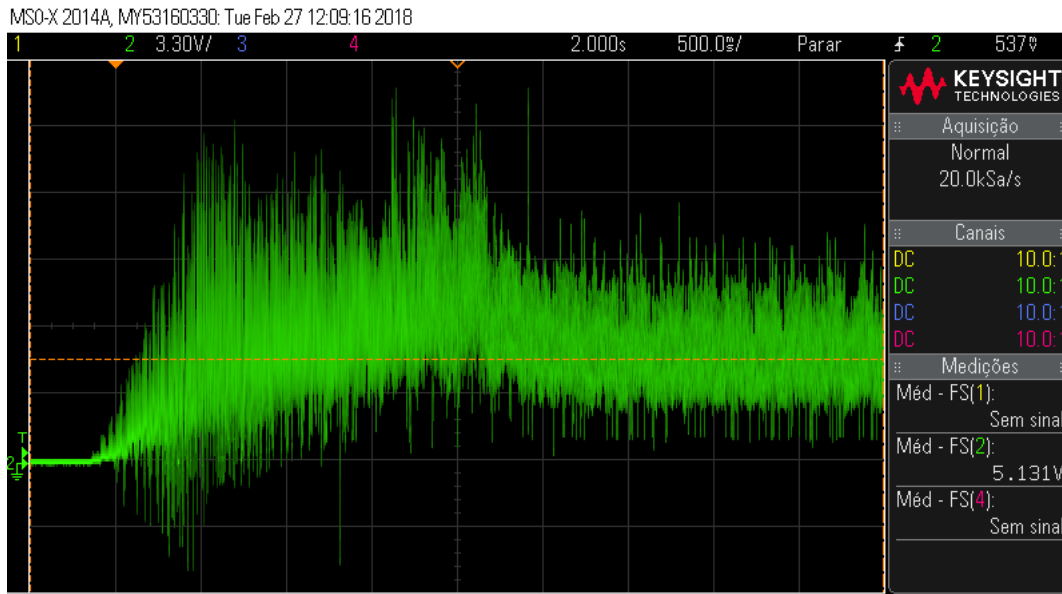


Figura 5.15: Dinâmica da corrente total de entrada do controlador desenvolvido na partida em rampa com carga, janela de 5 s, bateria de Lí-Ion com 41,78V. Fonte: Autoria própria.

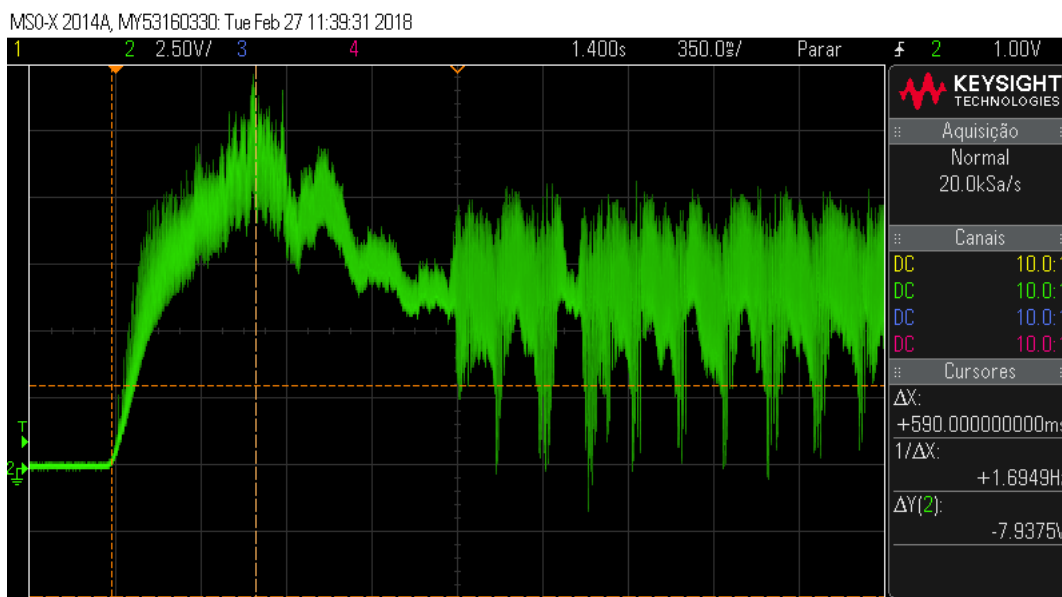


Figura 5.16: Dinâmica da corrente total de entrada do controlador comercial na partida em rampa com carga, janela de 3,5 s, bateria de Lí-Ion com 41,78V. Fonte: Autoria própria.

mantém sua tensão terminal mais estável, foi possível estabelecer uma comparação entre a performance dos dois controladores. Os ensaios foram feitos um logo em seguida do outro. Enquanto que o controlador comercial teve corrente de regime de 6,17A, o desenvolvido apresentou 5,52A em *steady-state*. Assim, o controlador desenvolvido se mostrou **quase 11% mais eficiente** que o comercial, quando ambos são alimentados pela bateria de Lítio-íon do protótipo Venturo, totalmente carregada



Importante destacar ainda, que o tempo de subida e acomodação da corrente é bem menor para o controlador comercial, mas isto não invalida a comparação de eficiência energética entre os dois.

## 5.7 Desafios na Implementação da Lógica de Controle e Suas Soluções

O código implementado no *dsPIC* contou com a facilidade de ter sido escrito em C e compilado pelo software *CCS*, de nível superior à programação com registradores, muito comum para plataforma *PIC*. Ainda com esta ferramenta, alguns desafios tiveram que ser superados na implementação da lógica de controle e acionamento do motor.

Existia a necessidade de melhorar a transição entre cada estado, determinado pela combinação dos três sensores de posição Hall que compõem o motor, então primeiramente variou-se o tempo morto (*dead-time*, em Inglês) que é inserido de forma a não permitir que dois transistores do mesmo braço da ponte conduzam simultaneamente (Figura 5.17). Após otimizado este tempo, foi variado o tempo de espera entre as transições de cada estado, de forma a melhorar a sincronia do motor. Obteve-se uma melhora significativa no comportamento da corrente de entrada total do controlador e o motor pôde girar com mais naturalidade.

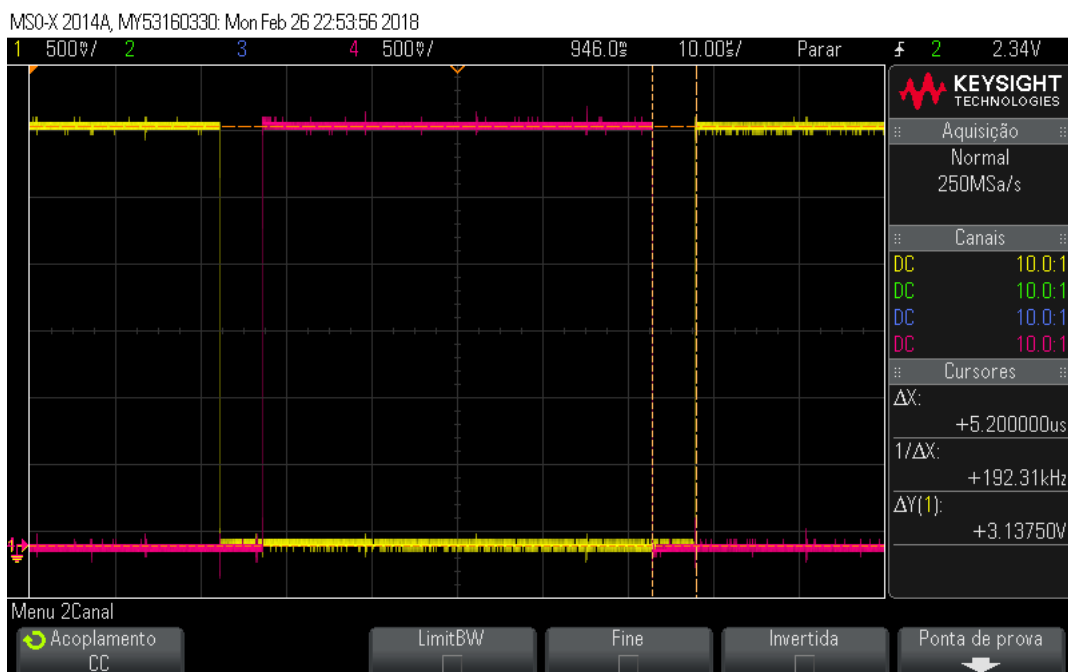


Figura 5.17: Detalhe do *dead-time* entre sinais de PWM complementares de um mesmo braço da ponte inversora. Fonte: Autoria própria.



## 6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Com o trabalho desenvolvido, foi possível determinar a configuração de controle e a forma de acionamento mais apropriada à situação de uso do motor. Também foi possível levantar os parâmetros elétricos do motor, que compõem o sistema simulado em software. Observou-se que o ensaio com a ponte RLC teve resultados muito próximos e coerentes com o tipo de motor, e que o cabo de conexão é responsável por boa parte das perdas ôhmicas do sistema.

As placas de sinal e potência foram finalizadas e aprimoradas, sendo agora possível embarcar o controlador no protótipo Venturo, sem a presença de ruídos oriundos de más conexões e apresentando boa estabilidade térmica.

A estratégia de acionamento em rampa foi implementada com sucesso, reduzindo a corrente de pico na partida. O tempo de subida e dinâmica da velocidade na partida podem ser alterado, caso seja necessária uma resposta mais rápida, ou mesmo mais lenta.

O controlador desenvolvido teve desempenho inferior ao comercial quando alimentado com baterias de Chumbo-ácido. Mas, uma vez que o Venturo utiliza apenas bateria de Lítio-íon, a EESCuderia Mileage pode ter agora um controlador 10% mais eficiente que o modelo comercial.

Com vistas a melhorar o projeto, sugere-se que os trabalhos futuros venham a abordar: ensaios em campo com o sistema embarcado no veículo para avaliar a eficiência energética (km/kWh) em um percurso conhecido, comparando com o controlador comercial; melhoria do algoritmo de controle do microcontrolador nos seguintes pontos: ajuste fino do sincronismo, projeto e simulação de um controlador em cascata, implementando uma rampa de velocidade com corrente constante, e mantendo a velocidade desejada após a rampa atingir o ponto desejado; melhoria do filtro passa-baixa do MC33039, CI que faz a conversão A/D da velocidade do motor; estudar o uso de transistores bipolares de porta isolada, (*IGBTs*) comparando com os atuais *MOSFETs* em termos de eficiência; envio das placas para impressão em empresa especializada em PCBs, além de dar acabamento com resina epóxi transparente, fixando melhor os componentes; e projetar uma estratégia de navegação com o protótipo, integrando a frenagem regenerativa em conjunto com a aceleração autônoma, visando a maior eficiência num percurso.



## REFERÊNCIAS

- ANDRADE, A. H. M. **Uma proposta de frenagem regenerativa para máquina sem escovas de corrente contínua**. São Carlos, São Paulo, Br: USP, 2017. Monografia (Graduação), Escola de Engenharia de São Carlos. Disponível em: <<http://www.tcc.sc.usp.br/tce/disponiveis/18/180500/tce-17012018-172638/?&lang=br>>.
- BLOS, J.; ANDRADE, A. H. M.; AGUIAR, M. L.; OLIVEIRA, V. A. Ensaio de obtenção de torque de um motor brushless cc aplicado a um carro elétrico. **25º SIICUSP, Simpósio Internacional de Iniciação Científica e Tecnológica da USP**, PRP-USP, October 2017. Disponível em: <<https://uspdigital.usp.br/siicusp/siicPublicacao.jsp?codmnu=7210>>.
- CHEN, C.-Y.; CHENG, M. H. M.; YANG, C.-F. Modified sliding mode speed control of brushless DC motor using quantized current regulator. In: **2009 Fourth International Conference on Innovative Computing, Information and Control (ICICIC)**. Ambassador Kaohsiung Kaohsiung, Taiwan: IEEE, 2009. p. 926 – 929.
- CHEN, H. C. et al. Robust current control for brushless DC motors. **IEE Proceedings - Electric Power Applications**, v. 147, p. 503–512, 2000.
- DESAI, P. C.; EMADI, A. A novel digital control technique for brushless DC motor drives: Current control. In: **IEEE International Conference on Electric Machines and Drives**. San Antonio, USA: IEEE, 2005. p. 326–331.
- EHSANI, M.; GAO, Y.; EMADI, A. **Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory, and Design, Second Edition**. CRC Press, 2010. (Power Electronics and Applications Series). ISBN 9781420054002. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=Rue\FhZsV40C>>.
- ERJAVEC, J.; ARIAS, J. **Hybrid, Electric and Fuel-cell Vehicles**. Thomson Delmar Learning, 2007. ISBN 9781401881085. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=RkzkAAAACAAJ>>.
- HUSAIN, I. **Electric and Hybrid Vehicles: Design Fundamentals, Second Edition**. Taylor & Francis, 2011. ISBN 9781439811788. Disponível em: <[https://books.google.com.br/books?id=7AAWH\\\_63HuAC](https://books.google.com.br/books?id=7AAWH\_63HuAC)>.
- LARMINIE, J.; LOWRY, J. **Electric Vehicle Technology Explained**. Wiley, 2004. ISBN 9780470090695. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=4VborAj0Un4C>>.
- MILLER, J. **Propulsion Systems for Hybrid Vehicles**. Institution of Engineering and Technology, 2008. (Energy Engineering). ISBN 9780863419157. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=BYkwEsmHqKYC>>.
- 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, V. A.; AGUIAR, M. L.; VARGAS, J. B. **Engenharia de controle: fundamentos de controle**. Rio de Janeiro, RJ: Elsevier, 2016.

RODRIGUEZ, F.; EMADI, A. A novel digital control technique for brushless DC motor drives. In: **IECON 2006 - 32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics**. Paris, France: IEEE, 2006. p. 1545–1550.

TAN, H.; HO, S. I. A novel single current sensor technique suitable for BLDCM drives. In: **IEEE 1999 International Conference on Power Electronics and Drive Systems. PEDS 99 (Cat. No.99TH8475)**. Hong Kong, Hong Kong: IEEE, 1999. v. 1, p. 133–138.

XIA, C.; JIANG, G.; CHEN, W.; SHI, T. Switching-Gain Adaptation Current Control for Brushless DC Motors. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 63, n. 4, p. 2044–2052, 2016.

ZHAO, Y.; YANG, Y. Application of an average current control method in double-loop control systems of brushless dc motor. In: **2011 International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks (CECNet)**. Xianning: IEEE, 2011. p. 102–105.