



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**RODNEI REGIS DE MELO**

**CONCEPÇÃO DE UM SISTEMA DE PROPULSÃO ELÉTRICA PARA UM TRATOR  
DE 9 kW ADEQUADO PARA AGRICULTURA FAMILIAR**

**FORTALEZA**

**2019**

RODNEI REGIS DE MELO

CONCEPÇÃO DE UM SISTEMA DE PROPULSÃO ELÉTRICA PARA UM TRATOR DE  
9 kW ADEQUADO PARA AGRICULTURA FAMILIAR

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica. Área de concentração: Eletrônica de Potência.

Orientador: Prof. PhD. Fernando Luiz Marcelo Antunes.

Coorientador: Prof. Dr.-Ing. Sérgio Daher.

FORTALEZA

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária  
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

M486c Melo, Rodnei Regis de.  
Concepção de um sistema de propulsão elétrica para um trator de 9 kW adequado para agricultura familiar / Rodnei Regis de Melo. – 2019.  
174 f. : il. color.

Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2019.

Orientação: Prof. Dr. Fernando Luiz Marcelo Antunes.

Coorientação: Prof. Dr. Sérgio Daher.

1. Sistema de propulsão elétrica. 2. Trator elétrico. 3. Agricultura familiar. 4. Energias renováveis. I. Título.

CDD 621.3

---

RODNEI REGIS DE MELO

CONCEPÇÃO DE UM SISTEMA DE PROPULSÃO ELÉTRICA PARA UM TRATOR DE  
9 kW ADEQUADO PARA AGRICULTURA FAMILIAR

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica. Área de concentração: Eletrônica de Potência.

Aprovada em: 20/12/2019.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. PhD. Fernando Luiz Marcelo Antunes (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr.-Ing. Sérgio Daher (Coorientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Daniel Albiero  
Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)

---

Prof. Dr. Auzuir Ripardo de Alexandria  
Instituto Federal do Ceará (IFCE)

---

Prof. Dr. Ricardo Silva The Pontes  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Fabrício Gonzalez Nogueira  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A  
Camila, minha esposa,  
e a nossa princesinha Isabel.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço inicialmente ao Instituto Federal do Ceará, pelo apoio conferido para vencer este grande desafio com sucesso.

Aos professores PhD. Fernando Luiz Marcelo Antunes e Dr.-Ing. Sérgio Daher, que sempre contribuíram com suas precisas pontuações.

Ao Prof. Dr. Daniel Albiero e ao Dr. Hans Heinrich Vogt, que colaboraram de forma significativa para o desenvolvimento do projeto.

Aos professores e amigos do IFCE, que sempre me apoiaram neste processo.

A minha família, por estar sempre presente e torcendo por mim.

“A simplicidade é o último grau de sofisticação”.

(Leonardo da Vinci)

## RESUMO

Inserida em um novo conceito de motorização agrícola, esta tese aborda a proposição e análise de desempenho de um sistema de propulsão elétrica com sistema de acionamento embarcado para um trator elétrico de pequeno porte. Um sistema de propulsão foi projetado com uma potência nominal de 9 kW e implementado em um protótipo de trator elétrico construído em escala real, baseado na avaliação das condições de vida e ambiente de trabalho da agricultura familiar no Brasil. Sua estrutura é formada por uma Unidade de Comando Eletrônico (UCE), dois inversores e dois motores de indução trifásicos. Um algoritmo foi aplicado para promover funcionalidades de controle, objetivando maior flexibilidade de uso e melhoria de desempenho com o sistema proposto. Uma estrutura de supervisão também foi proposta para armazenamento de dados e análise de desempenho. Para investigar o devido desempenho do sistema de propulsão elétrica com sistema de acionamento embarcado do trator elétrico foram realizados testes práticos de tração em diferentes cenários e configurações, para os quais a metodologia utilizada foi baseada no documento CODE 2 – código padrão da OCDE para ensaio oficial de desempenho de tratores (OECD, 2017). Com os ensaios de tração realizados, em que se atingiu uma força de tração média entre 2602,46 N e 2870,22 N e potência média da barra de tração entre 4026 W e 4204,87 W, ficou comprovado que o trator elétrico oferece plena capacidade de tração, compatível para o desenvolvimento de atividades da agricultura familiar, sem comprometer sua estrutura eletromecânica. Também, com os dados obtidos dos testes em campo, foi possível constatar que, para realizar o mesmo trabalho, o trator elétrico apresentou uma considerável melhoria em termos de estabilidade e consumo energético quando adotado o controle de patinagem implementado. A energia consumida nos ensaios sem controle de patinagem ativo variou entre 29,5 Wh e 32 Wh. Já para os ensaios com o controle de patinagem ativo, a energia consumida variou entre 17,1 Wh e 18,55 Wh. Ou seja, houve uma economia de 42% de energia com a implementação do controle proposto. Assim, os resultados experimentais comprovaram as evidências de que o sistema proposto é tecnicamente viável em termos de versatilidade de condução e desempenho em eficiência de tração e consumo energético.

**Palavras-chave:** Sistema de propulsão elétrica. Trator elétrico. Agricultura familiar. Energias renováveis.

## ABSTRACT

Inserted in a new concept of agricultural motorization, this thesis deals with the proposition and analysis of the performance of an electric propulsion system with the embedded drive system for a small electric tractor. A propulsion system was designed with a nominal power of 9 kW and implemented in a prototype electric tractor built on a real scale, based on the evaluation of living conditions and working environment of family agriculture in Brazil. Its structure is formed by an Electronic Command Unit (ECU), two inverters and two three-phase induction motors. An algorithm was applied to promote control functionalities aiming at greater use flexibility and performance improvement with the proposed system. A supervisory framework was also proposed for data storage and performance analysis. In order to investigate the proper performance of the electric propulsion system with the electric tractor embedded drive system, practical traction tests were carried out in different scenarios and configurations, where the methodology used was based on the CODE 2 document - OECD standard code for official performance testing of tractors (OECD, 2017). With the tensile tests performed, in which an average tensile force between 2602.46 N and 2870.22 N, and an average drawbar power between 4026 W and 4204.87 W were achieved, it was proved that the electric tractor offers full traction capacity, compatible for the development of family farming activities, without compromising its electromechanical structure. Also, with the data obtained from the field tests, it was found that to perform the same work the electric tractor showed a considerable improvement in terms of stability and energy consumption when adopting the implemented slip control. The energy consumed in the tests without active slip control ranged from 29.5 Wh to 32 Wh. For the tests with active slip control, the energy consumed ranged from 17.1 Wh to 18.55 Wh. That is, there were 42% energy savings with the implementation of the proposed control. Thus, the experimental results proved the evidence that the proposed system is technically viable in terms of driving versatility and performance in traction efficiency and energy consumption.

**Keywords:** Electric propulsion system. Electric tractor. Family farming. Renewable energy.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	- Agricultura sustentável com uso de fontes de energia limpa e renovável .....	24
Figura 2	- Protótipos de tratores elétricos de grandes fabricantes .....	28
Figura 3	- Diagrama do sistema de controle com barramento CAN em trator elétrico híbrido .....	30
Figura 4	- Protótipo trator elétrico desenvolvido por Chen <i>et al.</i> (2016) .....	30
Figura 5	- Representação esquemática da função de controle LTCS .....	31
Figura 6	- Micro geração distribuída para a agricultura familiar .....	33
Figura 7	- Estrutura geral do algoritmo do controle de tração proposto por Han <i>et al.</i> (2018) .....	35
Figura 8	- Estrutura do sistema de estabilidade proposto por Yin, Sun e Hu (2019) .....	36
Figura 9	- Trator agrícola.....	37
Figura 10	- Força de tração máx. <i>versus</i> potência no motor.....	39
Figura 11	- Eficiência de tração <i>versus</i> patinagem para diferentes condições do solo .....	40
Figura 12	- Arquiteturas de sistemas de propulsão para tratores elétricos .....	42
Figura 13	- Trator elétrico com múltiplos sistemas de armazenamento de energia .....	43
Figura 14	- Curvas características de potência e torque do motor elétrico.....	44
Figura 15	- Enrolamento trifásico balanceado.....	46
Figura 16	- Circuito equivalente de máquinas de indução .....	47
Figura 17	- Sistema trifásico dos enrolamentos do estator e do rotor de um motor de indução .....	48
Figura 18	- Sistema bifásico $\alpha\beta$ equivalente dos enrolamentos do estator e do rotor .....	49
Figura 19	- Vetor espacial da corrente do estator no referencial estacionário $\alpha\beta$ .....	50
Figura 20	- Vetor espacial da corrente do estator no referencial dinâmico $dq$ .....	50
Figura 21	- Circuito de um inversor trifásico .....	52
Figura 22	- Modbus com padrão RS-485 .....	56
Figura 23	- Sinal de transmissão no modo RTU .....	57
Figura 24	- Níveis de tensão em uma rede CAN .....	59
Figura 25	- Tipos de controle .....	61
Figura 26	- Configuração geral do controle escalar .....	62
Figura 27	- Diagrama de blocos geral de um sistema de controle vetorial para um motor de indução trifásico .....	63

Figura 28 - Layout do sistema de propulsão elétrica no trator .....	67
Figura 29 - Etapas de projeto.....	68
Figura 30 - Arquitetura do Sistema de Propulsão Elétrica .....	69
Figura 31 - Sensores utilizados no Trator Elétrico .....	71
Figura 32 - Diagrama elétrico UCE.....	72
Figura 33 - Diagrama de bloco da UCE .....	73
Figura 34 - Funcionalidades de acionamento do trator elétrico .....	74
Figura 35 - Sistema de acionamento e controle do trator elétrico .....	75
Figura 36 - Diagrama de blocos simplificado com controle de patinagem.....	75
Figura 37 - Modelo trator elétrico .....	76
Figura 38 - Sistema com controle de patinagem .....	78
Figura 39 - Sinais de controle UCE.....	78
Figura 40 - Sistemas de Supervisão do Trator Elétrico.....	79
Figura 41 - Sistema de Supervisão desenvolvido no software <i>Eclipse SCADA</i> .....	80
Figura 42 - Ferramenta <i>Organizer</i> no software <i>Eclipse SCADA</i> .....	81
Figura 43 - Sistema de interface e monitoramento desenvolvido com <i>MIT Inventor App</i> .....	82
Figura 44 - Sistema de Supervisão desenvolvido no software <i>C++ Builder</i> .....	83
Figura 45 - Sistema de Controle .....	84
Figura 46 - Estrutura com controlador PI.....	85
Figura 47 - Polo do modelo ARX identificado.....	88
Figura 48 - Polo do modelo discretizado.....	89
Figura 49 - Resposta ao degrau dos modelos da planta.....	89
Figura 50 - Polos do modelo de referência.....	90
Figura 51 - Polos-zero do modelo de referência discretizado .....	90
Figura 52 - Resposta ao degrau dos modelos de referência .....	91
Figura 53 - Polos e zero do modelo em malha fechada discretizado .....	92
Figura 54 - Resposta ao degrau do modelo em malha fechada discretizado.....	92
Figura 55 - Simulação da malha de controle utilizando o PSIM.....	93
Figura 56 - Resposta ao degrau do sistema em malha fechada .....	94
Figura 57 - Resposta ao degrau do sistema em malha fechada para vários níveis de referência de velocidade.....	95
Figura 58 - Simulação PSIM do controle de patinagem implementado no trator elétrico .....	95
Figura 59 - Simulação trator elétrico com rotação máxima nos motores de tração ajustada em 800 rpm .....	96

Figura 60 - Sequência de testes de acordo com a técnica utilizada no acionamento dos motores .....	100
Figura 61 - Pista de concreto padrão no Departamento de Engenharia Agrícola (DENA) – UFC .....	101
Figura 62 - Protótipo do trator elétrico sob teste .....	102
Figura 63 - Sistema de monitoramento da força de tração do trator elétrico .....	103
Figura 64 - Diagrama do Fluxo de Potência.....	105
Figura 65 - Teste com trator elétrico TTE#00 sem carga com deslocamento de 1 km realizado no Campus do Pici da Universidade Federal do Ceará – UFC.....	106
Figura 66 - Gráfico de rotação dos motores de tração nas rodas de tração durante o teste realizado em circuito de 1 km com o trator elétrico.....	106
Figura 67 - Gráfico de velocidade do trator elétrico durante o teste realizado em circuito de 1 km.....	107
Figura 68 - Gráfico de potência do banco de baterias do trator elétrico durante o teste realizado em circuito de 1 km .....	107
Figura 69 - Gráficos de rotação dos motores de tração e patinação nas rodas de tração durante os três ensaios realizados em pista de concreto sem carga com o trator elétrico .....	108
Figura 70 - Gráfico comparativo de velocidade do trator elétrico durante os três ensaios realizados em pista de concreto sem carga.....	109
Figura 71 - Medições realizadas no banco de baterias durante os três ensaios realizados em pista de concreto sem carga.....	110
Figura 72 - Gráficos de rotação dos motores de tração e patinação nas rodas de tração durante os três ensaios realizados em campo sem carga com o trator elétrico .	111
Figura 73 - Gráfico comparativo de velocidade do trator elétrico durante os três ensaios realizados em solo firme sem carga .....	112
Figura 74 - Medições realizadas no banco de baterias durante os três ensaios realizados em campo sem carga .....	113
Figura 75 - Teste de tração em pista de concreto padrão do Departamento de Engenharia Agrícola (DENA) - UFC .....	114
Figura 76 - Gráficos de rotação dos motores de tração e patinação nas rodas de tração durante os três ensaios realizados em pista de concreto com carga .....	115
Figura 77 - Gráfico comparativo de velocidade do trator elétrico durante os três ensaios realizados em pista de concreto com carga .....	116

Figura 78	- Gráfico comparativo de força medida na barra de tração durante os três ensaios realizados em pista de concreto com carga .....	116
Figura 79	- Medições realizadas no banco de baterias durante os três ensaios realizados em pista de concreto com carga .....	117
Figura 80	- Teste em solo firme com carga: trator elétrico com carga composta por um pulverizador agrícola acoplado a um trator ICE de 10,3 kW (TC14 - <i>Yanmar Agritech</i> ).....	118
Figura 81	- Gráficos de rotação dos motores de tração e patinagem nas rodas de tração durante os três ensaios realizados em solo firme com carga e sem controle de patinação ativo .....	120
Figura 82	- Estatística descritiva relacionada aos dados de patinagem dos três ensaios com o trator elétrico realizados em solo firme com carga e sem controle de patinação ativo.....	121
Figura 83	- Gráfico comparativo de velocidades do trator elétrico durante os três ensaios realizados em solo firme com carga e sem controle de patinação ativo.....	122
Figura 84	- Gráfico comparativo das medições de potências realizadas no banco de baterias do trator elétrico durante os três ensaios em solo firme com carga e sem controle de patinação ativo.....	122
Figura 85	- Gráfico comparativo de energia consumida no banco de baterias durante os três ensaios com o trator elétrico realizados em solo firme com carga e sem controle de patinação ativo.....	123
Figura 86	- Gráficos de rotação dos motores de tração e patinagem nas rodas de tração durante os três ensaios realizados em solo firme com carga e com a patinagem controlada pelo operador via pedal de aceleração .....	124
Figura 87	- Estatística descritiva relacionada aos dados de patinagem dos três ensaios com o trator elétrico realizados em solo firme com carga e com a patinagem controlada pelo operador via pedal de aceleração.....	125
Figura 88	- Gráfico comparativo de velocidades do trator elétrico durante os três ensaios realizados em solo firme com carga e com a patinagem controlada pelo operador via pedal de aceleração.....	126
Figura 89	- Gráfico comparativo das medições de potências realizadas no banco de baterias do trator elétrico durante os três ensaios em solo firme com carga e com a patinagem controlada pelo operador via pedal de aceleração.....	127

Figura 90	- Gráfico comparativo de energia consumida no banco de baterias durante os três ensaios com o trator elétrico realizados em solo firme com carga e com a patinação controlada pelo operador via pedal de aceleração .....	127
Figura 91	- Gráficos de rotação dos motores de tração e patinação nas rodas de tração durante os três ensaios realizados em solo firme com carga e com controle de patinação ativo .....	128
Figura 92	- Estatística descritiva relacionada aos dados de patinação dos três ensaios com o trator elétrico realizados em solo firme com carga e com controle de patinação ativo .....	130
Figura 93	- Cartas de controle relacionados aos dados de patinação dos três ensaios com o trator elétrico realizados em solo firme com carga e com controle de patinação ativo .....	131
Figura 94	- Gráfico comparativo de velocidades do trator elétrico durante os três ensaios realizados em solo firme com carga e com controle de patinação ativo .....	132
Figura 95	- Gráfico comparativo das medições de potências realizadas no banco de baterias do trator elétrico durante os três ensaios em solo firme com carga e com controle de patinação ativo .....	133
Figura 96	- Gráfico comparativo de energia consumida no banco de baterias durante os três ensaios com o trator elétrico realizados em solo firme com carga e com controle de patinação ativo .....	133
Figura 97	- Gráfico comparativo do tempo, patinação e energia consumida durante os nove ensaios com o trator elétrico realizados em solo firme com carga .....	134
Figura 98	- Estrutura do Trator Elétrico .....	146
Figura 99	- Sistema de Transmissão Trator Elétrico .....	147
Figura 100	- Projeto Trator Elétrico .....	148
Figura 101	- Pesagem Trator Elétrico.....	150
Figura 102	- Pré-teste de campo do trator elétrico .....	151
Figura 103	- UCE .....	152

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Patentes relacionadas a tratores elétricos .....	26
Quadro 2 - Mercado de tratores .....	27
Quadro 3 - Projetos relacionados a tratores elétricos .....	32
Quadro 4 - Mensagem no modo RTU .....	57
Quadro 5 - Comparativo entre tipos de baterias aplicadas em veículos elétricos .....	65
Quadro 6 - Níveis de potência e tensão do barramento CC em modelos de VEs .....	66
Quadro 7 - Dados característicos dos motores e dos inversores.....	68

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Folha de dados TTE#01 a TTE#03 .....	110
Tabela 2 - Folha de dados TTE#04 a TTE#06 .....	113
Tabela 3 - Folha de dados TTE#07 a TTE#09 .....	118
Tabela 4 - Folha de dados TTE#10 a TTE#12 .....	123
Tabela 5 - Folha de dados TTE#13 a TTE#15 .....	127
Tabela 6 - Folha de dados TTE#16 a TTE#18 .....	133

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	18
<b>1.1</b>	<b>Hipótese</b> .....	19
<b>1.2</b>	<b>Objetivos</b> .....	20
<b>1.2.1</b>	<i>Objetivo geral</i> .....	21
<b>1.2.2</b>	<i>Objetivos específicos</i> .....	21
<b>1.3</b>	<b>Estrutura e contribuições da tese</b> .....	22
<b>1.4</b>	<b>Publicações</b> .....	23
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	24
<b>2.1</b>	<b>Considerações iniciais</b> .....	24
<b>2.2</b>	<b>Tratores elétricos: uma abordagem da literatura recente</b> .....	25
<b>2.3</b>	<b>Revisão dos métodos de controle de movimento</b> .....	34
<b>3</b>	<b>TRATORES ELÉTRICOS: FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	37
<b>3.1</b>	<b>Tratores agrícolas convencionais</b> .....	37
<b>3.2</b>	<b>Veículos elétricos: sistemas de propulsão elétrica</b> .....	41
<b>3.2.1</b>	<i>Motores elétricos</i> .....	43
<b>3.2.2</b>	<i>Conversores</i> .....	51
<b>3.2.3</b>	<i>Sistemas eletrônicos embarcados</i> .....	54
<b>3.2.3.1</b>	<i>Unidade de comando eletrônico</i> .....	54
<b>3.2.3.1</b>	<i>Interfaces de comunicação</i> .....	55
<b>3.3</b>	<b>Técnicas de controle para inversores</b> .....	60
<b>3.3.1</b>	<i>O controle escalar</i> .....	61
<b>3.3.2</b>	<i>O controle vetorial</i> .....	62
<b>3.4</b>	<b>Baterias</b> .....	64
<b>4</b>	<b>O SISTEMA DE PROPULSÃO DO TRATOR ELÉTRICO</b> .....	67
<b>4.1</b>	<b>Proposição do sistema de acionamento e controle</b> .....	67
<b>4.2</b>	<b>Controle aplicado ao trator elétrico</b> .....	84
<b>4.3</b>	<b>Simulações</b> .....	93
<b>5</b>	<b>IMPLEMENTAÇÕES E RESULTADOS EXPERIMENTAIS</b> .....	100
<b>5.1</b>	<b>Estrutura de testes</b> .....	100
<b>5.2</b>	<b>Resultados experimentais</b> .....	105
<b>5.2.1</b>	<i>Teste preliminar sem carga</i> .....	105

5.2.2	<i>Teste em pista de concreto sem carga</i> .....	107
5.2.3	<i>Teste em solo firme sem carga</i> .....	111
5.2.4	<i>Teste em pista de concreto com carga</i> .....	114
5.2.5	<i>Teste em solo firme com carga</i> .....	118
5.2.5.1	<i>Teste em solo firme com carga e sem o controle de patinagem ativo</i> .....	119
5.2.5.2	<i>Teste em solo firme com carga e com a patinagem controlada pelo operador via pedal de aceleração</i> .....	123
5.2.5.3	<i>Teste em solo firme com carga e com controle de patinagem ativo</i> .....	128
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	136
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	138
	<b>APÊNDICE A – Protótipo Trator Elétrico</b> .....	146
	<b>APÊNDICE B – Programação UCE</b> .....	152
	<b>ANEXO A – Inversor de Frequência CVW300</b> .....	170
	<b>ANEXO B – Bateria DF 4001</b> .....	173

## 1 INTRODUÇÃO

A agricultura familiar se destaca como um dos segmentos que mais crescem na produção de alimentos, sendo de grande importância para a segurança alimentar em muitos lugares do mundo. Também tem sido uma grande aliada da sustentabilidade e da responsabilidade socioambiental (FAO, 2017). Os estabelecimentos agropecuários pertencentes a grupos familiares representam a maioria dos sistemas agrícolas em todo o mundo, cujos tamanhos variam de 1 a 10.000 hectares (BERCHIN *et al.*, 2019). No Brasil, a agricultura familiar é um pilar essencial para a economia, sendo responsável por grande parte da produção de alimentos no país (IBGE, 2006). De acordo com os resultados do último Censo Agropecuário, há no Brasil 5,07 milhões de estabelecimentos agropecuários, sendo que as propriedades rurais que têm até dez hectares representam 50,2% do número total de estabelecimentos (IBGE, 2017). Vale ainda destacar que a região Nordeste concentra o maior número de agricultores familiares do país.

Os empreendimentos familiares rurais também apresentam grande potencial para micro geração de energia no campo, por meio de fontes geradoras de energia limpa e renovável (VOGT; ALBIERO; SCHMUELLING, 2018). Nesse cenário, também se destaca que a região Nordeste é, atualmente, o principal foco de investimentos na ampliação da capacidade de geração de energia do país através de fontes limpas, como a eólica e a solar, potencializadas por suas características naturais (sol e vento) propícias. Assim, é possível promover cada vez mais o desenvolvimento sustentável na agricultura familiar, e o uso da agroenergia é fator fundamental dentro do contexto apresentado. Programas e projetos como o PRONAF - Programa Nacional de Fortalecimento da Agricultura Familiar (BIANCHINI, 2015), Programa Garantia Safra e Programa Nacional de Alimentação Escolar – Pnae (BRASIL, 2013), Programa Luz para Todos (BRASIL, 2017) e FNE Sol (BNB, 2019) têm sido fundamentais para o fortalecimento dos empreendimentos familiares rurais, contribuindo para melhor qualidade de vida daquelas pessoas, e principalmente dos produtos cultivados em menor escala.

A mecanização agrícola também é, atualmente, uma necessidade no Brasil. O aumento da população urbana e da renda per capita demanda maior produção de alimentos (KEPPLE; SEGALL-CORRÊA, 2017). Dessa forma, é extremamente relevante a modernização da agricultura familiar brasileira, para que se possa garantir técnicas agrícolas adequadas e facilitar a produtividade (SEAD, 2017). Os tratores são as grandes ferramentas de trabalho da agricultura moderna, e o Brasil é o quarto maior mercado de tratores agrícolas do mundo, ficando atrás apenas da Índia, China e Estados Unidos. Contudo, existe uma carência

no mercado nacional de máquinas e implementos de baixa potência, que são mais apropriados para os produtores familiares (ALBIERO *et al.*, 2015). Um trator agrícola com sistema de propulsão elétrica torna-se uma alternativa viável capaz de propiciar melhorias significativas para a agricultura familiar no Brasil e contribuir para a sustentabilidade. Os sistemas de propulsão elétrica para veículos consistem basicamente em motores elétricos, conversores e unidades de comando eletrônicos. O estudo de novas tecnologias de controle e gerenciamento de energia para veículos elétricos torna-se cada vez mais fundamental para garantir um máximo desempenho e excelente autonomia (ZHANG; GÖHLICH, 2017).

Assim, esta pesquisa é motivada pela premissa de que tratores elétricos representam uma opção tecnicamente viável para a agricultura familiar brasileira. Conforme revisão da literatura, há pouca pesquisa relacionada a esse tipo de veículo, comparado às relacionadas aos veículos elétricos urbanos. Nessa perspectiva, o protótipo de um trator elétrico foi desenvolvido. Este projeto tem caráter interdisciplinar e seu desenvolvimento é fruto de uma parceria entre os departamentos de Engenharia Elétrica e Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará – UFC, inicialmente apresentado em Vogt (2018). Na presente proposta enfatiza-se toda a estrutura eletroeletrônica necessária para o funcionamento do trator elétrico.

## **1.1 Hipótese**

Os tratores com propulsão convencional contam com um motor de combustão interna (MCI) em suas estruturas. Em um novo conceito de motorização, os tratores podem ser compostos por sistemas de propulsão elétrica. Tais sistemas de propulsão são a base da estrutura para veículos elétricos e a escolha desses depende de vários fatores: potência útil, velocidade máxima, fonte de energia, peso do veículo, etc. Tendo em vista tais fatores e os diversos aspectos a serem investigados em um projeto (tipos de arquiteturas, motores, conversores, técnicas de acionamento e controle, etc.), não há um consenso e descrição definitiva da metodologia de desenvolvimento e implementação de um sistema de propulsão elétrica completo especificamente projetado para tratores elétricos de pequeno porte na literatura. O que remete às seguintes conjecturas:

- Qual o atual panorama de pesquisas, inovações e desenvolvimentos relacionados a tratores elétricos?
- Qual a faixa de potência compatível com a maioria das aplicações na agricultura familiar?

- Um sistema de acionamento elétrico de um trator baseado em uma arquitetura distribuída com dois motores elétricos de indução trifásicos permite uma operação mais flexível e útil?
- É possível implementar um sistema embarcado (hardware e software incorporados em um sistema com objetivo pré-definido) com funcionalidades de controle de acionamento dos motores capaz de otimizar o desempenho e facilitar as manobras típicas envolvidas na atividade rural dos pequenos produtores?

Em resposta às questões precedentes é possível supor que a implementação de um sistema de propulsão elétrica projetado para utilização em um trator elétrico de baixa potência pode propiciar significativo desempenho e eficiência no desenvolvimento de atividades agrícolas familiares. Logo, a presente proposta visa apresentar soluções técnicas com embasamento científico que viabilizem a devida aplicação do sistema de propulsão elétrica com sistema embarcado para trator elétrico e fazer um estudo analítico de desempenho. O que leva à seguinte hipótese:

“Um sistema de propulsão elétrica distribuído, utilizando dois motores de indução trifásicos e uma unidade eletrônica de acionamento embarcada, especialmente projetado para um trator elétrico de pequeno porte proporciona bom desempenho técnico e flexibilidade operacional no desenvolvimento de atividades da agricultura familiar.”

É nesse panorama que a pesquisa aqui abordada tem como propósito identificar alternativas de acionamento e controle que viabilizem/possibilitem a utilização do trator elétrico de forma adequada e eficiente. Posto isso, a pesquisa visa propor um conceito de propulsão elétrica apropriado a um trator elétrico adequado para pequenos produtores agrícolas, e avaliar seu real desempenho técnico.

## **1.2 Objetivos**

Esta tese trata do conceito, projeto, implementação e análise de desempenho de um sistema de propulsão elétrica com sistema de acionamento embarcado aplicável a uma nova classe de veículos elétricos empregados exclusivamente para atividades agrícolas. O referido sistema de propulsão é projetado com uma potência nominal total de 9 kW e implementado em um protótipo de trator elétrico construído em escala real. O sistema projetado contém uma

estrutura distribuída com dois motores elétricos de indução trifásicos, dois inversores, uma Unidade de Comando Eletrônico (UCE) embarcada e um banco de baterias como fonte de energia. O protótipo é utilizado como plataforma experimental para demonstrar ou até mesmo refutar a eficácia do sistema de propulsão elétrica proposto em termos de versatilidade de condução, eficiência de tração e consumo energético. Assim, nesta pesquisa é feita toda a análise teórico-experimental do sistema adequadamente controlado para produzir resultados relevantes acerca de sua performance.

### ***1.2.1 Objetivo geral***

Com um novo conceito de mecanização agrícola voltada para a agricultura familiar, o objetivo geral desta tese é propor um sistema de propulsão elétrica com sistema de acionamento embarcado para trator elétrico e analisar o seu desempenho.

### ***1.2.2 Objetivos específicos***

Os objetivos específicos e desafios da presente pesquisa são:

- Identificar o atual panorama de pesquisas, inovações e desenvolvimentos relacionados a tratores elétricos.
- Apresentar um novo conceito de motorização agrícola através da concepção e configuração de um sistema de propulsão elétrica com arquitetura distribuída (dois motores elétricos de tração nas rodas traseiras) do trator elétrico sob investigação, com potência compatível com as atividades inerentes à agricultura familiar;
- Promover a implementação do sistema de propulsão elétrica tendo por base a flexibilidade e variação ampla na característica torque x velocidade que um sistema de propulsão elétrica adequadamente controlado pode permitir;
- Desenvolver um sistema eletrônico embarcado (hardware e software) para implementar funcionalidades no controle de acionamento dos motores, objetivando promover maior versatilidade de operação do trator em manobras típicas envolvidas na atividade rural;
- Apresentar uma nova proposta de algoritmo de um sistema de controle de patinagem para operação em alto torque e otimização de desempenho em diferentes cenários de atuação do trator elétrico;
- Desenvolver um sistema de aquisição de dados e supervisão do sistema de propulsão elétrica proposto que permita o monitoramento de variáveis, tais como: consumo de energia,

força e potência de tração, eficiência energética, carga e descarga das baterias, autonomia operacional;

- Fazer a avaliação final da hipótese baseada nos dados obtidos durante os procedimentos experimentais realizados.

### **1.3 Estrutura e contribuições da tese**

Com uma nova abordagem, esta tese apresenta um novo conceito de mecanização agrícola com a concepção e implementação de um sistema de propulsão para um trator elétrico, apresentando proposições relevantes na implementação e análise de desempenho do referido trator elétrico.

A pesquisa começa com uma revisão da literatura sobre sistemas de propulsão elétrica com aplicação em tratores elétricos. Com base na revisão, serão propostas as estratégias tecnológicas do sistema pretendido. A pesquisa prossegue tratando do conceito, projeto e implementação de um sistema de controle e supervisão para coordenar e monitorar a operação do sistema de propulsão do trator elétrico de pequeno porte e fazer a devida análise de desempenho do sistema aqui proposto.

Esta tese encontra-se estruturalmente dividida em seis capítulos. Após o Capítulo 1, introdutório, tem-se o Capítulo 2 iniciando a pesquisa com uma revisão da literatura sobre aplicações de sistemas de propulsão elétrica de tratores elétricos. O valor agregado desse capítulo consiste na apresentação de um levantamento detalhado de sistemas aplicados em tratores disponíveis na literatura recente. Com isso, constata-se que, mesmo com uma atual crescente, ainda há poucos estudos que abordaram tais sistemas para veículos agrícolas. No Capítulo 3 tem-se uma abordagem conceitual a respeito de tratores convencionais, sistemas de propulsão elétrica para veículos elétricos e a bateria como fonte de energia. A principal contribuição desse capítulo é fornecer uma fundamentação teórica para o desenvolvimento da pesquisa proposta. O Capítulo 4 representa o ponto culminante da pesquisa. Ele apresenta a proposição da tese enfatizando o desenvolvimento do projeto do sistema de acionamento e controle aplicado no trator elétrico. Na sequência, tem-se o Capítulo 5 que é tão relevante quanto o anterior. Nele são abordados os resultados experimentais obtidos com os testes realizados com o protótipo. A principal conquista desse capítulo consiste na plataforma experimental, em que a eficácia e análise de desempenho do sistema proposto são demonstradas através de vários testes realizados. No Capítulo 6, são concebidas as conclusões finais do trabalho realizado, de acordo com os resultados obtidos, e estabelecidas propostas para

trabalhos futuros. O Apêndice A contém uma visão geral do protótipo do trator elétrico empregado na validação experimental deste trabalho. As principais características são: uma arquitetura do sistema de propulsão distribuída, composta de dois inversores e dois motores elétricos de indução trifásicos acoplado às rodas traseiras do trator por meio de um sistema de transmissão por correntes; um sistema embarcado de acionamento e controle identificado como Unidade de Comando Eletrônico (UCE), baseado na tecnologia dsPIC. Por fim, no Apêndice B tem-se o código de programação aplicado na UCE, capaz de controlar simultaneamente os dois inversores/ motores elétricos de tração do trator elétrico.

#### 1.4 Publicações

Os seguintes artigos foram publicados e apresentados como contribuições relevantes deste trabalho de pesquisa:

MELO, R. R.; ANTUNES, F. L. M.; DAHER, S.; VOGT, H. H.; ALBIERO, D.; TOFOLI, F. L. Conception of an electric propulsion system for a 9 kW electric tractor suitable for family farming. **IET Electric Power Applications**, v.13, n. 12, p. 1993–2004, 2019. DOI: 10.1049/iet-epa.2019.0353.

VOGT, H. H.; MELO, R. R.; ANTUNES, F. L. M.; DAHER, S.; ALBIERO, D.; SCHMÜLLING, B. Electric Tractor System propelled by solar energy for family farming in the northeast of Brazil. 9th Brazil-Germany Symposium on Sustainable Development University of Hohenheim, Stuttgart, Germany, September 15-17, 2019.

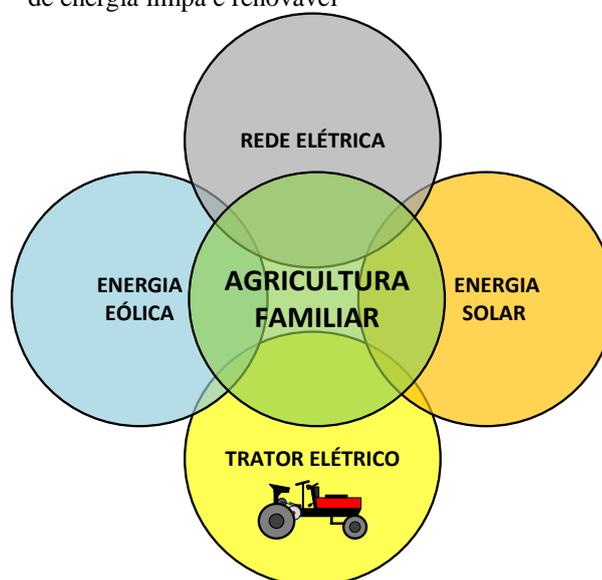
## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O principal objetivo deste Capítulo é fornecer uma revisão bibliográfica das principais pesquisas, inovações e aplicações relacionadas a sistemas de propulsão elétrica para tratores elétricos encontradas na literatura recente. Dentro desse contexto, também são avaliados sistemas de controle que estão sendo propostos pela literatura para solucionar problemas que envolvem a patinagem em veículos elétricos. A particularidade que a referida patinagem produz no comportamento dinâmico e desempenho em veículos como os tratores em suas atividades será contraposta com os problemas e soluções identificados a fim de contribuir para a elaboração do controle proposto para implementação no trator elétrico experimental.

### 2.1 Considerações iniciais

Veículos elétricos (VEs) são veículos automotores com sistema de propulsão elétrica que utilizam pelo menos um motor elétrico para acionamento das rodas. Esses veículos são mais eficazes em termos de rendimento energético do que os convencionais com motor de combustão interna (MCI) e podem fazer uso da energia proveniente de fontes limpas e renováveis (POULLIKKAS, 2015; TIE; TAN, 2013; VOGT; ALBIERO; SCHMUELLING 2018). A Figura 1 destaca o trator elétrico inserido no contexto da agricultura sustentável que se caracteriza pelo uso de fontes de energia limpa e renovável, evitando o uso de combustíveis fósseis.

Figura 1 - Agricultura sustentável com uso de fontes de energia limpa e renovável



Fonte: Elaborada pelo autor.

Há, globalmente, um avanço em ritmo acelerado no campo das energias renováveis. Essas são tecnologias inovadoras e inteligentes que podem impulsionar a adoção dos veículos elétricos. A integração inteligente entre mobilidade elétrica e sistemas de geração de energia fotovoltaica, por exemplo, pode otimizar o uso da eletricidade produzida e, conseqüentemente, contribuir significativamente para aumentar a eficiência energética (LIYOU *et al.*, 2017; HOARAU; PEREZ, 2018).

A produção de veículos elétricos vem se consolidando na indústria automotiva como uma das estratégias mais viáveis para reduzir as emissões de poluentes e o consumo de energia (ANDWARI *et al.*, 2017; MONNAY, 2017). Com a aplicação de sistemas cada vez mais inteligentes e integrados, a referida estratégia também tem atraído considerável atenção da indústria de tratores para impulsionar o desenvolvimento de novos veículos com sistemas de propulsão elétrica, propiciando a aceleração da transferência de tecnologias entre os segmentos (JIA; QIAO; QU, 2018).

## **2.2 Tratores elétricos: uma abordagem da literatura recente**

Na literatura, tratores são classificados como veículos *off-road*, *non-road* ou *off-highway*, ou seja, veículos “fora de estrada” (MÁS; ZHANG; HANSEN, 2010; MONNAY, 2017). O trator é o símbolo da mecanização na agricultura (SRIVASTAVA *et al.*, 2006). A necessidade de otimização das atividades no campo vem promovendo o aumento de exigências por melhores tecnologias, como máquinas e tratores agrícolas mais eficientes (GAGLIORDI, 2018; SRIVASTAVA *et al.*, 2006). Fernandez, Herrera e Cerrada (2018a e 2018b) ainda destacam que existe um interesse crescente de pesquisa em robótica agrícola e automação para ajudar a melhorar os processos de produção usando recursos, como máquinas, de forma mais eficiente para aumentar a produtividade sem precisar aumentar a área de trabalho. A automação de tratores é essencial nesse processo de melhoria. Atualmente, há um renovado interesse na implementação de sistemas elétricos em tratores, sejam eles para propulsão ou funções auxiliares (YOO *et al.*, 2013; MONNAY, 2017; LAJUNEN *et al.*, 2018). Entre as principais vantagens do uso de tratores elétricos podem ser citadas: emissões zero de CO<sub>2</sub>; baixo nível de ruído; alta eficiência dos motores elétricos; redução de consumo de energia em atividades intermitentes; utilização de equipamentos e ferramentas elétricas através de uma interface de conexão com as baterias; baixo custo de operação e manutenção.

Em 2016, Moreda *et al.* apresentaram uma revisão do estado da arte sobre o uso de sistemas elétricos em tratores e máquinas agrícolas. Os autores reforçaram que a incorporação de acionamentos elétricos em tratores e máquinas agrícolas apresenta vantagens em termos de

aumento da eficiência energética e ampliação de funcionalidades. Destacaram, ainda, que em 2002 a *Agricultural Industry Electronics Foundation* (AEF) desenvolveu o padrão ISO11783 (ISOBus) para promover comunicações compatíveis entre o trator e os implementos de qualquer fabricante. Atualmente, a AEF está trabalhando em um padrão para interface de sistemas elétricos compatível entre trator agrícola e implementos (MOREDA *et al.* 2016).

Recentemente, Magalhães *et al.* (2017) também fizeram uma revisão sobre aplicações de veículos elétricos no campo. Conforme os autores, constata-se que nos últimos 30 anos algumas patentes de projetos relacionados a tratores agrícolas com sistemas elétricos de propulsão foram depositadas, evidenciando a preocupação em apresentar alternativas para substituir os tratores com motor de combustão interna, porém ainda muito incipiente (Quadro 1). Dessa forma, em concordância com Magalhães *et al.* (2017), é importante e necessário para a área que mais pesquisas e testes sejam feitos com veículos elétricos em aplicações rurais.

Quadro 1 - Patentes relacionadas a tratores elétricos

PATENTE	TÍTULO	AUTORES
US4662472A	Electric tractor	Christianson, L.L. <i>et al.</i> (1987)
USD355148S	Electric tractor vehicle	Marius Orsolini (1995)
USO05743347A	Electric powered small tractor	Newton Roy Gingerich (1998)
EP1645456A2	Multifunction electric tractor	Brian Wilfred Edmond (2006)
US7828099B2	Electric tractor	Stephen Heckerroth (2010)

Fonte: CHRISTIANSON *et al.* (1987); ORSOLINI (1995); GINGERICH (1998); EDMOND (2006); HECKEROTH (2010).

Entre os projetos apresentados no Quadro 1 não há uma proposição de um sistema distribuído que utilize especificamente dois motores de indução trifásicos gerenciados por uma Unidade de Comando Eletrônico (UCE) e dois inversores de acionamento com baixa potência, compatível para o desenvolvimento de atividades na agricultura familiar. Nos últimos anos grandes fabricantes de tratores vêm desenvolvendo seus protótipos de tratores elétricos, porém, com potências elevadas. O Quadro 2 destaca o atual cenário de tratores disponíveis de acordo com a potência.

Quadro 2 - Mercado de tratores

TIPOS DE TRATORES		POTÊNCIA	FABRICANTES
MCI	Trator de duas rodas (motocultores ou tratores de rabiças)	2 - 11 kW	Tramontini, Yanmar Agritech e Kawashima
	Trator de quatro rodas	Microtratores (4x2 ou 4x2 TDA)	12–27 kW Agrale, Tramontini, Yanmar Agritech, John Deere e Massey Ferguson
		Convencionais (4x2 ou 4x2 TDA)	Acima de 33 kW Agrale, Case, John Deere, New Holland e Massey Ferguson
		Tração integral (4x4)	Acima de 80 kW John Deere e New Holland
ME	Trator elétrico (protótipos não comerciais)	19 kW	Escorts Group (Farmtrac 26E)
		50 kW	Fendt (Fendt e100 Vario)
		200 kW	New Holland (NH2TM)
		300 kW	John Deere (SESAM Tractor)

Fonte: SILVEIRA (1987); FUTURE FARMING (2017); FENDT (2017); FUEL CELLS BULLETIN (2012); JOHN DEERE (2017).

Os dados apresentados no Quadro 2 evidenciam o amplo domínio dos tratores com motor de combustão interna (MCI) e o estágio inicial de desenvolvimento dos tratores elétricos, dado que os modelos apresentados ainda se encontram em fase de protótipos. Para aplicação na agricultura familiar fica restrito o uso de tratores de duas rodas ou algumas poucas opções de microtratores de quatro rodas. Na agricultura familiar é mais frequente o uso dos motocultores (ALBIERO *et al.*, 2015). Esses, também chamados de “tratores de rabiças”, são tratores de pequeno porte, com baixa potência e podem ser acionados por motores Otto ou Diesel, com partida manual ou elétrica (SILVEIRA, 1987). Como limitação esses modelos possuem apenas um eixo de duas rodas e precisam necessariamente ser acoplados a uma máquina ou implemento para o desenvolvimento de atividades.

Entre 2009 e 2011 a New Holland apresentou duas versões do trator elétrico NH2TM com célula combustível de hidrogênio. A segunda versão do trator NH2TM utiliza dois motores elétricos com uma potência nominal de 100 kW cada motor. Apenas um motor é utilizado para tração. O tanque pode conter 8,2 kg de H<sub>2</sub> a uma pressão de 350 bar. Esse trator também possui um banco de baterias de Li-Ion de 300 V – 12 kWh (12.000Wh / 300 V = 40 Ah) com uma potência de pico de 50 kW (FUEL CELLS BULLETIN, 2012). O fabricante de tratores Escorts Group lançou em 2017 seu modelo protótipo Farmtrac 26E com um motor elétrico de indução de 19 kW e autonomia de 6 horas de trabalho (FUTURE FARMING, 2017). Também em 2017 a Fendt e a John Deere apresentaram seus protótipos. A AGCO / Fendt

lançou o Fendt e100 Vario, com um motor elétrico de 50 kW de potência, que pode operar por até 5 horas sob condições reais de operação. A fonte de energia é um banco de baterias de alta capacidade de íons-lítio de 650 V com uma capacidade de cerca de 100 kWh (FENDT, 2017). Já a John Deere, lançou o protótipo de trator SESAM equipado com dois motores elétricos de 150 kW para uma potência total de até 300 kW. Operando no modo padrão, um motor é usado para tração e o outro para a tomada de força TF (ou PTO - *power take-off*) e implementos no trabalho. As baterias garantem uma autonomia em operação de até quatro horas ao rodar no modo misto ou 55 horas apenas para o transporte (JOHN DEERE, 2017). A Figura 2 destaca alguns protótipos desenvolvidos por fabricantes de tratores e máquinas agrícolas.

Figura 2 - Protótipos de tratores elétricos de grandes fabricantes



(a) Fendt e100 Vario.



(b) SESAM - John Deere.



(c) NH2TM - New Holland.

Fonte: (a) FENDT (2017); (b) JOHN DEERE (2017); (c) CLEAN ENERGY LEADER (2018).

Ainda no âmbito das pesquisas, em 2001 Arjharn *et al.* propuseram um estudo preliminar sobre a aplicabilidade de um trator elétrico. Os objetivos desse estudo foram propor

um protótipo e investigar seu desempenho (ARJHARN *et al.*, 2001a; 2001b). O protótipo proposto foi construído a partir da conversão de um trator convencional trocando o motor diesel de 20 kW por um motor elétrico de corrente contínua de 10 kW. O trabalho dos autores foi dividido em duas partes. Na primeira parte foram apresentados os testes de desempenho focados nas características de consumo de energia e tração da barra de tração do trator elétrico (ARJHARN *et al.*, 2001a). Na segunda parte foi avaliado o desempenho trativo a partir do efeito da alocação de bateria no chassi do trator elétrico (ARJHARN *et al.*, 2001b).

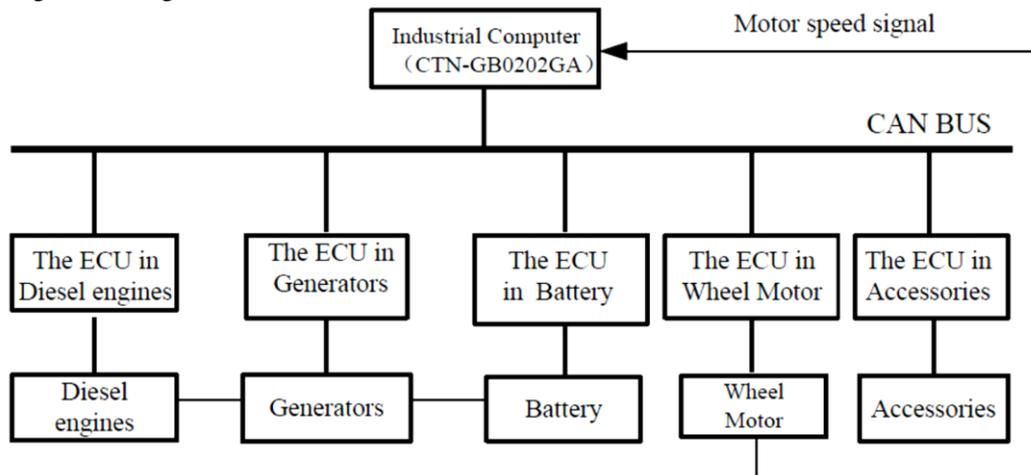
Em 2006, Rodrigues *et al.* avaliaram o desempenho de um microtrator utilizando três tipos diferentes de motores no acionamento: um motor elétrico trifásico de corrente alternada de potência 2,2 kW (220 Vca) a 3465 rpm, um motor elétrico de corrente contínua de tensão de alimentação de 36 Vcc e uma potência de 2,2 kW a 2900 rpm, e um motor de combustão interna (MCI) tipo ciclo “Otto”, dois tempos à gasolina, mono cilíndrico potência nominal de 2,6 kW a 3600 rpm. UEKA *et al.* (2013) também apresentaram um estudo de desempenho de um trator elétrico. Para o desenvolvimento do protótipo foi utilizada a estrutura de um trator convencional com adaptação de um único motor elétrico trifásico de corrente alternada de 10 kW em substituição ao motor de combustão interna também de 10 kW.

Seo *et al.* (2013) propuseram o projeto de motor síncrono de ímã permanente de 20 kW para um trator elétrico com base nas características de saída de um trator convencional. Tal trabalho restringe-se à análise do projeto do motor e não apresenta resultados experimentais com efetiva aplicação no acionamento de um trator.

Em Paula (2014) é apresentada uma proposta de avaliação da viabilidade operacional de tratores agrícolas movidos a eletricidade. A proposta de avaliação mencionada baseia-se nos resultados obtidos a partir de um protótipo de veículo elétrico construído, em escala reduzida, com um motor de corrente contínua de 40 W. Também, nesse trabalho, é apresentada a proposta de uma configuração teórica de trator elétrico usando apenas um motor elétrico, corroborado em Volpato *et al.* (2016). Não há, nesses trabalhos, um estudo elaborado acerca do sistema de acionamento e do controle para o trator elétrico ou uma avaliação de desempenho tomando como base um protótipo em escala real.

Li *et al.* (2014) destacam o projeto de um sistema de controle para um trator elétrico híbrido de média potência com barramento CAN. O artigo se prende mais ao projeto de software e hardware do referido sistema de controle. Na Figura 3 tem-se o diagrama do projeto apresentado pelos autores. Observa-se que nesse projeto são propostas várias UCEs, cada uma para um subsistema específico, conectadas a um barramento CAN.

Figura 3 - Diagrama do sistema de controle com barramento CAN em trator elétrico híbrido



Fonte: LI *et al.* (2014).

Chen *et al.* (2016) apresentaram um sistema de controle de acionamento para um protótipo de trator elétrico utilizando um motor Brushless DC (BLDC), de tensão nominal de 72 V e potência nominal de 7,5kW (Figura 4). Foi implementado como estratégia de controle do acionamento do motor o controle PID de circuito fechado duplo com velocidade externa e loop de corrente interna combinados com o controle PWM. O controlador do motor foi projetado com base em FPGA (onde o hardware usou o NI myRIO como núcleo de controle que integrou o ARM ao Xilinx FPGA). Foi utilizado o LabVIEW como ambiente de desenvolvimento para programação de controle, conforme descrevem Chen *et al.* (2016).

Figura 4 - Protótipo trator elétrico desenvolvido por Chen *et al.* (2016)

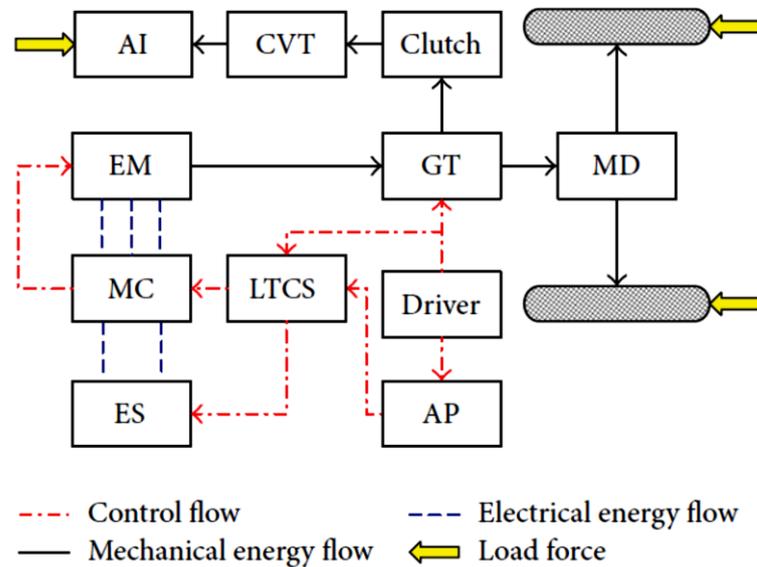


Fonte: CHEN *et al.* (2016).

Outro trabalho encontrado na literatura recente trata do projeto de uma estratégia de controle baseada em torque de carga (*Load Torque Control Strategy - LTCS*) para melhorar a eficiência de conversão de energia do motor Brushless DC (BLDC) de 130 kW para um trator

elétrico (puro ou híbrido), proposto por Liu *et al.* (2016). O estudo mostra a modelagem matemática e a análise de desempenho por meio de simulação da estratégia proposta. A Figura 5 destaca a representação esquemática da função de controle para o sistema de propulsão elétrica proposto.

Figura 5 - Representação esquemática da função de controle LTCS



Fonte: LIU *et al.* (2016).

Durante o processo investigativo constatou-se que pesquisas relacionadas a sistemas de propulsão aplicados diretamente a tratores elétricos e respectivas análises de desempenhos ainda são pouco discutidos na literatura, comparado com a aplicação em veículos urbanos. Verificou-se, ainda, que nas abordagens encontradas há o amplo domínio da utilização de um único motor elétrico como meio de propulsão (resumo no Quadro 3). Portanto, um sistema de propulsão com estrutura distribuída para um trator elétrico de pequeno porte adequado para a agricultura familiar não foi encontrado na literatura. Tão pouco sua análise de desempenho. Verificou-se que, mesmo que tecnologias avançadas já venham sendo utilizadas em tratores agrícolas, as especificidades de uso e a conveniência de usar os combustíveis fósseis ainda dificultam a disseminação dos tratores elétricos.

Assim, com os resultados da pesquisa bibliográfica apresentada evidencia-se que há, no mercado e na literatura, poucas proposições que atendam especificamente às necessidades dos pequenos produtores rurais com tratores elétricos de pequeno porte e baixa potência compatíveis com seus níveis de atividades (com grande capacidade de manobrar em pequenos espaços e menor custo de aquisição). Conseqüentemente, tratores elétricos de pequeno porte e baixa potência, dentro de uma faixa de 2 a 27 kW (equiparados aos

motocultores e microtratores vistos no Quadro 2), tornam-se uma alternativa viável, capaz de proporcionar melhorias significativas para a agricultura familiar (sendo capaz de acoplar diversos implementos agrícolas, como reboques, cultivadores, semeadoras e pulverizadores compatíveis) e contribuir para a sustentabilidade por meio do uso de energia limpa. Sua utilização com um sistema de micro geração distribuída de energia por meio de fontes eólica e solar fotovoltaica conectado à rede rural (ou em casos de propriedades isoladas do sistema de distribuição) fortalece o novo conceito da agricultura sustentável e renova as perspectivas dos pequenos agricultores de melhorar a capacidade produtiva.

Quadro 3 - Projetos relacionados a tratores elétricos

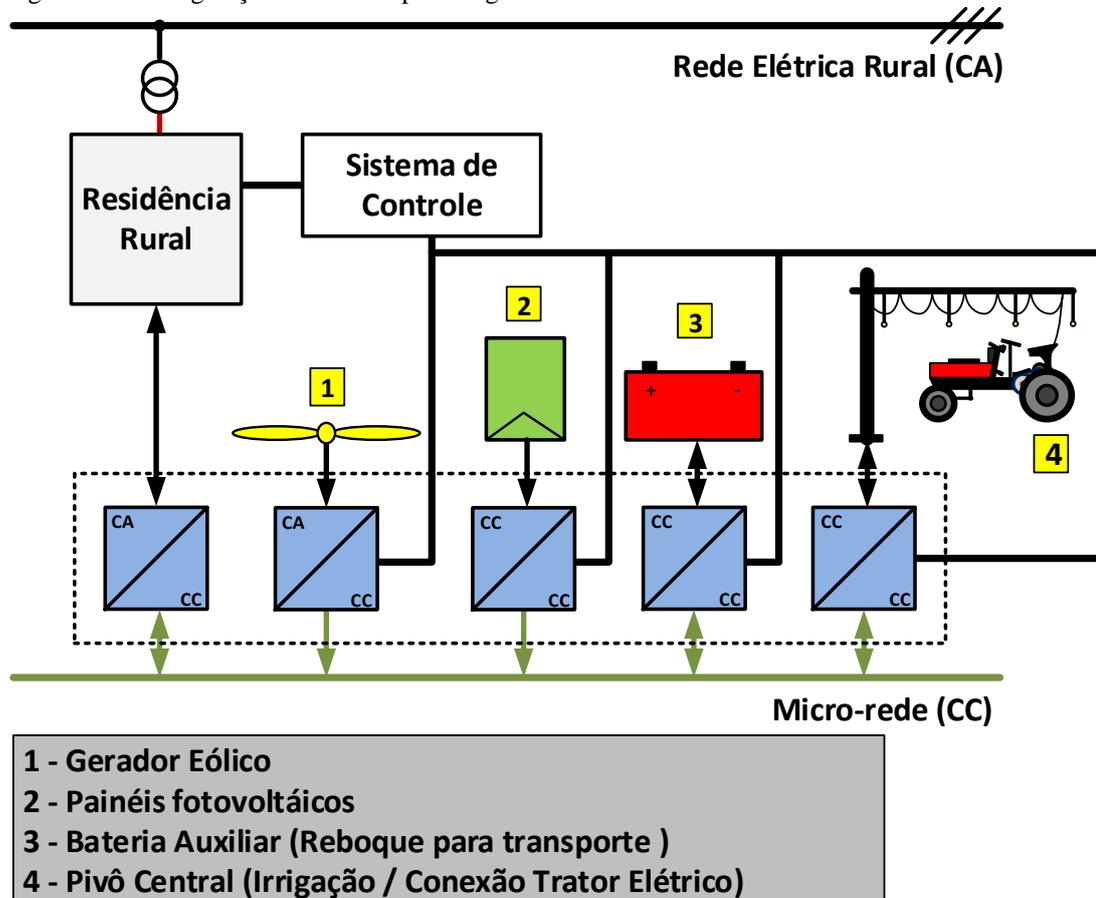
<b>AUTORES</b>	<b>QUANT. DE MOTORES DE TRACÇÃO</b>	<b>TIPO DE MOTOR</b>	<b>POTÊNCIA</b>
RODRIGUES <i>et al.</i> (2006)	1	Motor de indução CA ou Motor CC	2,2 kW
CHEN <i>et al.</i> (2016)	1	Motor Brushless DC (BLDC)	7,5kW
ARJHARN <i>et al.</i> (2001a; b)	1	Motor CC	10 kW
UEKA <i>et al.</i> (2013)	1	Motor de indução CA	10 kW
Escorts Group (2017)	1	Motor de indução CA	19 kW
SEO <i>et al.</i> (2013)	1	Motor síncrono de ímã permanente	20 kW
Fendt (2017)	1	-	50 kW
New Holland (2009-2011)	1	-	100 kW
LIU <i>et al.</i> (2016)	1	Motor Brushless DC (BLDC)	130 kW
John Deere (2017)	1	-	150 kW

Fonte: Elaborado pelo autor.

O presente projeto concentra-se em mobilidade elétrica no âmbito rural, mas outras áreas temáticas, como energias renováveis e infraestruturas (redes inteligentes), também estão integradas. Um sistema de geração distribuída consiste em unidades de geração em pequena escala diretamente conectadas à rede de distribuição, resultando em fluxos de energia bidirecional (EHSAN; YANG, 2018). Como alternativa para uso do trator elétrico com maior autonomia, propõe-se a utilização de um novo sistema com pivô central de dupla função: irrigação automatizada e conexão do trator elétrico a uma micro rede via cabo (Figura 6). Dentro do alcance do sistema, o fornecimento de energia por cabo alimentará o trator e simultaneamente recarregará as baterias. Ao trabalhar ou mover-se fora do alcance do sistema com cabo articulado, o trator elétrico utilizará as baterias como fonte de energia e o sistema

com pivô central atuará com a irrigação automatizada. Outra opção para ampliar o uso do trator de forma independente é a utilização de um banco de baterias reserva para troca rápida (VOGT, 2018).

Figura 6 - Micro geração distribuída para a agricultura familiar



Fonte: Elaborada pelo autor.

A agricultura familiar tem sido grande aliada da sustentabilidade e da responsabilidade socioambiental. Ela utiliza práticas de cultivo mais sustentáveis com a produção de alimentos orgânicos. O acesso a eletricidade no âmbito rural propicia a introdução de inovações tecnológicas, sendo um fator determinante para a maior produtividade e melhor qualidade dos processos produtivos agrícolas. O programa de eletrificação rural “Luz para Todos” (BRASIL, 2017) tem contribuído significativamente para atender à necessidade de acesso à energia elétrica e melhorar as condições de vida do homem no campo e aumentar a produção de alimentos. Os empreendimentos familiares rurais também apresentam grande potencial para micro geração de energia por meio de novas fontes de energia limpa e renovável. E dentro dessa concepção, o FNE Sol (BNB, 2019) é um exemplo de programa que tem contribuído para a expansão da utilização dessas novas fontes nas áreas rurais. Trata-se de um programa de financiamento para a instalação de projetos sustentáveis de fontes renováveis

(inclusive sistemas de micro e mini geração distribuída de energia) em propriedades rurais. O Brasil, sobretudo a Região Nordeste, apresenta condições altamente favoráveis para a produção de energia nas modalidades de geração solar e a eólica.

### **2.3 Revisão dos métodos de controle de movimento**

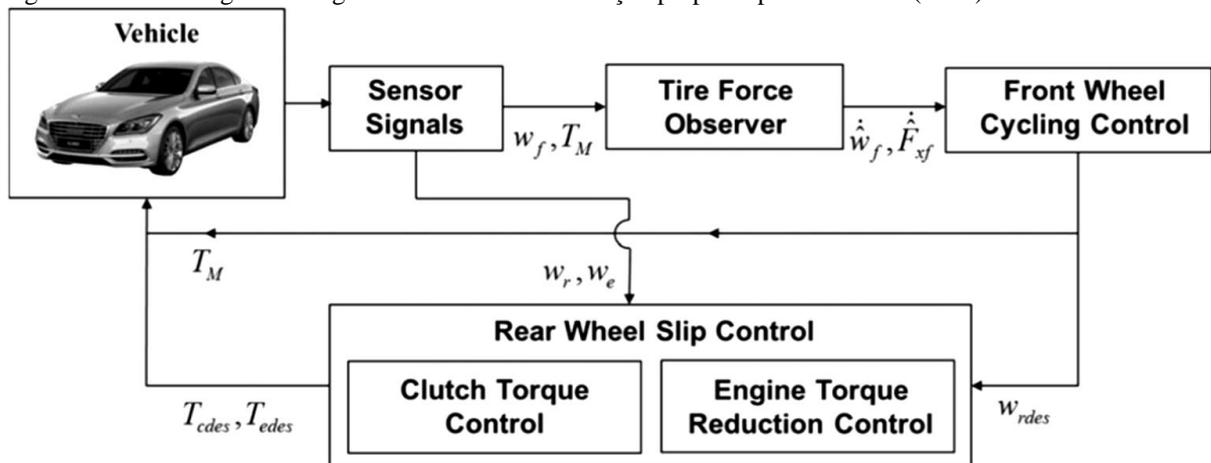
Dentro da proposta de um conceito de propulsão elétrica apropriado a um trator elétrico de baixa potência para pequenos produtores agrícolas, um dos objetivos essenciais para o desenvolvimento desta pesquisa está relacionado à proposição de funcionalidades no controle de acionamento dos motores de tração do trator elétrico, visando promover maior versatilidade de operação. Isso inclui um sistema de controle de patinagem para a otimização de desempenho. Conforme será demonstrado com mais detalhes no Capítulo 3, a patinagem das rodas motrizes é considerada um parâmetro essencial para avaliar o desempenho de um trator em determinadas condições de trabalho (ASAE, 2006; ASAE, 2009; ZOZ, 1972).

Dada a relevância da patinagem dentro do processo de utilização dos tratores no desenvolvimento das atividades agrícolas, a presente pesquisa também buscou investigar na literatura proposições de sistemas de controles aplicados a veículos elétricos que envolvam patinagem. Nesse processo, buscou-se saber se a temática vem sendo discutida para aplicações específicas em tratores elétricos. Inicialmente, em seu processo de revisão, a pesquisa apontou alguns esforços para implementação de sistemas de controle em tratores convencionais com o intuito de torná-los mais eficientes. Chancellor e Zhang (1989), por exemplo, propuseram um sistema automático de controle de patinagem para tratores. Um trator com MCI de 67 kW foi equipado com um sistema automatizado das alavancas que alteram o ponto de ajuste do controle de tração ou da profundidade do implemento (arado e grade do disco), para manter o deslizamento da roda dentro de uma faixa predefinida. Os autores destacam que o sistema proposto possibilitou uma economia média de combustível de 7,6% e economia média de tempo de 4,9% por unidade de área cultivada. Pranav *et al.* (2012) e Gupta *et al.* (2019) também apresentaram sistemas de controle automático de patinagem, baseados em microcontroladores, para tratores convencionais com tração em duas rodas. Tais sistemas buscam do mesmo modo atuar nas ações dos implementos agrícolas levando-se em consideração a patinagem do trator. Um trator diesel de 32,8 kW (potência PTO) foi utilizado para os testes de campo.

Ao longo da busca, constatou-se que há grande concentração e crescente produção de pesquisas sobre sistemas de controles voltadas para veículos elétricos urbanos. (CUI *et al.*, 2017; YIN; SUN; HU, 2019; NAM; HORI; LEE, 2015). Os desenvolvimentos em sistemas eletrônicos e controlados por microprocessador têm resultado avanços consideráveis em

sistemas de controles desses veículos, como controles de tração das rodas (*Traction Control System* - TCS) e controles de estabilidade (*Electronic Stability Control* - ESC) (HAN *et al.*, 2018; HORI; TOYODA; TSURUOKA, 1998; YIN; SUN, HU, 2019; TAVERNINI *et al.*, 2019). Para esses sistemas de controle, a patinagem é um parâmetro indispensável. E para o desenvolvimento, vários métodos têm sido utilizados, como controle de modo deslizante, controle robusto e controle fuzzy (CUI *et al.*, 2017; HAN *et al.*, 2018; YIN; SUN; HU, 2019; NAM; HORI; LEE, 2015). Assim, existem diferentes abordagens para a representação de tais sistemas em um veículo elétrico. Han *et al.* (2018), por exemplo, apresentaram um sistema de controle de tração usando um tipo especial de controlador de modo deslizante para aplicação em veículos elétricos híbridos ou puros com tração nas quatro rodas. Na Figura 7 tem-se a estrutura geral do controle de tração proposto.

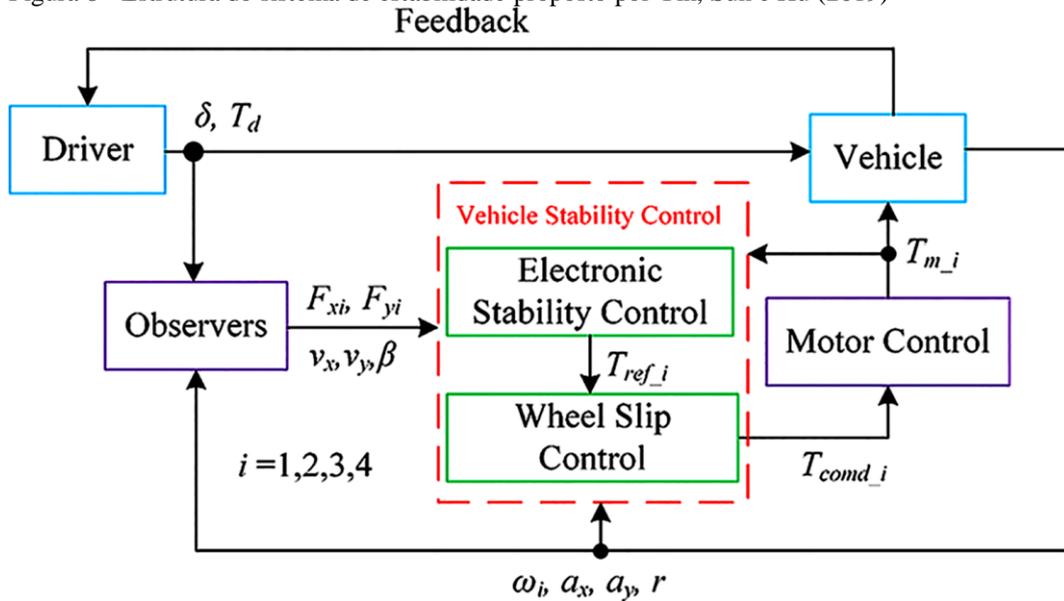
Figura 7 - Estrutura geral do algoritmo do controle de tração proposto por Han *et al.* (2018)



Fonte: HAN *et al.* (2018).

Já Yin, Sun e Hu (2019) apresentaram uma abordagem de controle de patinagem das rodas que garante que o controle de estabilidade funcione normalmente para veículos elétricos de tração descentralizada. A abordagem proposta utiliza as velocidades das rodas e a aceleração do veículo para estimar o torque máximo transmissível. Além disso, um controlador fuzzy garante que o torque não seja restrito na arrancada do veículo ou quando a roda estiver se recuperando da patinagem, o que melhora o desempenho de aceleração do veículo. No sistema proposto, o comando de torque do ESC funciona como entrada para o controle de patinagem da roda, e o controle de patinagem da roda gera o comando de torque final para os motores de acionamento. A Figura 8 destaca a respectiva estrutura do sistema de controle de estabilidade mencionada em que envolve a patinagem das rodas.

Figura 8 - Estrutura do sistema de estabilidade proposto por Yin, Sun e Hu (2019)



Fonte: YIN; SUN; HU (2019).

As abordagens encontradas são próprias para veículos elétricos urbanos, o que confirmam os exemplos apresentados. Assim, diante do processo investigativo, verificou-se que sistemas de controles aplicados a tratores elétricos também são ainda pouco discutidos na literatura. Em especial, sistemas de controles que envolvem a patinação em tratores elétricos para torná-los mais eficientes não foram encontrados. As especificidades de uso desse tipo veículo (não linearidades relacionadas à dinâmica veicular, em constante mudança devido a irregularidades no terreno) requer um sistema de controle intrínseco a sua aplicação.

Neste Capítulo, uma revisão abrangente sobre pesquisas e aplicações de sistemas de propulsão elétrica para tratores foi apresentada. Ficou constatado que na literatura ainda há poucos estudos e aplicações que abordam tais sistemas. Conclui-se que há para o segmento a necessidade de que mais pesquisas e aplicações sejam direcionadas a tratores elétricos. Assim, durante o processo investigativo realizado, objetivos importantes foram alcançados no presente capítulo: identificação do atual panorama de pesquisas, inovações e desenvolvimentos relacionados a tratores elétricos; e identificação da faixa de potência de 2 a 27 kW viável para o desenvolvimento de um trator elétrico (equiparados aos motocultores e microtratores) para aplicação na agricultura familiar; e a constatação da necessidade de exploração da lacuna que envolve sistemas de controles aplicados a tratores elétricos capazes de promover melhorias em termos de eficiência. No Capítulo seguinte, será realizada uma abordagem conceitual de temas relacionados com a pesquisa proposta no intuito de fornecer os fundamentos teóricos para o seu desenvolvimento.

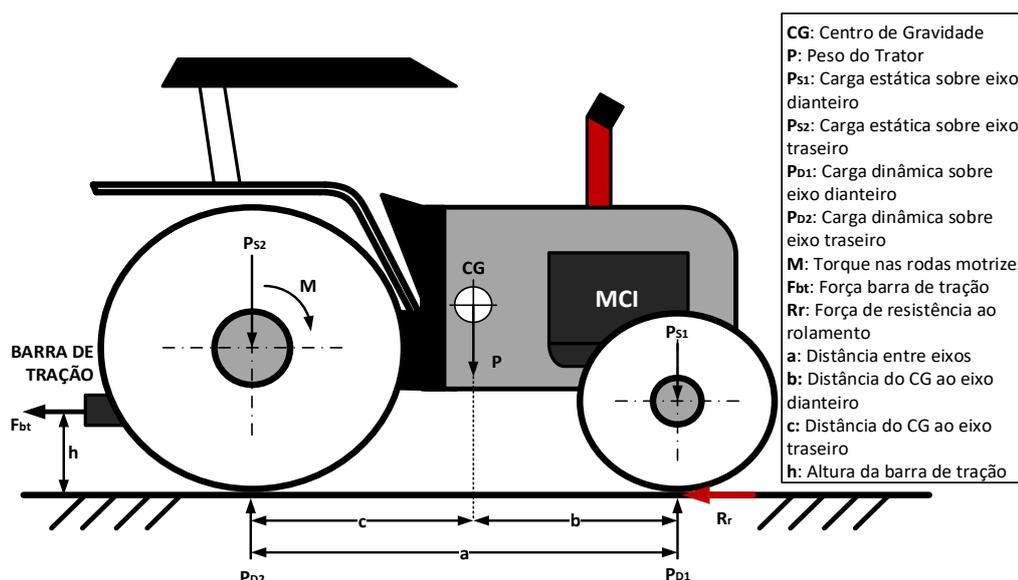
### 3 TRATORES ELÉTRICOS: FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este Capítulo 3 apresenta uma abordagem conceitual a respeito de tratores convencionais e sistemas de propulsão elétrica em veículos elétricos, necessária para o desenvolvimento da pesquisa relacionada diretamente a tratores elétricos. São, ainda, abordados os conceitos das técnicas de controles empregados em inversores, parte integrante dos referidos sistemas de propulsão. Também são analisadas as baterias e suas características, visto que essas são o tipo de fonte de energia empregada no sistema proposto.

#### 3.1 Tratores agrícolas convencionais

O trator agrícola, exemplificado na Figura 9, é um veículo de propulsão automotora que produz potência para operar implementos e máquinas agrícolas, incluindo reboques (OECD, 2019). A potência desses tratores vem da energia do combustível fornecida a um motor de combustão interna (MCI), e é utilizada na agricultura principalmente sob a forma de força de tração pela barra de tração (LILJEDAHN *et al.*, 1989).

Figura 9 - Trator agrícola



Fonte: ZOZ; GRISSO (2003). Adaptado.

Os tratores de pneus são os mais usados na agricultura. Esses podem ser de duas (2RM) ou quatro rodas motrizes (4RM). Os tratores de duas rodas motrizes podem ser de um eixo (motocultores ou tratores de rabiças) ou de dois eixos (MARQUEZ, 2012). Os tratores de duas rodas motrizes e dois eixos são os mais comuns na agricultura brasileira. Esse modelo de trator possui uma distribuição aproximada do peso de modo que 38% do peso total estão sobre o eixo dianteiro do trator, enquanto 62% estão sobre o eixo traseiro. O trator de quatro rodas

motrizes foi desenvolvido com o propósito de aperfeiçoar o trator de duas rodas motrizes, objetivando a melhor utilização da potência do motor (FOLLE; FRANZ, 1990).

À medida que um trator agrícola promove o deslocamento para desenvolver um determinado esforço de tração, duas forças fundamentais se opõem ao movimento: a força na barra de tração e a força de resistência ao rolamento (Figura 9). Dessa maneira, o pneu deverá imprimir ao solo um esforço capaz de superar essas duas forças (LILJEDAHN *et al.*, 1989; ZOZ; GRISSO, 2003). A estimativa da carga dinâmica sobre rodas de tração é dada pela equação (3.1).

$$P_{D2} = \frac{F_{bt} \cdot h}{a} + \frac{P \cdot b}{a} \quad (3.1)$$

Tem-se que (3.2):

$$\frac{F_{bt} \cdot h}{a} = T_p \quad (3.2)$$

Onde  $T_p$  é a transferência de peso devido à força na barra de tração do trator.

A capacidade de realizar um trabalho agrícola de um trator está relacionada mais com a força de tração do que com a potência disponível no eixo do motor, destacam Folle e Franz (1990). Assim, ainda segundo os autores, a força de tração está diretamente relacionada com a capacidade de execução de trabalho de um determinado trator, enquanto a potência determina a velocidade em que esse trabalho poderá ser executado. As condições do solo é uma das características que influenciam na força de tração (ASAE, 2009). No gráfico da Figura 10 pode-se ver a força de tração máxima disponível para os tratores agrícolas em função da potência no motor (considerando a velocidade ideal de trabalho).

A patinagem a que são submetidas as rodas motrizes e a distribuição de peso nos tratores interferem diretamente no aproveitamento da potência do eixo do motor, transformada na potência da barra de tração. Patinagem é a denominação dada para o deslizamento entre a superfície da seção de um pneu e o solo. Esse é considerado um parâmetro essencial para observar o desempenho do trator em determinadas condições de trabalho (ASAE, 2006), (ASAE, 2009). O índice de utilização da potência, denominado eficiência de tração ou eficiência tratória (ET), é diretamente influenciado pelos níveis de patinagem. A obtenção da potência e força máxima de tração varia de acordo com o tipo de trator e as condições do solo.

A eficiência de tração é a razão entre a potência útil na barra de tração e a potência motora (MACMILLAN, 2002), ou seja, (3.3):

$$ET = \frac{PBT}{PEM} \quad (3.3)$$

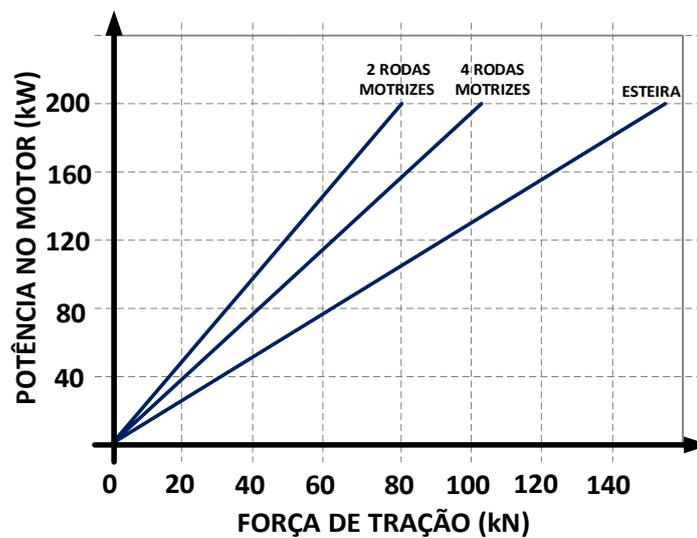
Onde:

$ET$  = Eficiência de Tração (ou Tratória);

$PBT$  = Potência na Barra de Tração;

$PEM$  = Potência no Eixo Motriz.

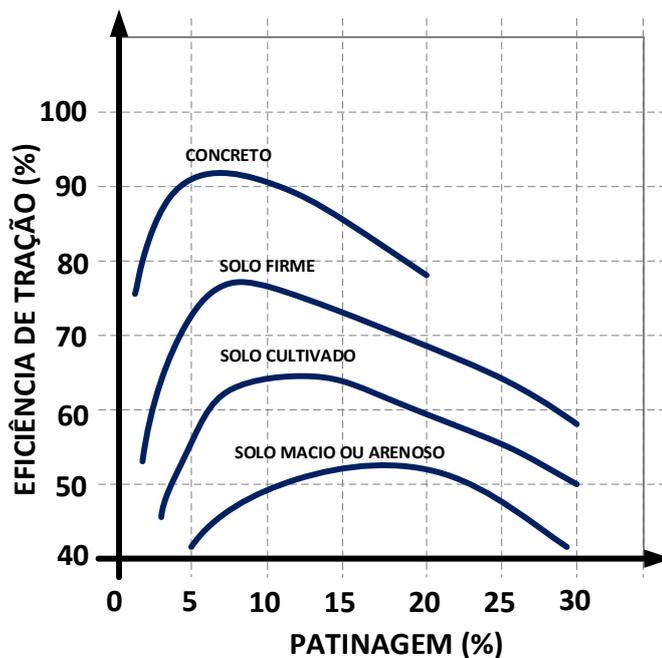
Figura 10 - Força de tração máx. versus potência no motor



Fonte: FOLLE; FRANZ (1990). Adaptado.

Zoz (1972) concluiu que diferentes tipos de solos teriam diferentes faixas de patinagem, nas quais a eficiência de tração é máxima. Através do gráfico da Figura 11 é observada a relação da patinagem com a eficiência de tração dos tratores de duas rodas motrizes em diversas condições de solo.

Figura 11 - Eficiência de tração versus patinação para diferentes condições do solo



Fonte: ZOZ (1972). Adaptado.

De acordo com a Figura 11, a patinação deve estar próxima ao valor máximo da eficiência de tração para uma operação mais eficiente, considerando a curva para cada tipo de solo. Assim, a eficiência de tração é máxima quando o trator opera nas seguintes condições, atesta a ASAE (2006):

- Concreto: patinação entre 4% e 8%;
- Solo firme: patinação entre 8% e 10%;
- Solo cultivado: patinação entre 11% e 13%;
- Solo macio ou arenoso: patinação entre 14% e 16%.

Assim, pode-se afirmar que a faixa de máxima eficiência de tração acontece quando a patinação se encontra entre 4% e 16%. Para se obter uma operação eficiente do trator, deve haver um certo percentual de patinação entre a roda e o solo, no entanto, uma patinação restrita para melhor eficiência de tração. A patinação da roda motriz é essencial para que ocorra a tração, contudo, se certos limites forem excedidos, poderá ocorrer perda de aderência e redução da tração. Nesse contexto, a patinação em excesso das rodas é uma das principais causas responsáveis pela redução da eficiência (ASAE, 2006). A patinação da roda motriz reduz a velocidade de avanço do trator e, conseqüentemente, exerce uma grande influência na perda de

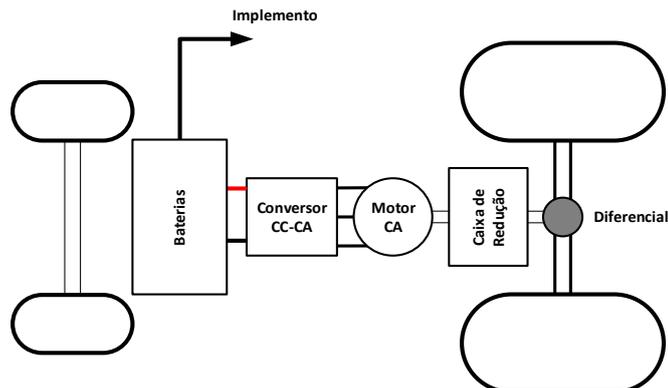
potência na barra de tração. Nos tratores agrícolas, a ocorrência de patinação abrange vários fatores, tais como a força na barra de tração exigida para deslocar determinados equipamentos agrícolas; tipo de solo; tipo e pressão dos pneus e carga nas rodas.

Dessa forma, podem ser adotadas medidas práticas, conforme o tipo de solo e a respectiva faixa de patinação, no intuito de se obter a eficiência de tração máxima e evitar problemas operacionais e custos desnecessários (ASAE, 2009). Para reduzir a patinação em tratores agrícolas, atualmente usa-se o método convencional denominado lastragem. Esse método significa aumentar a massa do trator, melhorando a sua aderência ao solo e, portanto, diminuindo a patinação das rodas motrizes, assegurando, assim, a capacidade de tração (MARQUEZ, 2012). A aplicação de lastro (sólido ou líquido) deve ser feita de forma adequada, pois seu uso de maneira incorreta altera os níveis de patinação. Quando a patinação é muito baixa (tendendo a zero) geralmente pode representar um excesso de peso no trator. Nesse sentido, dá-se o aumento da potência requerida para deslocar o trator e diminuir a potência disponível na barra de tração para puxar o implemento. Conseqüentemente, ocorre o aumento do consumo de combustível e do desgaste do trator. Quando a patinação atinge um percentual elevado, há perda de potência pelo deslizamento excessivo dos pneus, redução da velocidade de deslocamento e o conseqüente desgaste dos pneus (ZOZ; GRISSO, 2003).

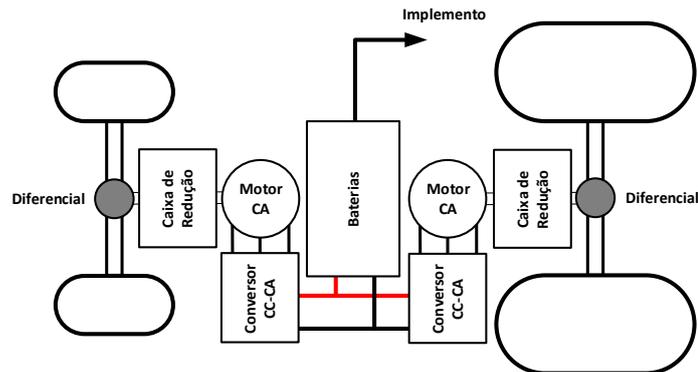
### **3.2 Veículos elétricos: sistemas de propulsão elétrica**

Sistemas de propulsão puramente elétricos para veículos elétricos (VEs) são caracterizados por uma cadeia de conversão de energia elétrica composta basicamente por um sistema de armazenamento de eletricidade e motor elétrico com o seu controlador (DENTON, 2018; DU *et al.*, 2019). Comparado com um veículo convencional com motor de combustão interna, em que o fluxo de energia se dá através da direta integração de dispositivos mecânicos, um veículo elétrico apresenta um sistema de propulsão mais flexível. Em um VE é possível distribuir mais livremente os dispositivos do sistema de propulsão visto que suas conexões são feitas através de cabos elétricos. Dessa forma, essa flexibilidade leva a várias possibilidades de arquiteturas de sistema de propulsão que podem ser utilizadas (ECKERT *et al.*, 2016; EHSANI *et al.*, 2010; HU *et al.* 2019). A Figura 12 destaca algumas possibilidades de arquiteturas de sistema de propulsão que podem ser usadas em um trator puramente elétrico.

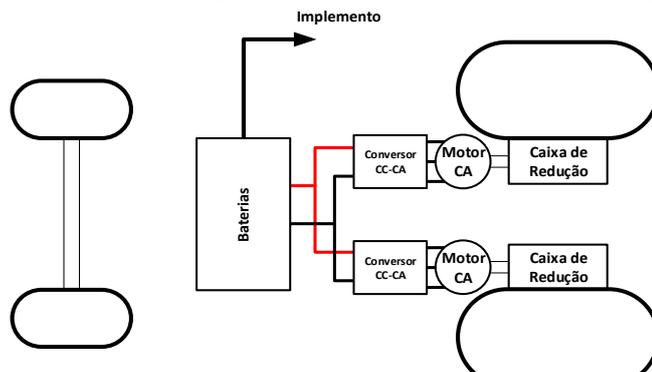
Figura 12 - Arquiteturas de sistemas de propulsão para tratores elétricos



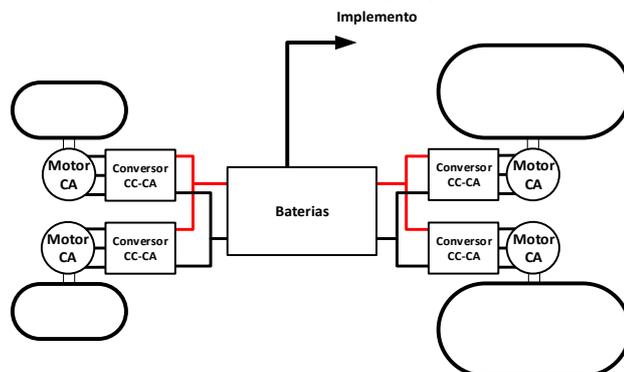
(a) Sistema com único motor elétrico de tração no eixo traseiro



(b) Sistema com um motor de tração no eixo traseiro e outro motor de tração no eixo dianteiro



(c) Sistema com um motor de tração para cada roda traseira

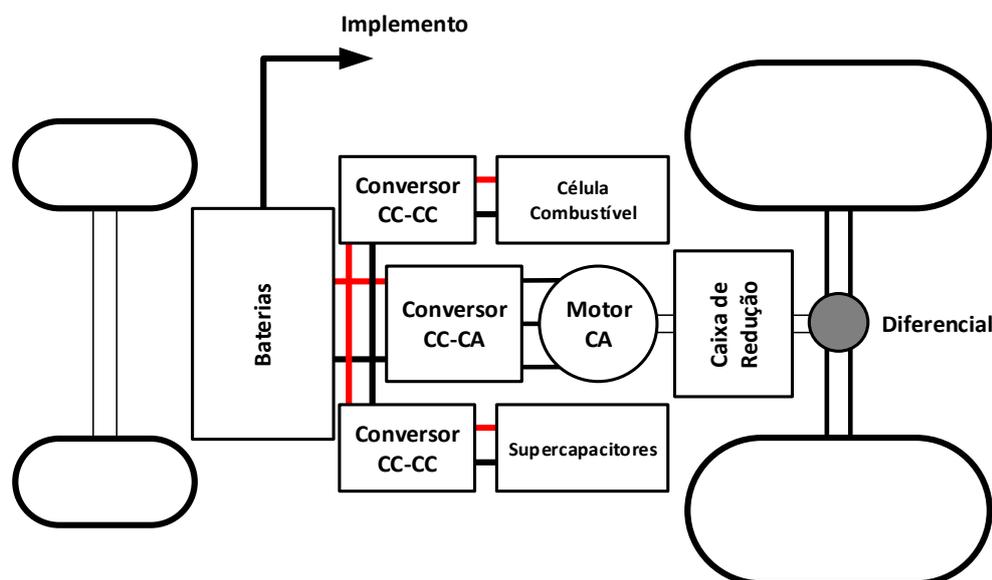


(d) Sistema independente com um motor de tração em cada roda

Fonte: Elaborada pelo autor.

Assim como nos veículos elétricos urbanos, o uso de vários componentes de armazenamento de energia, como baterias, ultracapacitores e células combustíveis, podem ser utilizados nos tratores agrícolas elétricos. Essa associação garante uma fonte de alimentação estável e uma resposta rápida à demanda (DU *et al.*, 2019; JIA; QIAO; QU, 2018; MELO, 2014). A Figura 13 apresenta uma arquitetura possível para um trator elétrico, associando vários sistemas de armazenamento de energia.

Figura 13 - Trator elétrico com múltiplos sistemas de armazenamento de energia



Fonte: Elaborada pelo autor.

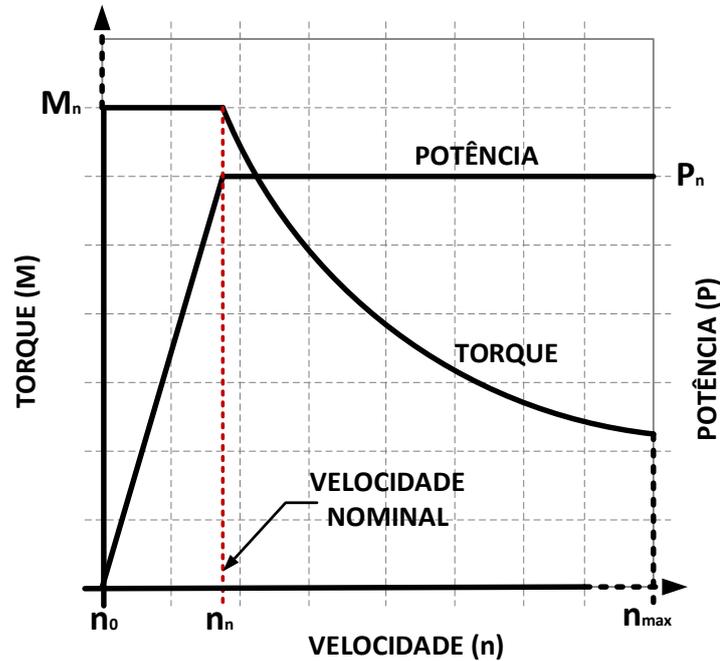
Outra característica importante a ser mencionada para sucesso dos sistemas de propulsão elétrica é que, com o avanço no desenvolvimento da eletrônica de potência, houve uma significativa diminuição nos custos dos conversores de acionamento. Os avanços relevantes nesse campo incluem o desenvolvimento de semicondutores de potência capazes de operar em uma ampla faixa de correntes, tensões e frequências de comutação. Além disso, a concepção de microprocessadores também permite o desenvolvimento de projetos flexíveis, especialmente quando processadores digitais de sinais (DSPs) e microcontroladores são empregados.

### 3.2.1 Motores elétricos

A potência que um motor elétrico pode fornecer continuamente sem superaquecimento é a sua potência nominal. Por curtos períodos de tempo, o motor pode fornecer de duas a três vezes a potência nominal. As características de potência e torque do motor elétrico em função da velocidade são vistas na Figura 14. Na partida, é possível observar

através desta figura que a alta potência está disponível para aceleração, e o torque do motor pode ser máximo em velocidade zero.

Figura 14 - Curvas características de potência e torque do motor elétrico



Fonte: EHSANI *et al.* (2010). Adaptado.

As características importantes de um motor para um veículo elétrico incluem controle de acionamento flexível e tolerância a falhas. O acionamento do motor deve ser capaz de lidar com as flutuações de tensão da fonte. Os requisitos de um motor para VEs estão relacionados da seguinte forma:

- Robustez;
- Alta relação torque-velocidade;
- Capacidade de torque máximo (200 a 300%)
- Alta relação potência/ peso;
- Facilidade de controle;
- Baixo ruído;
- Baixa interferência eletromagnética;
- Baixa manutenção;
- Baixo custo.

Em um veículo elétrico, o motor elétrico de tração converte energia elétrica proveniente da fonte de armazenamento em energia mecânica, que aciona as rodas do veículo (DOMINGUES-OLAVARRÍA *et al.*, 2019). As principais vantagens do motor elétrico, tais como fornecer torque total em baixas velocidades e potência instantânea duas ou três vezes a potência nominal do motor, permitem uma excelente aceleração ao veículo.

Os motores elétricos podem ser do tipo CC ou CA. Os motores da série CC foram usados nas primeiras gerações de veículos elétricos devido, principalmente, à facilidade de controle. No entanto, os requisitos de tamanho e manutenção de um motor CC estão tornando o seu uso obsoleto em todas as aplicações de acionamento motorizado. Os VEs mais recentes utilizam motores CA e sem escova, que incluem motores de indução trifásico (MIT), motores de ímã permanente (*Permanent Magnet Synchronous Machine* - PMSM) e motores de relutância variável (*Switched Reluctance Motor* - SRM) (DU *et al.*, 2019; EHSANI *et al.*, 2010). Para o desenvolvimento do presente projeto de pesquisa, dois motores de indução trifásicos exclusivos para aplicação veicular são empregados no protótipo do trator elétrico. Dessa forma, os motores de indução trifásicos são estudados com maior ênfase na sequência.

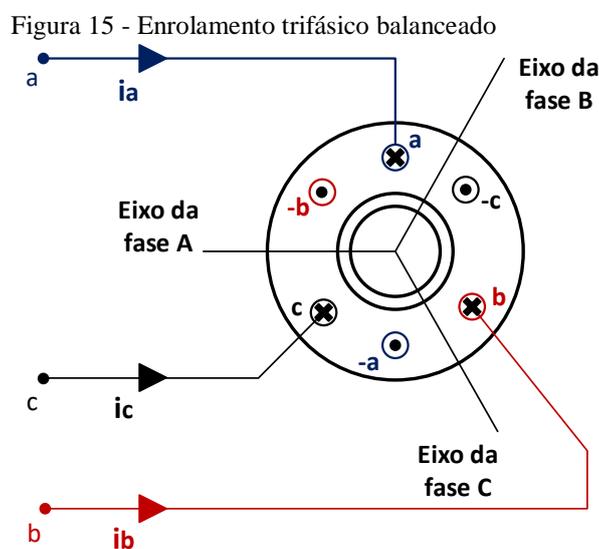
Sistemas de potência CC ainda são comuns em carros, tratores e aeronaves. O uso de motores CC é considerável quando um determinado veículo já dispõe de um sistema elétrico CC. Antes da difusão dos retificadores e inversores com dispositivos semicondutores de potência, os motores CC eram predominantes em aplicações de controle de velocidade (CHAPMAN, 2013). Assim, devido à facilidade com que podem ser controlados, os sistemas de máquinas CC são usados em aplicações que exigem ampla faixa de velocidades ou controle preciso da velocidade de saída do motor (FITZGERALD; KINGSLEY JR; UMANS 2006). Há cinco tipos principais de motores CC de uso geral (CHAPMAN, 2013):

- O motor CC de excitação independente;
- O motor CC em derivação;
- O motor CC de ímã permanente;
- O motor CC série;
- O motor CC composto.

O motor de indução trifásico (MIT) é o mais adotado na indústria e um dos principais motores utilizados em sistemas de propulsão de veículos elétricos. A tecnologia de motores de indução CA evoluiu de forma significativa nas últimas décadas por meio das

pesquisas e desenvolvimentos ocorridos (TRZYNADLOWSKI, 2001; HUSAIN, 2003). O motor de indução trifásico é alimentado em corrente alternada, fornecida diretamente ao estator. O rotor desse motor pode ser de dois tipos: bobinado ou gaiola de esquilo. O rotor bobinado, não muito utilizado, tem enrolamentos trifásicos no rotor conectados a anéis coletores no eixo, possibilitando o acesso externo das correntes induzidas nas bobinas do rotor. O rotor de gaiola de esquilo é formado por barras condutoras de alumínio fundidas nas ranhuras do rotor e curto-circuitadas por anéis condutores de alumínio (FITZGERALD; KINGSLEY JR; UMANS 2006). Essa forma construtiva do rotor resulta em motores de indução mais robustos. Nesse formato, o motor de indução trifásico se tornou amplamente aplicado. Sua eficiência de operação sem precisar fazer contato com os enrolamentos do rotor trouxe grande benefício, reduzindo consideravelmente os custos e a manutenção. O MIT funciona em velocidade constante e inferior à velocidade síncrona. Por essa razão, esse motor também é denominado motor assíncrono (FITZGERALD; KINGSLEY JR; UMANS 2006; HUSAIN, 2003; TRZYNADLOWSKI, 2001).

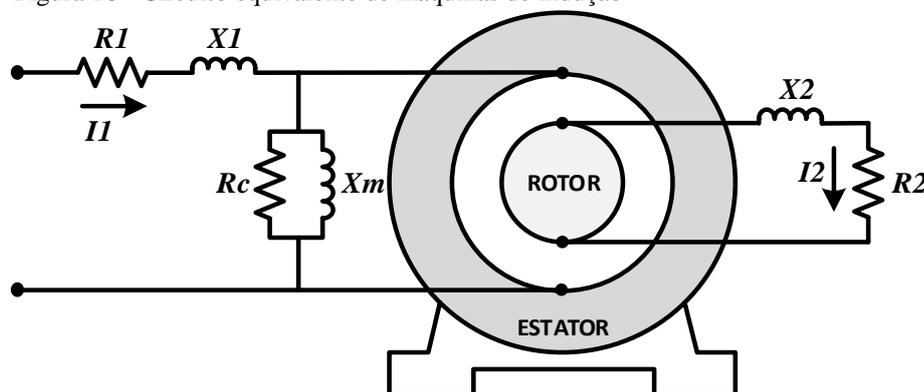
Os enrolamentos do estator de um motor de indução trifásico são dispostos de modo a produzir uma força magnetomotriz ( $f_{mm}$ ) com características senoidais e com defasagem de  $120^\circ$  ( $2\pi/3$  rad) elétricos. A representação de um MIT de dois polos pode ser vista na Figura 15. Assim, o estator de um motor de indução trifásico de dois polos contém três enrolamentos idênticos balanceados, ou seja,  $120^\circ$  espacialmente deslocados, alimentados por uma fonte trifásica balanceada.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Nos motores de indução trifásicos, um fluxo magnético distribuído senoidalmente no espaço é gerado no entreferro através das correntes elétricas (com determinada frequência em Hertz) que circulam nos enrolamentos distribuídos do estator. Com isso, o vetor espacial resultante de magnitude constante gira com uma velocidade angular síncrona  $\omega_s$  (rad/s). O fluxo magnético rotatório no entreferro induz nos condutores do rotor uma força eletromotriz (*fem*) e, portanto, correntes elétricas passam a circular nesses condutores. Dessa forma, o motor de indução pode ser comparado a um transformador trifásico, em que os três enrolamentos primários estão situados no estator (estáticos) e os três enrolamentos secundários equivalentes estão localizados no rotor (rotativos). Na Figura 16 tem-se o circuito equivalente de uma máquina de indução (FITZGERALD; KINGSLEY JR; UMANS 2006).

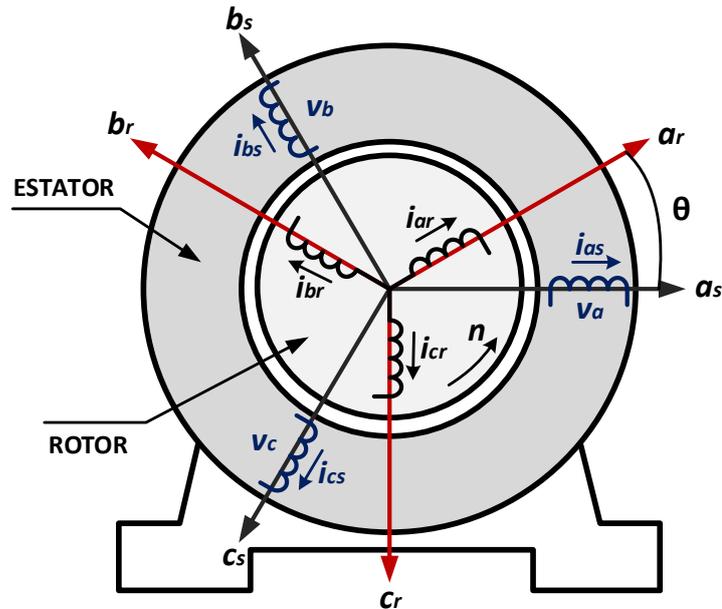
Figura 16 - Circuito equivalente de máquinas de indução



Fonte: Elaborada pelo autor.

Os enrolamentos do estator são estruturados para que se tenha um deslocamento angular espacial de  $120^\circ$  entre eles. O rotor do tipo gaiola de esquilo (mais usado) é formado por barras condutoras paralelas, inseridas em ranhuras do núcleo laminado e com as extremidades curto-circuitadas por anéis condutores. Um fluxo magnético é produzido pelas correntes que circulam pelo rotor e através da interação entre esse fluxo magnético no entreferro e a força magnetomotriz (*fmm*) do rotor é produzido o torque. Conforme a Lei de Lenz, esse torque faz o rotor girar com uma velocidade mecânica  $n$  (rpm) no mesmo sentido do fluxo girante no entreferro (BOSE, 2002; FITZGERALD; KINGSLEY JR; UMANS 2006). A Figura 17 destaca o sistema trifásico dos enrolamentos do estator e do rotor de um motor de indução.

Figura 17 - Sistema trifásico dos enrolamentos do estator e do rotor de um motor de indução



Fonte: Elaborada pelo autor.

O termo usado para definir o movimento relativo entre a velocidade síncrona do fluxo e a velocidade do rotor é escorregamento. É comumente expresso por um valor fracionário representado por  $s$  e calculado conforme a equação (3.4):

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (3.4)$$

Onde:

$s$  = escorregamento;

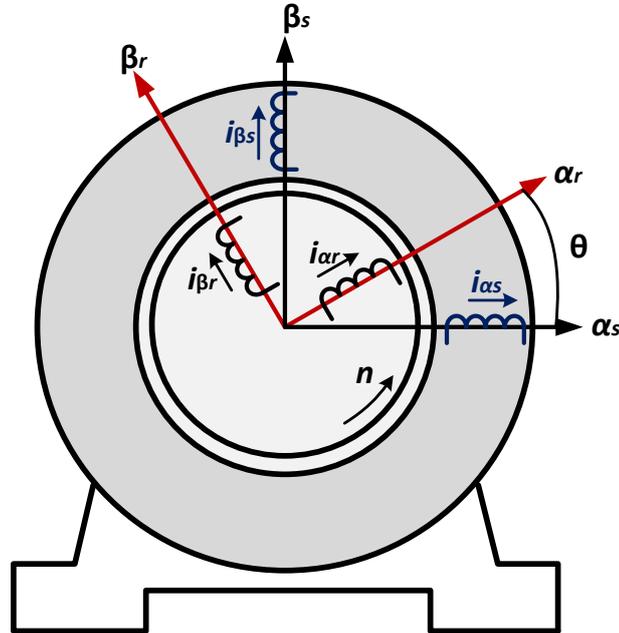
$n_s$  = velocidade síncrona do fluxo (rpm);

$n$  = velocidade mecânica do rotor (rpm).

É preciso que se tenha o escorregamento em um motor de indução para que ocorra a indução, visto que a amplitude da força eletromotriz ( $fem$ ) induzida nos condutores do rotor é proporcional ao escorregamento. O sistema trifásico dos enrolamentos do estator e do rotor de um motor de indução trifásico pode ser transformado em um sistema bifásico  $\alpha\beta$  estacionário mediante a transformada de Clarke. Assim, se tem dois enrolamentos no estator dispostos perpendicularmente de acordo com o sistema de coordenadas formado por um eixo direto  $\alpha_s$  e um eixo em quadratura  $\beta_s$ . No rotor também se tem dois enrolamentos, dispostos

perpendicularmente conforme o sistema de coordenadas estabelecido pelos eixos direto  $\alpha_r$  e em quadratura  $\beta_r$ . Essa representação é mostrada na Figura 18.

Figura 18 - Sistema bifásico  $\alpha\beta$  equivalente dos enrolamentos do estator e do rotor



Fonte: Elaborada pelo autor.

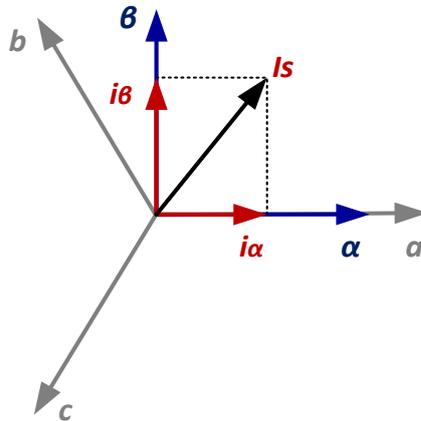
Contudo, nesse sistema ainda permanece o impasse das indutâncias variantes no tempo. Com a transformação matemática proposta por Park (1929) é factível projetar um vetor espacial de uma determinada grandeza elétrica em um referencial girante (eixos  $dq$ ) com velocidade angular estabelecida a partir do sistema trifásico (eixos  $abc$ ) ou do referencial estacionário  $\alpha\beta$ . Logo, com a transformada de Park é possível referenciar as variáveis do estator a um sistema referencial de coordenadas, que gira sincronizado com a velocidade do rotor, e descartar as indutâncias mútuas variantes no tempo das equações que estabelecem o modelo do motor de indução (BOSE, 2002).

O modo matricial da transformação matemática de Clarke é determinado conforme a equação (3.5):

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha}(t) \\ i_{\beta}(t) \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \\ i_c(t) \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

A representação do vetor espacial da corrente do estator  $I_s$  no sistema de coordenadas  $\alpha\beta$  está mostrada na Figura 19.

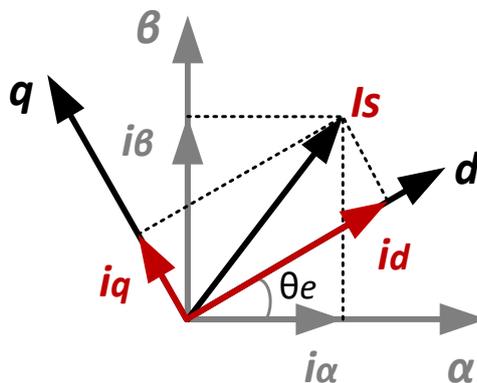
Figura 19 - Vetor espacial da corrente do estator no referencial estacionário  $\alpha\beta$



Fonte: Elaborada pelo autor.

A fundamentação teórica de Park (1929) foi adotada inicialmente em motores síncronos, porém, também é totalmente apropriada para os motores de indução. Essa é uma transformação matemática que possibilita converter o sistema referencial estacionário  $\alpha\beta$  em um sistema referencial dinâmico  $dq$ , como ilustrado na Figura 20.

Figura 20 - Vetor espacial da corrente do estator no referencial dinâmico  $dq$



Fonte: Elaborada pelo autor.

A transformada de Park é descrita na forma algébrica a partir das equações (3.6) e (3.7).

$$i_d(t) = i_\alpha(t)\cos\theta_e + i_\beta\text{sen}\theta_e \quad (3.6)$$

e

$$i_q(t) = -i_\alpha(t)\text{sen}\theta_e + i_\beta\text{cos}\theta_e \quad (3.7)$$

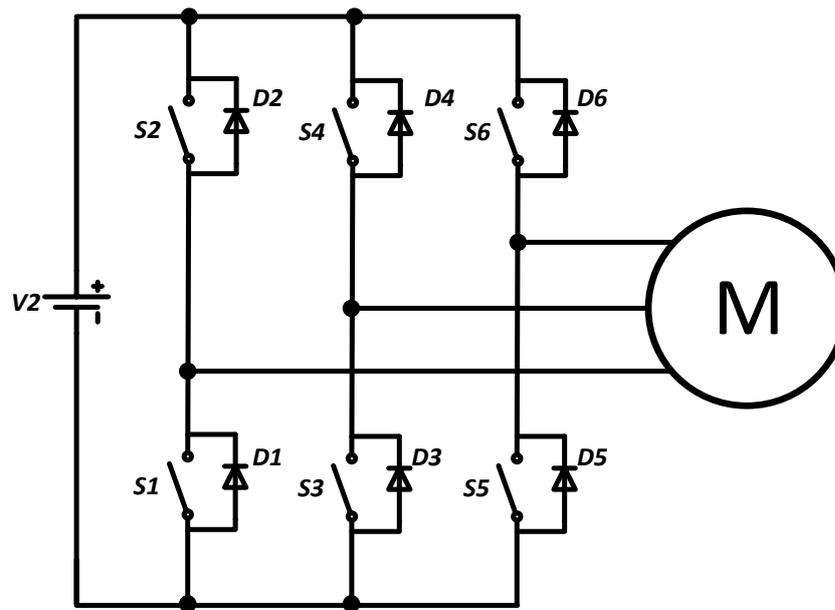
Um dos concorrentes para o motor de indução em sistemas de propulsão é o motor de ímã permanente. Os motores de ímã permanente têm ímãs no rotor, enquanto a construção do estator é a mesma do motor de indução. O uso de ímãs de alta densidade em motores de ímã permanente fornece alta densidade de potência, mas o custo de ímãs está no lado negativo para esses motores. Para aplicações em veículos elétricos, o tamanho do motor é relativamente grande em comparação com as outras aplicações de menor potência dos motores de ímã permanente, o que amplifica o problema de custo (EHSANI *et al.*, 2010; HUSAIN, 2003).

O motor de relutância variável (*Switched Reluctance Motor - SRM*) também é potencialmente viável para aplicações em veículos elétricos. Esse motor tem excelentes características de tolerância a falhas, e sua construção é extremamente simples. Os motores de relutância variável não possuem enrolamentos, ímãs ou gaiolas no rotor, o que ajuda a aumentar seu torque e a capacidade de inércia. As características de torque-velocidade do motor são excelentes em operação, com alto desempenho e robustez nas aplicações em VEs. Dois problemas associados aos motores de relutância variável são ruído acústico e oscilação de torque (DENTON, 2018; EHSANI *et al.*, 2010; HUSAIN, 2003).

### 3.2.2 Conversores

Os conversores de potência são uma peça fundamental nos sistemas de propulsão elétrica. Esses são responsáveis por transferir a potência da fonte de energia até o motor. Como, nos veículos elétricos, se pretende passar uma energia baseada em corrente contínua para corrente alternada, a topologia adequada para essa função é uma topologia CC-CA, ou seja, uma topologia inversora conforme mostra a Figura 21 (SOYLU, 2011). O avanço desse tipo de equipamento tem ocorrido em consequência do desenvolvimento e produção em grande escala dos dispositivos semicondutores de potência (BOSE, 2002; ERICSON; MAKSIMOVIC, 2000). Em constante evolução, eles vêm ficando menores, mais leves e com melhores desempenhos estáticos e dinâmicos.

Figura 21 - Circuito de um inversor trifásico



Fonte: Elaborada pelo autor.

A topologia alimentada por uma fonte de tensão com ponte trifásica controlada é a topologia mais clássica de inversor para acionar motores em corrente alternada (*Voltage Source Inverter – VSI*). Com esse tipo de inversor é possível fazer a modulação da tensão em amplitude e em frequência, fatores essenciais para o controle da velocidade e operação do motor em uma região em que não haja saturação do circuito magnético. O inversor também deve estar habilitado para fornecer a corrente necessária para produzir o torque mecânico que varia constantemente em uma aplicação de propulsão (BOSE, 2002; ERICSON; MAKSIMOVIC, 2000).

O processo de chaveamento do inversor responsável por fornecer o resultado esperado de tensão na sua saída é denominado modulação. Existem diversas técnicas de modulação e normalmente essas variam conforme o objetivo que se quer atingir e com as variáveis indesejadas que se pretende minimizar, como perdas, distorção harmônica, etc.

Os inversores de frequência com controle PWM (*Pulse Width Modulation*) são os equipamentos mais utilizados para o acionamento de motores de indução nas aplicações que demandam velocidade variável. Eles são a interface entre o motor de indução e a fonte de energia (TRZYNADLOWSKI, 2001). A rotação de um motor de indução está diretamente relacionada com a frequência de alimentação, o número de polos e o escorregamento. Essa relação é dada pela equação (3.8):

$$n = \frac{120 \cdot f}{p} \cdot (1 - s) \quad (3.8)$$

Onde:

$n$  = velocidade mecânica do rotor (rpm);

$f$  = frequência da tensão de alimentação (Hz);

$p$  = números de polos;

$s$  = escorregamento.

Para alterar a velocidade de um motor de indução, é perceptível, através da equação (3.8), que se pode promover modificações em três parâmetros: frequência, número de polos e escorregamento. Os inversores de frequência apresentam o método mais eficaz para o controle de velocidade dos motores de indução. Os mesmos convertem a tensão de entrada, de frequência e amplitude constantes, em uma tensão de frequência e amplitude controláveis na saída. Assim, alterando-se a frequência da tensão de entrada, altera-se também a velocidade do campo magnético girante e, portanto, a velocidade mecânica do eixo do motor (WEG, 2016b). O torque  $M$  (N.m) produzido pelo motor de indução pode ser expresso pela equação (3.9):

$$M = k_1 \cdot \phi_m \cdot I_2 \quad (3.9)$$

Desprezando a queda de tensão causada pela resistência e pela reatância dos enrolamentos do estator tem-se o fluxo magnetizante  $\phi_m$  (Wb) dado por (3.10):

$$\phi_m = k_2 \cdot \frac{V}{f} \quad (3.10)$$

Onde:

$I_2$  = corrente no rotor (A);

$V$  = tensão no estator (V);

$f$  = frequência da tensão de alimentação (Hz);

$k_1$  e  $k_2$  = constantes (dependem do projeto da máquina e do material).

Para uma carga constante, a corrente é praticamente constante. Dessa forma, através das equações (3.9) e (3.10) é possível verificar que, variando proporcionalmente a frequência e amplitude da tensão de entrada, o fluxo magnético permanece constante e, portanto, o torque também. Assim, o motor propicia um contínuo ajuste de velocidade e torque levando em conta a carga mecânica. Ainda, conservando-se constante o escorregamento do motor em qualquer velocidade, para a mesma carga, as perdas podem ser reduzidas (WEG, 2016b).

### ***3.2.3 Sistemas eletrônicos embarcados***

O uso crescente da eletrônica em veículos tem melhorado significativamente o desempenho, a confiabilidade e o conforto (KIENCKE; NIELSEN, 2005). Um sistema eletrônico embarcado é um sistema com hardware e software projetado para executar uma ou mais funções específicas, normalmente oferecendo resposta em tempo real, devendo ser flexível e capaz de controlar diversas necessidades dos condutores de veículos (CROLLA, 2009; HEATH, 2003; NAVET; SIMONOT-LION, 2008).

#### ***3.2.3.1 Unidade de comando eletrônico***

Unidades de Comando Eletrônico (UCEs) são dispositivos ou módulos eletrônicos que assumem os processos de controle e regulação de funções automatizadas em veículos. Ou seja, uma UCE é qualquer módulo embarcado na eletrônica automotiva que controla um ou mais sistemas (ou subsistemas) elétricos de um veículo. O desenvolvimento de uma UCE envolve hardware e software necessários para executar as funções esperadas daquele módulo específico. Dessa forma, uma UCE engloba um microcontrolador com periféricos associados mais software correspondente. Para o software, cada microcontrolador requer sua própria configuração conforme cada UCE (BOSCH, 2005).

A UCE tem grande atuação na operação do veículo. Ela é responsável por monitorar todos os aspectos da operação de um sistema de propulsão e fazer ajustes com base em sinais de entrada. As informações são enviadas para a UCE a partir de sensores (sinais analógicos ou digitais) localizados em todo o sistema. O modo como os componentes estão integrados em um sistema eletroeletrônico veicular, especialmente as UCEs, caracteriza-se como um dos requisitos principais na definição e organização da arquitetura do sistema. Essencialmente, existem dois tipos de arquitetura: a centralizada e a distribuída. Em uma arquitetura centralizada, somente uma UCE assume a responsabilidade de controlar uma série de funcionalidades do veículo. Já a arquitetura distribuída, proporciona uma distribuição das

funções, em que se pode ter várias UCEs interconectadas através de um barramento de comunicação. Esse barramento usa um protocolo de comunicação de dados próprio para a utilização veicular (BOSCH, 2005; NAVET; SIMONOT-LION, 2008).

Os barramentos seriais de dados são essenciais para as arquiteturas eletroeletrônicas dos veículos atuais. Esses mecanismos de comunicação possibilitam a interação entre as UCEs, com a finalidade de tornar factível o correto funcionamento de todos os componentes integrados, além de permitir a conexão com equipamentos externos de diagnóstico do veículo. Assim, as UCEs de um veículo devem estar interconectadas por meio de um barramento de comunicação de dados para realizar suas funções, através de um intenso intercâmbio de dados e informações dentro da arquitetura (BOSCH, 2005; NAVET; SIMONOT-LION, 2008).

### 3.2.3.2 Interfaces de comunicação

Os diferentes requisitos de desempenho em um veículo, bem como a concorrência entre as empresas da indústria automotiva, levaram ao desenvolvimento de um grande número de redes de comunicação (NAVET; SIMONOT-LION, 2008). Em um veículo podem haver várias tecnologias de barramentos de dados interligadas. Diversos aspectos podem ser analisados na classificação dos barramentos de comunicação veicular: funcionalidade, tecnologia de transmissão, capacidade de transferência de informação, topologia, facilidade de integração e manutenção. Muitas tecnologias usam comunicação serial para transmissão de dados, incluindo as interfaces RS-232 (*Recommended Standard-232*) e RS-485 (*Recommended Standard-485*). Os bits de dados em uma interface serial são transmitidos em sequência através do barramento.

As normas de especificação dos padrões RS-232 e RS-485, porém, não determinam o formato nem a sequência de caracteres para a transferência de dados. Assim, além da interface, é preciso também conhecer o protocolo adotado para comunicação de dados (WEG, 2014). Para a troca de informações via barramento de comunicação, há vários protocolos padronizados. Dentre os diversos protocolos existentes, dois muito utilizados são o Modbus e o CAN.

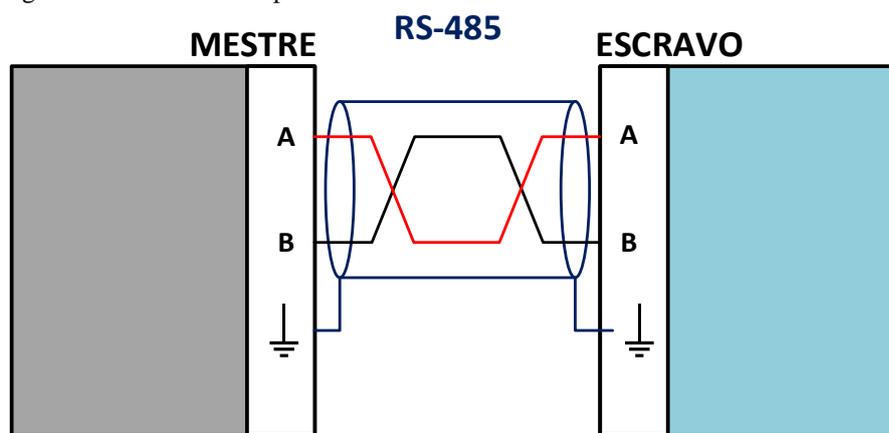
O Modbus é um protocolo aberto elaborado pela Modicon em 1979 e empregado para comunicação entre dispositivos de acordo com o princípio mestre-escravo. A Modicon foi depois obtida pela *Schneider Electric* e os direitos acerca do protocolo foram disponibilizados pela Organização Modbus.

Em razão da sua simplicidade e facilidade de implementação, o Modbus é um dos protocolos mais empregados em automação industrial, podendo ser aplicado em alguns padrões

de meio físico, como: RS-232, RS-485 e Ethernet TCP/IP (MODBUS TCP). Vale destacar que a dimensão da rede, a velocidade de comunicação e o número máximo de dispositivos conectados mudam em cada um desses padrões.

O padrão RS-485 é um dos padrões mais aplicados pelo protocolo Modbus. Com esse padrão é possível atuar com taxas de transmissão de dados que podem atingir 12 Mbps. Ainda é possível destacar que: o comprimento máximo do barramento é de 1200 m; a velocidade de transmissão deve diminuir à medida que se aumenta o comprimento do barramento; o limite de dispositivos conectados no barramento é de 32. A Figura 22 mostra a estrutura RS-485 para o protocolo Modbus.

Figura 22 - Modbus com padrão RS-485



Fonte: Elaborada pelo autor.

O protocolo Modbus tem dois modos de transmissão estabelecidos: ASCII (*American Standard Code for Information Interchange*) e RTU (*Remote Terminal Unit*). Esses modos estabelecem a maneira como os bytes da mensagem são transmitidos. Não é possível usar os dois modos de transmissão de dados no mesmo barramento (MODBUS, 2006; WEG, 2014). Existem equipamentos que permitem a seleção do modo de transmissão, porém, outros têm modo de transmissão fixo. Alguns inversores de frequência e CLPs, por exemplo, usam o modo RTU como padrão.

No modo RTU, cada byte (8 bits) da mensagem é enviado através de dois caracteres no padrão hexadecimal, ou seja, uma palavra. A transmissão de cada mensagem deve ser feita em uma sequência constante de palavras conforme a estrutura destacada no Quadro 4. Esse modo RTU tem como vantagem importante a sua densidade maior de caracteres que possibilita um processamento de dados mais eficiente para a mesma velocidade de transmissão (*baud rate*) comparado com o modo ASCII (MODBUS, 2006).

Quadro 4 - Mensagem no modo RTU

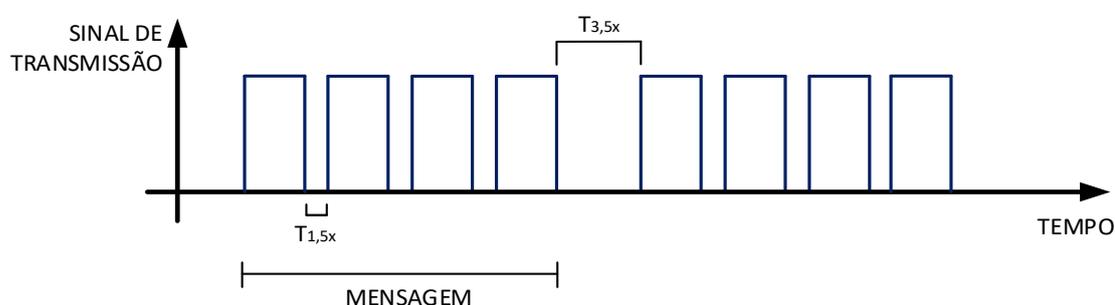
ENDEREÇO	CÓDIGO DA FUNÇÃO	CAMPO DE DADOS	CRC
8 BITS	8 BITS	N x 8 BITS	16 BITS

Fonte: MODBUS (2006). Adaptado.

Não há um caractere exclusivo que sinalize quando uma mensagem começa ou termina no modo RTU. As mensagens são separadas por intervalos de tempo onde a falta de transmissão de dados no barramento de pelo menos 3,5 vezes (3,5x) o tempo de transmissão de um byte de dados indica o início ou o fim de uma mensagem. Dessa forma, se uma mensagem iniciar depois desse tempo mínimo transcorrido, os dispositivos do barramento irão considerar o primeiro caractere recebido como o início de uma nova mensagem. Do mesmo modo, quando esse tempo transcorrer outra vez, depois de recebidos os bytes da mensagem, os dispositivos do barramento irão assumir que a mensagem chegou ao fim (MODBUS, 2006; WEG, 2014). O sinal de transmissão característico pode ser visto na Figura 23.

Se, no decorrer da transmissão de uma mensagem, o tempo entre os bytes for maior que 1,5 vezes (1,5x) o tempo de transmissão de um byte de dados, a mensagem será declarada incompleta e deverá ser descartada pelo destinatário. No modo RTU, a verificação de erros de transmissão de dados é baseada no método CRC (*Cyclical Redundancy Checking*), formado por dois bytes (16 Bits) (MODBUS, 2006).

Figura 23 - Sinal de transmissão no modo RTU



Fonte: MODBUS (2006). Adaptado.

No âmbito automotivo, o barramento mais utilizado é o CAN (*Controller Area Network*). Esse foi desenvolvido pela empresa alemã Robert BOSCH GmbH e disponibilizado no fim dos anos 80. Sua aplicação inicial foi na indústria automobilística, em ônibus e caminhões, com o objetivo de simplificar os sistemas complexos de fios em veículos, além de

permitir compartilhamento de sensores entre as UCEs (NAVET; SIMONOT-LION, 2008). Atualmente, o barramento CAN também é utilizado na indústria, em navios, tratores, etc.

O CAN é um barramento de comunicação serial de dados definido pela Organização Internacional de Padronização (*International Standardization Organization* - ISO). Seus fundamentos são especificados por duas normas: a ISO 11519-2 e a ISO11898. A ISO 11519-2 determina as características de uma rede com taxa de transmissão de dados de 10 Kbps a 125 Kbps (CAN de baixa velocidade) com um identificador padrão de 11 bits. Já a ISO 11898 determina as características de uma rede com taxa de transmissão de dados de 125 Kbps a 1 Mbps (CAN de alta velocidade) com identificadores de 11 ou 29 bits. Esses padrões definem as duas camadas inferiores (1 e 2) como a camada física e a camada de dados, em conformidade com o modelo de *Open Systems Interconnection* (OSI) de 7 camadas estabelecido na ISO7498-1. As demais camadas (3 a 7) são especificadas por outros padrões, cada qual relacionado a uma aplicação específica (CORRIGAN, 2002; GUIMARÃES, 2007; ISO, 2003; RICHARDS, 2002).

O sincronismo entre os dispositivos interconectados em um barramento CAN é executado no início de cada mensagem direcionada ao barramento em intervalos de tempo conhecidos e regulares (GUIMARÃES, 2007). Dessa maneira, o CAN funciona como um sistema de transmissão de mensagens multimestre que especifica uma taxa máxima de transmissão de 1 Mbps (barramento de até 40 metros). Logo, todos os dispositivos interconectados através dessa estrutura linear de barramento têm o mesmo nível de prioridade. As mensagens são enviadas em regime *multicast*, que se caracteriza pelo envio de toda e qualquer mensagem para todos os dispositivos existentes no barramento (BOSCH, 2005; CORRIGAN, 2002; GUIMARÃES, 2007). Vale salientar que a velocidade de transmissão dos dados é inversamente proporcional ao comprimento do barramento (CORRIGAN, 2002; GUIMARÃES, 2007). O protocolo usa o método de representação de sinais binários *Non Return to Zero* (NRZ), em que cada bit é transmitido por um valor de tensão específico e constante (ISO, 2003; NAVET; SIMONOT-LION, 2008).

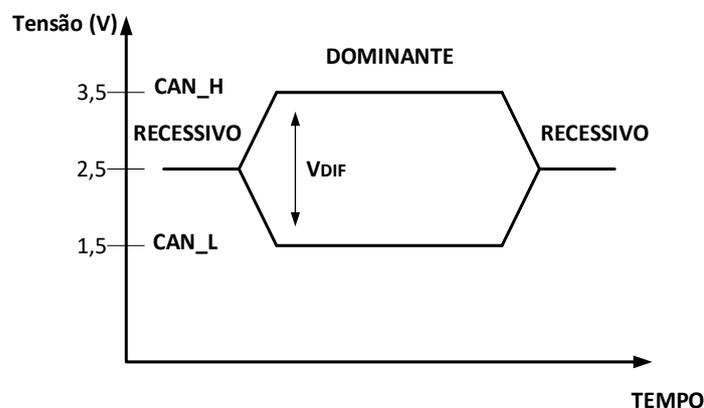
Ainda, de acordo com Guimarães (2007), o CAN é embasado no conceito CSMA/CD com NDA (*Carrier Sense Multiple Access/ Collision Detection with Non-Destructive Arbitration*), ou seja, todos os dispositivos verificam o estado do barramento, analisando se outro dispositivo está ou não enviando mensagens com maior prioridade. Ainda conforme o autor, caso isso seja identificado, o dispositivo cuja mensagem tiver menor prioridade interromperá sua transmissão e o de maior prioridade seguirá enviando sua mensagem a partir desse ponto, sem a necessidade de reiniciá-la.

Há três formas de se instalar um meio físico para o barramento CAN, considerando-se fios elétricos como o meio de transmissão dos dados. Portanto, existem redes com 1, 2 e 4 fios. As redes com 2 e 4 fios utilizam os sinais de dados CAN\_H (CAN *High*) e CAN\_L (CAN *Low*). No caso específico dos barramentos com 4 fios, além dos sinais de dados, fazem parte um fio com a alimentação (Vcc) e outro com o aterramento (GND), levando a alimentação para as duas terminações ativas da rede. Nos barramentos CAN com um único fio, os dados são transmitidos por essa única via, chamada linha CAN (GUIMARÃES, 2007).

Atualmente, a maioria das aplicações com o CAN utiliza um barramento diferencial a 2 fios trançados. Os dados transferidos por meio do barramento são compreendidos mediante a análise da diferença de potencial entre os fios CAN\_H e CAN\_L. Esse formato, classificado como par trançado diferencial, diminui consideravelmente os efeitos causados por interferências eletromagnéticas, no qual as entradas CAN diferenciais cancelam o ruído de forma efetiva, garantindo a robustez do barramento. No final, o que vale para os dispositivos que recebem as mensagens é a diferença de potencial entre os fios CAN\_H e CAN\_L. Assim, a comunicação não é afetada (GUIMARÃES, 2007; NAVET; SIMONOT-LION, 2008; RICHARDS, 2002).

No CAN são especificados dois estados lógicos: recessivo e dominante. Esses são criados em função da condição presente nos fios CAN\_H e CAN\_L (RICHARDS, 2002). Assim, é definida uma tensão diferencial para representar estados recessivos e dominantes, conforme mostrado na Figura 24.

Figura 24 - Níveis de tensão em uma rede CAN



Fonte: RICHARDS (2002). Adaptado.

O protocolo CAN de alta velocidade suporta dois formatos de mensagens:

- CAN 2.0A (*Standard CAN*) – o comprimento do identificador é de 11 bits. Sob este formato podem ser identificadas 2.048 ( $2^{11}$ ) mensagens diferentes na rede estabelecida. Em determinadas aplicações isso pode caracterizar uma limitação (BOSCH, 2005; CORRIGAN, 2002; GUIMARÃES, 2007).
- CAN 2.0B (*Extended CAN*) – o comprimento do identificador é de 29 bits. Isto permite 537 milhões ( $2^{29}$ ) de identificadores de mensagens em uma rede estabelecida sob este formato. O identificador de 29 bits é composto do identificador básico de 11 bits e o identificador estendido de 18 bits. Esses 18 bits adicionais aumentam o tempo de transmissão de cada mensagem, porém, isso pode caracterizar um problema em determinadas aplicações que trabalhem em tempo real (BOSCH, 2005; CORRIGAN, 2002; GUIMARÃES, 2007).

Dependendo da aplicação, um sistema de barramento de dados CAN poderá ter vários dispositivos conectados. Também é possível ter, em um mesmo sistema, duas ou mais sub-redes transmitindo dados em velocidades diferentes. Nesse caso, há dispositivos que atuam nas duas sub-redes, garantindo a transferência de dados de uma sub-rede para a outra (BOSCH, 2005; GUIMARÃES, 2007; NAVET; SIMONOT-LION, 2008).

A especificação da interface de nível físico da rede CAN requer resistores de terminação de  $120\ \Omega$  (nominal) em cada extremidade do barramento. Esses resistores servem para evitar reflexões de sinal, garantindo, assim, o desempenho correto da rede CAN (CORRIGAN, 2002; RICHARDS, 2002).

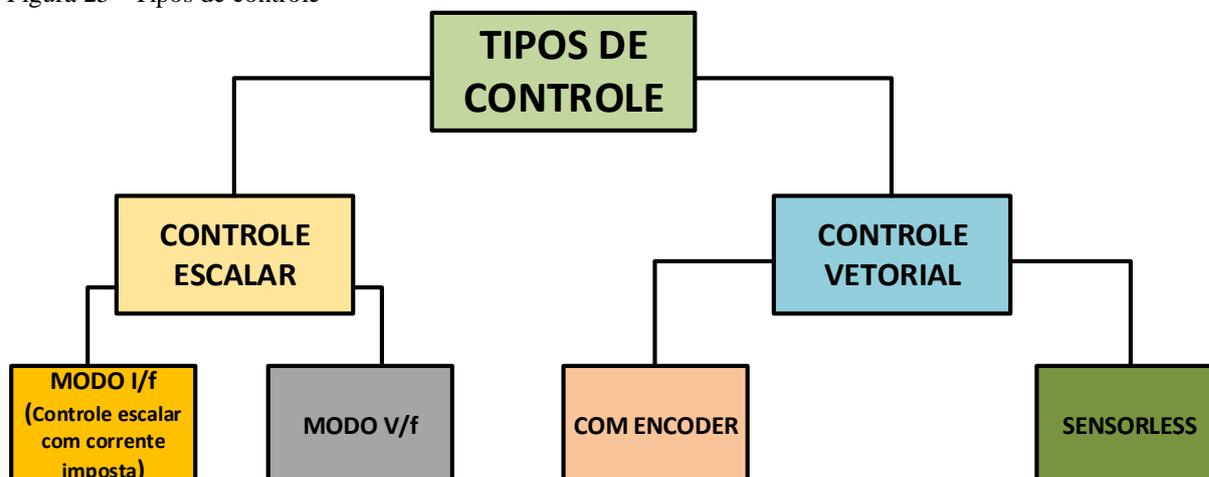
### **3.3 Técnicas de controle para inversores**

Há, essencialmente, dois métodos de controle empregados nos inversores de frequência que possibilitam variar a velocidade de motores elétricos de indução: o escalar e o vetorial (Figura 25). O acionamento através de inversores de frequência já é amplamente utilizado, apesar de ser uma solução relativamente nova (SOYLU, 2011; TRZYNADLOWSKI, 2001). Em sequência são apresentados os fundamentos conceituais dos dois métodos de controle e suas características principais.

As diferenças básicas entre os dois métodos de controle são que o escalar controla apenas as amplitudes das grandezas elétricas instantâneas referenciadas no estator (tensões, correntes e fluxos magnéticos), onde suas equações são fundamentadas no circuito equivalente do motor (regime permanente); já no vetorial as grandezas elétricas instantâneas são

representadas por vetores espaciais, fundamentando-se nas equações espaciais dinâmicas do motor, com as grandezas referenciadas em um determinado fluxo magnético, sendo possível o controle independente do fluxo e do torque (BOSE, 2002; SOYLU, 2011; TRZYNADLOWSKI, 2001; WEG, 2016b).

Figura 25 - Tipos de controle

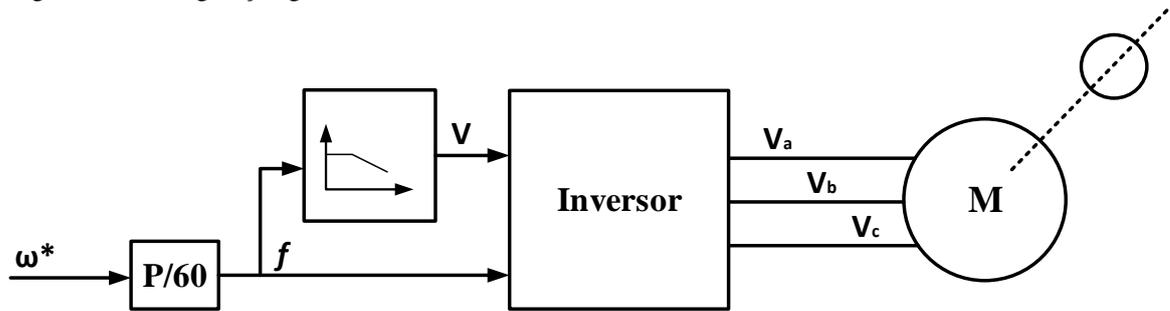


Fonte: Elaborada pelo autor.

### 3.3.1 O controle escalar

O controle escalar é baseado na imposição de uma determinada tensão/frequência no motor, com o objetivo de manter a relação  $V/f$  constante, e conseqüentemente manter o motor trabalhando com um fluxo magnético constante. O mesmo é aplicado em malha aberta, onde a precisão da velocidade depende do escorregamento do motor (que varia de acordo com a carga) visto que a frequência é imposta no estator. Assim, esse tipo de controle é adotado quando não se faz necessário respostas rápidas no controle de velocidade e torque. Para uma melhor performance do motor em velocidades baixas, mantendo a capacidade de torque, alguns inversores têm funções especiais como o *boost* de tensão e a compensação de escorregamento. Devido a sua simplicidade o controle escalar é geralmente utilizado em aplicações de baixo custo e baixo desempenho, onde a maior parte dessas aplicações não demanda grande precisão e/ou rapidez no controle da velocidade (BOSE, 2002; WEG, 2016b). Vale ressaltar que, o seu uso não é indicado para aplicação em tração elétrica veicular, na qual a sua utilização fica restrita aos testes iniciais de desenvolvimento do veículo ou manutenção (WEG, 2016a). A Figura 26 mostra um diagrama com o esquema desse tipo de controle em malha aberta. Neste caso, não há realimentação de variável.

Figura 26 - Configuração geral do controle escalar



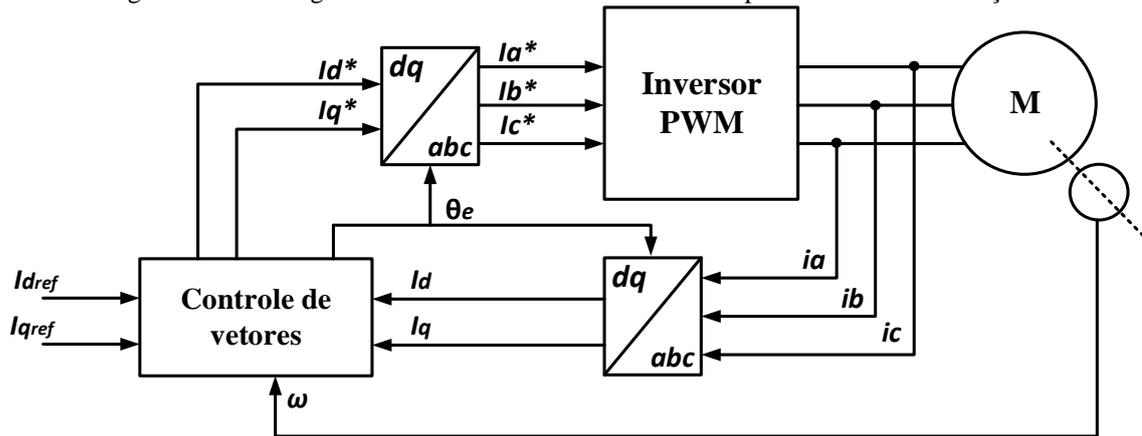
Fonte: Elaborada pelo autor.

No controle escalar, vale destacar também o denominado modo  $I/f$ , que é um controle com corrente imposta. Ou seja, esse controle escalar com imposição de corrente consiste em um controle de corrente atuando com valor de referência constante, de forma ajustada. Nesse caso, não há controle de velocidade, somente controle de frequência em malha aberta (WEG, 2016a).

### 3.3.2 O controle vetorial

O controle vetorial permite alcançar um alto nível de precisão e robustez no controle da velocidade e do torque do motor (WEG, 2016b). É definido através de um sistema referencial  $dq$  síncrono (eixo direto  $d$  e eixo em quadratura  $q$ ) a partir do modelo dinâmico do motor de indução. Dessa maneira, o controle possibilita a decomposição da corrente do motor em duas componentes vetoriais: uma correspondente ao fluxo magnético de referência e outra correspondente ao torque, controlando o fluxo e o torque de forma independente. Assim, a concepção do controle vetorial é fundamentada em transformações matemáticas (transformadas de Clarke e Park) das grandezas físicas existentes no motor (tensões, correntes e fluxos magnéticos) (BOSE, 2002). É possível executar esse método de controle tanto em malha aberta (*sensorless*) quanto em malha fechada (com *encoder*). A Figura 27 expõe o diagrama de um sistema onde um inversor é utilizado com controle vetorial em malha fechada (com *encoder*) para acionar um motor de indução trifásico.

Figura 27 - Diagrama de blocos geral de um sistema de controle vetorial para um motor de indução trifásico



Fonte: Elaborada pelo autor.

As três correntes do motor de indução trifásico são medidas ( $i_a$ ,  $i_b$  e  $i_c$ ) e, usando o sistema referencial  $dq$  síncrono girando na velocidade síncrona ( $\omega_s$ ), seus valores são decompostos em duas componentes vetoriais de corrente, uma relativa ao eixo direto ( $i_d$ ) e a outra relativa ao eixo em quadratura ( $i_q$ ). Nos motores de indução trifásicos, o vetor espacial que representa a corrente do estator é determinado através da soma vetorial das correntes instantâneas nos enrolamentos do motor, com defasagem de  $120^\circ$ . O vetor corrente espacial pode ser representado como (3.11):

$$i_s = k(i_a + ai_b + a^2i_c) \quad (3.11)$$

onde  $k$  é a constante de transformação igual a  $2/3$  (proveniente da decomposição dos três enrolamentos em dois);  $i_a$ ,  $i_b$  e  $i_c$  são as correntes instantâneas por fase e  $a$  é o operador espacial definido por (3.12):

$$a = e^{j\frac{2\pi}{3}} \quad (3.12)$$

A transformação (facultada pela transformada de Park) pode ser escrita na forma matricial como mostra a equação (3.13):

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta_e) & \cos(\theta_e - 120^\circ) & \cos(\theta_e + 120^\circ) \\ -\sin(\theta_e) & -\sin(\theta_e - 120^\circ) & -\sin(\theta_e + 120^\circ) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

O módulo do vetor corrente no estator do motor pode ser expresso como (3.14):

$$i_s = \sqrt{i_d^2 + i_q^2} \quad (3.14)$$

O controle vetorial *sensorless* é mais simples, no entanto, possui limitações de torque, sobretudo em rotações muito baixas (depende da estimação da velocidade do motor). No controle vetorial com *encoder* é necessária a utilização de um sensor de velocidade no motor (um *encoder* incremental, por exemplo). Esse método de controle proporciona maior confiabilidade e robustez no controle da velocidade e do torque, até em rotação zero. Dessa forma, atualmente, motores elétricos para sistemas de propulsão de veículos já são especificamente projetados com um *encoder* incorporado (WEG, 2016a).

### 3.4 Baterias

As baterias são componentes essenciais para o desenvolvimento e inserção de mercado dos veículos elétricos. Essas ainda têm sido utilizadas como a principal fonte de energia em um VE (ANDWARI *et al.*, 2017; YONG *et al.*, 2015). Em um estudo feito pela Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial foi destacado que a crescente difusão do uso desses dispositivos, especialmente na indústria de celulares e notebooks, contribuiu para o desenvolvimento de novas tecnologias que buscam o aumento da densidade energética e maior autonomia (ABDI, 2009). O custo das baterias também é um dos aspectos fundamentais para a viabilização comercial dos VEs.

Impulsionado por novas tecnologias, atualmente, há diversos tipos de baterias com potencial de utilização em veículos elétricos. Para a indústria automobilística, destacam-se os seguintes tipos de baterias (ANDWARI *et al.*, 2017; CASTRO; FERREIRA, 2010; YONG *et al.*, 2015; LAJUNEN *et al.*, 2018):

- Chumbo-ácido (PbA);
- Níquel-cádmio (NiCd)
- Níquel-hidreto metálico (NiMH);
- Sódio (ZEBRA);
- Íon-lítio (Íon-Li);
- Polímero íon-lítio (LiPo);
- Fosfato de ferro e lítio (LiFePO<sub>4</sub>).

Entre esses tipos, as baterias de uso mais promitente, e que já incorporam muitos veículos elétricos, são as de íon-lítio. Outras alternativas tecnológicas para o desenvolvimento de novas baterias vêm sendo estudadas considerando novos materiais ou nanoestruturas (ANDWARI *et al.*, 2017). Assim, em uma perspectiva atual, existem algumas tecnologias de bateria na fase experimental, que oferecem desempenho superior. Essas baterias são (YONG *et al.*, 2015):

- Lítio-enxofre (Li-S);
- Zinco-ar (Zn-ar);
- Lítio-ar (Li-ar).

Em YONG *et al.* (2015) é apresentado um quadro comparativo entre os principais tipos de baterias para veículos elétricos. O Quadro 5 mostra algumas dessas características comparadas.

Quadro 5 – Comparativo entre tipos de baterias aplicadas em veículos elétricos

<b>Tipo</b>	<b>Tensão nominal (V)</b>	<b>Densidade de Energia (Wh/kg)</b>	<b>Potência Específica (W/kg)</b>	<b>Vida útil (ciclos)</b>	<b>Custo de produção (\$/Kwh)</b>
<b>PbA</b>	2,0	35	180	1000	60
<b>NiCd</b>	1,2	50 – 80	200	2000	250 – 300
<b>NiMH</b>	1,2	70 – 95	200 – 300	< 3000	200 – 250
<b>ZEBRA</b>	2,6	- 120	155	> 1200	230 – 345
<b>Lítio: Íon-Li</b>	3,6	118 – 250	200 – 430	2000	150
<b>LiPo</b>	3,7	130 – 225	260 – 450	1200	150
<b>LiFePO<sub>4</sub></b>	3,2	120	2000 – 4500	> 2000	350
<b>Li-S</b>	2,5	350 – 650	-	300	100 – 120
<b>Zn-ar</b>	1,65	460	80 – 140	200	90 – 120
<b>Li-ar</b>	2,9	1300 – 2000	-	100	-

Fonte: YONG *et al.* (2015). Adaptado.

Assim, um dos motivos para o avanço do segmento dos veículos elétricos é a crescente melhoria no desempenho dos dispositivos de fornecimento de energia, em que se destacam as novas baterias (ANDWARI *et al.*, 2017). Portanto, os veículos elétricos têm aliado eficiência à crescente autonomia. Ainda, com a associação de múltiplas fontes de energia elétrica, é possível otimizar o fornecimento de energia em um mesmo veículo elétrico. Desse modo, essa associação consiste no uso de vários componentes de armazenamento de energia,

como baterias, supercapacitores e células combustíveis (DU *et al*, 2019; JIA; QIAO; QU, 2018; LAJUNEN *et al*, 2018).

Nesse cenário, outro ponto importante em projetos observado por Melo (2014) é o nível de tensão do barramento CC das baterias, adotado em veículos elétricos em diferentes níveis de potência. O Quadro 6 traz exemplos de alguns modelos de veículos elétricos e seus respectivos níveis de potência e de tensão no barramento CC. Assim, observa-se que o nível de tensão adotado varia de acordo com o projeto de cada fabricante.

Quadro 6 - Níveis de potência e tensão do barramento CC em modelos de VEs

<b>Fabricante de VE</b>	<b>Modelo VE</b>	<b>Potência (kW)</b>	<b>Barramento cc (V)</b>
<b>BAOYA-EV</b>	BY02-10 kW-1	10	96
<b>Green Wheel EV</b>	GW28-A07P22-01	7,5	72
<b>Mahindra</b>	REVA E2O	19	48
<b>VEZ do Brasil</b>	SEED – GREEN CITY CARS	36,8	96
<b>ITAIPU Binacional e parceiros</b>	VE ITAIPU	15	253
<b>Daher/ UFC</b>	VPE20-BR	11	144
<b>Nissan</b>	Leaf	80	365
<b>Fendt</b>	Fendt e100 Vario	50	650

Fonte: MELO (2014); FENDT (2017).

É evidente a grande retomada que os veículos de propulsão puramente elétrica vêm apresentando no cenário mundial. Já são diversos modelos disponibilizados pela indústria automobilística e novos investidores, bem como muitos os modelos desenvolvidos em pesquisas aplicadas em centros de pesquisas (ANDWARI *et al.*, 2017; YONG *et al.*, 2015). Ao final do presente Capítulo é possível destacar o denso acervo teórico necessário para compreensão e desenvolvimento de um projeto de sistema de propulsão com tecnologia embarcada para um trator elétrico. Dessa forma, foram identificadas características peculiares dos tratores e apresentada toda fundamentação teórica que envolve um sistema de propulsão elétrica, indispensáveis para o avanço do projeto proposto. No Capítulo 4, a seguir, será apresentada a proposta do sistema implementado e analisado.

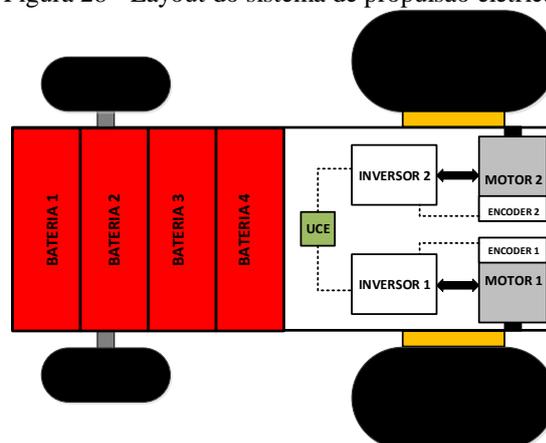
## 4 O SISTEMA DE PROPULSÃO DO TRATOR ELÉTRICO

O presente Capítulo aborda diretamente o objeto de estudo da tese, que é o sistema de propulsão elétrica projetado para o trator elétrico. É inicialmente destacada toda a estrutura do sistema de propulsão proposto para o protótipo do trator elétrico. Em seguida, é abordado o sistema embarcado implementado, ou seja, a UCE. Com isso, são apresentadas as principais funcionalidades de acionamento e controle propostas para flexibilizar o uso do referido veículo e otimizar o seu desempenho.

### 4.1 Proposição do sistema de acionamento e controle

O sistema projetado para o trator elétrico foi desenvolvido com uma estrutura de propulsão distribuída contendo dois motores elétricos de 4,5 kW (tensão e corrente nominal de 34 V e 115 A, respectivamente), cada um dedicado a uma roda motriz do eixo traseiro, necessários para gerar a potência contínua requerida. Essa configuração distribuída proporciona uma grande versatilidade de condução, pois permite ao motorista operar cada roda motriz com torque e velocidade diferentes, conforme também reforçam Ivanov, Savitski e Shyrokau (2015) em seu trabalho sobre veículos elétricos. Como fonte de energia é utilizado um banco de quatro baterias eletroquímicas (cada uma de 12 V, com capacidade de 200 Ah – Anexo B), conectadas em série com saída de 48 V nos terminais, alimentando dois inversores de frequência de aplicação específica em veículos elétricos. A Figura 28 apresenta o layout elétrico do trator. Esse foi baseado na combinação mais adequada, para uma proporção ideal de peso, dos componentes principais: baterias, inversores e motores elétricos.

Figura 28 - Layout do sistema de propulsão elétrica no trator



Fonte: Elaborada pelo autor.

Uma Unidade de Comando Eletrônico (UCE) foi exclusivamente desenvolvida e conectada a dois inversores, responsáveis pelo acionamento dos dois motores de tração, completando o sistema de propulsão elétrica do trator elétrico. Os dados característicos dos motores elétricos e os inversores são apresentados no Quadro 7.

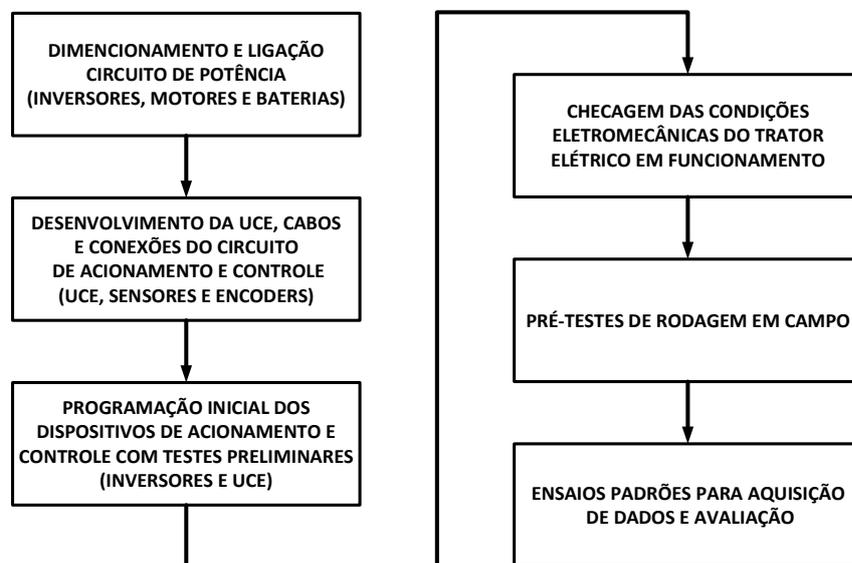
Quadro 7 - Dados característicos dos motores e dos inversores

<b>MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO - ROTOR DE GAIOLA - WEG</b>		<b>INVERSOR DE FREQUÊNCIA CVW300 - WEG</b>	
Potência	4,5 kW	Tensão nominal de entrada	24 -72V <sub>DC</sub>
Corrente nominal	115 A	Corrente nominal	200A
Tensão nominal	34 V	Corrente de saída de pico (2 min)	400A
Rotação nominal	1715 rpm	Tensão de saída	$V_{DC}/\sqrt{2}$
Conjugado nominal	25,1 Nm		
Conjugado máximo	330%		
			

Fonte: Elaborado pelo autor.

Logo, o processo de pesquisa e implementação do sistema de propulsão elétrica, tema central desta tese, se deu na sequência das seguintes etapas mostradas na Figura 29. O Apêndice A contém uma visão geral do protótipo do trator elétrico.

Figura 29 - Etapas de projeto

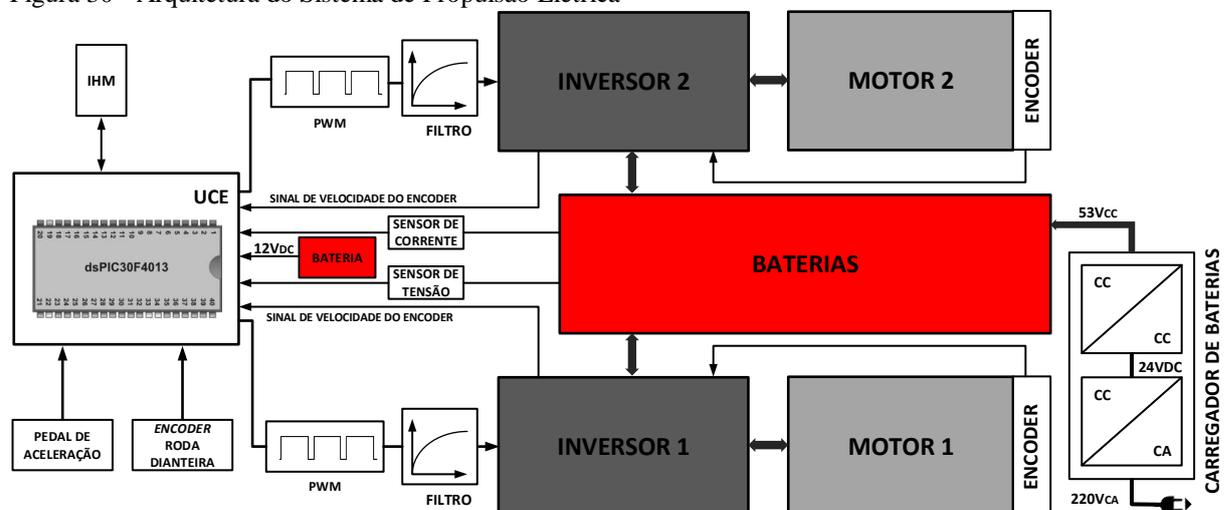


Fonte: Elaborada pelo autor.

Após instalação de todo o sistema de potência do trator elétrico (inversores, motores e baterias) a implementação do protótipo segue com o desenvolvimento da UCE com um controlador de sinal digital, além dos cabos e conexões do circuito de acionamento e controle (UCE, sensores e *encoders*). A partir daí se dá a programação inicial dos dispositivos de acionamento e controle com testes preliminares: inversores e UCE. Para a operação necessária dos inversores de frequência (CVW 300 – Anexo A) é usado o software WLP para completa parametrização. Já para a realização do algoritmo de controle executado pela UCE é utilizado o software MPLAB. Inicialmente, em laboratório, é feita a checagem das condições eletromecânicas do trator elétrico em funcionamento: verificação do sistema de aceleração com ajuste de ganhos e *offsets* dos sinais de controle; avaliação das condições mecânicas da transmissão acoplada aos motores em diferentes níveis de rotação; checagem do funcionamento da IHM integrada a UCE e interruptores de comando (liga/para, sentido de giro e desligamento de emergência). Após o protótipo passar por extensa rotina de ajustes eletromecânicos e melhorias de programação para aprovação de funcionamento em laboratório, foram feitos testes de rodagem em campo. Por fim, são realizados os ensaios padrões para aquisição de dados e avaliação de desempenho tração e consumo de energia.

Para o trator, o sistema de propulsão elétrica projetado é constituído de uma Unidade de Comando Eletrônico (UCE) que contém um microprocessador. Esse faz todo o gerenciamento de comando do trator elétrico. A Figura 30 destaca a arquitetura do sistema de propulsão elétrica proposta.

Figura 30 - Arquitetura do Sistema de Propulsão Elétrica



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Unidade de Comando Eletrônico (UCE) é alimentada por uma bateria auxiliar de 12 V. Nessa unidade há um regulador de tensão de 5 V responsável pela alimentação estável do circuito interno de processamento. A UCE aciona os inversores, fornecendo-lhes sinais PWM de controle, e esses, em seguida, controlam o funcionamento dos motores elétricos para produzir torque e velocidade adequados à operação, de acordo com o comando. Sensores são usados para medição de variáveis mensuráveis como: posição, corrente, tensão, temperatura e velocidade. Esses sinais medidos são condicionados ao nível apropriado (0 – 5 V) antes de serem enviados ao processador. Os sinais PWM\_1 e PWM\_2 de saída do processador são enviados através dos circuitos de interface para as entradas analógicas (AI1) configuradas dos dois inversores (IN1 e IN2).

Para a implementação da UCE, optou-se pela utilização de um dsPIC (*Digital Signal Controller* ou DSC) da Microchip. Esse contém ampla funcionalidade DSP (*Digital Signal Processor*) dentro de uma arquitetura de microcontrolador de 16 bits (MCU) de alto desempenho (MICROCHIP, 2004). Assim, o processador dsPIC30F4013 foi adotado para executar as estratégias de comando aqui expostas. A UCE recebe o sinal do sensor de posição do pedal de aceleração, processa e aciona os inversores. Quando o pedal é pressionado, o sinal elétrico (0 – 5 V) do sensor é utilizado pela UCE (pino 2/AN2 do dsPIC) que, por sua vez, identifica a posição do pedal. Com os dados enviados por outros sensores (sensor de velocidade da roda dianteira – pino 18/RD9; sinal de velocidade dos *encoders* – AO1\_IN1/pino 7 e AO1\_IN2/pino 9) e informações fornecidas pelo operador via IHM (pinos 30 e 33 a 38), a UCE faz algumas correções e gerencia os sinais PWM (pinos 19/RD3 e 22/RD2) para o acionamento dos inversores por meio de suas entradas analógicas AI1\_IN1 e AI1\_IN2. Na Figura 31 podem ser vistos os sensores de posição do pedal de aceleração, de velocidade do trator e corrente das baterias, respectivamente.

No mercado automotivo há diversos tipos de pedais de acelerador especialmente equipados com transdutores elétricos. Para o pedal de aceleração do trator elétrico foi adaptado um pedal com sensor de posição utilizado no veículo Strada da Fiat. Ainda, para medição da velocidade, foi adaptado um *encoder* (360 pulsos) na roda dianteira do trator elétrico. Por fim, um sensor de corrente foi colocado na saída das baterias para mensurar o consumo energético do protótipo. O sistema ainda conta com o sensor de tensão das baterias na UCE e os *encoders* e sensores de temperatura dos motores. Também há no carregador das baterias um sensor de tensão e outro de corrente. Na Figura 32 tem-se o projeto do circuito elétrico implementado com a unidade de comando, utilizando o processador dsPIC30F4013.

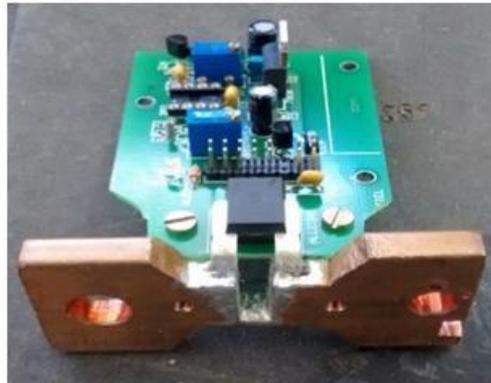
Figura 31 - Sensores utilizados no Trator Elétrico



(a) Pedal do acelerador com sensor eletrônico de posição.



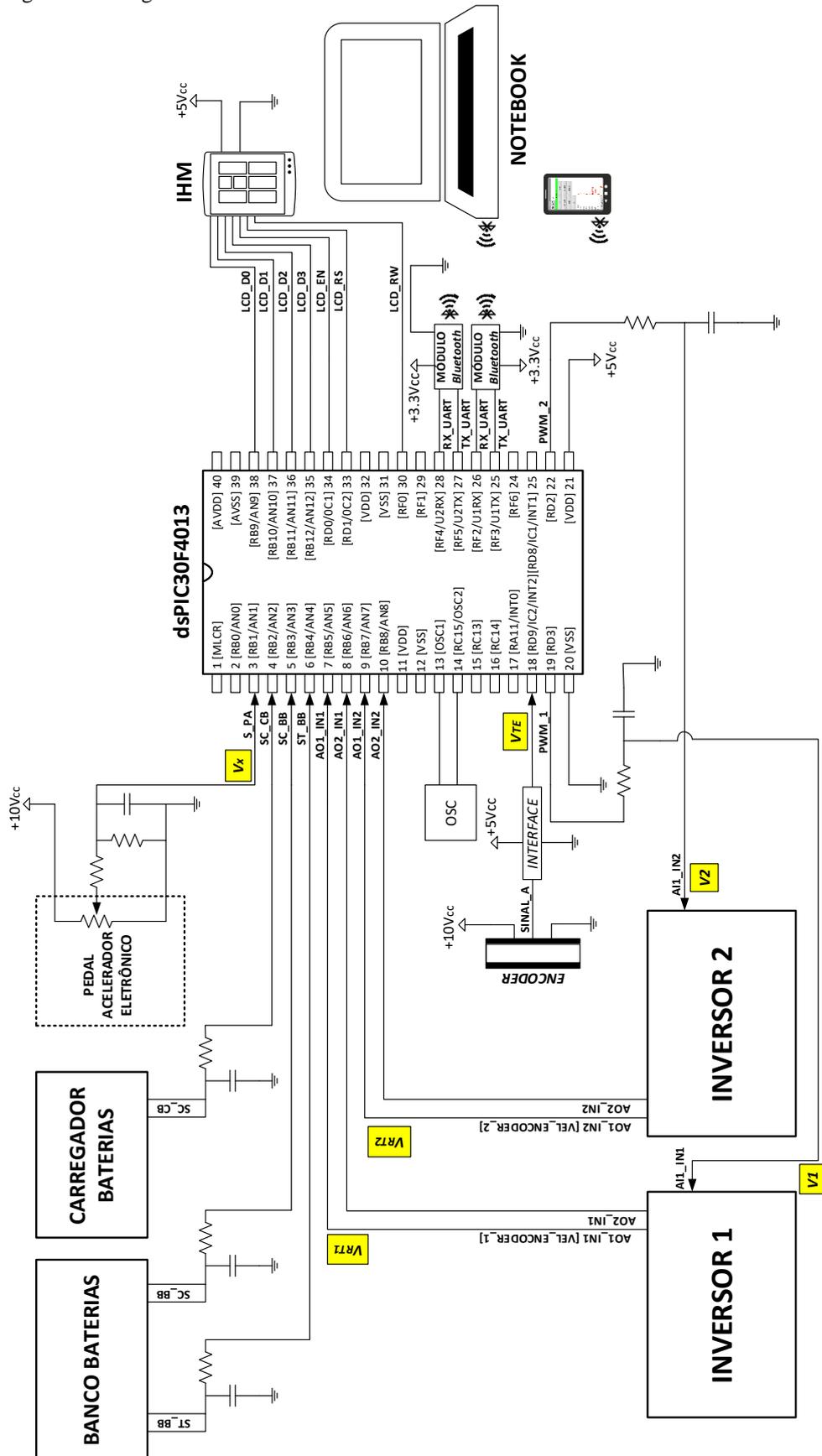
(b) Sensor de Velocidade – *Encoder Miniature Type 2400 Kübler (5 – 24 Vcc)*.



(c) Sensor de corrente - Baterias.

Fonte: Elaborada pelo autor.

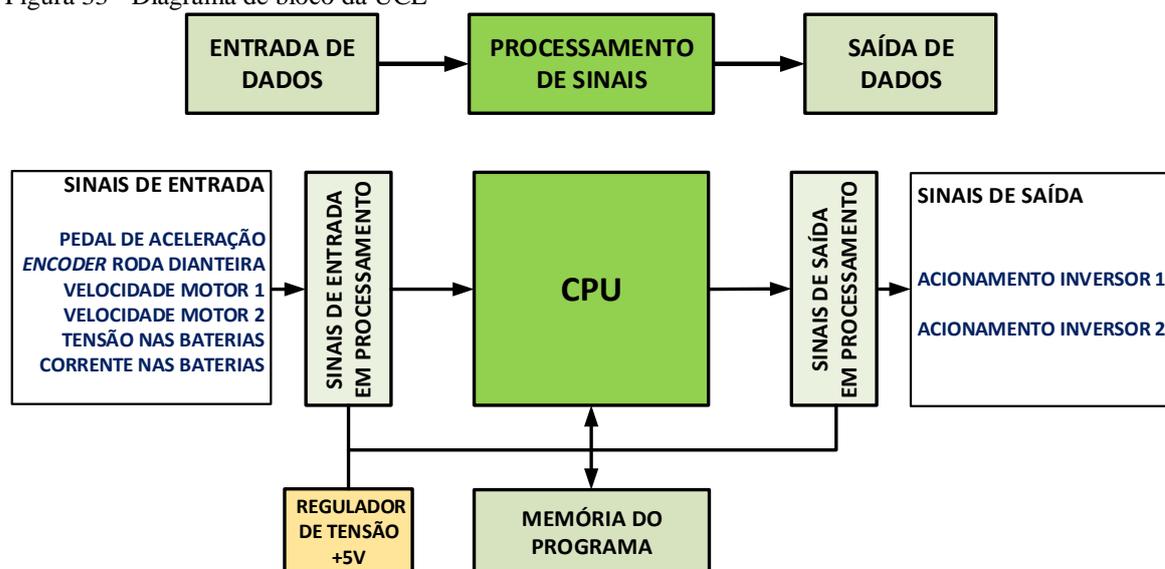
Figura 32 - Diagrama elétrico UCE



Fonte: Elaborada pelo autor.

As funções distintas do módulo microprocessado são vistas na Figura 33.

Figura 33 - Diagrama de bloco da UCE

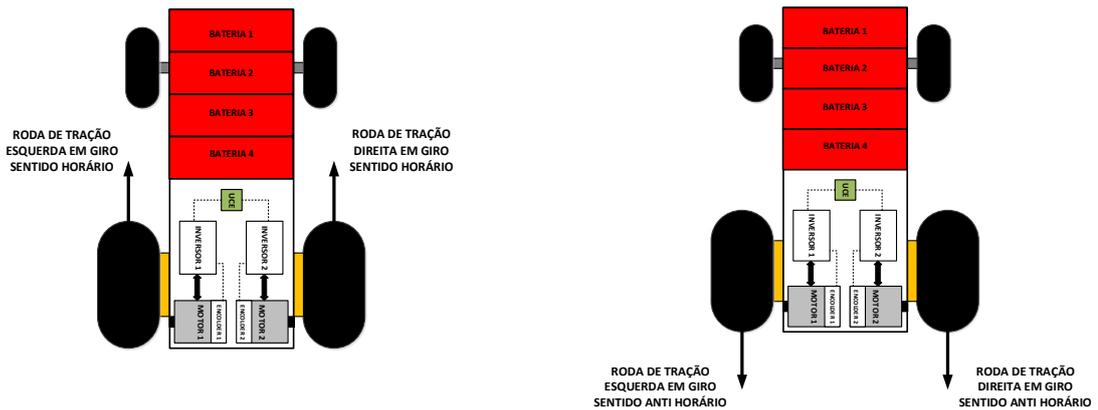


Fonte: Elaborada pelo autor.

A lógica de funcionamento do algoritmo executado pelo microcontrolador é desenvolvida em linguagem de programação C. A UCE visa à otimização e flexibilização da operacionalização do trator elétrico nas manobras típicas envolvidas na atividade rural. Assim têm-se as principais funcionalidades propostas para implementação, tais como:

- Controle de acionamento dos inversores conforme destaca a Figura 34. Essa função permite flexibilizar a operação do trator elétrico em suas manobras fazendo com que o acionamento dos inversores possa ser feito de forma independente e prática por parte do operador conforme sua necessidade (acionamento simultâneo dos motores com mesmo sentido de giro, acionamento simultâneo dos motores com sentidos de giros opostos ou acionamento individual dos motores);
- Controle de velocidade (com essa funcionalidade é possível variar o range de rotação que o motor pode atingir. Também permite ao condutor determinar uma velocidade máxima mantendo constante essa velocidade selecionada e desativar automaticamente ao pisar no pedal do acelerador).
- Controle de patinagem (essa função permite melhorar a eficiência do trator elétrico no tracionamento de carga, diminuindo as perdas por patinagem);
- Monitoramento da corrente e tensão das baterias (com o monitoramento das baterias é possível acompanhar o consumo energético desempenhado pelo trator).

Figura 34 - Funcionalidades de acionamento do trator elétrico



(a) Tração com rodas em mesmo sentido de giro.



(b) Tração com apenas uma roda.

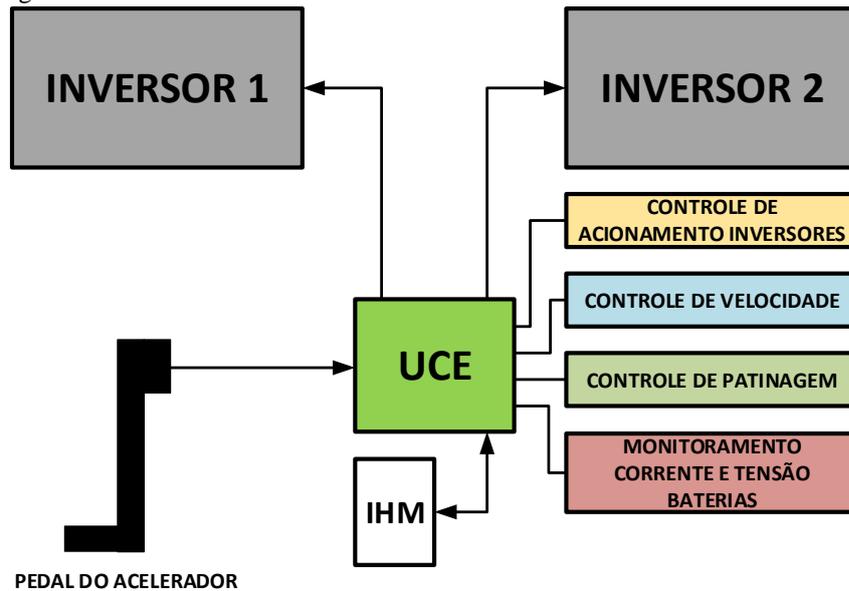


(c) Tração com rodas em sentidos opostos.

Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 35 exibe o circuito de controle idealizado e suas principais funcionalidades.

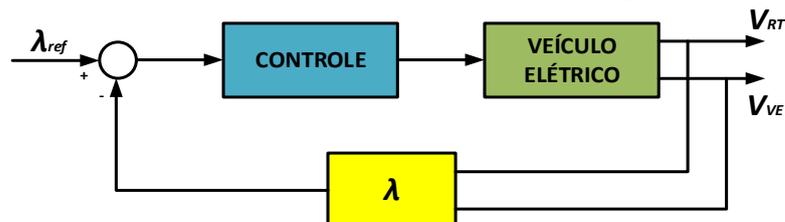
Figura 35 - Sistema de acionamento e controle do trator elétrico



Fonte: Elaborada pelo autor.

Vale ressaltar que o controle de patinagem é uma das propostas essenciais na concepção desta pesquisa devido ao seu caráter inovador para aplicação no trator elétrico e a complexidade de implementação. Para um veículo é extremamente importante entregar sua potência às rodas de tração fazendo com que o mesmo tenha máxima eficiência de tração. Para um trator convencional a patinagem é um dos principais pontos de perda de eficiência. Com o uso de um sistema de propulsão elétrica é possível implementar um controle capaz de minimizar tais perdas para o trator elétrico. Assim, o controle proposto visa monitorar o coeficiente de patinagem e promover o acionamento das rodas com uma tração mais eficiente, através dos sinais de referências de velocidades dos inversores diretamente controlados. A Figura 36 destaca um diagrama de blocos simplificado que retrata a exemplificação de controle envolvendo a patinagem.

Figura 36 - Diagrama de blocos simplificado com controle de patinagem

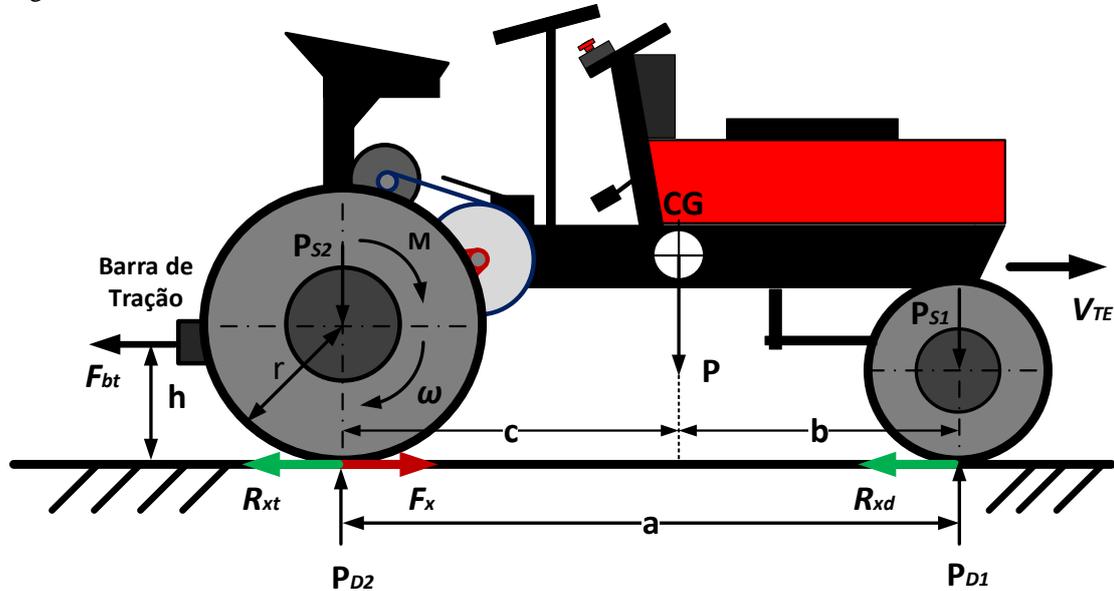


Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 37 destaca o modelo inicialmente elaborado do trator elétrico para análise. Um modelo de tração nas rodas traseiras é adotado neste trabalho, onde o trator é visto como um corpo rígido cujo movimento lateral não é levado em consideração. Considerando apenas o

movimento longitudinal, a figura mostra as forças que atuam no trator elétrico em movimento. Como os tratores agrícolas geralmente operam em baixas velocidades, a resistência aerodinâmica foi desprezada.

Figura 37 - Modelo trator elétrico



Fonte: Elaborada pelo autor.

A força resultante associada à interação da roda e do solo é chamada de força da barra de tração. O trator elétrico apresenta uma interação roda-solo complexa, onde as equações de força do trator elétrico ao longo do eixo longitudinal podem ser expressas por (4.1), (4.2), (4.3) e (4.4):

$$m\dot{V}_{TE} = F_x - F_{bt} - R_r \quad (4.1)$$

$$R_r = R_{xd} + R_{xt} = C_r P_{D1} + C_r P_{D2} \quad (4.2)$$

$$P_{D1} = \frac{-h(F_{bt} + m\dot{V}_{TE}) + cP}{a} \quad (4.3)$$

$$P_{D2} = \frac{h(F_{bt} + m\dot{V}_{TE}) + bP}{a} \quad (4.4)$$

Onde:

$m$  – massa do trator elétrico;

$V_{TE}$  – velocidade do trator elétrico;  
 $F_x$  – força de tração longitudinal das rodas;  
 $F_{bt}$  – força da barra de tração;  
 $R_r$  – força de resistência ao rolamento;  
 $R_{xd}$  – resistência ao rolamento nas rodas dianteiras;  
 $R_{xt}$  – resistência ao rolamento nas rodas traseiras;  
 $C_r$  – coeficiente de resistência ao rolamento de pneus;  
 $P_{D1}$  – carga dinâmica nas rodas dianteiras;  
 $P_{D2}$  – carga dinâmica nas rodas traseiras;  
 $P$  – peso do trator elétrico;  
 $a$  – distância entre eixos;  
 $b$  – distância do centro de gravidade ao eixo dianteiro;  
 $c$  – distância do centro de gravidade ao eixo traseiro;  
 $h$  – altura da barra de tração.

A patinagem longitudinal  $\lambda$  no modelo representado na Figura 37 é dado por (4.5):

$$\lambda = \frac{V_{RT} - V_{TE}}{V_{RT}} \quad (4.5)$$

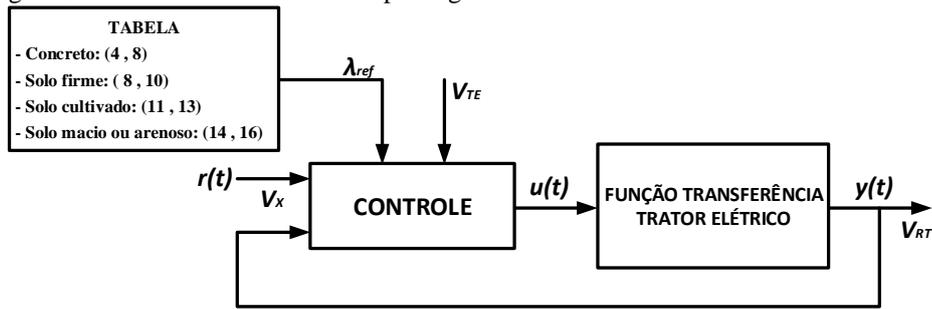
Onde a velocidade da roda de tração  $V_{RT}$  é dada por (4.6):

$$V_{RT} = r\omega \quad (4.6)$$

Onde  $r$  e  $\omega$  são o raio da roda e a velocidade angular, respectivamente.

Assim, dentro do contexto do controle de patinagem, a velocidade do veículo e a velocidade da roda de tração são parâmetros úteis para calcular a patinagem. Conforme apresentado no Capítulo 2, foi possível observar na literatura a proposição de vários métodos de controle que envolvem patinagem aplicados a veículos elétricos. Com base na fundamentação exposta e nas equações apresentadas do modelo longitudinal, é possível elaborar uma estratégia capaz de efetuar o controle de patinagem para um trator elétrico, respeitando as especificidades de uso, como o tipo de solo ( $\lambda_{ref}$ ), conforme exemplificado na Figura 38. Vale salientar que a relação da patinagem com a eficiência de tração dos tratores de duas rodas motrizes em diversas condições de solo foi mostrada no Capítulo 3 (Figura 11).

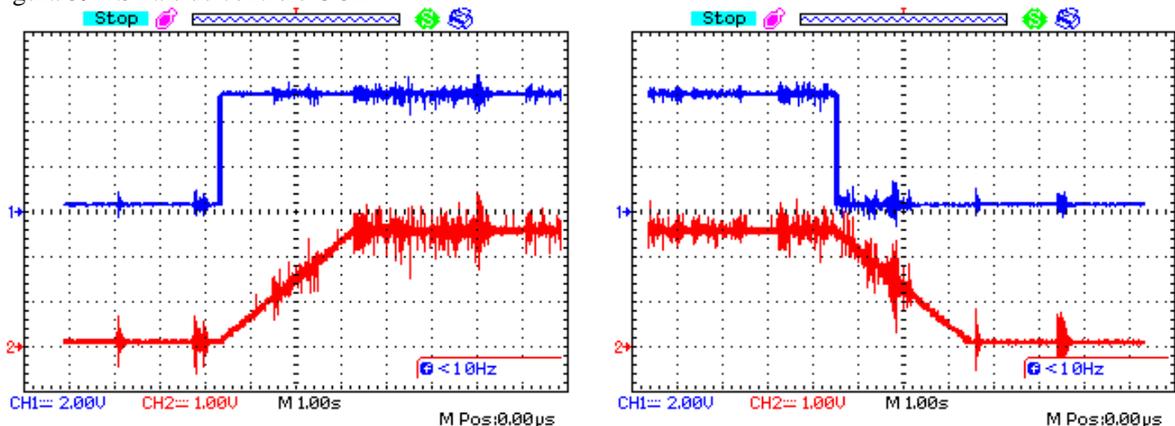
Figura 38 - Sistema com controle de patinagem



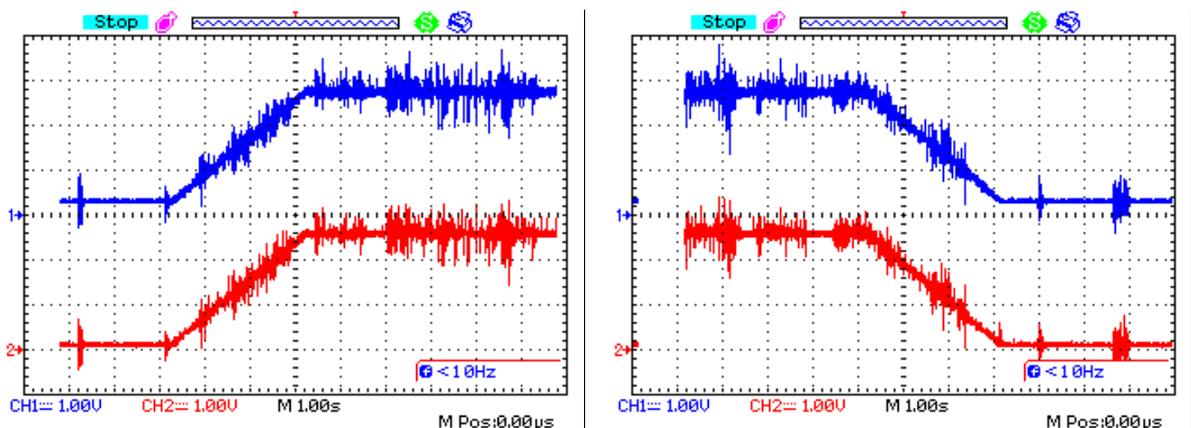
Fonte: Elaborada pelo autor.

O sinal  $u(t)$  representa a entrada (sinal de controle) da planta,  $y(t)$  representa sua saída (sinal controlado  $V_{RT}$ ) e  $r(t)$  representa um sinal de referência (sinal do pedal  $V_x$ ). Na Figura 39 é possível destacar, inicialmente em malha aberta, os sinais de entrada e saída da UCE que serão utilizados no processo de implementação do controle desejado.

Figura 39 - Sinais de controle UCE



(a) Sinal 1 enviado pela UCE para entrada analógica AI1\_IN1 e Sinal 2 (velocidade) enviado pela saída analógica AO2\_IN1 para UCE.



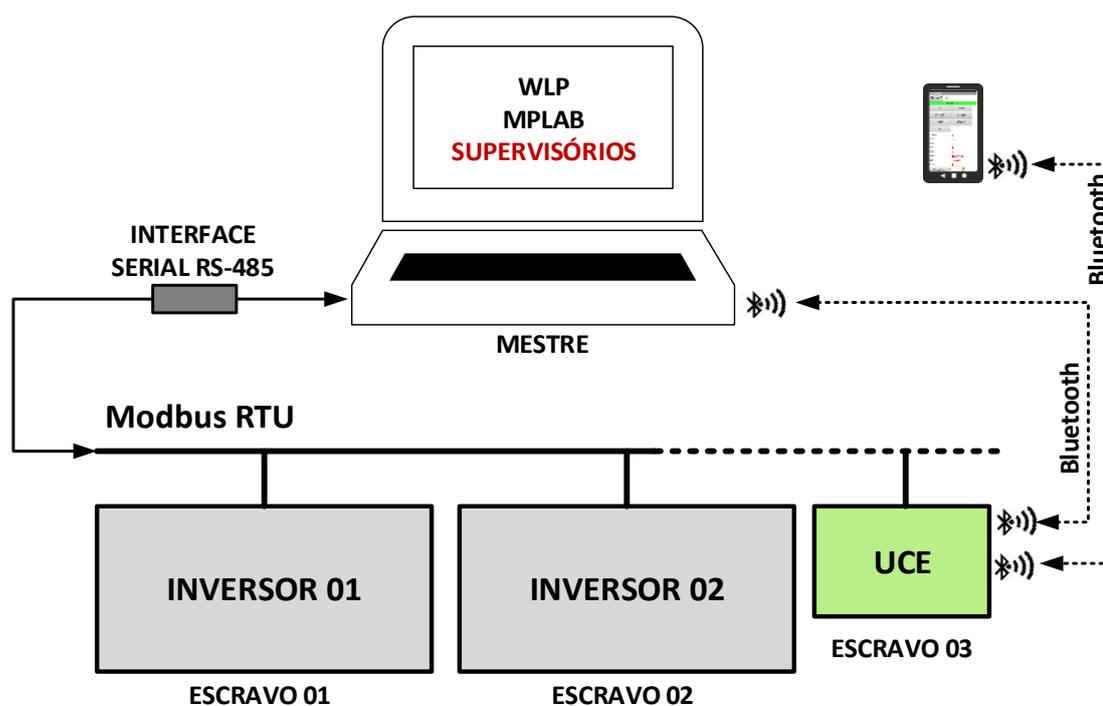
(b) Sinais (velocidade) enviados pelas saídas analógicas AO2\_IN1 e AO2\_IN2 para UCE.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tem-se na Figura 39(a) o Sinal 1 (azul) de saída da UCE responsável pelo acionamento do Inversor 1 através de sua entrada analógica AI1\_IN1 e o Sinal 2 (vermelho) de entrada da UCE enviado pela saída analógica AO2\_IN1 do Inversor 1, que corresponde à velocidade do respectivo motor acionado. Já na Figura 39(b) tem-se os Sinais 1 e 2 das entradas da UCE enviados pelas saídas analógicas AO2\_IN1 e AO2\_IN2 dos Inversores 1 e 2 corresponde à velocidade dos respectivos motores de acionamento das rodas de tração. Com esses dois sinais de velocidade mais o sinal de velocidade do trator será possível mensurar o coeficiente de patinagem necessário para o projeto de controle. Por fim, métodos de controle devem ser estudados e avaliados para a proposição final do controle de patinagem a ser implementado e testado nos ensaios do trator elétrico.

Na estrutura do trator elétrico foram implementadas três ferramentas de supervisão com objetivo de monitorar as variáveis do sistema de propulsão nas etapas de desenvolvimento do projeto. Com esses recursos é possível promover o armazenamento de dados e gerar relatórios. A Figura 40 mostra a estrutura proposta.

Figura 40 - Sistemas de Supervisão do Trator Elétrico

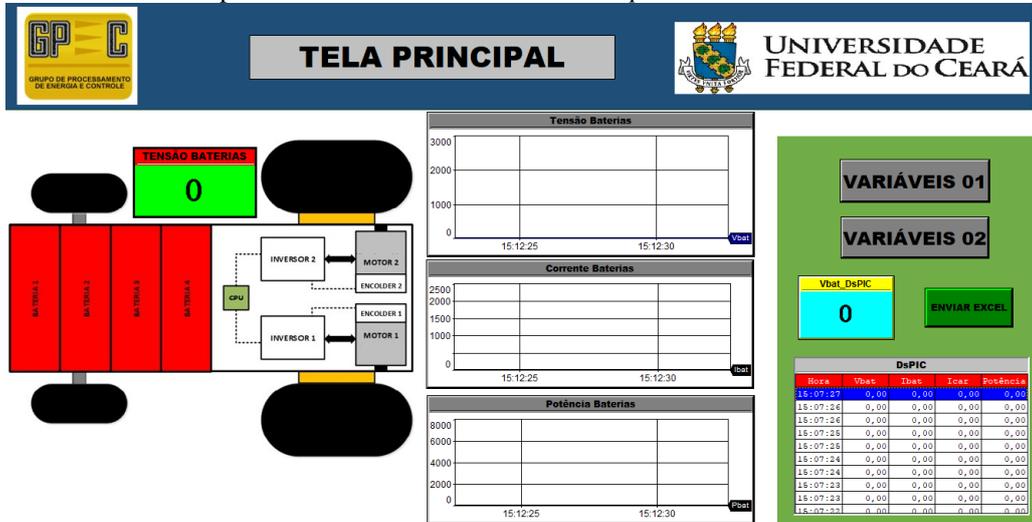


Fonte: Elaborada pelo autor.

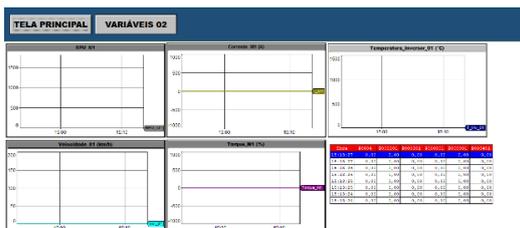
Foram utilizadas diferentes plataformas (softwares) para a elaboração dos supervisórios: *Eclipse SCADA*, *C++ Builder* e *MIT Inventor App*. Para a fase inicial do projeto foi desenvolvido e utilizado um supervisório no *Eclipse SCADA*. Nessa fase inicial é feita a execução da ligação dos inversores e toda a parametrização. Com isso, os primeiros testes foram

realizados com o trator elétrico em laboratório. O referido supervisor foi utilizado para o monitoramento de variáveis nas primeiras análises de funcionamento do sistema. A Figura 41 destaca as telas de interface com o operador para monitoração desenvolvido com o software *Eclipse SCADA*.

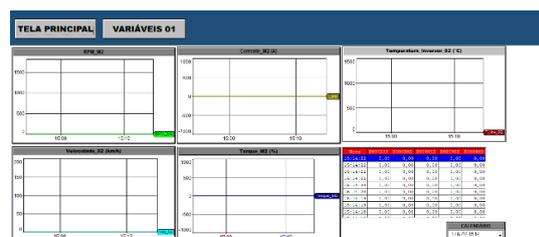
Figura 41 - Sistema de Supervisão desenvolvido no software *Eclipse SCADA*



(c) Tela Principal Supervisorio



(d) Tela monitoramento de variáveis do Inversor 1



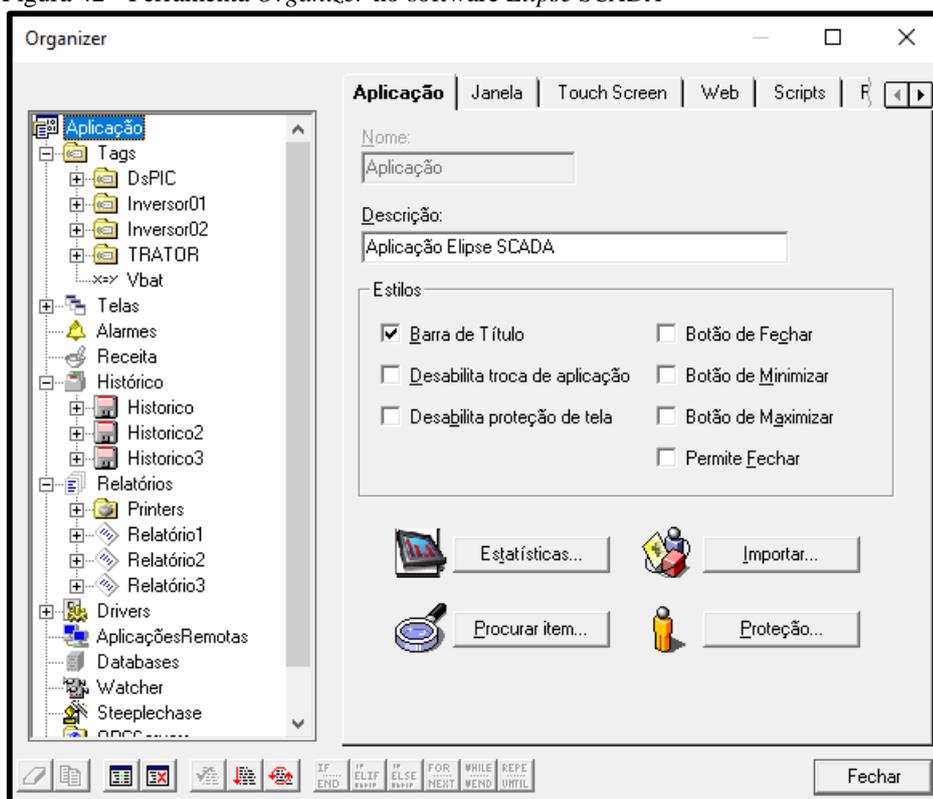
(e) Tela monitoramento de variáveis do Inversor 2

Fonte: Elaborada pelo autor.

Para o processo de comunicação entre o supervisorio e os inversores foi utilizado o protocolo Modbus com modo de transmissão RTU. Esse é um protocolo aberto largamente difundido, utilizado em diversos equipamentos por vários fabricantes. A rede Modbus RTU utiliza o sistema mestre-escravo para a troca de mensagens. Toda comunicação inicia com o mestre fazendo uma solicitação a um escravo, e esse responde ao mestre o que foi solicitado. Em ambos os telegramas (pergunta e resposta), a estrutura utilizada é a mesma: Endereço, Código da Função, Dados e CRC. O mestre inicia a comunicação enviando um byte com o endereço do escravo para o qual se destina a mensagem. Ao enviar a resposta, o escravo também inicia o telegrama com o seu próprio endereço.

Essa estrutura ainda permite inserir a UCE na rede Modbus RTU. A concepção da aplicação no *Eclipse SCADA* é baseada na ferramenta *Organizer*. Essa ferramenta proporciona uma visão simples e organizada de toda a aplicação, contribuindo na edição e configuração de todos os objetos incluídos no sistema por meio de uma árvore hierárquica (ELIPSE SOFTWARE LTDA., 2018). Na Figura 42 tem-se a raiz da aplicação da estrutura da ferramenta *Organizer*. É possível observar, por meio da figura, que todos os objetos descem a partir da raiz, agrupados de acordo com seu tipo: *Tags*, *Telas*, *Alarmes*, *Receitas*, *Históricos*, *Relatórios*, *Drivers*, *Databases*, que formam os elementos essenciais da aplicação.

Figura 42 - Ferramenta *Organizer* no software *Eclipse SCADA*



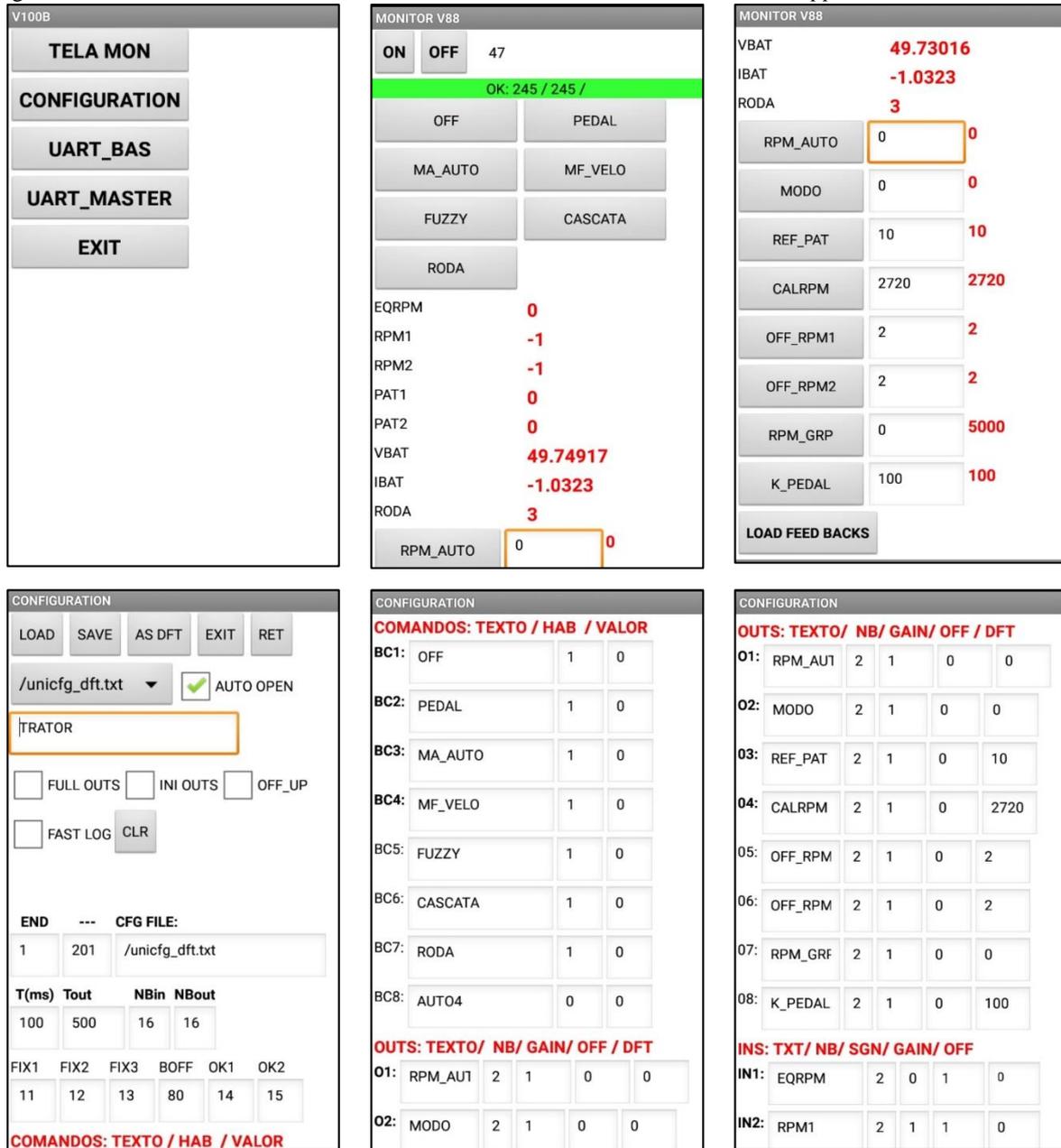
Fonte: Elaborada pelo autor.

A supervisão de um processo com o *Eclipse SCADA* ocorre através da leitura de variáveis. Os valores dessas variáveis são associados a objetos do sistema chamados “*Tags*”. Para o projeto de monitoramento dos dois inversores utilizados no trator elétrico as seguintes variáveis foram associadas: rotação; corrente; torque; tensão nas baterias; temperatura dos inversores.

Visando maior flexibilidade na execução dos testes finais de avaliação do trator elétrico em campo, foram criados mais dois mecanismos de interface e monitoramento. Esses permitem acessar a UCE de modo independente pela comunicação *Bluetooth*. O segundo

o sistema é um aplicativo para celular desenvolvido com o *MIT Inventor App*. Com ele é possível alterar facilmente parâmetros e acompanhar em tempo real as variáveis monitoradas do trator elétrico. A Figura 43 destaca as telas de interface e monitoramento do aplicativo.

Figura 43 - Sistema de interface e monitoramento desenvolvido com *MIT Inventor App*

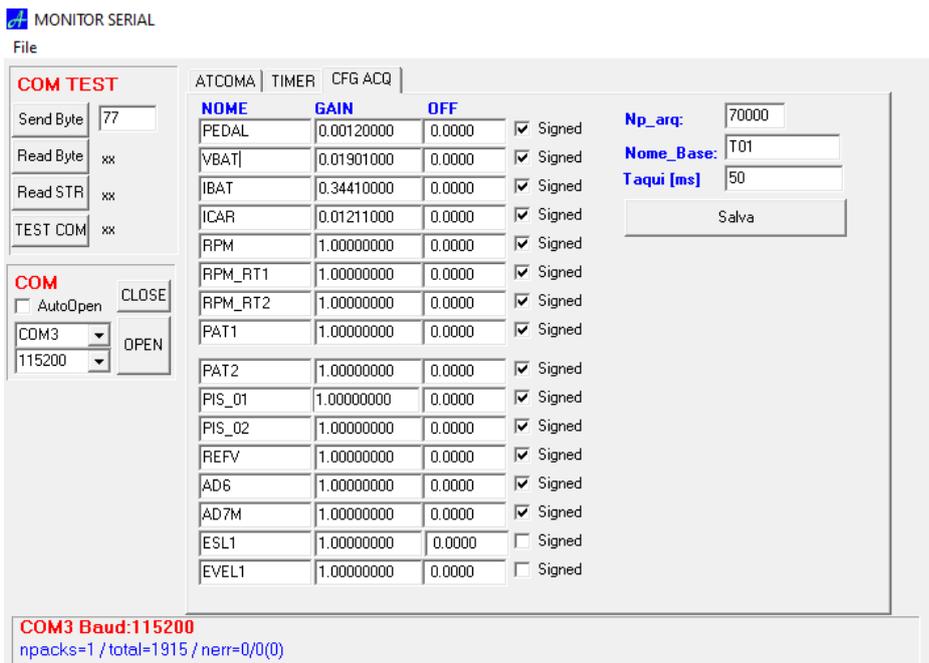
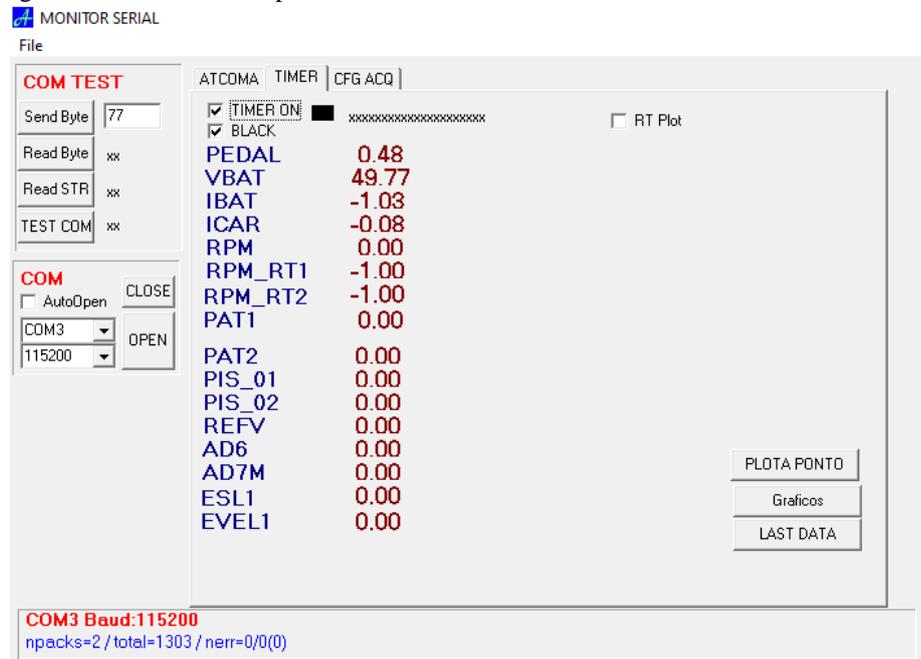


Fonte: Elaborada pelo autor.

Por último tem-se o sistema de interface e monitoramento elaborado no software *C++ Builder*. Esse é um ambiente de desenvolvimento integrado (IDE para o desenvolvimento de softwares na linguagem C++). O supervisor desenvolvido nessa plataforma é responsável pelo armazenamento de todos os dados coletados nos testes de avaliação do trator elétrico

mantendo uma comunicação direta com a UCE via *Bluetooth*. A Figura 44 apresenta as telas de interação do referido supervisor.

Figura 44 - Sistema de Supervisão desenvolvido no software *C++ Builder*

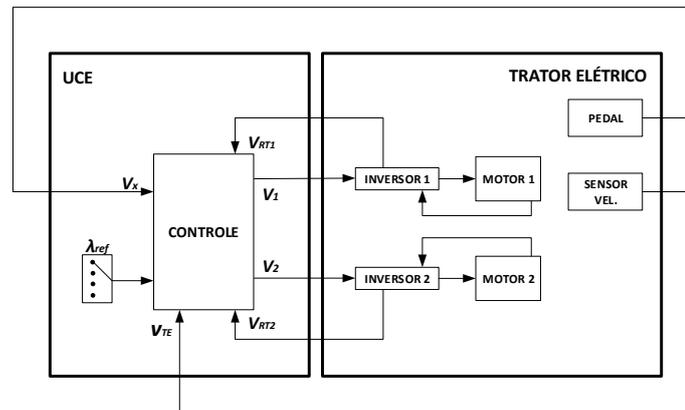


Fonte: Elaborada pelo autor.

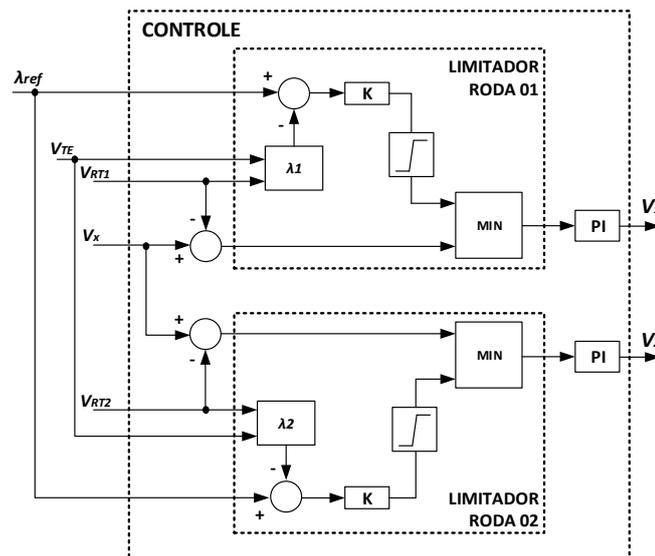
## 4.2 Controle aplicado ao trator elétrico

O presente trabalho propõe o controle de patinagem para o trator elétrico baseado na linearização da dinâmica longitudinal do veículo usando um controlador PI. A Figura 45 mostra o sistema de controle implementado para o acionamento de cada motor elétrico do trator elétrico.

Figura 45 - Sistema de Controle



(a) Diagrama de bloco do sistema de controle de acionamento do trator elétrico



(b) Controle de patinagem.

Fonte: Elaborada pelo autor.

É possível observar na Figura 45(a) que a UCE é diretamente responsável pelo gerenciamento dos sinais de referência de velocidade dos inversores ( $V_1$  e  $V_2$ ). O controle de patinagem das rodas de tração do trator elétrico, apresentado na Figura 45(b), é composto por um módulo limitador associado a um controlador PI. É justamente esse controle o responsável pelos sinais resultantes de referência de velocidade,  $V_1$  e  $V_2$ , para acionamento dos inversores.

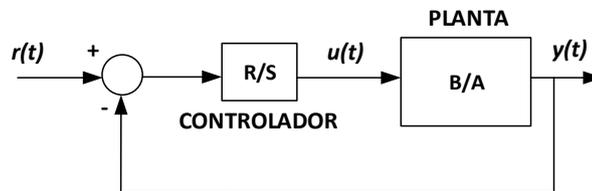
Para implementação do controle de patinagem foi encontrado o modelo matemático do sistema usando método de identificação paramétrica através de dados medidos no trator elétrico. Os parâmetros do modelo matemático empregados para fins do projeto da lei de controle utilizam medidas de uma entrada (pedal de aceleração -  $V_x$ ) e uma saída (velocidade da roda de tração -  $V_{RT}$ ) coletadas na planta. Os dados foram coletados durante testes em laboratório realizados com o trator elétrico. Ou seja, o propósito fundamental para concepção do projeto de controle de patinagem foi estimar os parâmetros da planta, a partir das medidas da entrada e da saída, e utilizar a técnica de alocação de polos para obter o controlador de acordo com o desempenho desejado em malha fechada.

Para fins de controle, a planta é representada através de um modelo linear de estrutura ARX (*Auto-Regressive with Exogenous Input*) com o formato de uma função de transferência (4.4):

$$H(z^{-1}) = \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} = \frac{b_1(z^{-1})}{1 + a_1(z^{-1})} \quad (4.4)$$

A função de transferência do controlador PI utilizado é formada por dois polinômios,  $R(z^{-1})$  e  $S(z^{-1})$ , conforme mostra a Figura 46. Esses polinômios são projetados para atender as especificações de desempenho de regulação do sistema. O controlador tem como entrada a diferença entre a referência  $r(t)$  e a saída medida  $y(t)$  e como saída o sinal  $u(t)$  de controle entregue à planta.

Figura 46 - Estrutura com controlador PI



Fonte: Elaborada pelo autor.

A lei de controle para um controlador PI é dada por (4.5) (LANDAU; ZITO, 2006):

$$u(t) = K \left[ \frac{(1 - z^{-1}) + (T_s/T_i)}{(1 - z^{-1})} \right] [r(t) - y(t)] \quad (4.5)$$

Dessa forma, têm-se os polinômios característicos do controlador  $R(z^{-1})$  e  $S(z^{-1})$ , vistos em (4.6) e (4.7):

$$S(z^{-1}) = 1 - z^{-1} = 1 + s_1 z^{-1} \quad (s_1 = -1) \quad (4.6)$$

$$R(z^{-1}) = K(1 + T_s/T_i) - Kz^{-1} = r_0 + r_1 z^{-1} \quad (4.7)$$

O desempenho desejado para o sistema em malha fechada em termos de tempo de subida e sobressinal é especificado em um polinômio de segunda ordem correspondente à discretização de um sistema de tempo contínuo de segunda ordem. A função de transferência do sistema em malha fechada é dada por (4.8):

$$H_{MF}(z^{-1}) = \frac{B(z^{-1})R(z^{-1})}{A(z^{-1})S(z^{-1}) + B(z^{-1})R(z^{-1})} = \frac{B(z^{-1})R(z^{-1})}{P(z^{-1})} \quad (4.8)$$

Assim, o projeto da lei de controle é realizado através do método de alocação de polos, na qual os parâmetros dos polinômios  $R(z^{-1})$  e  $S(z^{-1})$  são calculados pela solução da Equação Diofantina (4.9):

$$A(z^{-1})S(z^{-1}) + B(z^{-1})R(z^{-1}) = P(z^{-1}) \quad (4.9)$$

$A(z^{-1})$  e  $B(z^{-1})$  são os polinômios do modelo da planta obtidos na etapa de identificação, e  $P(z^{-1})$  é polinômio especificado em projeto de acordo com o desempenho desejado (amortecimento e velocidade de resposta do sistema). Portanto, o polinômio característico  $P(z^{-1})$ , cujas raízes são os polos do sistema de malha fechada desejados, define essencialmente a estabilidade e o desempenho do sistema através do posicionamento dos polos de malha fechada no interior do círculo unitário no plano complexo  $z$ . Resolvendo-se a Equação Diofantina dada por (4.9) tem-se (4.10):

$$1 + (a_1 - 1 + r_0 b_1)z^{-1} + (b_1 r_1 - a_1)z^{-2} = 1 + p_1 z^{-1} + p_2 z^{-2} \quad (4.10)$$

Igualando-se os coeficientes da equação (4.10) têm-se os polos  $p_1$  e  $p_2$  do sistema de malha fechada vistos em (4.11) e (4.12), respectivamente:

$$p_1 = a_1 - 1 + r_0 b_1 \quad (4.11)$$

$$p_2 = b_1 r_1 - a_1 \quad (4.12)$$

Logo, os parâmetros  $r_0$  e  $r_1$  do controlador PI digital são obtidos por (4.13) e (4.14), respectivamente:

$$r_0 = \frac{p_1 - a_1 + 1}{b_1} \quad (4.13)$$

$$r_1 = \frac{p_2 + a_1}{b_1} \quad (4.14)$$

Assim, pode-se observar que os parâmetros do controlador PI digital dependem dos parâmetros da planta ( $a_1$ ,  $b_1$ ) e do polinômio desejado (polos desejados  $p_1$  e  $p_2$  de malha fechada). Com isso, também é possível obter os parâmetros do controlador PI no tempo contínuo através de (4.15) e (4.16):

$$K = -r_1 \quad (4.15)$$

$$T_i = -\frac{T_s r_1}{r_1 + r_0} \quad (4.16)$$

Com a identificação do modelo da planta, obteve-se a equação (4.17). Vale ressaltar que esse processo foi realizado de forma experimental. Atribuindo-se um processo SISO (*Single-input, single-output*), o referido modelo foi obtido relacionando a referência de velocidade  $V_x$ , e a velocidade do eixo do motor,  $V_{RT}$ . Assim, realizou-se o ensaio de identificação do modelo da planta através da aplicação de um sinal do tipo degrau na entrada do sistema ( $V_x$ ) através do pedal de aceleração e, através das saídas analógicas dos inversores, foram coletadas as respostas obtidas das velocidades dos eixos dos motores ( $V_{RT1}$  e  $V_{RT2}$ ), com um período de amostragem de 50ms.

$$H(s) = \frac{4}{s + 0.667} \quad (4.17)$$

Realizando-se a discretização do modelo da planta, chega-se à equação (4.8):

$$H(z^{-1}) = \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} = \frac{b_1(z^{-1})}{1 + a_1(z^{-1})} = \frac{0.1967}{z - 0.9672} \quad (4.18)$$

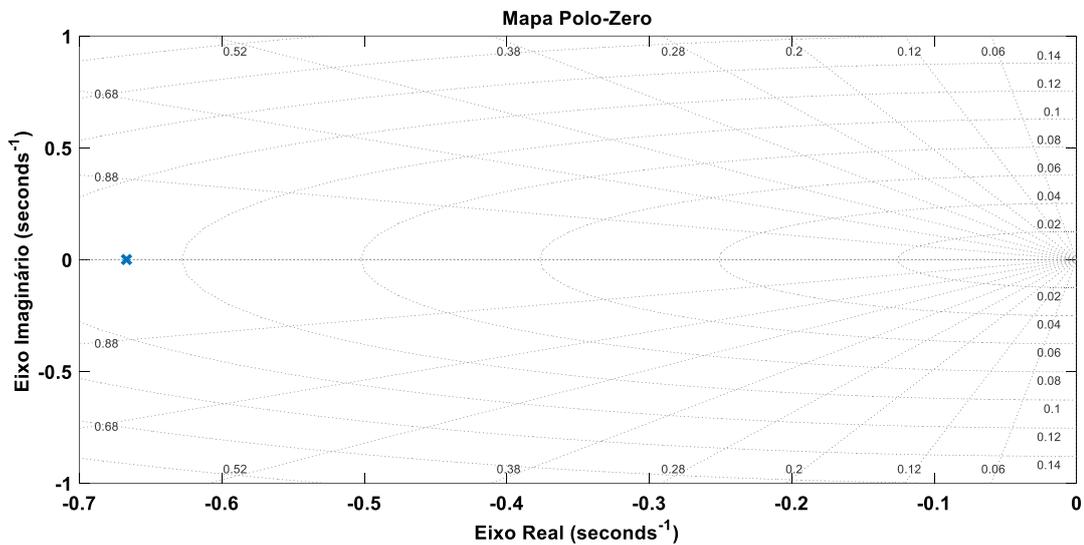
Logo,  $b_1$  e  $a_1$  são:

$$b_1 = 0.1967$$

$$a_1 = -0.9672$$

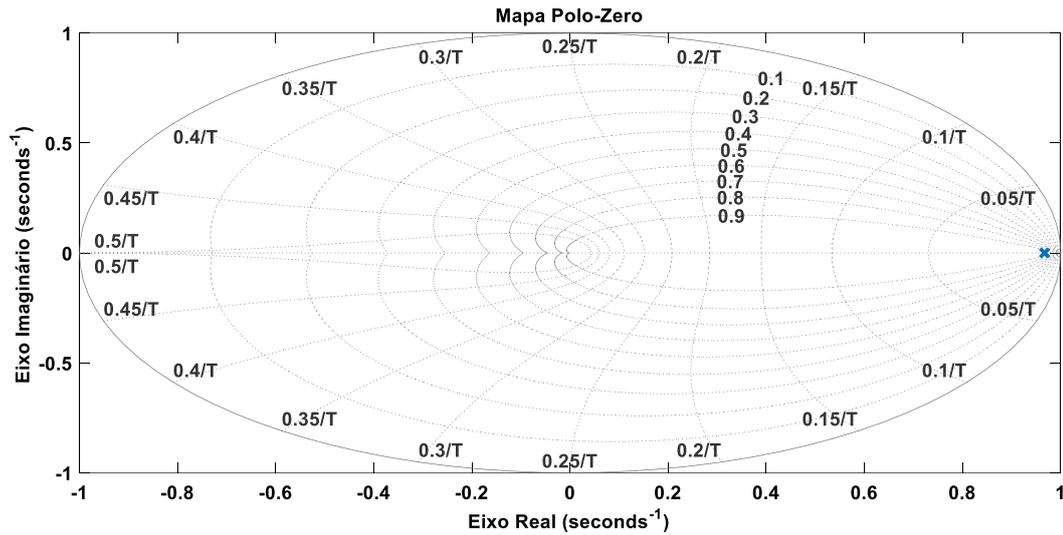
Os mapas polo-zero do modelo da planta e do modelo da planta discretizada são apresentados na Figura 47 e na Figura 48, respectivamente.

Figura 47 - Polo do modelo ARX identificado



Fonte: Elaborada pelo autor.

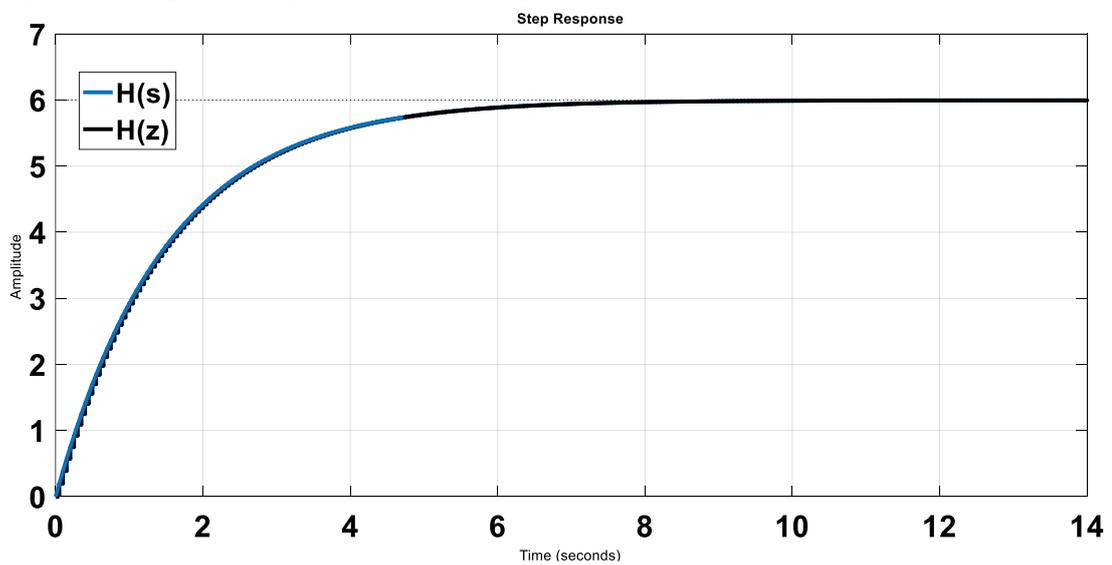
Figura 48 - Polo do modelo discretizado



Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Figura 49 tem-se a resposta ao degrau dos modelos da planta.

Figura 49 - Resposta ao degrau dos modelos da planta



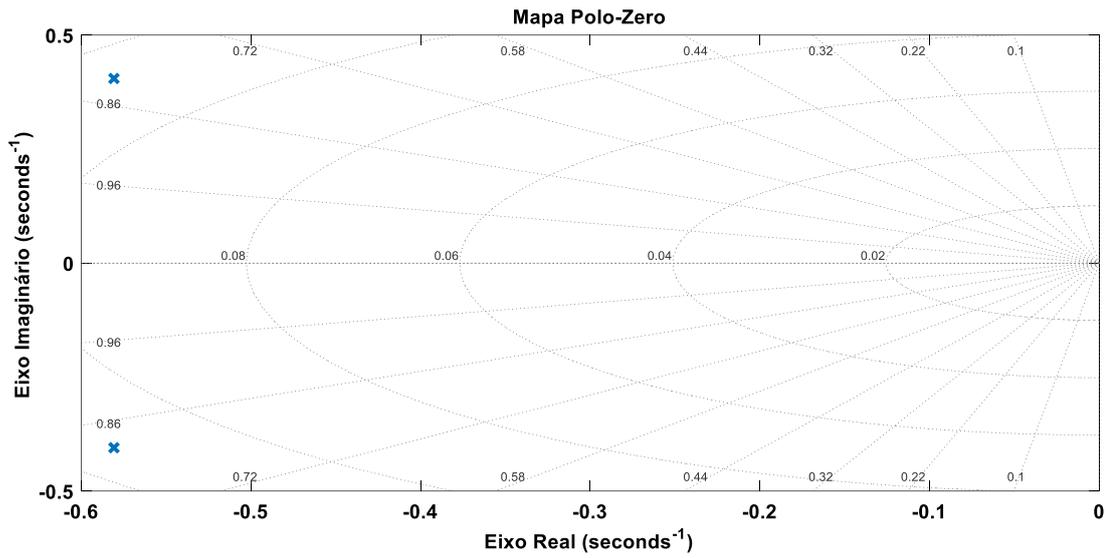
Fonte: Elaborada pelo autor.

A partir dos critérios de projeto tem-se o seguinte modelo de referência (4.19):

$$H_{ref}(s) = \frac{0.5011}{s^2 + 1.161 s + 0.5011} \quad (4.19)$$

O mapa polo-zero do modelo de referência é apresentado na Figura 50.

Figura 50 - Polos do modelo de referência



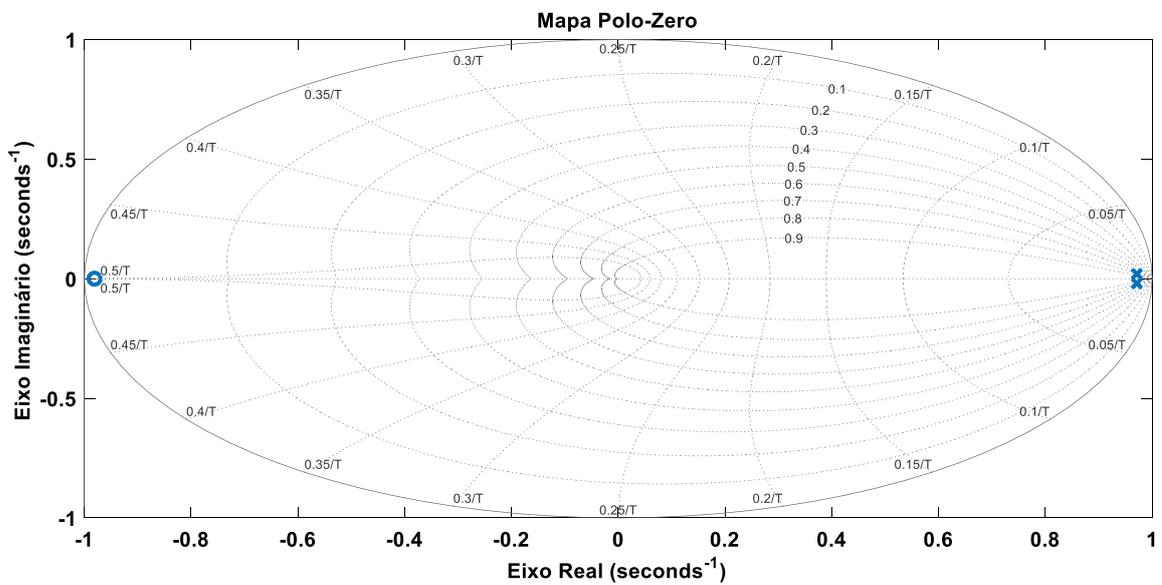
Fonte: Elaborada pelo autor.

Assim, após realizar a discretização do modelo de referência tem-se (4.20):

$$H_{ref}(z^{-1}) = \frac{0.0006144 z + 0.0006026}{z^2 - 1.9423691 z + 0.9435861} \tag{4.20}$$

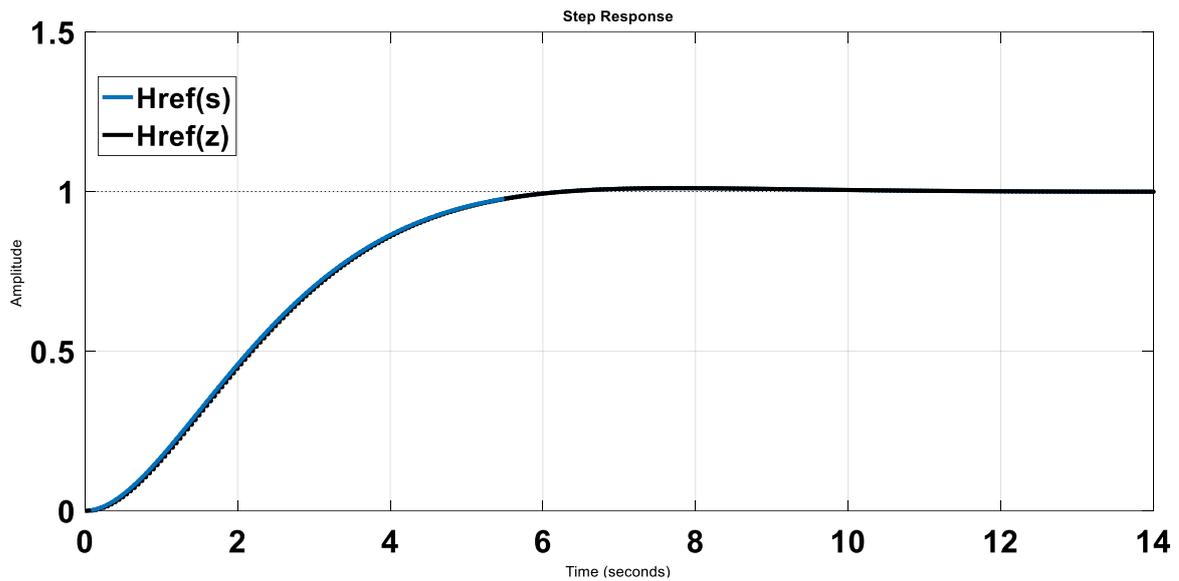
O mapa polo-zero do modelo de referência discretizado é visto na Figura 51.

Figura 51 - Polos-zero do modelo de referência discretizado



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 52 - Resposta ao degrau dos modelos de referência



Fonte: Elaborada pelo autor.

A função de transferência discretizada do sistema em malha fechada é dada por (4.21):

$$H_{MF}(z^{-1}) = \frac{0.02483 z - 0.02361}{z^2 - 1.9423691 z + 0.9435861} \quad (4.21)$$

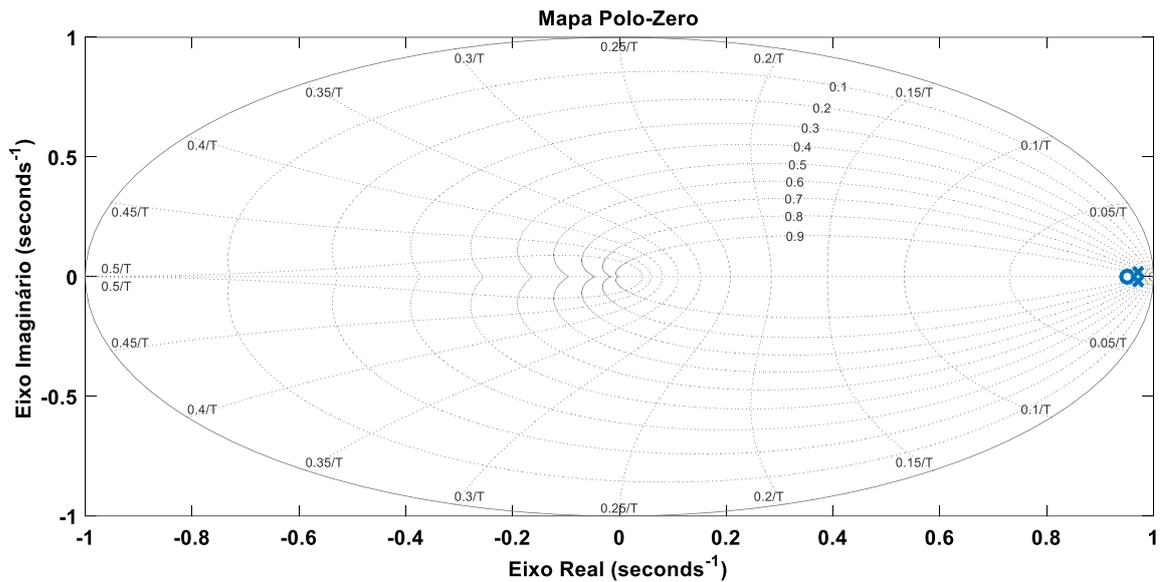
Dessa forma, tem-se no denominador da função de transferência discretizada do sistema em malha fechada o polinômio característico  $P(z^{-1})$ , cujas raízes são os polos do sistema de malha fechada desejados. Logo, de acordo com as equações (4.11) e (4.12), os polos  $p_1$  e  $p_2$  são:

$$p_1 = -1.9423691$$

$$p_2 = 0.9435861$$

O mapa polo-zero da função de transferência discretizada do sistema em malha fechada é apresentado na Figura 53.

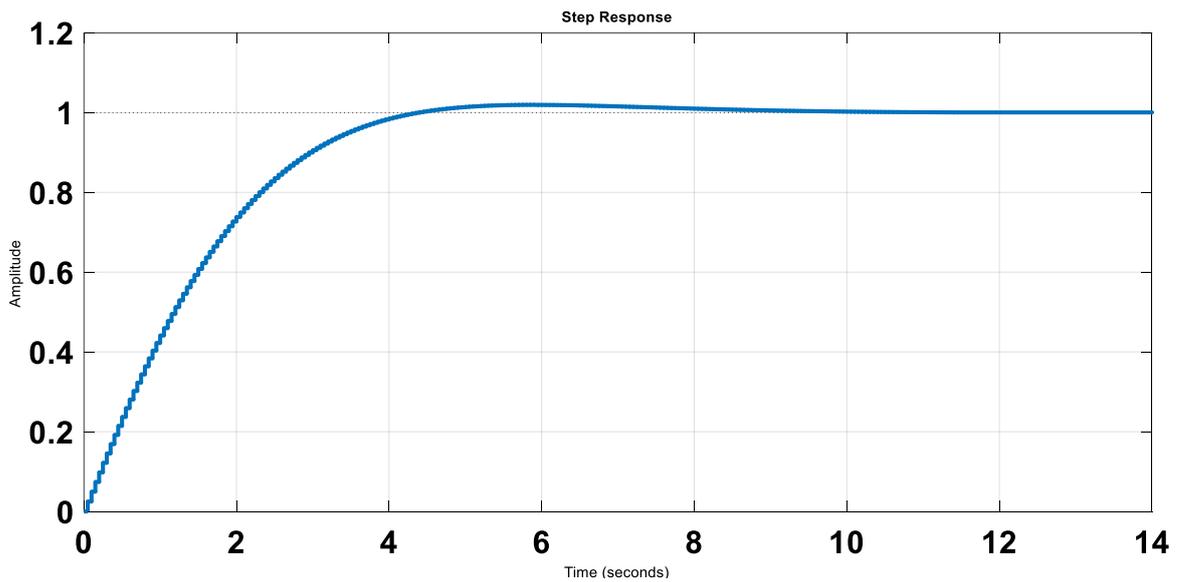
Figura 53 - Polos e zero do modelo em malha fechada discretizado



Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Figura 54 tem-se a resposta ao degrau do modelo em malha fechada discretizado.

Figura 54 - Resposta ao degrau do modelo em malha fechada discretizado



Fonte: Elaborada pelo autor.

Conforme as equações (4.13) e (4.14) os parâmetros do controlador PI digital são:

$$r_0 = \frac{p_1 - a_1 + 1}{b_1} = 0.1262$$

$$r_1 = \frac{p_2 + a_1}{b_1} = -0.12$$

Os parâmetros do controlador PI no tempo contínuo, de acordo com as equações (4.15) e (4.16), são:

$$K = -r_1 = 0.12$$

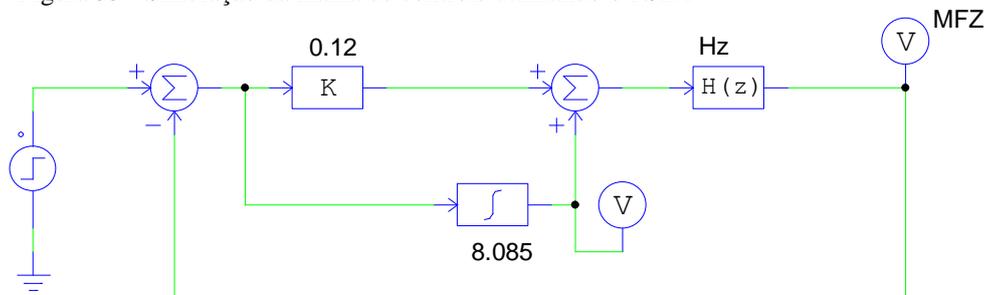
$$T_i = -\frac{T_e r_1}{r_1 + r_0} = 0.9702$$

Com a utilização do módulo limitador no sistema de controle proposto (conforme diagrama apresentado na Figura 43(b)), não foi empregada no algoritmo de controle digital a implementação direta via equação a diferença. Na prática, a partir dos parâmetros do controlador PI contínuo equivalente foi realizada uma implementação em código com variáveis de 16 bits incluindo limitações de variáveis e algoritmo *anti-windup* (APÊNDICE B).

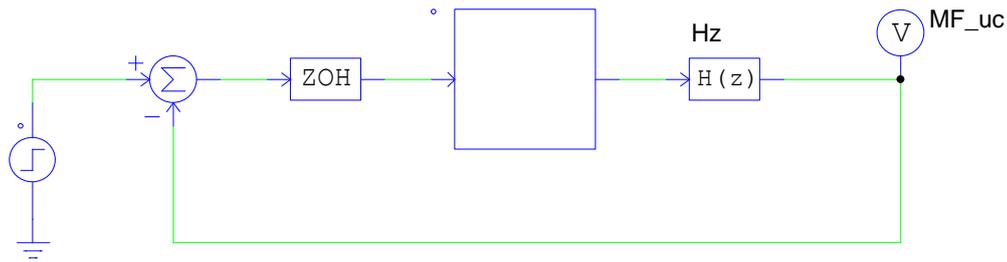
### 4.3 Simulações

Para validar o funcionamento do controlador projetado antes da implementação prática, utilizou-se a ferramenta PSIM para realizar a simulação da malha de controle. A Figura 55 apresenta os circuitos utilizados na simulação da malha de controle, tanto em blocos como através da implementação via código no *C Block*.

Figura 55 - Simulação da malha de controle utilizando o PSIM



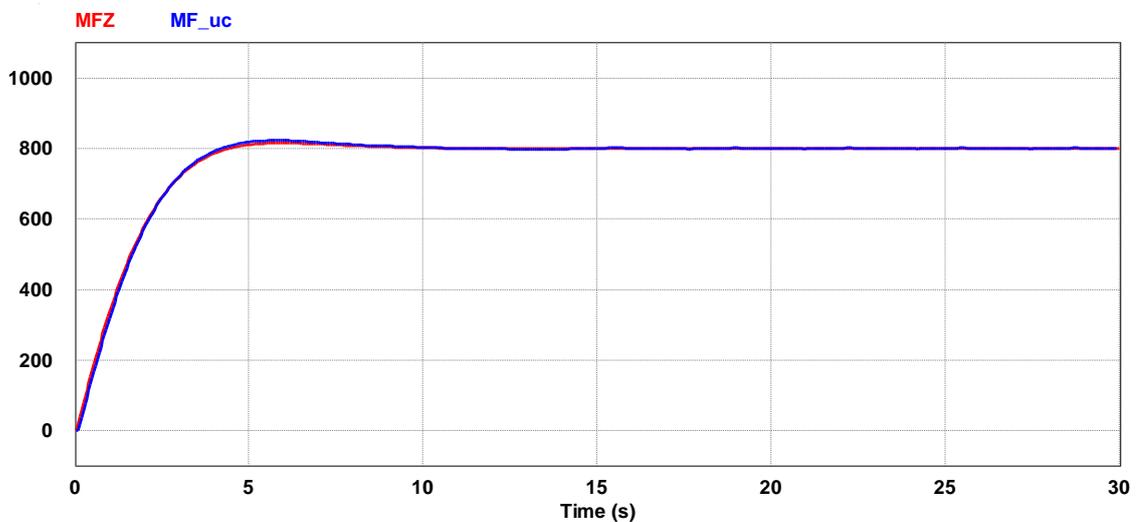
(a) Simulação em blocos

(b) Simulação com código implementado no *C Block*

Fonte: Elaborada pelo autor.

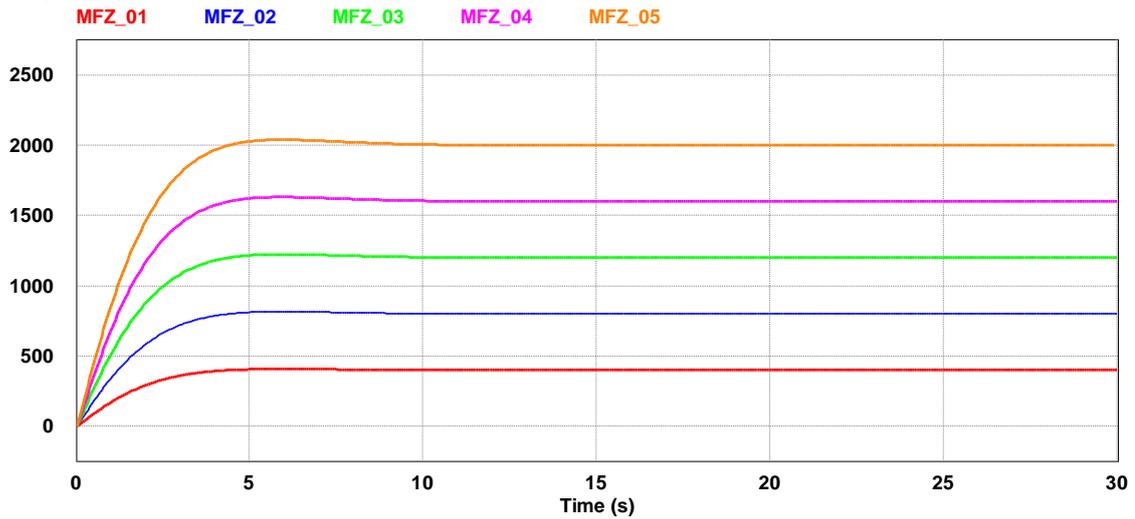
No trator elétrico, o sinal proveniente do pedal acelerador impõe valores de aceleração que resultam em um sinal cujo valor corresponde à velocidade de referência para o eixo do motor de tração. O primeiro sinal de referência aplicado nas simulações foi 800 rpm a fim de se verificar a resposta dinâmica da velocidade do motor de tração do trator elétrico. Portanto, esse sinal corresponde ao valor da velocidade de referência para o eixo do motor. Na Figura 56 têm-se as respostas ao degrau dos dois sistemas simulados. Verifica-se que nos dois sistemas a resposta dinâmica de velocidade foi a mesma, visto que os gráficos ficaram sobrepostos. Na Figura 56 também é apresentada a resposta ao degrau para vários níveis de referência de velocidade: 400 rpm, 800 rpm, 1200 rpm, 1600 rpm e 2000 rpm. A velocidade máxima do motor é limitada a partir da limitação do valor do sinal correspondente à velocidade de referência.

Figura 56 - Resposta ao degrau do sistema em malha fechada



Fonte: Elaborada pelo autor.

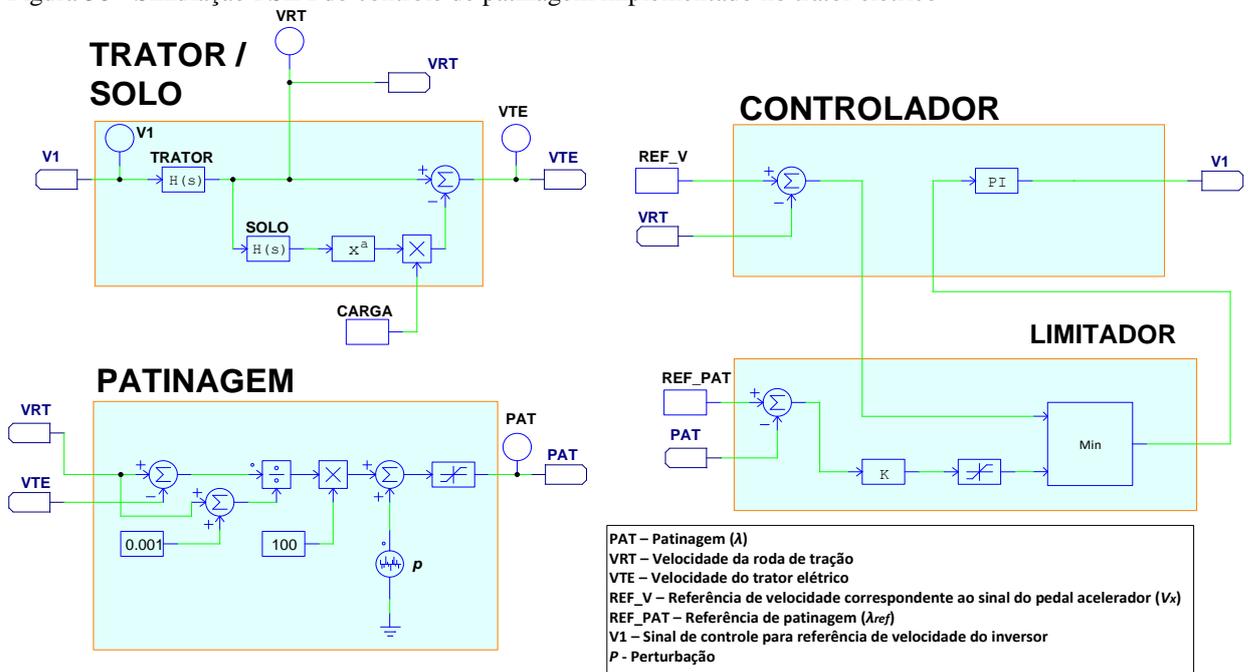
Figura 57 - Resposta ao degrau do sistema em malha fechada para vários níveis de referência de velocidade



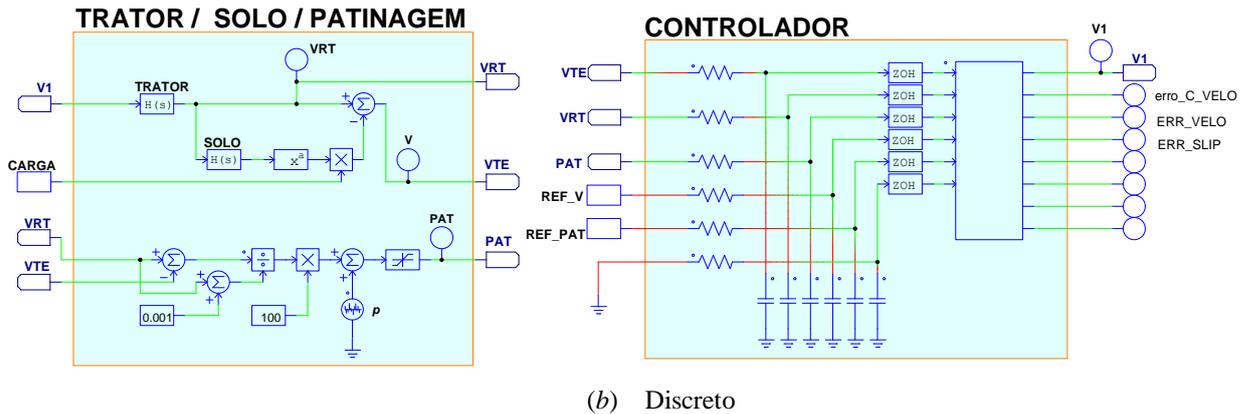
Fonte: Elaborada pelo autor.

Analisando as respostas mostradas na Figura 57, observa-se a aceleração do motor no intervalo de 0 s a 10 s e a operação em regime permanente na velocidade nominal a partir do instante 10 s, em conformidade com os valores de referência especificados. Tem-se, assim, o regime transitório de aceleração com tempo de acomodação e sobressinal de velocidade em conformidade com o esperado teoricamente e a velocidade desenvolvida seguindo a velocidade de referência ao longo do tempo. A seguir, o modelo dinâmico do trator elétrico elaborado no PSIM é mostrado na Figura 58. Nesta figura têm-se os diagramas de blocos do sistema proposto.

Figura 58 - Simulação PSIM do controle de patinagem implementado no trator elétrico



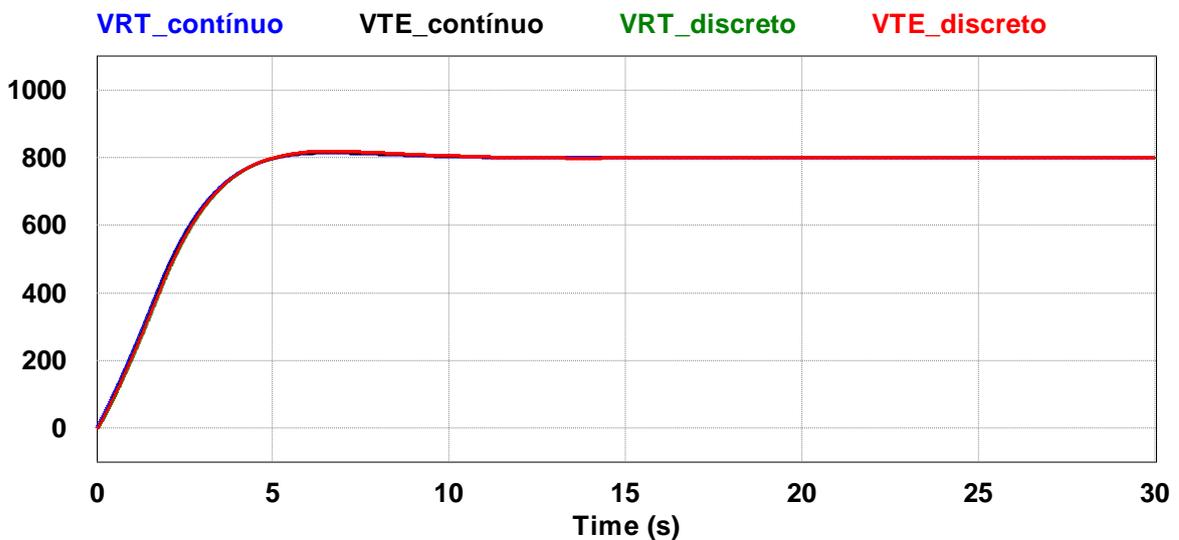
(a) Contínuo



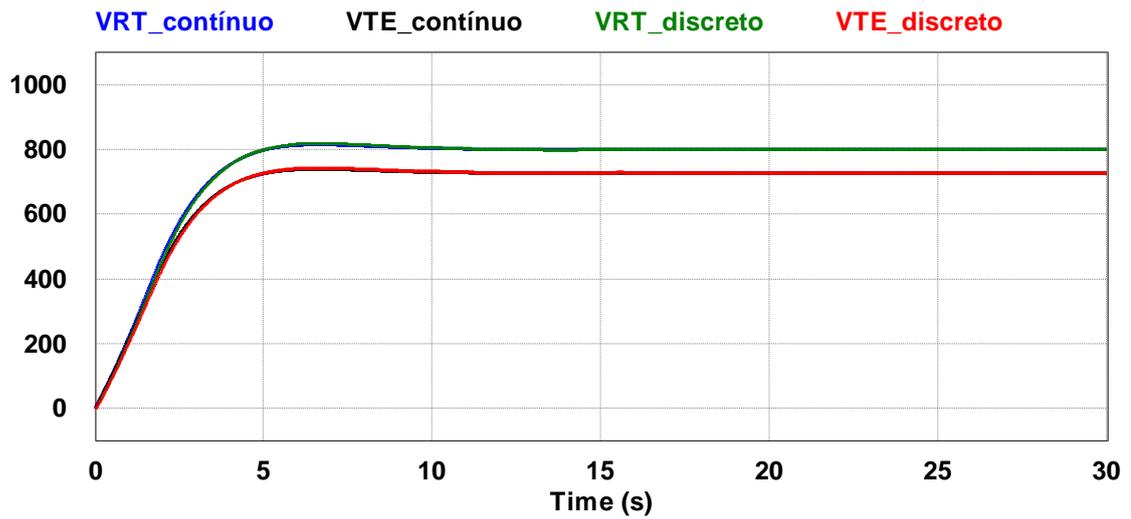
Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 58 mostra dois sistemas (contínuo e discreto) elaborados no PSIM para efetuar o teste do modelo dinâmico do trator elétrico em movimento longitudinal, dispondo dos seguintes sinais: referência de velocidade (REF\_V) correspondente ao sinal do pedal acelerador ( $V_x$ ), referência de patinagem (REF\_PAT) correspondente ao  $\lambda_{ref}$ , velocidade da roda de tração ( $V_{RT}$ ), velocidade do trator elétrico ( $V_{TE}$ ) e sinal de controle para referência de velocidade do inversor ( $V_I$ ). Os códigos do controle digital implementados no PSIM e posteriormente no dsPIC utilizado na UCE do trator elétrico podem ser vistos no APÊNDICE B. A seguir, na Figura 59, são mostrados os resultados obtidos a partir das simulações realizadas com base nos sistemas mostrados na figura anterior.

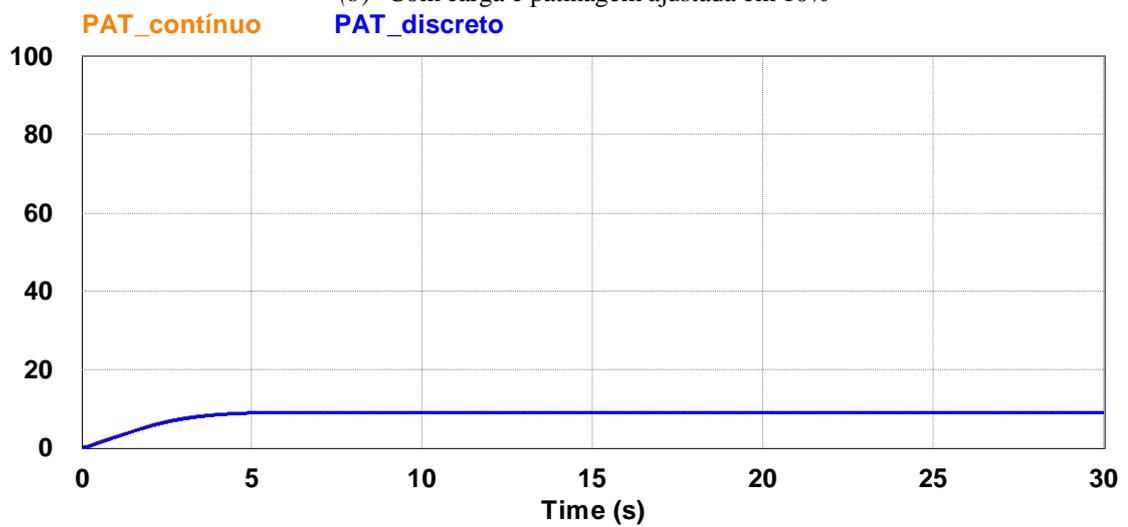
Figura 59 - Simulação trator elétrico com rotação máxima nos motores de tração ajustada em 800 rpm



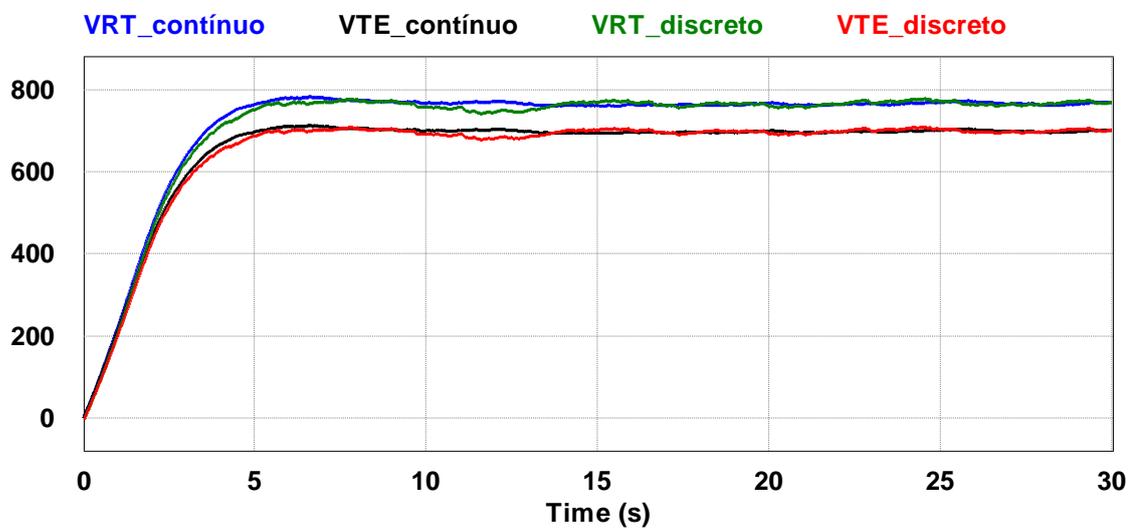
(a) Sem carga



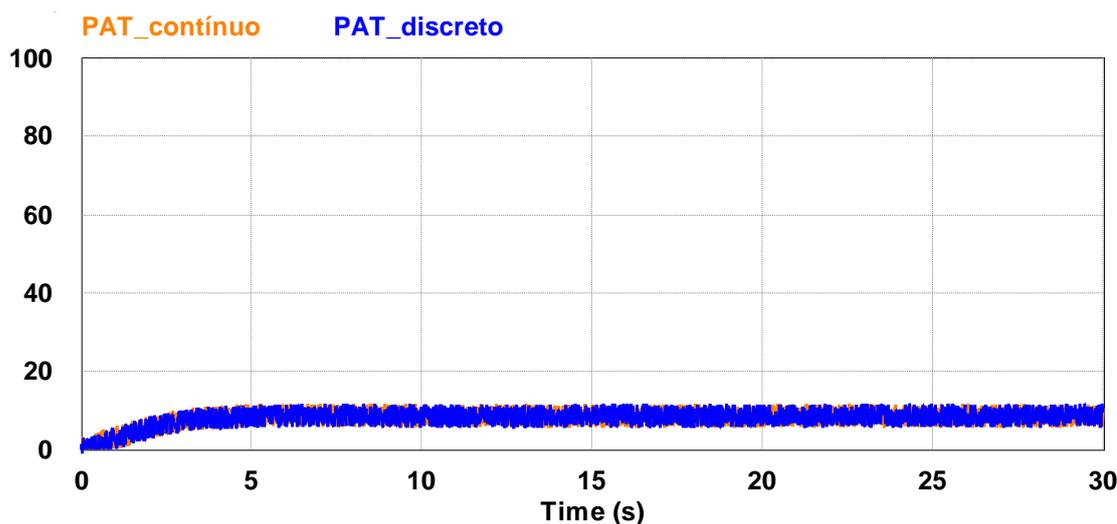
(b) Com carga e patinagem ajustada em 10%



(c) Patinagem seguindo a referência especificada



(d) Com carga, patinagem ajustada em 10% e perturbação no sinal de patinagem



(e) Patinagem seguindo a referência especificada após a perturbação

Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 59(a) traz as respostas dinâmicas dos dois sistemas para o trator elétrico sem carga e com sinal de referência de velocidade aplicado de 800 rpm. Verifica-se que, nesse primeiro caso, a velocidade desenvolvida pela roda de tração seguiu a velocidade de referência ao longo do tempo sem a presença de patinagem ( $V_{TE}$  igual a  $V_{RT}$ ). No segundo caso, visto na Figura 59(b), têm-se as respostas dinâmicas dos dois sistemas do trator elétrico com carga e com mesmo sinal de referência de velocidade aplicado. A referência de patinagem foi ajustada em 10%. Observa-se que a velocidade desenvolvida pela roda de tração seguiu a velocidade de referência ao longo do tempo, porém, a velocidade do trator ficou abaixo, devido à presença da patinagem. No entanto, a patinagem foi mantida de acordo com a referência especificada de 10%. Na Figura 59(c) é possível verificar os gráficos de patinagem dos dois sistemas seguindo a referência especificada. Por fim, no terceiro caso, foram mantidos os valores de referências de velocidade e patinagem e adicionada uma pequena perturbação ( $p$ ) nos sinais de patinagem. A carga utilizada também foi a mesma do segundo caso. A Figura 59(d) apresenta as respostas dinâmicas dos dois sistemas para o trator elétrico nesse terceiro caso. É possível observar que houve uma pequena redução nas velocidades, comparado com o caso anterior. Essa redução se deve ao fato de, com a inserção da perturbação, o controle ter atuado na limitação da velocidade da roda de tração para assegurar que o trator elétrico assumisse uma velocidade capaz de manter a patinagem no valor de referência especificado de 10%. Na Figura 59(e) são apresentados os gráficos de patinagem dos dois sistemas, seguindo a referência especificada.

Neste Capítulo 4 foi destacada toda a estrutura do sistema de propulsão proposto para o protótipo do trator elétrico. Foi feita, também, toda a abordagem sobre a UCE implementada, e foram apresentadas as principais funcionalidades de acionamento e controle

propostas para flexibilizar o uso do referido veículo e otimizar o seu desempenho. Dentro dessas proposições, o desenvolvimento da estratégia controle de patinação adotada foi mostrado e validado através de simulações com o PSIM para sua posterior implementação prática.

## 5 IMPLEMENTAÇÕES E RESULTADOS EXPERIMENTAIS

O Capítulo 5 traz a plataforma completa de testes utilizada para analisar experimentalmente o trator elétrico. Em seguida, os resultados experimentais alcançados são apresentados para avaliação final da hipótese baseada nos dados obtidos durante os procedimentos experimentais realizados.

Para investigar e obter resultados comparáveis, a metodologia utilizada para os testes práticos de tração é baseada no documento CODE 2 (OECD, 2017), usado para testes de performance de tratores agrícolas. Com os testes realizados fica possível avaliar o pleno funcionamento do sistema de propulsão, o desempenho obtido pelo trator elétrico e constatar seu rendimento médio. Assim, os resultados experimentais obtidos possibilitam averiguar a viabilidade técnica do trator elétrico em termos de desempenho.

### 5.1 Estrutura de testes

Um dos objetivos essenciais do presente trabalho é avaliar a performance do trator elétrico com um sistema de acionamento customizado e estratégia de controle proposta. Para isso, foram utilizados dois tipos de superfície para atuação experimental: pista de concreto e solo firme. Logo, a Figura 60 destaca a sequência proposta de testes realizados conforme a técnica de controle utilizada nos inversores (vetorial com *encoder*) para o acionamento dos motores de tração e o uso do controle de patinagem implementado na UCE, apresentado na tese.

Figura 60 - Sequência de testes de acordo com a técnica utilizada no acionamento dos motores



Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Figura 60 é facilmente possível observar os tipos de testes realizados, a quantidade respectiva de ensaios para cada tipo de teste e as distâncias percorridas em cada

ensaio. Foram realizadas sete baterias de testes, totalizando dezenove ensaios, com e sem carga acoplada. Inicialmente, foi feito um teste preliminar em um circuito de um quilômetro (1 km) para uma avaliação inicial de funcionamento e performance, realizado dentro do Campus do Pici (UFC). Em seguida, os demais testes foram realizados nos dois tipos de superfície para atuação experimental previstos: pista de concreto e solo firme. Em cada bateria de teste foram realizados três ensaios para efeito de comparação. No primeiro cenário, os testes com o trator elétrico foram realizados na pista de concreto padrão do Departamento de Engenharia Agrícola (DENA), da Universidade Federal do Ceará - UFC. A carga fixada ao trator elétrico na execução dos testes de tração em pista de concreto foi a de um trator convencional (Valtra A Series One) com um reboque de dois eixos acoplado a ele. Já no segundo cenário, o campo experimental utilizado para a realização dos testes fica localizado ao lado da pista de concreto. O solo do campo experimental é classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo com textura franco-arenosa. Trata-se, portanto, de um solo firme com índice de cone em torno de 1500 kPa (que representa a resistência do solo dada pela força média por unidade de área necessária para forçar um dispositivo vertical em forma de cone no solo a uma taxa constante, conforme descrito na ASAE EP542, 1999). A carga utilizada nos testes em solo firme é composta de um pulverizador agrícola acoplado a um trator ICE de 10,3 kW. Na Figura 61 é possível observar a pista de concreto utilizada; observa-se, na lateral, a área de campo experimental de solo firme.

Figura 61 - Pista de concreto padrão no Departamento de Engenharia Agrícola (DENA) – UFC



Fonte: Arquivo do autor.

(Dados geográficos da pista de teste: localização/ elevação: 3°44'47.7"S 38°34'53.8"W/ 19 m)

A Figura 62 destaca o protótipo desenvolvido e mostra toda a estrutura disponível para a realização dos testes do trator elétrico.

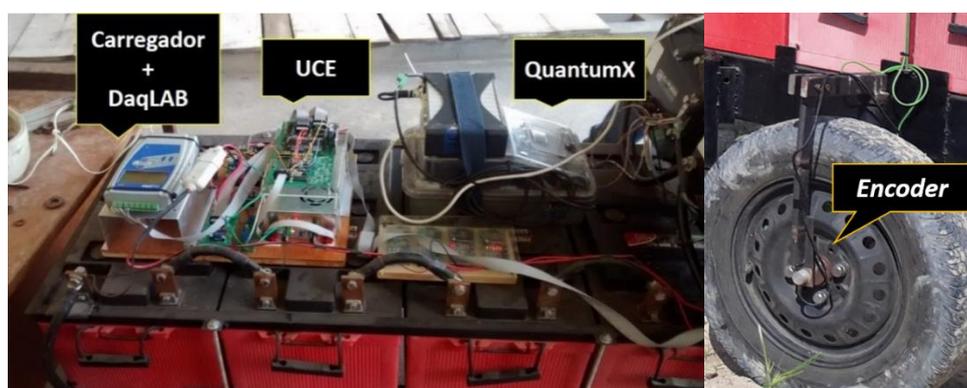
Figura 62 - Protótipo do trator elétrico sob teste



(a) Trator elétrico com estrutura para ensaios



(b) Célula de carga acoplada ao trator elétrico

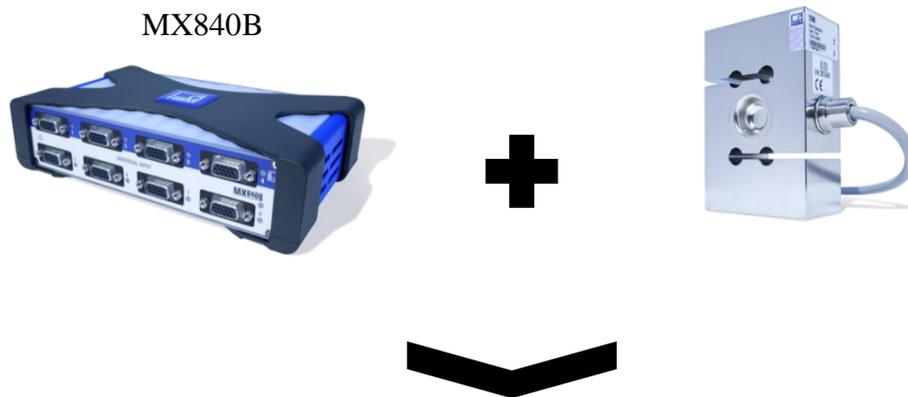


(c) Sistemas embarcados de controle, monitoramento e aquisição de dados

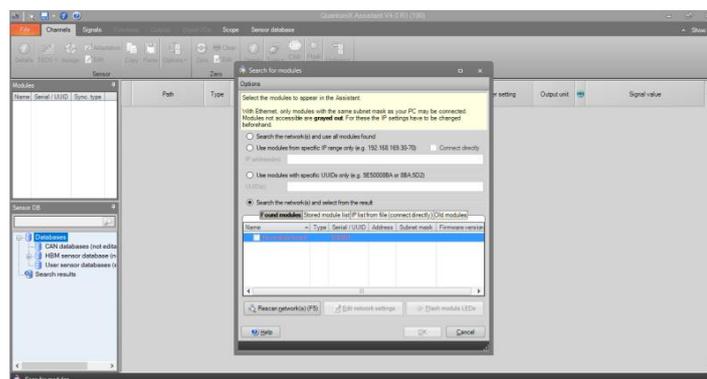
Fonte: Elaborada pelo autor.

Toda a plataforma experimental elaborada permite a avaliação de diferentes situações de atuação do trator elétrico por meio do sistema monitoramento de variáveis e aquisição de dados. São monitoradas e registradas variáveis, como a força de tração, rotação das rodas traseiras, velocidades de deslocamento e consumo das baterias. Para os testes de tração na barra, além do sistema de supervisão desenvolvido, é utilizado um módulo de medição acoplado a uma célula de carga, conforme destaca a Figura 63, para o monitoramento da força de tração. Tal acompanhamento e arquivamento de dados se dá através do *Software QuantumX Assistant*.

Figura 63 - Sistema de monitoramento da força de tração do trator elétrico  
MÓDULO DE MEDIÇÃO QUANTUMX CÉLULA DE CARGA S9M/10 kN-1



SOFTWARE QUANTUMX ASSISTANT V4.0R1



Fonte: Elaborada pelo autor.

A análise dos testes de tração usa a equação (5.1) para calcular a força de tração média.

$$F_{tm} = \frac{\sum_{i=1}^n F_i}{t_p} \quad (5.1)$$

Onde:

$F_{tm}$  = força de tração líquida média (kN);

$F_i$  = força de medição instantânea na célula de carga durante o intervalo de tempo entre real e último medição (kN/s);

$t_p$  = tempo de execução do teste.

A potência da barra de tração disponível é uma função da força de tração e da velocidade, e pode ser calculada usando a expressão (5.2):

$$P_{bt} = \frac{F_{tm} \cdot V}{3,6} \quad (5.2)$$

Onde:

$P_{bt}$  = potência da barra de tração (kW);

$F_{tm}$  = força de tração média (kN);

$V$  = Velocidade (km/h).

A eficiência do trator elétrico é dada pela relação da potência de saída na barra de tração e a potência disponibilizada pelas baterias, conforme (5.3).

$$E_{et} = \frac{P_{bt}}{P_b} \cdot 100 \quad (5.3)$$

Onde:

$E_{et}$  = eficiência do trator elétrico (%);

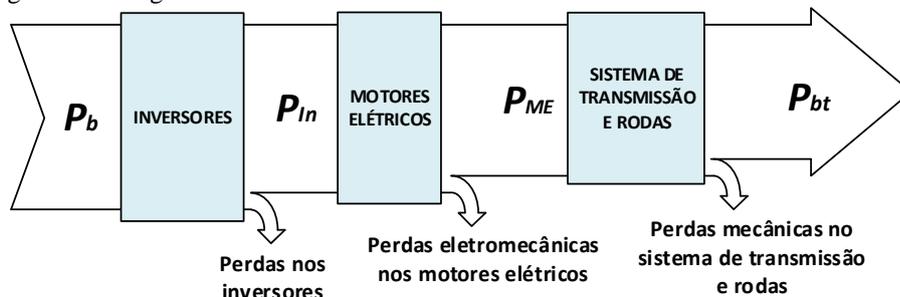
$P_{bt}$  = potência da barra de tração (kW);

$P_b$  = potência das baterias.

O valor de eficiência teórica global do trator elétrico depende dos valores individuais de eficiência dos seus componentes. Assim, as perdas no trator elétrico estão diretamente relacionadas com o rendimento dos inversores, motores elétricos, sistema de transmissão mecânica. Contudo, as grandes perdas ocorrem na interação entre as rodas e a

superfície de trabalho. Nessa interface, são gerados forças e fenômenos relacionados com a tração, resistência ao rolamento, patinagem, flutuação, interferindo no desempenho do trator. O diagrama da Figura 64 mostra o fluxo de potência no trator elétrico. À esquerda tem-se a potência das baterias, à direita a potência na barra de tração, e apontando para baixo as diversas perdas de potência existente.

Figura 64 - Diagrama do Fluxo de Potência



Fonte: Elaborada pelo autor.

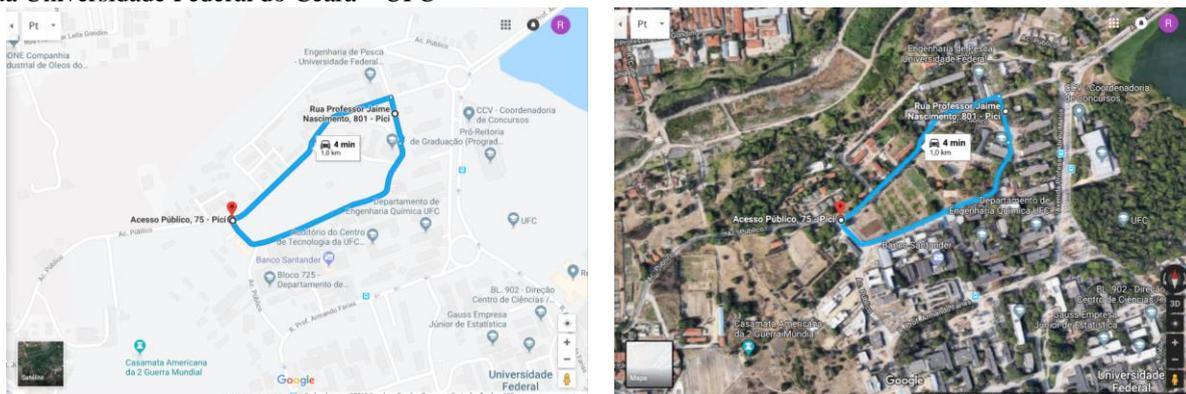
## 5.2 Resultados experimentais

Os ensaios permitem averiguar o funcionamento do sistema de propulsão (motores elétricos, inversores e a unidade de comando eletrônico) do trator elétrico. Por meio do registro das variáveis monitoradas é possível analisar o seu desempenho. Os resultados são apresentados conforme a sequência de testes destacada anteriormente. Vale ressaltar que após o teste preliminar, para cada tipo de teste foram efetuados três ensaios, no intuito de comparar e validar a uniformidade das amostras. Para facilitar a abordagem dos testes será adotada a seguinte legenda: TTE# (Teste Trator Elétrico).

### 5.2.1 Teste preliminar sem carga

Após o trator elétrico ser devidamente ajustado e pré-avaliado em laboratório o mesmo foi submetido a um teste preliminar sem carga em um circuito de um quilômetro (1 km) (TTE#00). Na Figura 65 é possível observar o circuito percorrido dentro do Campus do Pici - UFC. Tal circuito apresenta diferentes superfícies e elevações, sendo possível observar o completo funcionamento do trator elétrico (sistema de propulsão e sistemas mecânicos).

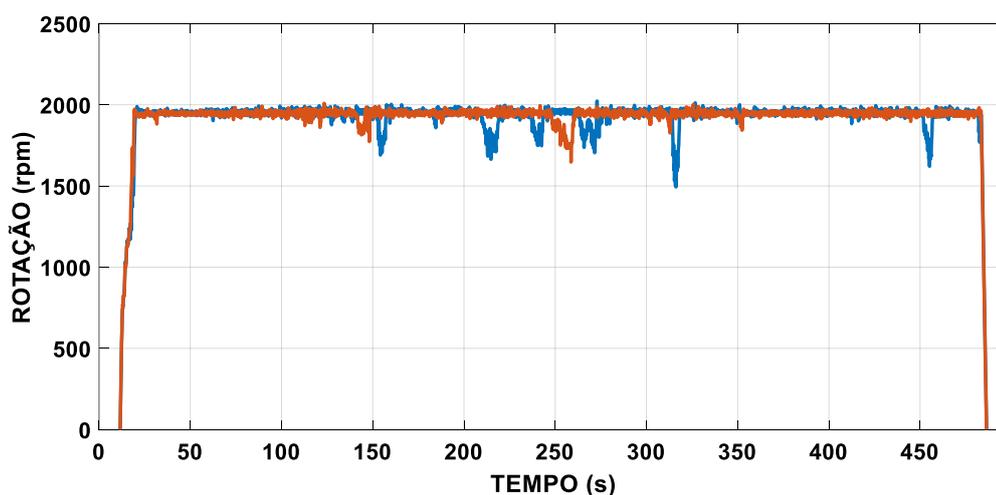
Figura 65 - Teste com trator elétrico TTE#00 sem carga com deslocamento de 1 km realizado no Campus do Pici da Universidade Federal do Ceará – UFC



Fonte: Elaborada pelo autor.

Para o teste preliminar TTE#00, a rotação máxima dos motores elétricos foi ajustada em 2000 rpm. Com essa rotação, o trator elétrico pode atingir uma velocidade média de aproximadamente 8,17 km/h (2,27 m/s). Essa velocidade foi adotada para aplicação do trator elétrico em trajetos de deslocamento, sem a necessidade de acoplamento de carga ou implemento. A Figura 66 destaca o comportamento gráfico das rotações nos motores elétricos ao longo da execução do circuito de um quilômetro realizado com o trator elétrico.

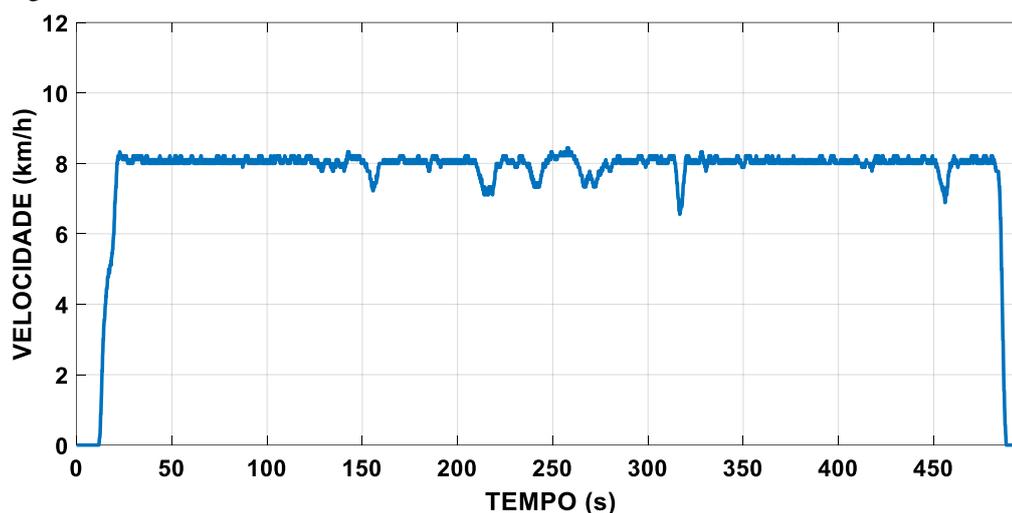
Figura 66 - Gráfico de rotação dos motores de tração nas rodas de tração durante o teste realizado em circuito de 1 km com o trator elétrico



Fonte: Elaborada pelo autor.

A seguir, na Figura 67, tem-se o gráfico de velocidade do teste preliminar. O trator elétrico atingiu uma velocidade média de aproximadamente 8 km/h (2,22 m/s). Com isso, o percurso total foi realizado em 7,5 min (450,45 s).

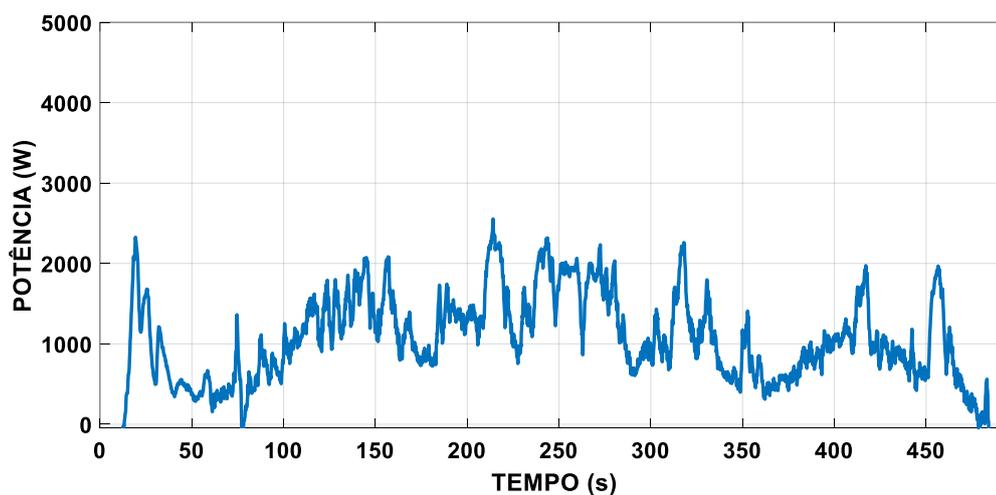
Figura 67 - Gráfico de velocidade do trator elétrico durante o teste realizado em circuito de 1 km



Fonte: Elaborada pelo autor.

Para esse teste (TTE#00), a potência média nas baterias foi de 1077,77 W. A Figura 68 mostra o gráfico de potência nas baterias do teste preliminar. O consumo energético para percorrer o trajeto foi de 0,137 kWh. Assim, levando-se em consideração o referido dado de consumo nas condições apresentadas, tem-se que o trator elétrico obteve um desempenho de 7,3 km/kWh.

Figura 68 - Gráfico de potência do banco de baterias do trator elétrico durante o teste realizado em circuito de 1 km



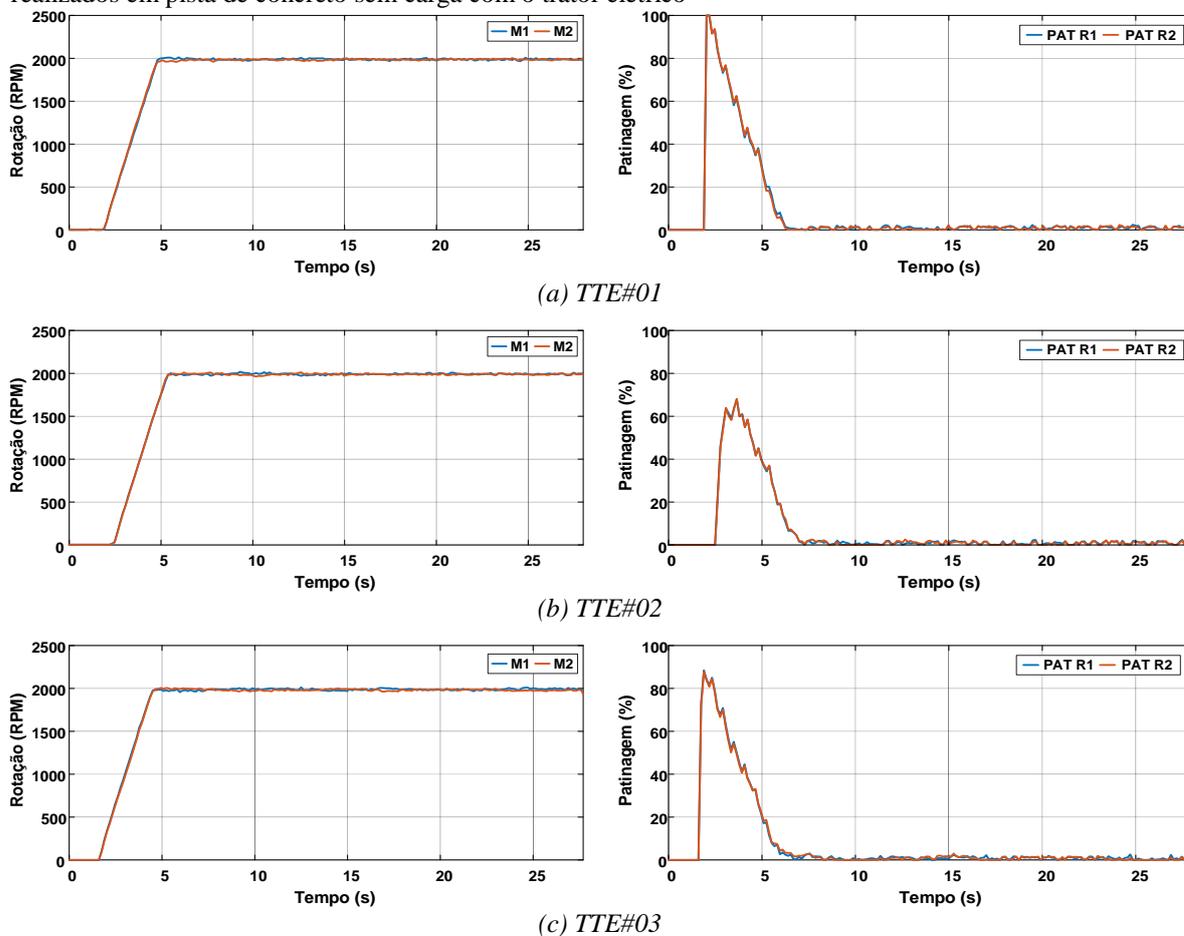
Fonte: Elaborada pelo autor.

### 5.2.2 Teste em pista de concreto sem carga

Os ensaios com trator elétrico em pista de concreto sem carga, TTE#01 a TTE#03, foram executados em uma distância de 50 m. As rotações dos motores de tração foram mantidas

em 2000 rpm. A Figura 69 destaca os gráficos de rotação e patinação nas duas rodas de tração, obtidos nos três ensaios.

Figura 69 - Gráficos de rotação dos motores de tração e patinação nas rodas de tração durante os três ensaios realizados em pista de concreto sem carga com o trator elétrico

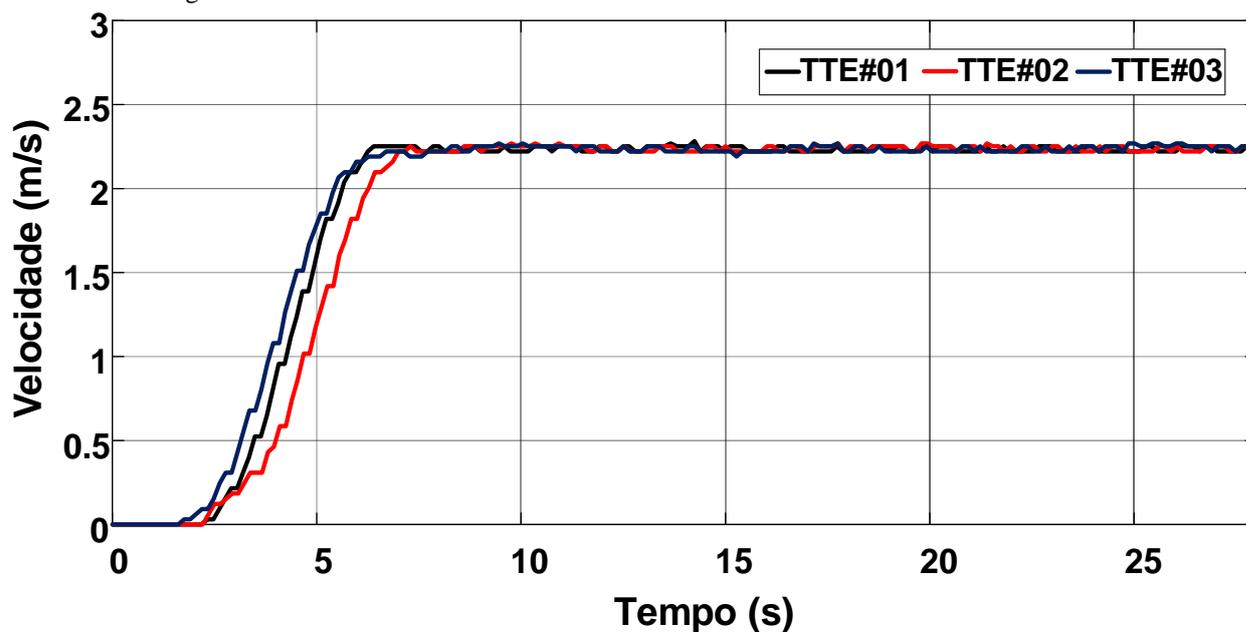


Fonte: Elaborada pelo autor.

É possível observar na figura as rampas de acelerações e a manutenção das rotações conforme valor ajustado, ou seja, 2000 rpm. Após o tempo transitório de arrancada do trator elétrico, a patinação se manteve entre 0,88% e 1,35%, em média, compatível com o tipo de superfície.

A velocidade média desenvolvida pelo trator elétrico nos três ensaios variou entre 2,23 m/s e 2,24 m/s. A Figura 70 apresenta os gráficos de velocidade dos ensaios TTE#01 a TTE#03.

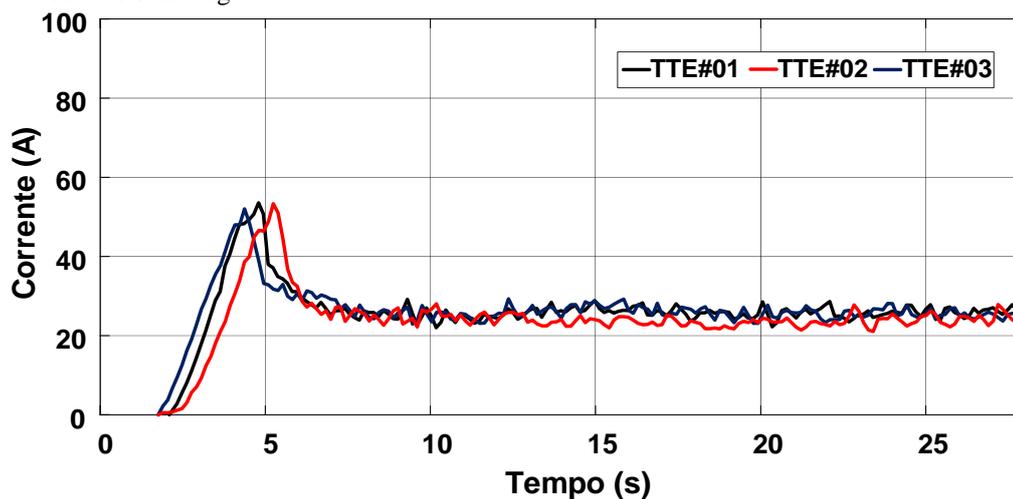
Figura 70 - Gráfico comparativo de velocidade do trator elétrico durante os três ensaios realizados em pista de concreto sem carga



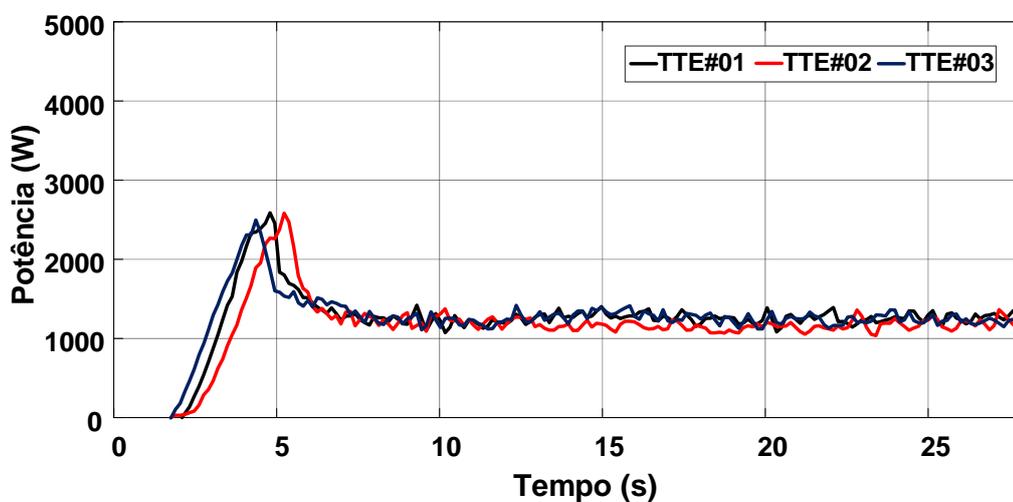
Fonte: Elaborada pelo autor.

Em relação ao banco de baterias, a média da corrente variou entre 24,25 A e 26,07 A durante a execução dos ensaios. Com isso, teve-se uma potência média, variando entre 1188,41 W e 1268,3 W. Tendo em vista esses resultados, é possível destacar que a energia consumida nos ensaios em pista de concreto sem carga para o percurso de 50 m oscilou entre 7,4 Wh e 7,89 Wh. Na Figura 71 têm-se os gráficos de corrente e potência do banco de baterias do trator elétrico compilados nessa fase de teste. Em seguida, tem-se uma tabela resumo com os dados dos ensaios TTE#01 a TTE#03 (Tabela 1).

Figura 71 - Medições realizadas no banco de baterias durante os três ensaios realizados em pista de concreto sem carga



(a) Gráfico comparativo de corrente no banco de baterias do trator elétrico



(b) Gráfico comparativo de potência no banco de baterias do trator elétrico

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 1 - Folha de dados TTE#01 a TTE#03

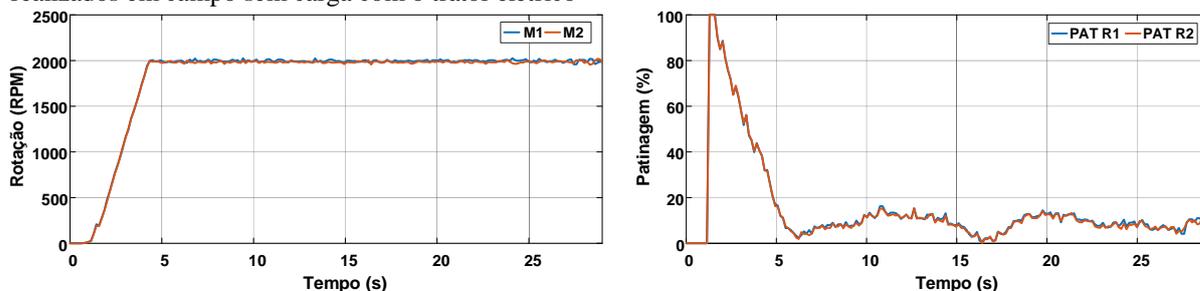
TTE#	01	02	03
Tempo de execução do teste (50 m) [s]	22,32	22,42	22,42
Velocidade [m/s]	2,24	2,23	2,23
Velocidade [km/h]	8,06	8,03	8,03
Patinagem [%]	1,02/ 0,88	1,35/ 1,28	1,06/ 0,96
Corrente média nas baterias [A]	25,85	24,25	26,07
Potência média nas baterias [W]	1259	1188,41	1268,3
Energia [Wh]	7,81	7,4	7,89

Fonte: Elaborada pelo autor.

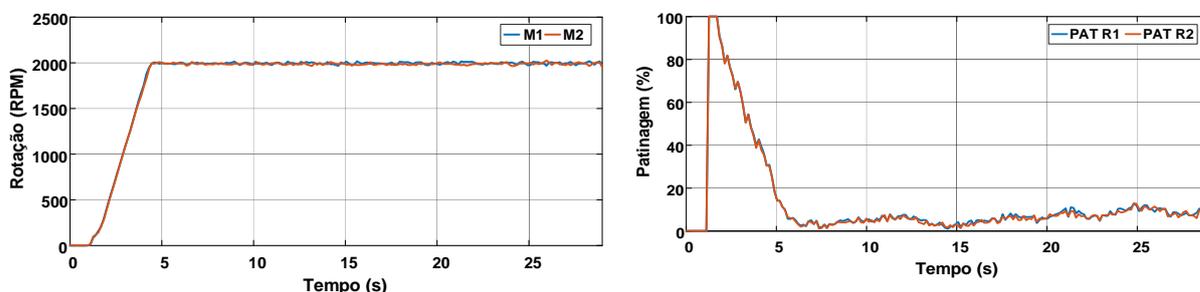
### 5.2.3 Teste em solo firme sem carga

Em sequência, os ensaios em solo firme e sem carga com trator elétrico, TTE#04 a TTE#06, foram executados também em uma distância de 50 m. A exemplo dos ensaios anteriores, as rotações dos motores de tração foram mantidas em 2000 rpm. A Figura 72 destaca os gráficos de rotação e patinagem nas duas rodas de tração, obtidos nos três ensaios realizados.

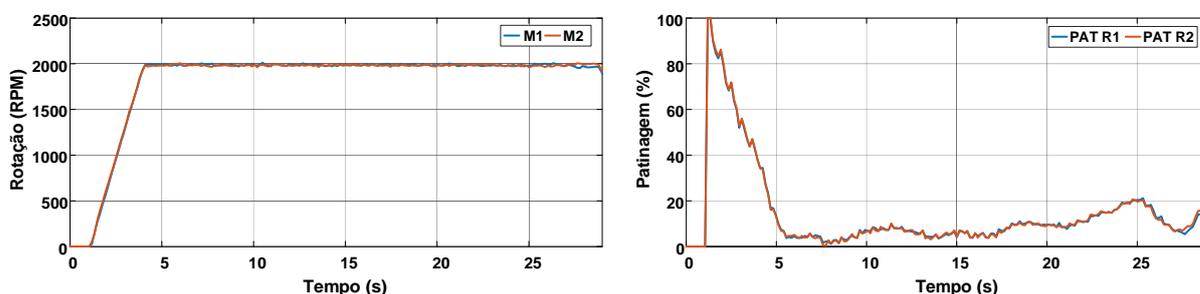
Figura 72 - Gráficos de rotação dos motores de tração e patinagem nas rodas de tração durante os três ensaios realizados em campo sem carga com o trator elétrico



(a) TTE#04



(b) TTE#05



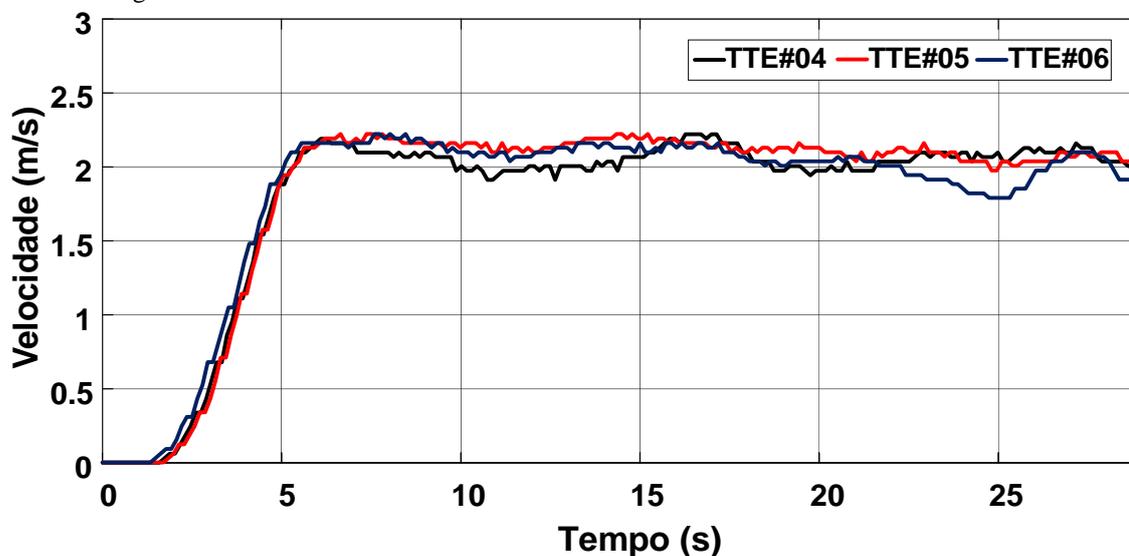
(c) TTE#06

Fonte: Elaborada pelo autor.

Com os gráficos da Figura 72 é possível observar as rampas de acelerações e a manutenção das rotações em 2000 rpm, conforme valor ajustado. Após o tempo transitório de arrancada do trator elétrico, a patinagem oscilou entre 5,94% e 9,02%, em média. Importante observar que a patinagem nesses ensaios apresentou maior valor percentual, comparado aos ensaios em pista de concreto. Esse aumento está diretamente relacionado com o tipo de superfície e a resistência oferecida para o deslocamento do trator elétrico.

A velocidade média desenvolvida pelo trator elétrico nos três ensaios em solo firme sem carga variou entre 2,06 m/s e 2,12 m/s. A Figura 73 apresenta o gráfico de velocidade dos ensaios TTE#04 a TTE#06.

Figura 73 - Gráfico comparativo de velocidade do trator elétrico durante os três ensaios realizados em solo firme sem carga

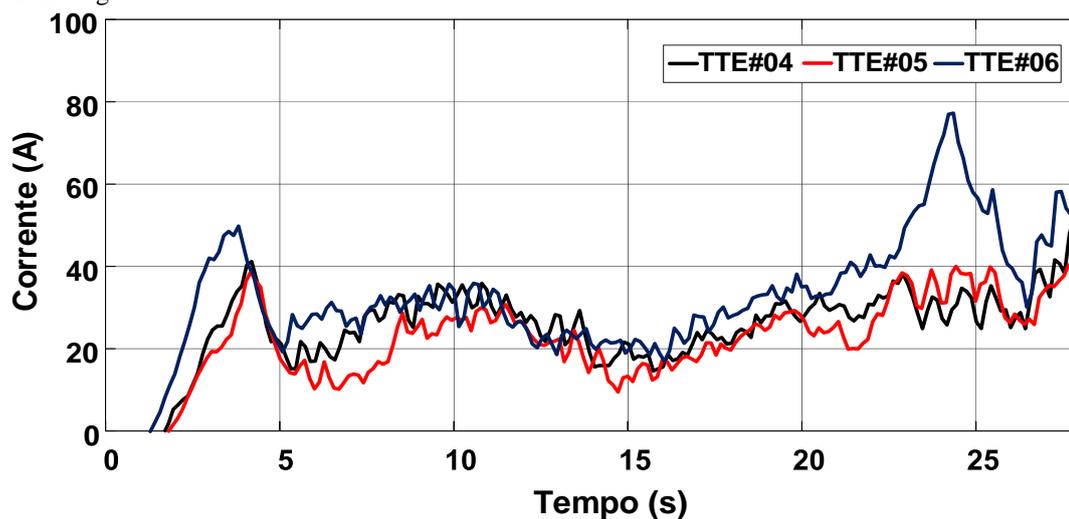


Fonte: Elaborada pelo autor.

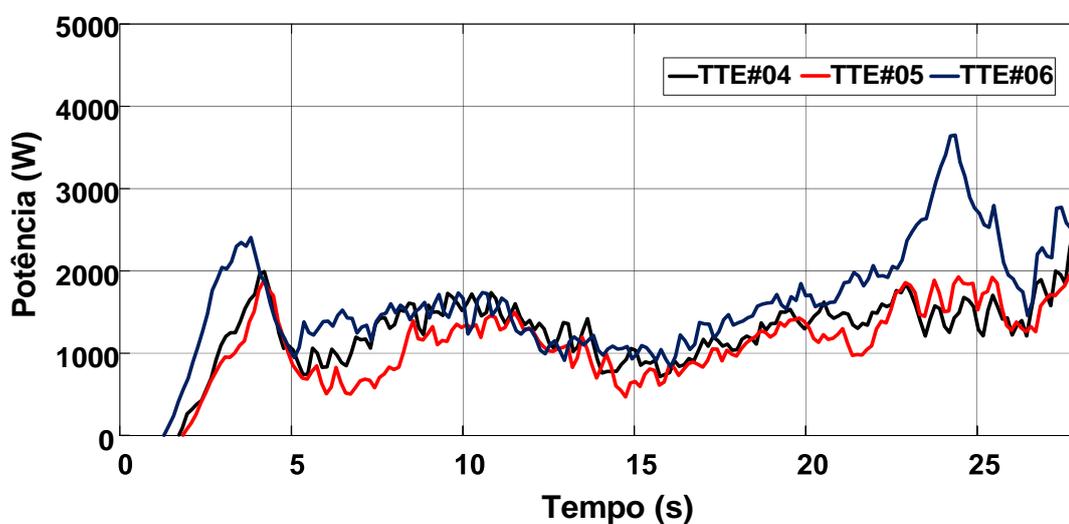
Para os três ensaios em solo firme e sem carga, a média da corrente no banco de baterias do trator elétrico variou entre 24,29 A e 34,37 A durante a execução. Desse modo, a média da potência variou entre 1178,05 W e 1654,79 W. Com esses resultados, ressalta-se que a energia consumida nos referidos ensaios, no percurso de 50 m, oscilou entre 7,72 Wh e 11,04 Wh. Na Figura 74 têm-se os respectivos gráficos de corrente e potência do banco de baterias do trator elétrico nessa fase de teste.

Também, em seguida, é apresentada a Tabela 2 com o resumo dos dados dos ensaios TTE#04 a TTE#06. Com tais dados é possível constatar que, com o aumento característico da patinação (comparando os ensaios nos dois tipos de superfícies), houve uma consequente queda na velocidade resultante do trator elétrico e um pequeno aumento no consumo de energia.

Figura 74 - Medições realizadas no banco de baterias durante os três ensaios realizados em campo sem carga



(a) Gráfico comparativo de corrente no banco de baterias do trator elétrico



(b) Gráfico comparativo de potência no banco de baterias do trator elétrico

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 2 - Folha de dados TTE#04 a TTE#06

TTE#	04	05	06
Tempo de execução do teste (50 m) [s]	24,27	23,58	24,27
Velocidade [m/s]	2,06	2,12	2,06
Velocidade [km/h]	7,41	7,63	7,41
Patinagem [%]	9,02/ 8,68	6,31/ 5,94	8,69/ 8,61
Corrente média nas baterias [A]	27,43	24,29	34,37
Potência média nas baterias [W]	1328,98	1178,05	1654,79
Energia [Wh]	8,96	7,72	11,04

Fonte: Elaborada pelo autor.

### 5.2.4 Teste em pista de concreto com carga

Com os ensaios de tração realizados nessa fase de teste é possível avaliar o desempenho dinâmico do trator elétrico através da força exercida na barra de tração. Para isso, foi acoplado um trator convencional (Valtra A Series One) juntamente com um reboque de dois eixos. Os ensaios também foram desenvolvidos na pista de concreto padrão com um deslocamento de 50 m. Resalta-se, ainda, que as rotações dos motores elétricos foram reajustas para esses testes e que nenhum mecanismo de lastragem foi utilizado nessa etapa. A Figura 75 mostra o trator elétrico em ação durante essa bateria de teste.

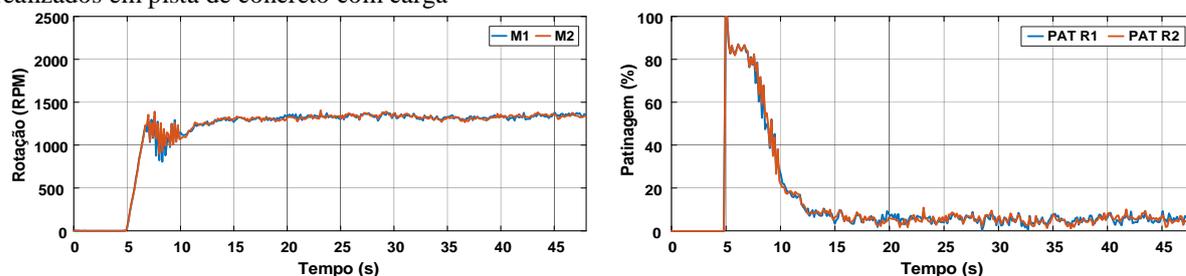
Figura 75 - Teste de tração em pista de concreto padrão do Departamento de Engenharia Agrícola (DENA)- UFC



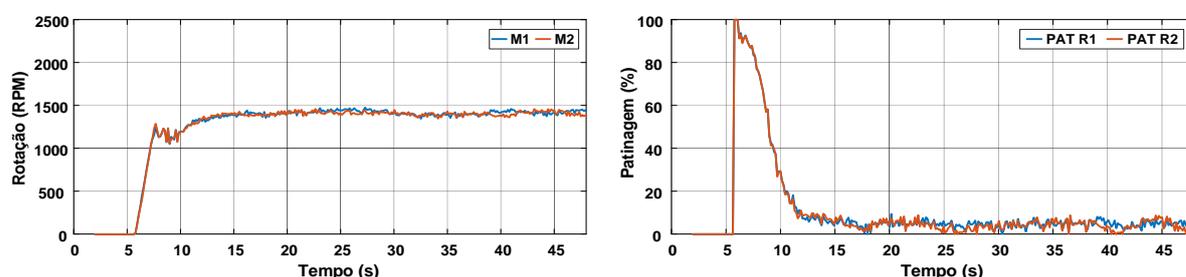
Fonte: Arquivo do autor.

Os ensaios com trator elétrico em pista de concreto e com carga, TTE#07 a TTE#09, foram executados também em uma distância de 50 m. As rotações dos motores de tração foram ajustadas em 1450 rpm para garantir uma velocidade segura de trabalho sem necessitar a utilização de lastro no trator. A Figura 76 destaca os gráficos de rotação e patinagem nas duas rodas de tração obtidos nos três ensaios realizados.

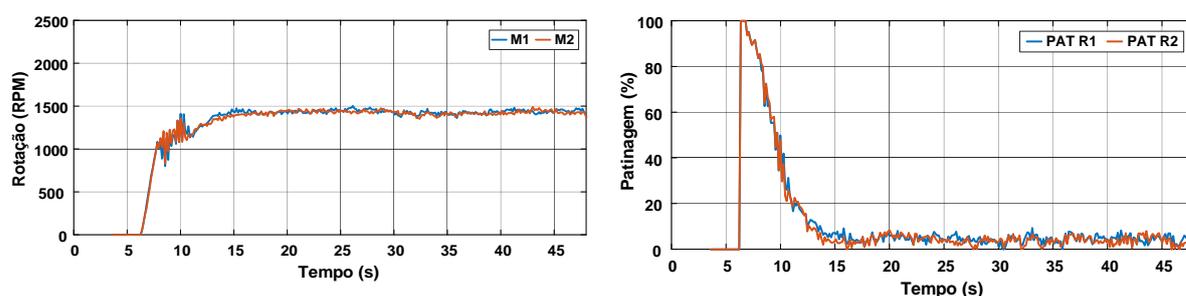
Figura 76 - Gráficos de rotação dos motores de tração e patinagem nas rodas de tração durante os três ensaios realizados em pista de concreto com carga



(a) TTE#07



(b) TTE#08



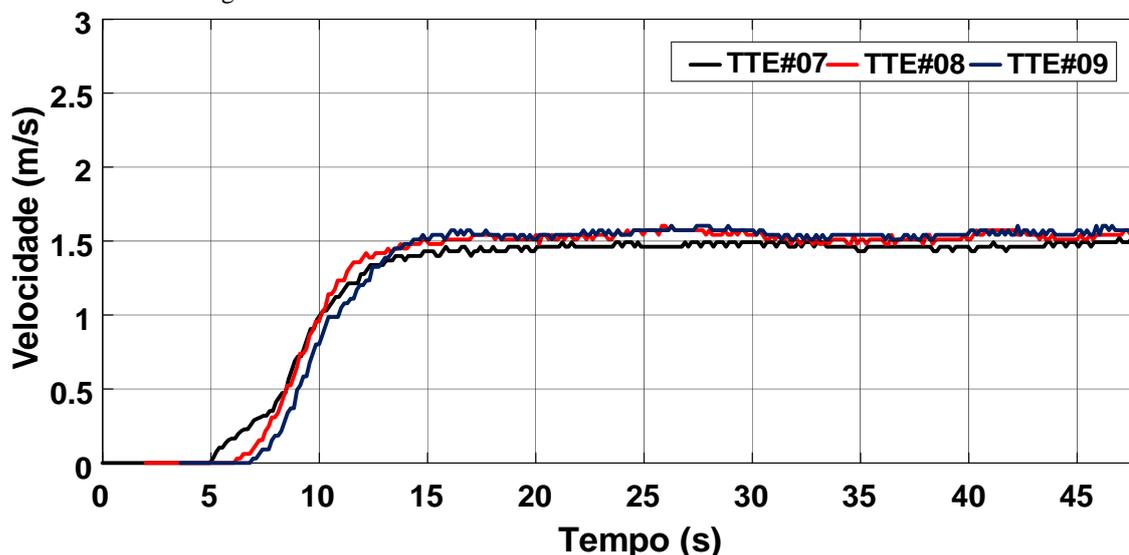
(c) TTE#09

Fonte: Elaborada pelo autor.

É possível verificar nos gráficos acima as rampas de acelerações e a manutenção das rotações dos motores de tração em torno dos 1450 rpm, conforme ajuste feito. Após o tempo transitório de arrancada do trator elétrico com carga, a patinagem oscilou entre 2,72% e 4,8%, em média. Vale destacar que a patinagem nesses ensaios, em pista de concreto e com carga, apresentou um valor percentual próximo do recomendado, conforme ASAE (2006), apresentado no Capítulo 3.

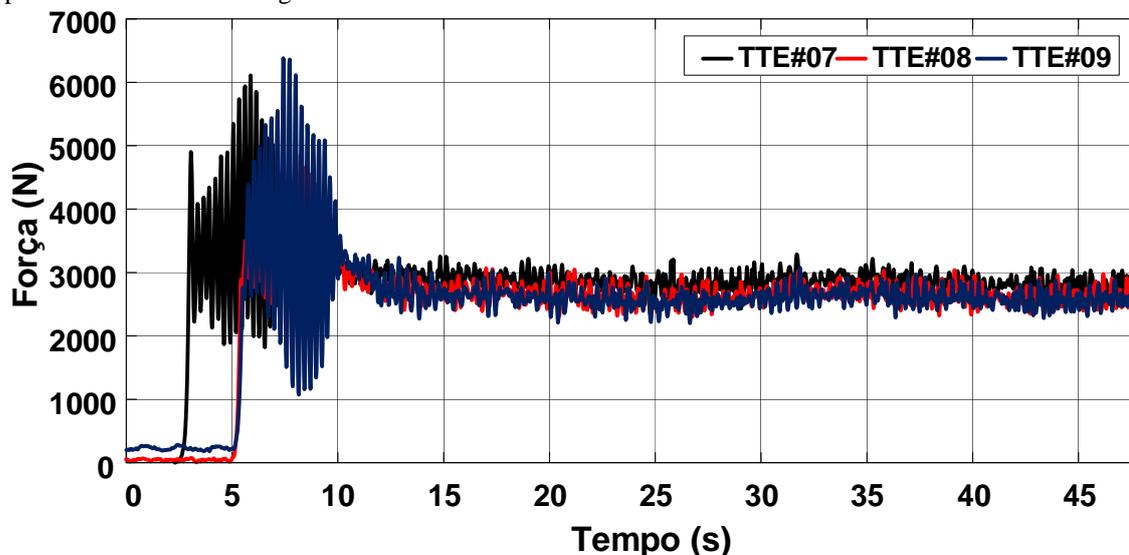
Nos três ensaios em pista de concreto e com carga, a velocidade média desenvolvida pelo trator elétrico variou entre 1,465 m/s e 1,547 m/s, gerando uma força de tração média entre 2602,46 N e 2870,22 N. A potência média da barra de tração variou entre 4026 W e 4204,87W. Têm-se nas Figuras 77 e 78 os gráficos de velocidade e força, respectivamente, dos referidos ensaios (TTE#07 a TTE#09).

Figura 77 - Gráfico comparativo de velocidade do trator elétrico durante os três ensaios realizados em pista de concreto com carga



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 78 - Gráfico comparativo de força medida na barra de tração durante os três ensaios realizados em pista de concreto com carga

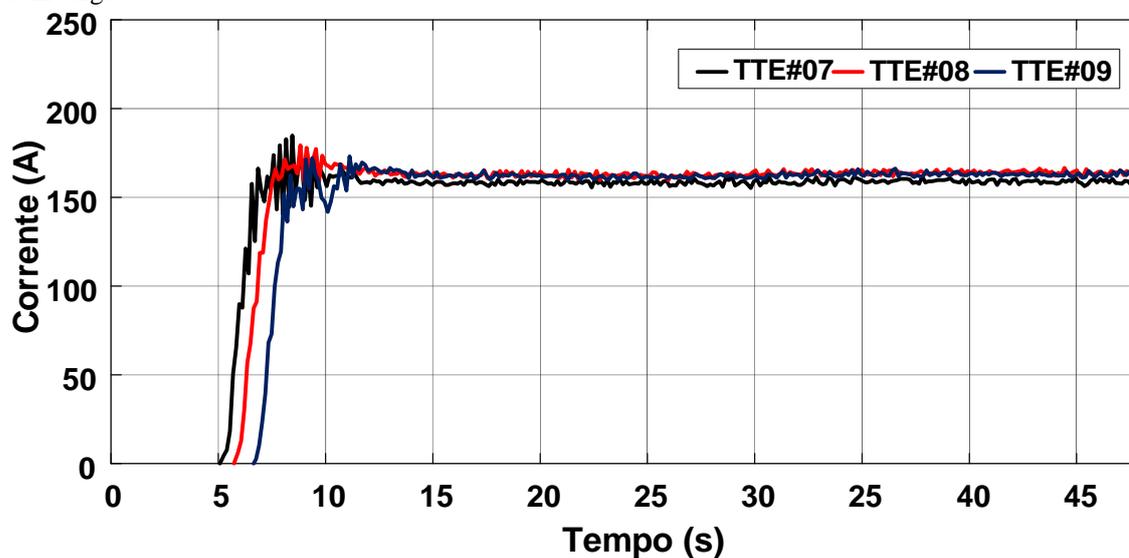


Fonte: Elaborada pelo autor.

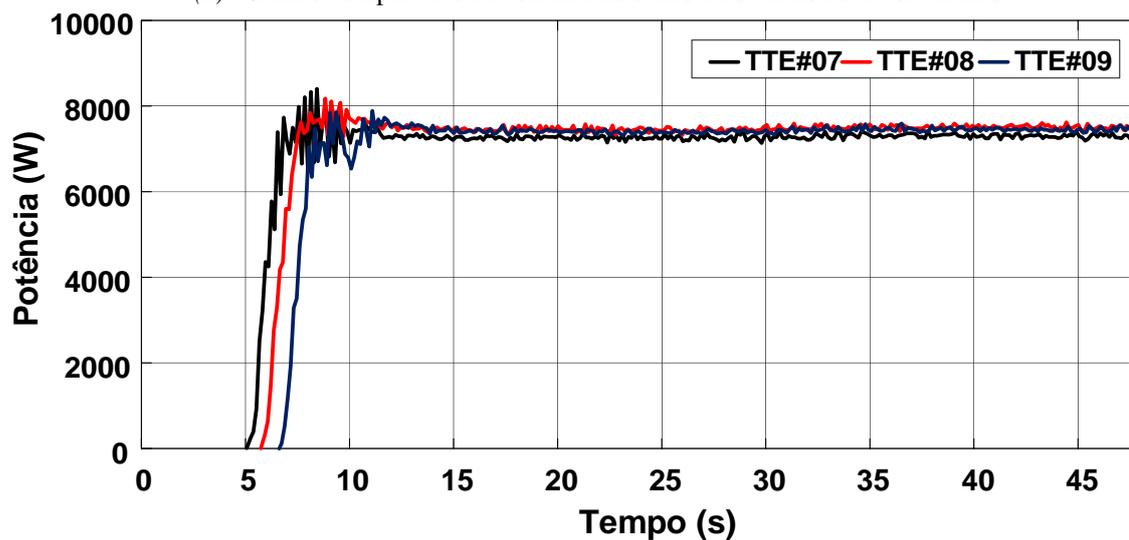
Durante a execução dos três ensaios em pista de concreto e com carga, a média da corrente no banco de baterias do trator elétrico variou entre 158,56 A e 163,27 A. Dessa maneira, a média da potência variou entre 7275 W e 7475,71 W. Com esses resultados, resalta-

se que a energia consumida nos referidos ensaios, no percurso de 50 m, oscilou entre 66,7 Wh e 69 Wh. A eficiência do trator elétrico variou entre 54,18% e 57,8%, superior a um trator convencional com motor de combustão interna (MCI). Na Figura 79, têm-se os respectivos gráficos de corrente e potência do banco de baterias do trator elétrico nesta fase de teste.

Figura 79 - Medições realizadas no banco de baterias durante os três ensaios realizados em pista de concreto com carga



(a) Gráfico comparativo de corrente no banco de baterias do trator elétrico



(b) Gráfico comparativo de potência no banco de baterias do trator elétrico

Fonte: Elaborada pelo autor.

A Tabela 3 destaca o resumo dos dados dos ensaios TTE#07 a TTE#09. Com os resultados obtidos é possível atestar a robustez do trator elétrico, tanto para o sistema de propulsão quanto para a estrutura mecânica do protótipo.

Tabela 3 - Folha de dados TTE#07 a TTE#09

TTE#	07	08	09
Tempo de execução do teste (50 m) [s]	34,15	32,72	32,32
Velocidade [m/s]	1,465	1,528	1,547
Velocidade [km/h]	5,274	5,5	5,57
Patinagem [%]	2,75/ 2,72	4,78/ 4,36	4,8/ 4,11
Corrente média nas baterias [A]	158,56	163,27	162,38
Potência média nas baterias [W]	7275	7475,71	7430,26
Energia [Wh]	69	67,94	66,7
Força média da barra de tração [N]	2870,22	2673,94	2602,46
Potência média da barra de tração [W]	4204,87	4085,78	4026
Eficiência [%]	57,8	54,65	54,18

Fonte: Elaborada pelo autor.

### 5.2.5 Teste em solo firme com carga

Para avaliar o desempenho do trator elétrico atuando em campo com carga, foram feitos testes comparativos com e sem controle de patinagem em uma nova etapa experimental. Uma foto tirada durante a realização do teste em campo pode ser vista na Figura 80.

Figura 80 - Teste em solo firme com carga: trator elétrico com carga composta por um pulverizador agrícola acoplado a um trator ICE de 10,3 kW (TC14 - Yanmar Agritech)



Fonte: Arquivo do autor.

Os testes realizados visam validar uma das principais contribuições deste trabalho que é a aplicação do conceito de controle de patinagem em um trator elétrico com objetivo de obter significativa redução no consumo de energia no desenvolvimento de atividades agrícolas. Foram realizadas três sessões de testes com três repetições em cada sessão: teste sem o controle de patinagem ativo e rotação dos motores de tração mantida em valor máximo ajustado; teste com a patinagem controlada pelo operador via pedal de aceleração; teste com controle de

patinagem ativo (pedal de aceleração totalmente acionado e rotação dos motores de tração ajustada automaticamente conforme atuação do controle).

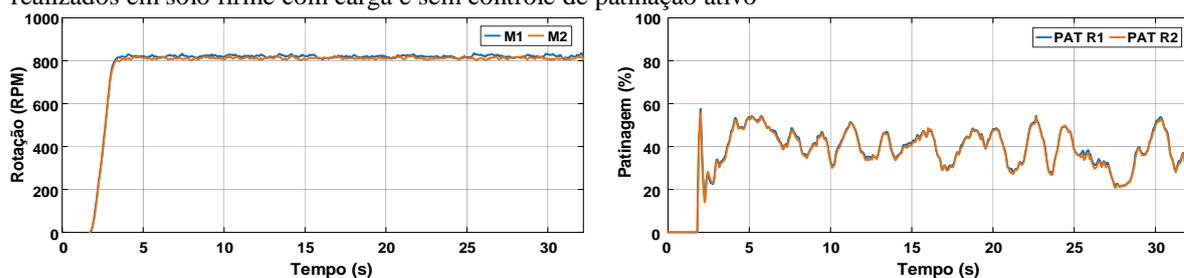
Cada ensaio foi realizado em uma área de campo com 15m de comprimento. A carga arrastada pelo trator elétrico nessa nova etapa experimental é composta de um pulverizador agrícola (abastecido com 200 litros de água cujo tanque é de 400 litros de capacidade) acoplado a um trator ICE de 10,3 kW. Nesses testes experimentais em campo, a rotação máxima dos motores elétricos foi ajustada para 800 rpm, o que garante uma velocidade média de 0,9 m/s (3.24 km/h) nas rodas de tração do trator elétrico. Para os ensaios com controle de patinagem, a referência de patinagem foi ajustada em 10%, adequada ao tipo de solo. Os dados dos resultados obtidos foram tratados e avaliados pela estatística descritiva (média aritmética, desvio padrão, variância, mediana, máximo, mínimo, simetria, curtose). Por meio do coeficiente de simetria e curtose foi determinada a normalidade dos dados avaliados adotando as recomendações de Montgomery (2004). De acordo com o autor, se os coeficientes de simetria e curtose se apresentarem entre os intervalos de -2 a 2 considera-se que os dados apresentaram distribuição normal.

Para uma avaliação qualitativa a ferramenta utilizada para análise foi a carta de controle. Essa é uma ferramenta de Controle Estatístico do Processo (CEP) que vem sendo inserida nos processos agrícolas, como opção para realizar o monitoramento e análise dos resultados de atividades relacionadas às operações agrícolas mecanizadas (MELO, 2017).

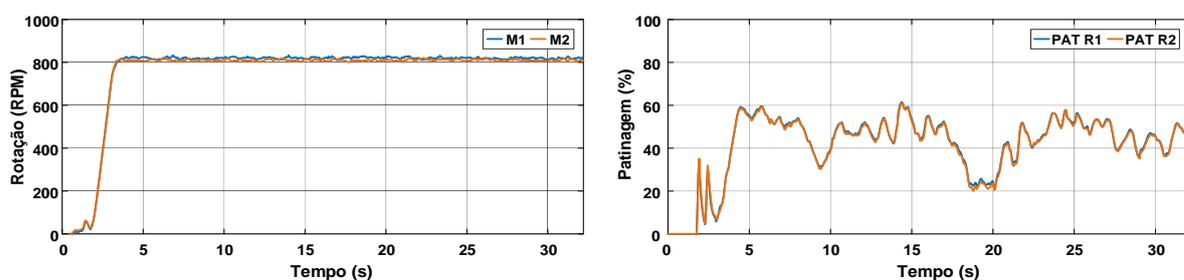
#### *5.2.5.1 Teste em solo firme com carga e sem o controle de patinagem ativo*

Os ensaios com trator elétrico em solo firme com carga e sem o controle de patinagem ativo, TTE#10 a TTE#12, foram executados em uma distância de 15 m. As rotações máximas dos motores de tração foram ajustadas e mantidas em 800 rpm. A Figura 81 destaca os gráficos de rotação e patinagem nas duas rodas de tração obtidos nos três ensaios. Através desses gráficos, fica fácil perceber que o trator elétrico manteve suas rodas de tração na rotação ajustada durante a execução dos três ensaios e que apresentou percentuais altos de patinagem.

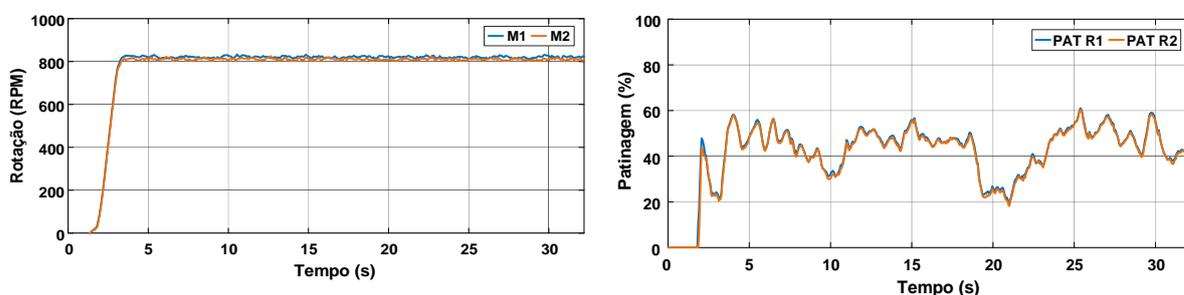
Figura 81 - Gráficos de rotação dos motores de tração e patinagem nas rodas de tração durante os três ensaios realizados em solo firme com carga e sem controle de patinação ativo



(a) TTE#10



(b) TTE#11



(c) TTE#12

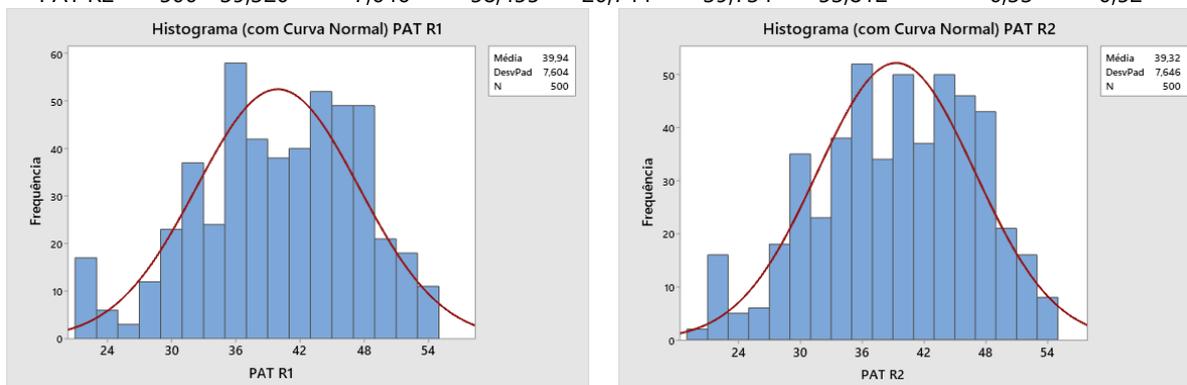
Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Figura 82 encontram-se os dados da estatística descritiva básica e os Histogramas (com curva normal) relacionados à patinagem nas duas rodas de tração, obtidos na execução do deslocamento longitudinal do protótipo para avaliação. Sem o controle ativo, a patinagem média variou entre 39,32% e 46,16%. O desvio padrão ficou entre 7,6% e 9,26%. Dessa forma, fica evidente que os valores de patinagem se encontram bem acima dos valores estipulados para atividades em solo firme (8% a 10%), indicando a irregularidade do processo não controlado.

A Figura 82 também apresenta os coeficientes de simetria e curtose, que foram os parâmetros utilizados para verificar a normalidade dos dados analisados. A simetria ficou compreendida entre -1,05 e -0,33 e a curtose entre -0,52 e 0,66. Assim, como os coeficientes de simetria e curtose encontram-se dentro do intervalo especificado por Montgomery (2004) os dados avaliados respeitaram uma distribuição normal.

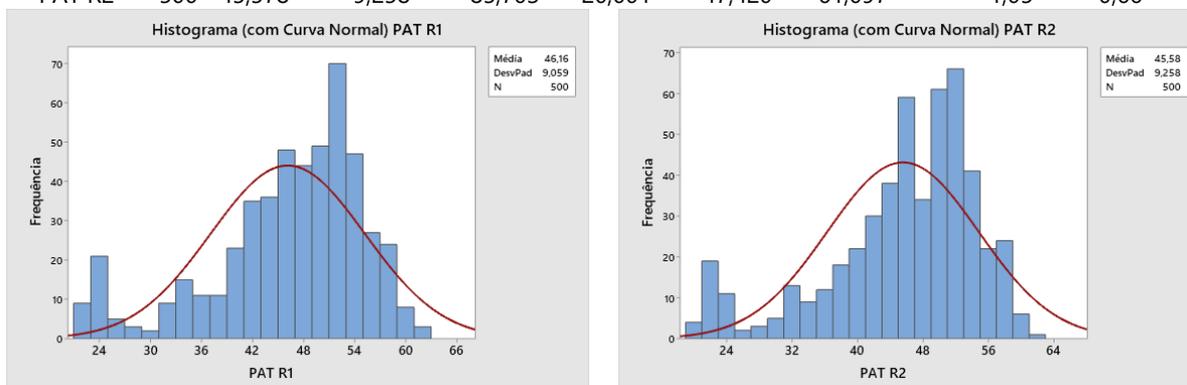
Figura 82 - Estatística descritiva relacionada aos dados de patinagem dos três ensaios com o trator elétrico realizados em solo firme com carga e sem controle de patinação ativo

Variável	N	Média	DesvPad	Variância	Mínimo	Mediana	Máximo	Assimetria	Curtose
PAT R1	500	39,943	7,604	57,821	21,083	40,662	54,255	-0,38	-0,43
PAT R2	500	39,320	7,646	58,455	20,744	39,734	53,812	-0,33	-0,52



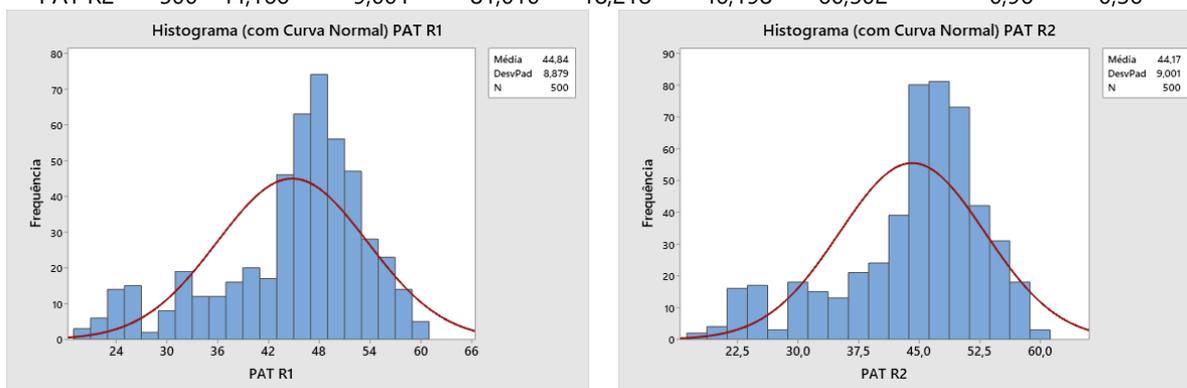
(a) Relatório Resumo da patinagem nas duas rodas de tração no TTE#10

Variável	N	Média	DesvPad	Variância	Mínimo	Mediana	Máximo	Assimetria	Curtose
PAT R1	500	46,157	9,059	82,067	21,437	47,905	61,508	-1,00	0,54
PAT R2	500	45,578	9,258	85,703	20,001	47,420	61,097	-1,05	0,66



(b) Relatório Resumo da patinagem nas duas rodas de tração no TTE#11

Variável	N	Média	DesvPad	Variância	Mínimo	Mediana	Máximo	Assimetria	Curtose
PAT R1	500	44,836	8,879	78,832	19,676	46,856	60,949	-0,94	0,30
PAT R2	500	44,166	9,001	81,010	18,218	46,198	60,502	-0,96	0,36

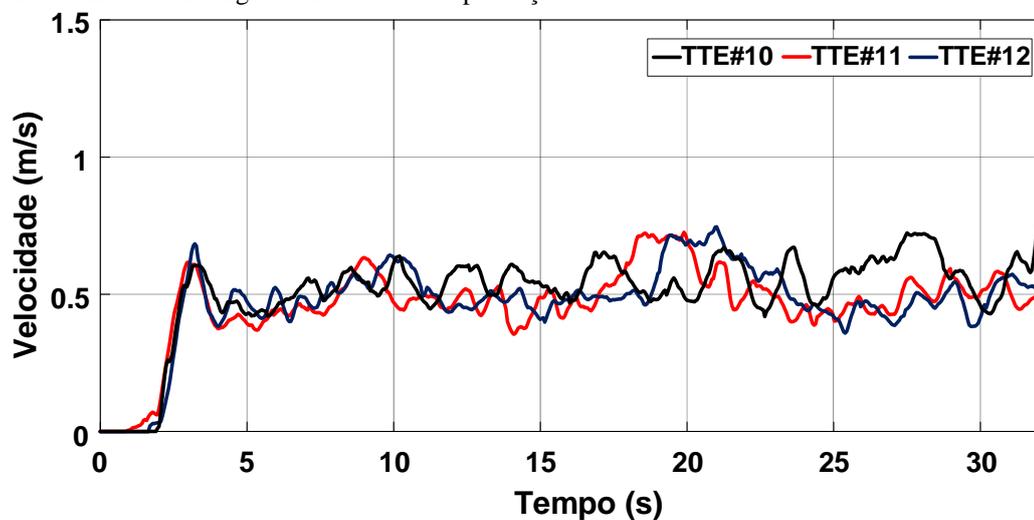


(c) Relatório Resumo da patinagem nas duas rodas de tração no TTE#12

Fonte: Elaborada pelo autor.

A velocidade média desenvolvida pelo trator elétrico nos três ensaios em solo firme com carga e sem o controle de patinação ativo variou entre 0,49 m/s e 0,55 m/s. A Figura 83 apresenta os gráficos de velocidade dos ensaios TTE#10 a TTE#12.

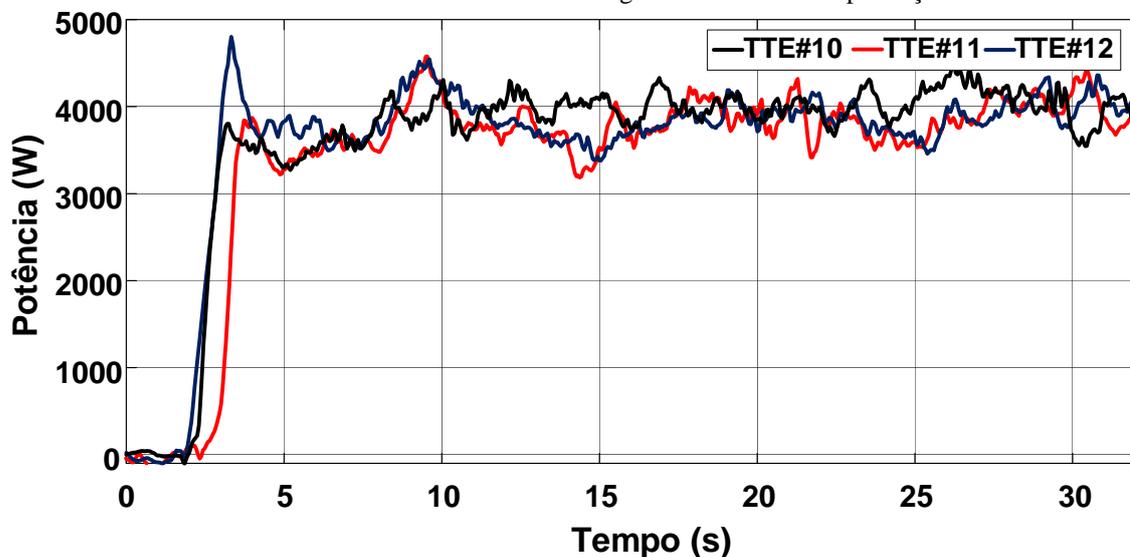
Figura 83 - Gráfico comparativo de velocidades do trator elétrico durante os três ensaios realizados em solo firme com carga e sem controle de patinação ativo



Fonte: Elaborada pelo autor.

Em relação ao banco de baterias, a média da corrente variou entre 79,28 A e 83,43 A durante a execução dos ensaios. Com isso, teve-se uma potência média variando entre 3790,68 W e 3968,68 W. Na Figura 84 tem-se o gráfico comparativo das medições de potência do banco de baterias do trator elétrico nessa fase de teste.

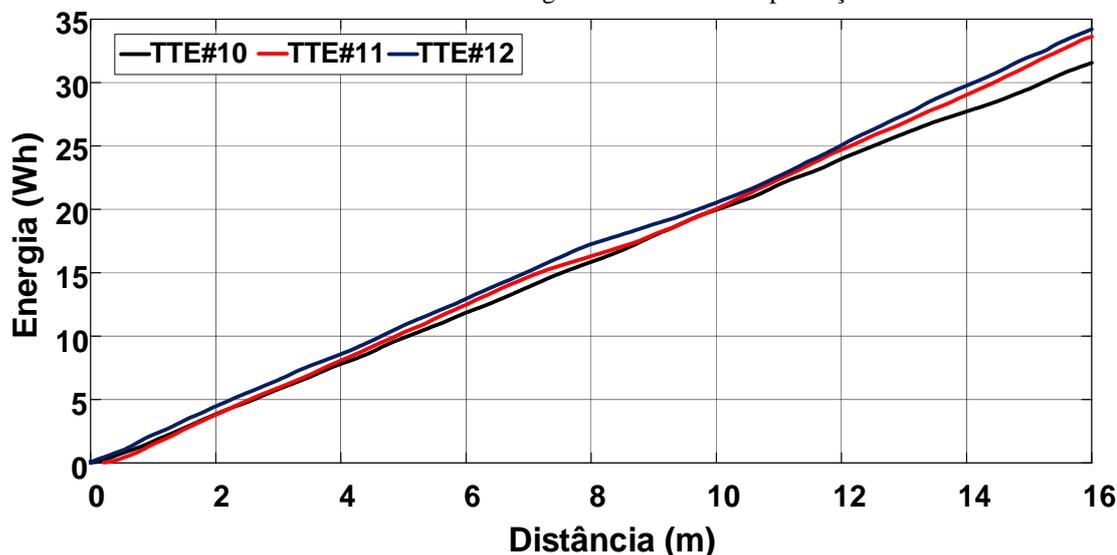
Figura 84 - Gráfico comparativo das medições de potências realizadas no banco de baterias do trator elétrico durante os três ensaios em solo firme com carga e sem controle de patinação ativo



Fonte: Elaborada pelo autor.

Vistos esses resultados, é possível destacar que a energia consumida nos ensaios em pista de concreto sem carga para o percurso de 15m oscilou entre 29,5 Wh e 32 Wh. A Figura 85 destaca o gráfico comparativo da energia consumida em função da distância percorrida durante os três testes com o trator elétrico realizados em campo com carga e sem controle de patinação ativo.

Figura 85 - Gráfico comparativo de energia consumida no banco de baterias durante os três ensaios com o trator elétrico realizados em solo firme com carga e sem controle de patinação ativo



Fonte: Elaborada pelo autor.

Em seguida, tem-se uma tabela resumo com os dados dos ensaios TTE#10 a TTE#12 (Tabela 4).

Tabela 4 - Folha de dados TTE#10 a TTE#12

TTE#	10	11	12
Tempo de execução do teste (15m) [s]	27,27	30,61	29,41
Velocidade [m/s]	0,55	0,49	0,51
Velocidade [km/h]	1,98	1,76	1,94
Patinagem [%]	39,94/ 39,92	46,16/ 45,58	44,84/ 44,17
Corrente média nas baterias [A]	83,43	79,28	81,36
Potência média nas baterias [W]	3968,68	3790,68	3889,88
Energia [Wh]	29,5	31,34	32

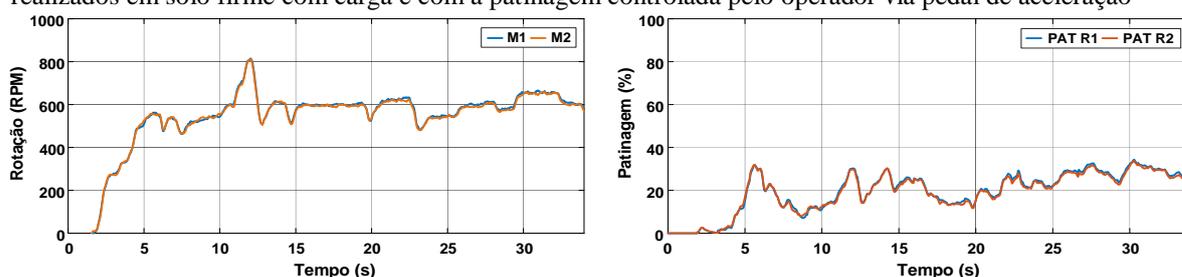
Fonte: Elaborada pelo autor.

#### 5.2.5.2 Teste em solo firme com carga e com a patinação controlada pelo operador via pedal de aceleração

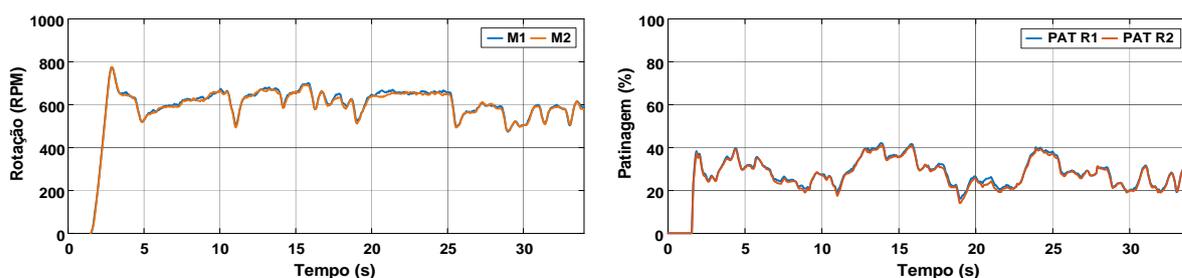
Os testes com trator elétrico em solo firme com carga e com a patinação controlada pelo operador, via pedal de aceleração, TTE#13 a TTE#15, foram executados em uma distância

de 15 m. As rotações máximas dos motores de tração permaneceram ajustadas em 800 rpm, mas com velocidade resultante dependendo diretamente da atuação do operador via pedal. A Figura 86 destaca os gráficos de rotação e patinação nas duas rodas de tração, obtidos nos três ensaios. Através desses gráficos fica fácil perceber que a rotação das rodas de tração do trator elétrico variou conforme a atuação do operador na tentativa de diminuir o efeito da patinação durante a execução dos três ensaios. Apesar de ter havido uma queda no percentual de patinação nas rodas de tração, os valores continuaram bem acima do valor desejável (8% a 10%). Na Figura 87 encontram-se os dados da estatística descritiva básica e os Histogramas (com curva normal) relacionados à patinação nas duas rodas de tração.

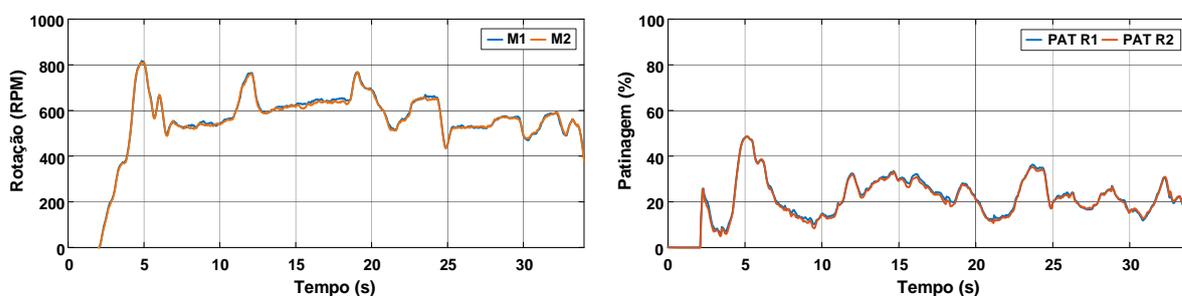
Figura 86 - Gráficos de rotação dos motores de tração e patinação nas rodas de tração durante os três ensaios realizados em solo firme com carga e com a patinação controlada pelo operador via pedal de aceleração



(a) TTE#13



(b) TTE#14

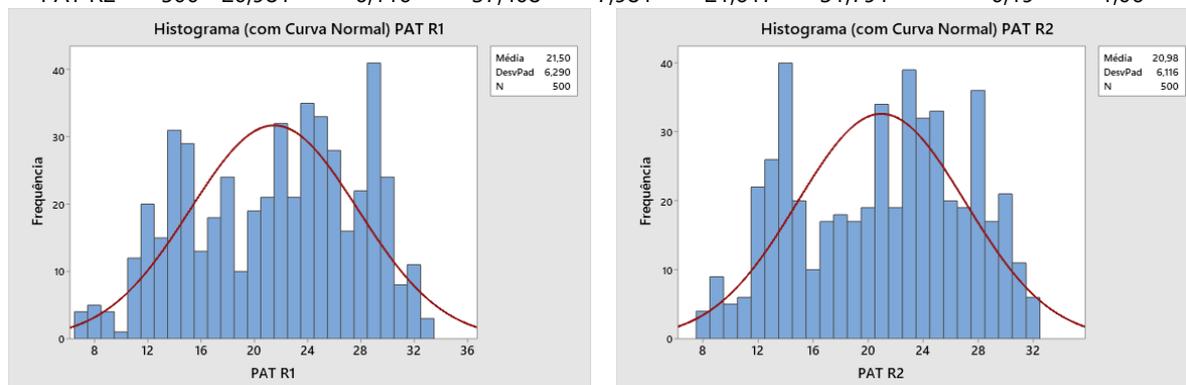


(c) TTE#15

Fonte: Elaborada pelo autor.

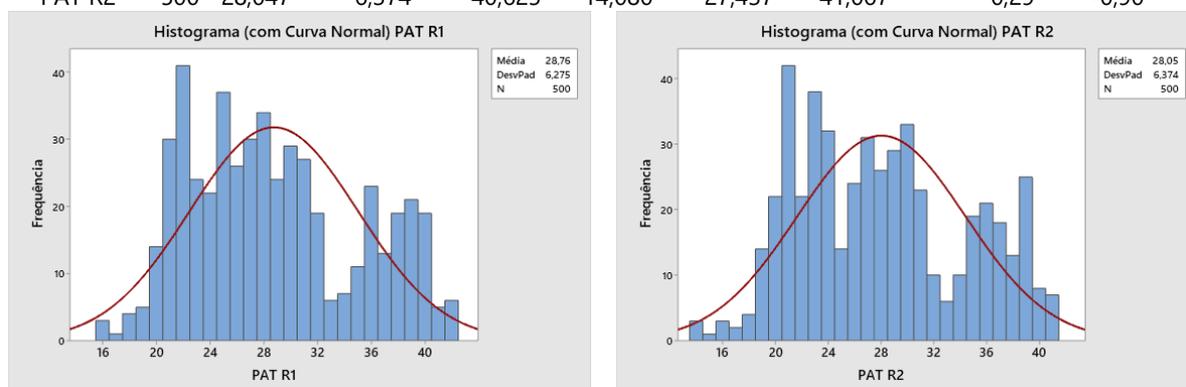
Figura 87 - Estatística descritiva relacionada aos dados de patinagem dos três ensaios com o trator elétrico realizados em solo firme com carga e com a patinagem controlada pelo operador via pedal de aceleração

Variável	N	Média	DesvPad	Variância	Mínimo	Mediana	Máximo	Assimetria	Curtose
PAT R1	500	21,501	6,290	39,566	7,067	22,175	32,642	-0,24	-0,97
PAT R2	500	20,981	6,116	37,408	7,981	21,617	31,791	-0,19	-1,06



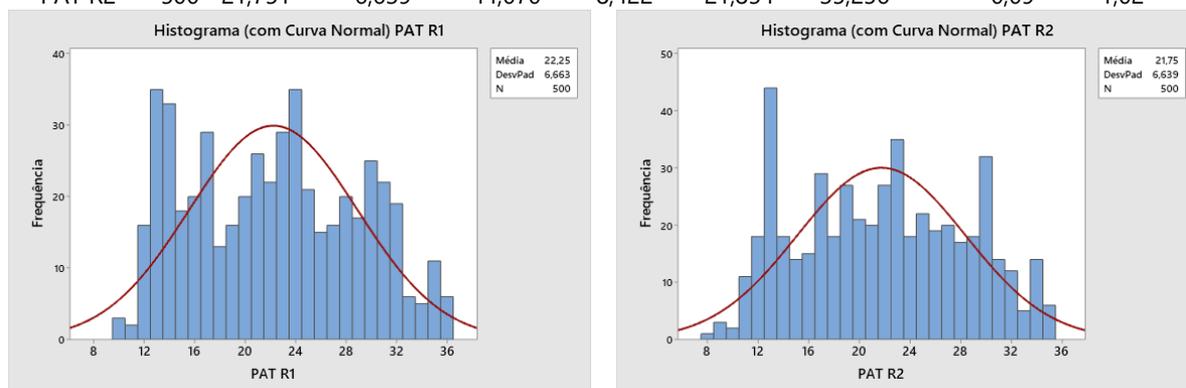
(a) Relatório Resumo da patinagem nas duas rodas de tração no TTE#13

Variável	N	Média	DesvPad	Variância	Mínimo	Mediana	Máximo	Assimetria	Curtose
PAT R1	500	28,762	6,275	39,372	16,094	27,826	42,085	0,36	-0,89
PAT R2	500	28,047	6,374	40,625	14,080	27,437	41,067	0,29	-0,90



(b) Relatório Resumo da patinagem nas duas rodas de tração no TTE#14

Variável	N	Média	DesvPad	Variância	Mínimo	Mediana	Máximo	Assimetria	Curtose
PAT R1	500	22,253	6,663	44,395	10,226	22,396	36,300	0,13	-1,06
PAT R2	500	21,751	6,639	44,070	8,422	21,854	35,256	0,09	-1,02



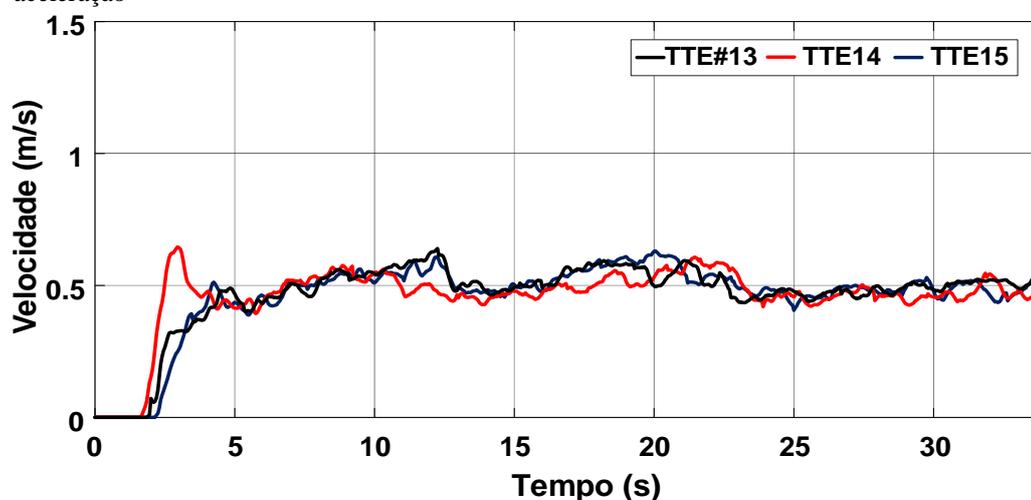
(c) Relatório Resumo da patinagem nas duas rodas de tração no TTE#15

Fonte: Elaborada pelo autor.

Com a patinagem controlada pelo operador via pedal de aceleração a média variou entre 20,98% e 28,76%. O desvio padrão ficou entre 6,11% e 6,66%. Dessa forma, fica evidente que os valores de patinagem ainda se encontram bem acima dos valores estipulados para atividades em solo firme. A Figura 5.28 também apresenta os coeficientes de simetria e curtose. A simetria ficou compreendida entre -0,24 e 0,36 e a curtose entre -1,06 e -0,89. Os dados avaliados respeitaram uma distribuição normal, dentro do intervalo especificado por Montgomery (2004).

A velocidade média desenvolvida pelo trator elétrico nos três ensaios, TTE#13 a TTE#15, variou entre 0,49 m/s e 0,52 m/s. A Figura 88 apresenta os gráficos de velocidade desses ensaios realizados.

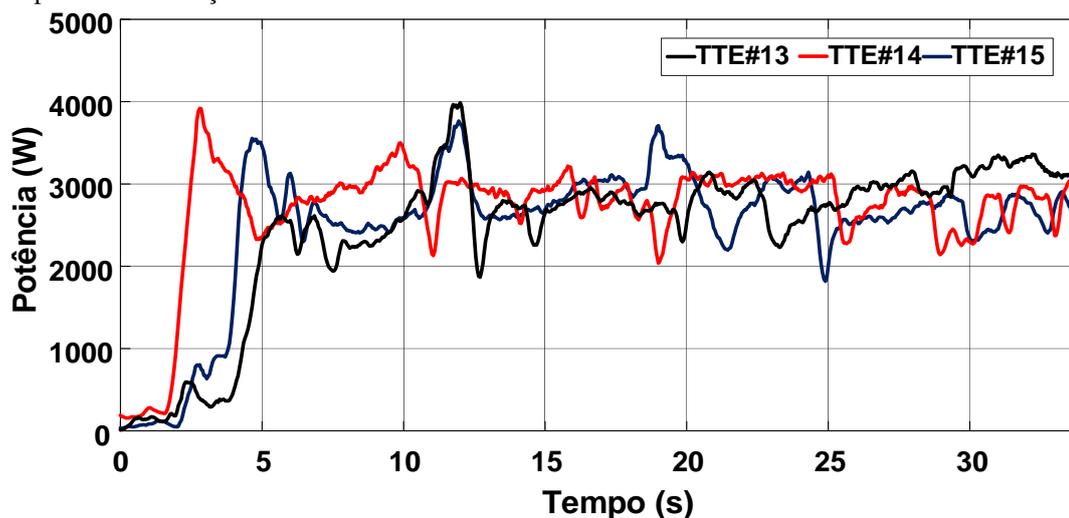
Figura 88 - Gráfico comparativo de velocidades do trator elétrico durante os três ensaios realizados em solo firme com carga e com a patinagem controlada pelo operador via pedal de aceleração



Fonte: Elaborada pelo autor.

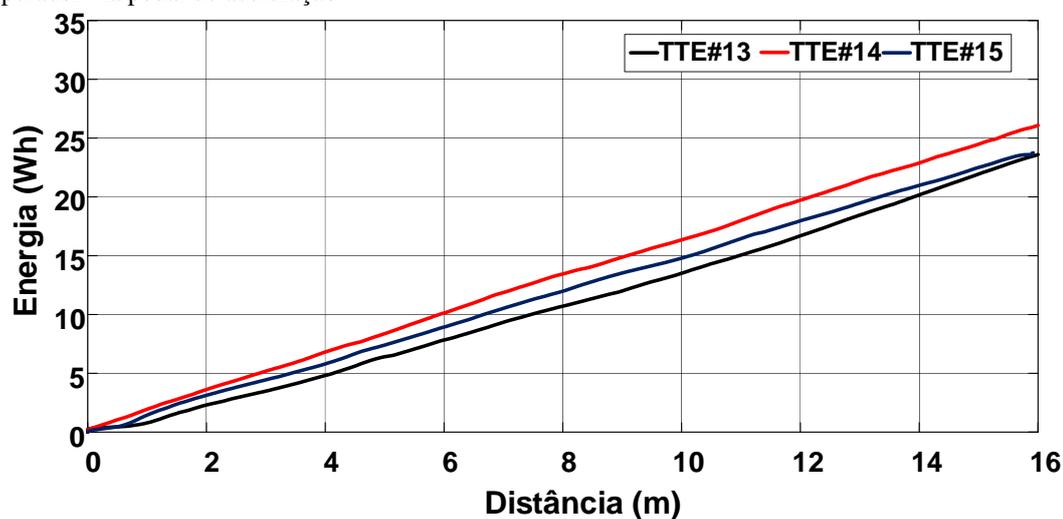
Em relação ao banco de baterias, a média da corrente variou entre 57,05 A e 59,54 A durante a execução dos ensaios. Com isso, teve-se uma potência média variando entre 2742,94 W e 2854,64 W. Na Figura 89 tem-se o gráfico comparativo das medições de potência do banco de baterias do trator elétrico nessa fase de teste. Logo, é possível destacar que a energia consumida nos ensaios em solo firme com carga e com a patinagem controlada pelo operador via pedal de aceleração para o percurso de 15 m oscilou entre 21,94 Wh e 24,51 Wh. A Figura 90 destaca o gráfico comparativo da energia consumida em função da distância percorrida durante esses três ensaios realizados com o trator elétrico. Em seguida, tem-se a Tabela 5 com o resumo dos dados dos ensaios TTE#13 a TTE#15.

Figura 89 - Gráfico comparativo das medições de potências realizadas no banco de baterias do trator elétrico durante os três ensaios em solo firme com carga e com a patinagem controlada pelo operador via pedal de aceleração



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 90 - Gráfico comparativo de energia consumida no banco de baterias durante os três ensaios com o trator elétrico realizados em solo firme com carga e com a patinagem controlada pelo operador via pedal de aceleração



Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 5 - Folha de dados TTE#13 a TTE#15

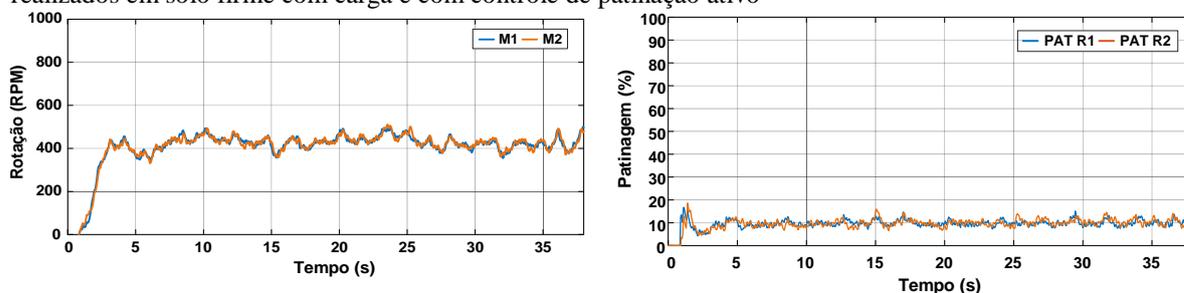
TTE#	13	14	15
Tempo de execução do teste (15m) [s]	29,41	30,61	28,85
Velocidade [m/s]	0,51	0,49	0,52
Velocidade [km/h]	1,83	1,76	1,87
Patinagem [%]	21,5/ 21,98	28,76/ 28,05	22,25/ 21,75
Corrente média nas baterias [A]	57,05	59,54	57,50
Potência média nas baterias [W]	2742,94	2854,64	2766,99
Energia [Wh]	21,94	24,51	22,5

Fonte: Elaborada pelo autor.

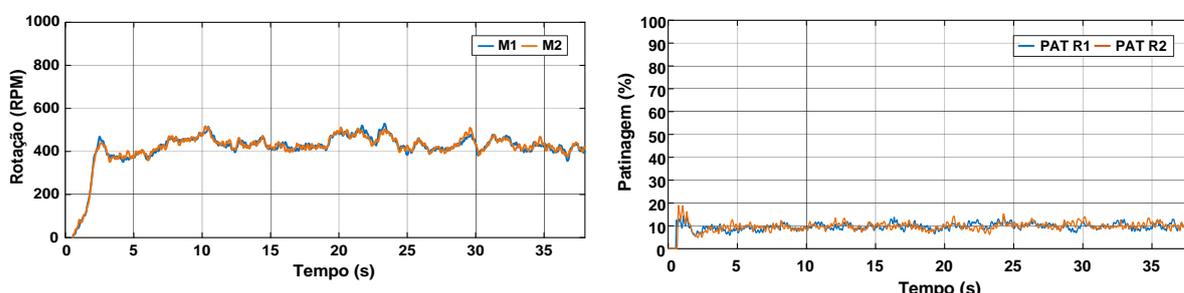
### 5.2.5.3 Teste em solo firme com carga e com controle de patinagem ativo

Conforme observado na ASAE (2006) e aqui apresentado no Capítulo 2, a faixa de patinagem para a máxima eficiência de tração ocorre entre 4% e 16%, onde, para cada tipo de solo tem-se uma faixa característica ideal. Assim, o campo de teste é caracterizado pelo solo firme, como já descrito anteriormente, cuja faixa ideal de patinagem é de 8% a 10% (ASAE, 2006) para se obter máxima eficiência. Para comprovar o ganho de eficiência energética, três testes com o trator elétrico foram realizados em campo com carga e com controle de patinagem ativo e ajustado em 10%. Ressalta-se que os testes foram realizados acrescentando apenas a ativação do controle de patinagem. Nenhum outro mecanismo convencional adotado em tratores ICE para aumentar a capacidade de tração, como a lastragem, foi utilizado. A Figura 91 apresenta inicialmente os gráficos de rotação atingida nos motores de tração e os percentuais de patinagem atingidos nas respectivas rodas de tração.

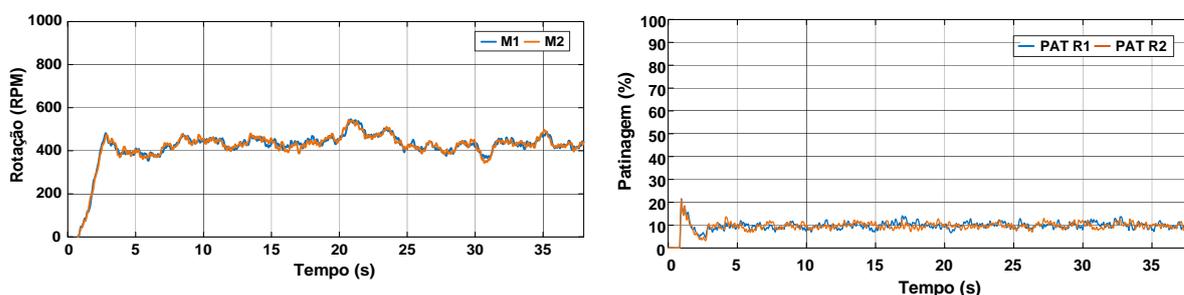
Figura 91 - Gráficos de rotação dos motores de tração e patinagem nas rodas de tração durante os três ensaios realizados em solo firme com carga e com controle de patinação ativo



(a) TTE#16



(b) TTE#17



(c) TTE#18

Fonte: Elaborada pelo autor.

Através dos gráficos observados na Figura 91 e dos sumários descritivos e Histogramas (com curva normal) apresentados na Figura 92 é possível fazer uma análise de desempenho do controle de patinagem atuando no trator elétrico. A patinagem média se manteve entre 9,68% e 9,85%, bem próximo do valor ajustado. O desvio padrão se manteve entre 1,17% e 1,5%, bem inferior aos testes anteriores (entre 7,6% e 9,26% para os ensaios sem controle ativo e entre 6,11% e 6,66% para os ensaios com controle via operador).

Para uma análise mais aprofundada dos resultados obtidos com os testes do trator elétrico realizados em campo com carga e com controle de patinagem ativo, além da análise de estatísticas descritivas dos dados de patinagem, também é feita uma avaliação de qualidade por meio do Controle Estatístico do Processo (CEP), com base nas cartas de controle.

Conforme Montgomery e Runger (2002), um gráfico de controle é uma maneira de examinar a variabilidade nos dados orientados ao tempo. O gráfico contém uma linha central que representa o valor médio da variável controlada e monitorada. Contém, ainda, duas outras linhas horizontais, chamadas limite superior de controle (LSC) e limite inferior de controle (LIC). Essas representam um par de limites estatisticamente derivados que refletem a variabilidade inerente ou natural no processo, localizados três desvios padrão dos valores de concentração acima e abaixo da linha central. Assim, as cartas ou os gráficos de controle incluem estatisticamente limites de controle superior e inferior que são dados por (5.4) e (5.5):

$$LSC = \mu + 3 \cdot \sigma \quad (5.4)$$

$$LIC = \mu - 3 \cdot \sigma \quad (5.5)$$

Onde:

$LSC$  = Limite Superior de Controle;

$LIC$  = Limite Inferior de Controle;

$\mu$  = Média do processo;

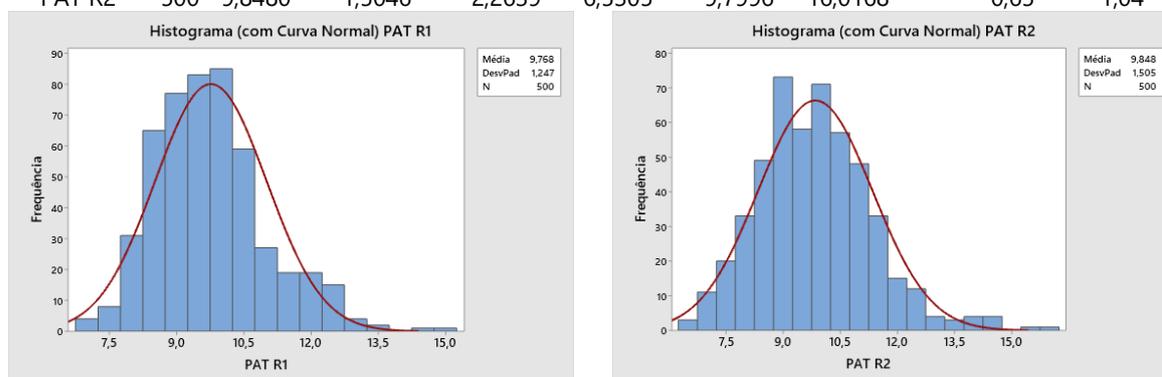
$\sigma$  = Desvio padrão.

Portanto, se o processo estiver operando como deveria estar, sem nenhuma fonte externa de variabilidade presente no sistema, as medições de concentração devem flutuar aleatoriamente em torno da linha central e quase todas elas devem ficar entre os limites de

controle (MONTGOMERY; RUNGER, 2002). Na Figura 93 são apresentadas as cartas de controle do processo com patinagem controlada.

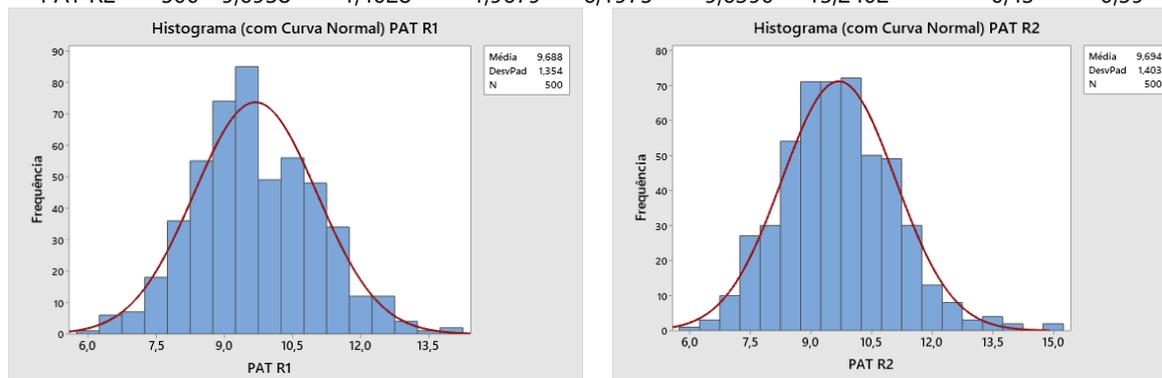
Figura 92 - Estatística descritiva relacionada aos dados de patinagem dos três ensaios com o trator elétrico realizados em solo firme com carga e com controle de patinagem ativo

Variável	N	Média	DesvPad	Variância	Mínimo	Mediana	Máximo	Assimetria	Curtose
PAT R1	500	9,7681	1,2467	1,5543	6,7691	9,6603	15,1088	0,73	0,89
PAT R2	500	9,8480	1,5046	2,2639	6,5305	9,7996	16,0168	0,65	1,04



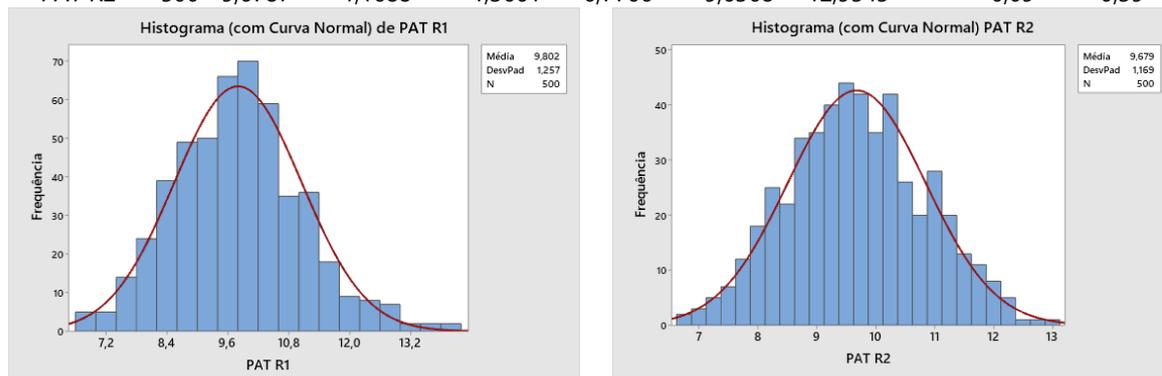
(a) Relatório Resumo da patinagem nas duas rodas de tração no TTE#16

Variável	N	Média	DesvPad	Variância	Mínimo	Mediana	Máximo	Assimetria	Curtose
PAT R1	500	9,6884	1,3544	1,8343	5,8675	9,5753	14,1731	0,23	0,03
PAT R2	500	9,6938	1,4028	1,9679	6,1975	9,6390	15,2402	0,43	0,59



(b) Relatório Resumo da patinagem nas duas rodas de tração no TTE#17

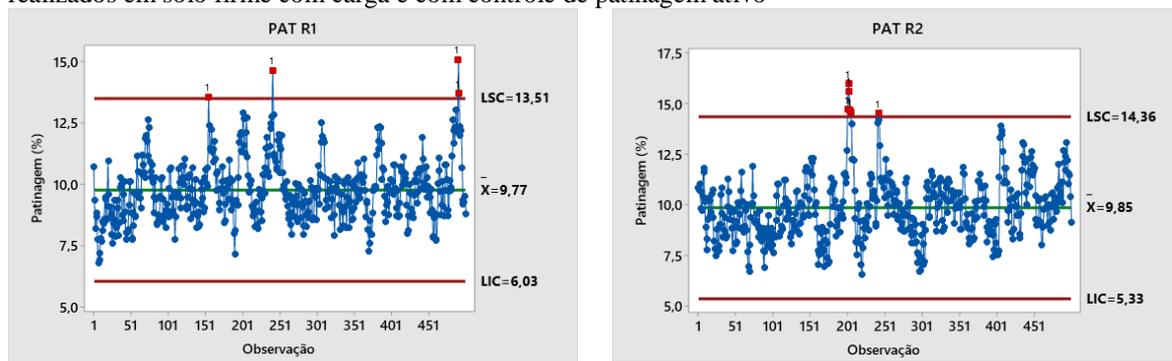
Variável	N	Média	DesvPad	Variância	Mínimo	Mediana	Máximo	Assimetria	Curtose
PAT R1	500	9,8023	1,2572	1,5805	6,6688	9,7650	14,0810	0,30	0,22
PAT R2	500	9,6787	1,1688	1,3661	6,7766	9,6368	12,9545	0,09	-0,39



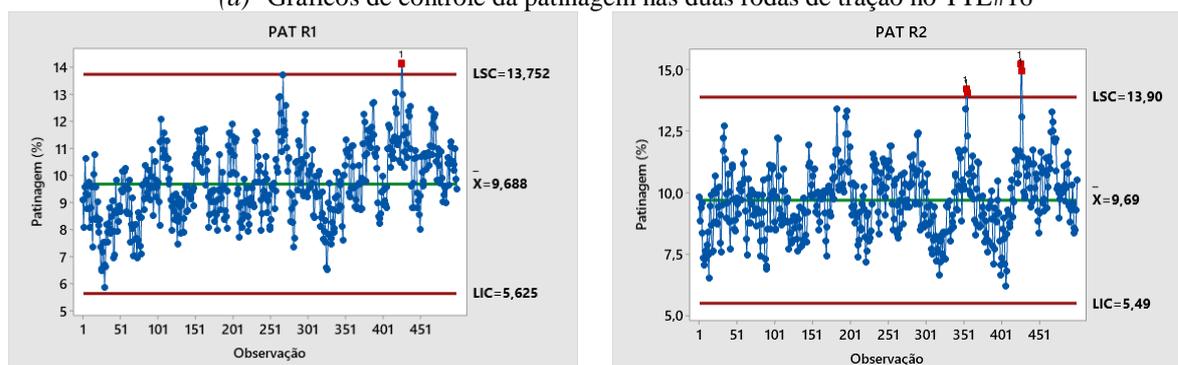
(c) Relatório Resumo da patinagem nas duas rodas de tração no TTE#18

Fonte: Elaborada pelo autor.

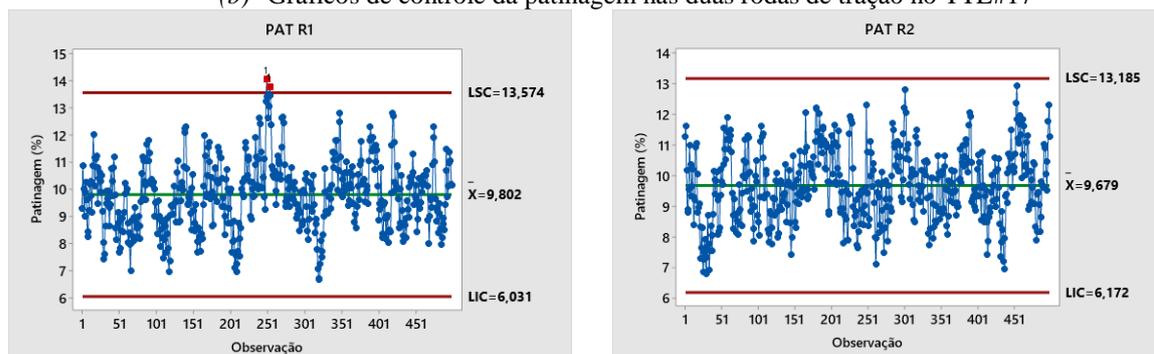
Figura 93 - Cartas de controle relacionados aos dados de patinagem dos três ensaios com o trator elétrico realizados em solo firme com carga e com controle de patinagem ativo



(a) Gráficos de controle da patinagem nas duas rodas de tração no TTE#16



(b) Gráficos de controle da patinagem nas duas rodas de tração no TTE#17



(c) Gráficos de controle da patinagem nas duas rodas de tração no TTE#18

Fonte: Elaborada pelo autor.

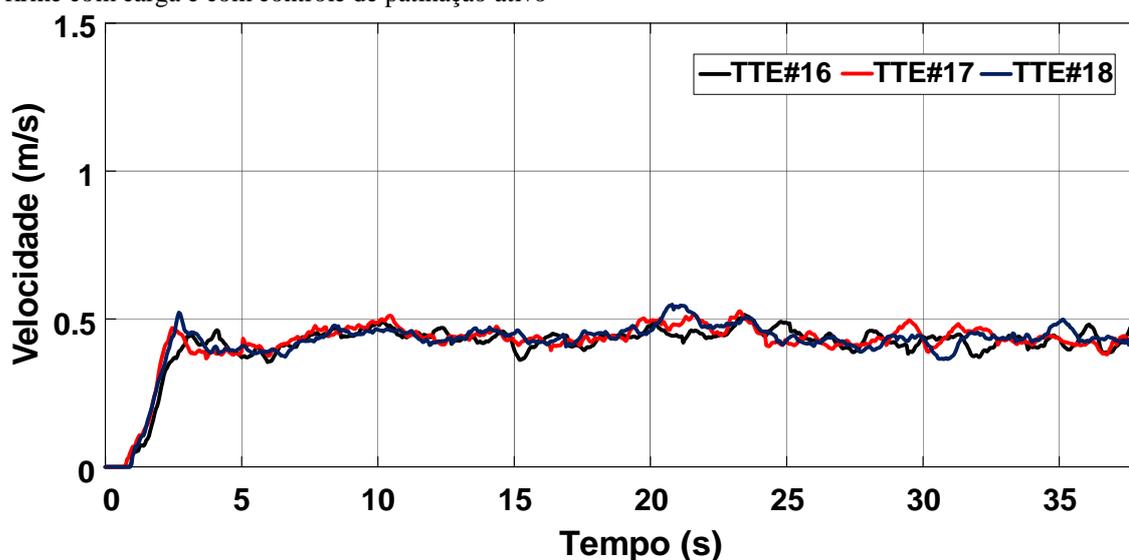
De acordo com a Figura 92, a simetria ficou compreendida entre 0,09 e 0,73 e a curtose entre -0,39 e 1,04. Portanto, os dados avaliados respeitaram uma distribuição normal conforme Montgomery (2004).

Ao avaliar as cartas de controle da Figura 93, nota-se que no máximo 5 pontos nas amostragens ultrapassaram os limites de controle superior. Isso caracteriza o máximo de 1% do total de dados das amostras, que é 500 pontos. Segundo Albiero (2012) e Melo (2017) se apenas 5% de dados amostrais estiverem fora dos limites de controle especificados considera-se que o processo apresentou estabilidade, já que durante as operações no campo há muita variabilidade (condições meteorológicas, condições de solo, sistemas mecanizados, índices de qualidade de

operações agrícolas, entre outros). Assim, pode-se considerar que o controle de patinação aplicado no trator elétrico apresentou resultado satisfatório, pois o processo proporcionou estabilidade, visto que no máximo 1% (5 pontos) do universo das amostras ficou fora dos limites especificados, não ultrapassando os 5% (25 pontos) estipulados pelos autores anteriormente mencionados.

A velocidade média desenvolvida pelo trator elétrico nos três ensaios em solo firme com carga e com o controle de patinação ativo foi de 0,44 m/s. A Figura 94 apresenta os gráficos de velocidade dos ensaios TTE#16 a TTE#18.

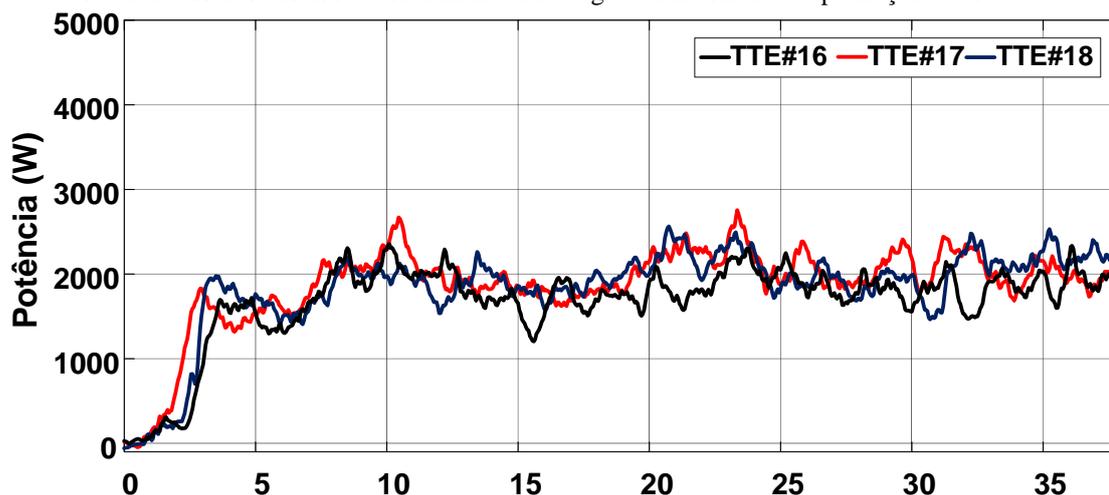
Figura 94 - Gráfico comparativo de velocidades do trator elétrico durante os três ensaios realizados em solo firme com carga e com controle de patinação ativo



Fonte: Elaborada pelo autor.

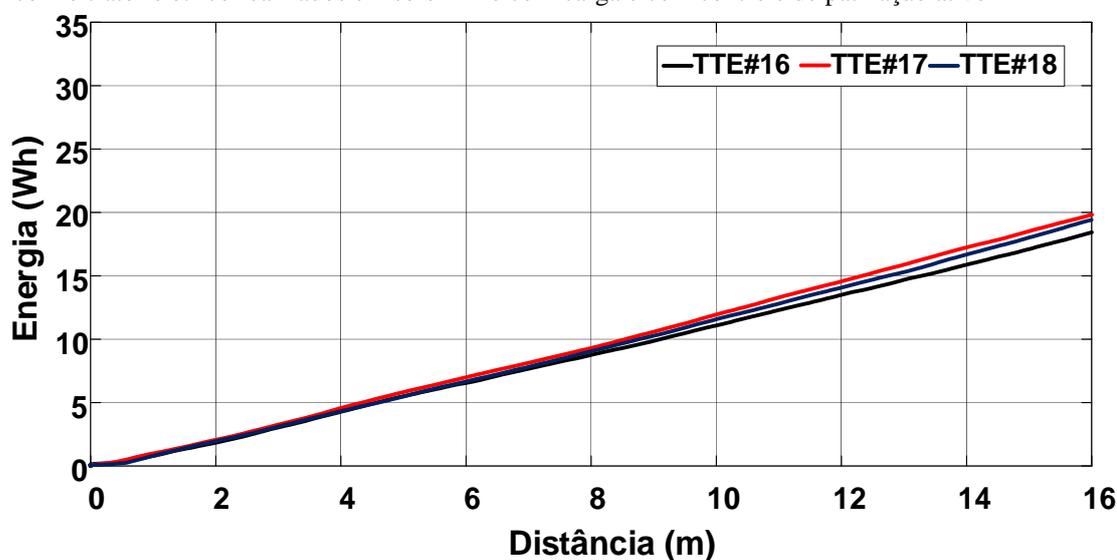
Em relação ao banco de baterias, a média da corrente variou entre 37,27 A e 40,09 A durante a execução dos ensaios. Assim, teve-se uma potência média variando entre 1820,18 W e 1955,25 W. Na Figura 95 tem-se o gráfico comparativo das medições de potência do banco de baterias do trator elétrico nesta fase de teste. Dessa maneira, é possível destacar que a energia consumida nos ensaios em solo firme com carga e com o controle de patinação ativo para o percurso de 15 m oscilou entre 17,1 Wh e 18,55 Wh. A Figura 96 destaca o gráfico comparativo da energia consumida em função da distância percorrida durante esses três testes realizados com o trator elétrico. Em seguida, tem-se a Tabela 6 com o resumo dos dados dos ensaios TTE#16 a TTE#18.

Figura 95 - Gráfico comparativo das medições de potências realizadas no banco de baterias do trator elétrico durante os três ensaios em solo firme com carga e com controle de patinação ativo



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 96 - Gráfico comparativo de energia consumida no banco de baterias durante os três ensaios com o trator elétrico realizados em solo firme com carga e com controle de patinação ativo



Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 6 - Folha de dados TTE#16 a TTE#18

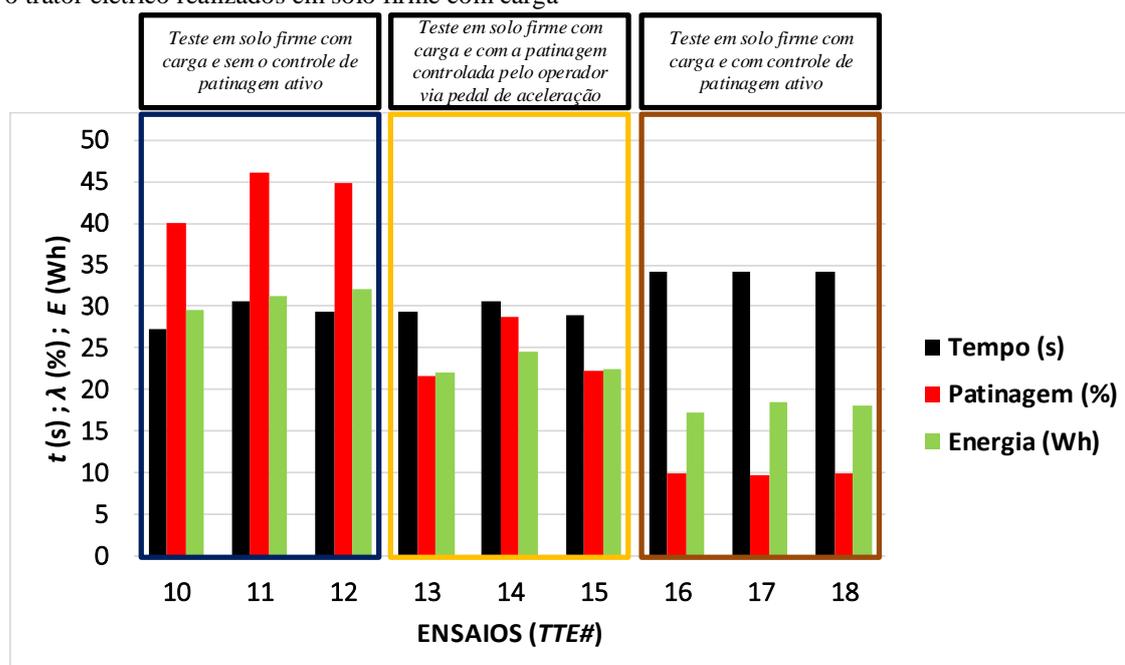
TTE#	16	17	18
Tempo de execução do teste (15m) [s]	34,1	34,1	34,1
Velocidade [m/s]	0,44	0,44	0,44
Velocidade [km/h]	1,58	1,58	1,58
Patinagem [%]	9,77/ 9,85	9,69/ 9,70	9,80/ 9,68
Corrente média nas baterias [A]	37,27	40,09	39,63
Potência média nas baterias [W]	1820,18	1955,25	1931,35
Energia [Wh]	17,1	18,55	18

Fonte: Elaborada pelo autor.

Assim, com os dados obtidos e visualizados nas figuras apresentadas é possível constatar que para realizar o mesmo trabalho o trator elétrico apresentou uma considerável

melhoria em termos de estabilidade e consumo energético quando adotado o controle de patinagem. Sem o controle de patinagem (TTE#10 a TTE#12) o trator elétrico alcançou uma velocidade média entre 0,49 m/s e 0,55 m/s com uma patinagem média entre 39,32% e 46,16%. Com controle de patinagem ativo (TTE#16 a TTE#18) o trator elétrico atingiu uma velocidade média de 0,44 m/s com uma patinagem variando entre 9,68% e 9,85%. Observa-se que, apesar de uma pequena redução na velocidade, o controle adotado garantiu uma maior estabilidade para o trator elétrico com uma velocidade mais uniforme. A energia consumida nos ensaios sem controle de patinagem ativo variou entre 29,5 Wh e 32 Wh. Já para os ensaios com o controle de patinagem ativo a energia consumida variou entre 17,1 Wh e 18,55 Wh. Ou seja, houve uma economia de 42% de energia com a implementação do controle proposto. Com a patinagem controlada pelo operador via pedal de aceleração a média variou entre 20,98% e 28,76%. Obteve-se um consumo de energia que oscilou entre 21,94 Wh e 24,51 Wh. Logo, observa-se que são valores intermediários, e que são completamente dependentes da habilidade do operador. Na Figura 97 é possível observar o comportamento gráfico da relação tempo, patinagem e consumo energético em função da mesma distância percorrida (15 metros) em todos os nove testes realizados.

Figura 97 - Gráfico comparativo do tempo, patinagem e energia consumida durante os nove ensaios com o trator elétrico realizados em solo firme com carga



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 97 evidencia o ganho de estabilidade do processo e a redução significativa do consumo de energia. Assim, é possível observar a uniformidade atingida nas três variáveis

(tempo, patinagem e energia) nos ensaios TTE#16 a TTE#18 com a ativação do controle proposto na execução dos referidos ensaios. Dessa forma, o controle também contribui para melhorar a eficiência da operação, minimizando o trabalho do operador, através de uma intervenção mínima durante a execução de determinada atividade agrícola.

## 6 CONCLUSÃO

Nesta tese, um sistema de propulsão elétrica para trator elétrico de pequeno porte com aplicação na agricultura familiar foi investigado. Diante das conjecturas apresentadas na Introdução foi possível pressupor que um sistema de propulsão elétrica distribuído, utilizando dois motores de indução trifásicos e uma unidade eletrônica de acionamento embarcada, para um trator elétrico de baixa potência, é capaz de proporcionar bom desempenho técnico e flexibilidade operacional no desenvolvimento de atividades da agricultura familiar. Os resultados experimentais apresentados revelaram comprovações de sua viabilidade e eficácia. O sistema de propulsão atuou de forma satisfatória através de sua UCE aliada aos inversores de acionamento. A implementação do dsPIC30F4013 adotado na UCE para executar as estratégias de comando permitiu gerenciar os sinais de acionamento dos inversores com eficácia e garantir o pleno funcionamento do trator elétrico. Por meio dos sistemas de monitoramento e supervisão foi possível armazenar os dados dos testes de forma confiável em todas as etapas de desenvolvimento.

Na execução da fase experimental, foram realizadas sete baterias de testes, totalizando dezenove ensaios, com e sem carga acoplada. Através dos três ensaios de tração em pista de concreto e com carga, o trator elétrico atingiu uma força de tração média entre 2602,46 N e 2870,22 N. A potência média da barra de tração variou entre 4026 W e 4204,87 W. Tais resultados em termos de força e potência de tração comprovaram que o trator elétrico oferece plena capacidade de tração, compatível para o desenvolvimento de atividades da agricultura familiar, sem comprometer sua estrutura eletromecânica. Ainda, observados os resultados gráficos, verificou-se que o processo de tração apresentou boa estabilidade. Também, com os dados obtidos dos testes em campo, foi possível constatar que para realizar o mesmo trabalho o trator elétrico apresentou considerável melhoria em termos de estabilidade e consumo energético quando adotado o controle de patinagem.

Sem o controle de patinagem o trator elétrico alcançou uma velocidade média entre 0,49 m/s e 0,55 m/s com uma patinagem média entre 39,32% e 46,16%, em um processo instável. Com controle de patinagem ativo o trator elétrico atingiu uma velocidade média de 0,44 m/s com uma patinagem variando entre 9,68% e 9,85%. Observou-se que, apesar de uma pequena redução na velocidade, o controle adotado garantiu maior estabilidade para o trator elétrico com velocidade mais uniforme. A energia consumida nos ensaios sem controle de patinagem variou entre 29,5 Wh e 32 Wh. Já para os ensaios com o controle de patinagem

ativo, a energia consumida variou entre 17,1 Wh e 18,55 Wh. Ou seja, houve uma economia de 42% de energia com a implementação do controle proposto.

Logo, com as proposições de implementação feitas e os resultados obtidos, é possível comprovar a hipótese de que um sistema de propulsão elétrica distribuído, utilizando dois motores de indução trifásicos e uma unidade eletrônica de acionamento embarcada, especialmente projetado para um trator elétrico de pequeno porte é capaz de proporcionar bom desempenho técnico e flexibilidade operacional no desenvolvimento de atividades da agricultura familiar.

Múltiplas abordagens relacionadas a este trabalho de pesquisa podem ser exploradas, podendo contribuir para outros projetos. Como trabalhos futuros sugere-se:

- Implementação do sistema de diferencial eletrônico para as duas rodas motrizes de acionamento independente do trator elétrico;
- Estudo e análise de um sistema autônomo para implementação no trator elétrico, ou seja, o desenvolvimento de uma nova versão que tem como resultado o trator totalmente autônomo.
- Projeto e implementação de um sistema de micro geração de energia por meio de fontes geradoras de energia limpa e renovável com a utilização de um novo sistema com pivô central de dupla função: irrigação automatizada e conexão do trator elétrico a micro rede via cabo.

## REFERÊNCIAS

- ABDI. **Estudo prospectivo setorial automotivo: relatório final**. Brasília, 2009. Disponível em: <https://www.abit.org.br/adm/Arquivo/Servico/114216.pdf>. Acesso em: 12 jun. 2019.
- ALBIERO, D. *et al.* Avaliação da distribuição de sementes por uma semeadora de anel interno rotativo utilizando média móvel exponencial. **Revista Ciência Agronômica**, v. 43, n. 1, p. 86–95, 2012.
- ALBIERO, D. *et al.* **Tecnologias agroecológicas para o semiárido**. Fortaleza: Edição do Autor, 2015. [Online]. Disponível em: <http://www.repositoriobib.ufc.br/000021/000021cd.pdf>. Acesso em: 21 ago. 2019.
- ANDWARI, A. M. *et al.* A review of battery electric vehicle technology and readiness levels. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 78, p. 414–430, 2017.
- ARJHARN, W. *et al.* **Preliminary study on the applicability an electric tractor** (Part 1), v. 63, n. 3, p. 130-137, 2001a.
- ARJHARN, W. *et al.* **Preliminary study on the applicability an electric tractor** (Part 2), v. 63, n. 5, p. 92-99, 2001b.
- ASAE. **ASAE D497.6 JUN2009** Agricultural Machinery Management Data. Standard by The American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2009.
- ASAE. **ASAE EP496.3 FEB2006** Agricultural Machinery Management. Standard by The American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2006.
- ASAE. **ASAE EP542 FEB1999 (R2013)** Procedures for Using and Reporting Data Obtained with the Soil Cone Penetrometer. Standard by The American Society of Agricultural and Biological Engineers, 1999.
- BERCHIN, I. I. *et al.* The contributions of public policies for strengthening family farming and increasing food security: the case of Brazil. **Land Use Policy**, v. 82, p. 573–584, 2019.
- BIANCHINI, V. **Vinte anos do PRONAF, 1995 - 2015: avanços e desafios**. Brasília: SAF/MDA, 2015.
- BNB. **Cartilha de financiamento à micro e à minigeração distribuída de energia elétrica**. 2019. Disponível em: [https://www.bnb.gov.br/documents/22492/35331/Cartilha\\_FNE\\_Sol\\_PJ\\_V20.pdf/0c4896d4-4633-a1e1-bbae-7e68ed82fac1](https://www.bnb.gov.br/documents/22492/35331/Cartilha_FNE_Sol_PJ_V20.pdf/0c4896d4-4633-a1e1-bbae-7e68ed82fac1). Acesso em :12 set. 2019.
- BOSCH, R. **Manual de tecnologia automotiva**. Trad. 25. ed. alemã, São Paulo: Edgard Blücher, 2005.
- BOSE, B. K. **Modern power electronics and AC drives**. Upper Saddle River (USA): Prentice Hall PTR, 2002.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Anexo à Portaria n. 209/GM, de 29 maio de 2017. **Programa Nacional de universalização do acesso e uso da energia elétrica**. Manual de operacionalização. Período 2015/2018 - Rev. 1, 2017. Disponível em: [https://www.mme.gov.br/luzparatodos/downloads/Manual\\_PLPT\\_Revisao\\_1\\_Portaria\\_209.pdf](https://www.mme.gov.br/luzparatodos/downloads/Manual_PLPT_Revisao_1_Portaria_209.pdf). Acesso em: 12 set. 19.

BRASIL. Ministério do desenvolvimento agrário. **Políticas públicas para agricultura familiar**. 2013. Disponível em: [https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4137306/mod\\_resource/content/0/politicas\\_publicas\\_baixa.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4137306/mod_resource/content/0/politicas_publicas_baixa.pdf). Acesso em :12 set. 2019.

CASTRO, B. H. R.; FERREIRA, T. T. Veículos elétricos: aspectos básicos, perspectivas e oportunidades. **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, 32, p. 267-310, 2010.

CHANCELLOR, W.; ZHANG, N. Automatic wheel-slip control for tractors. **Transactions of the ASAE**, v. 32, n. 1, p. 17–22, 1989.

CHAPMAN, S. J. **Fundamentos de máquinas elétricas**. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

CHEN, Y. *et al.* Electric tractor motor drive control based on FPGA. 5th IFAC Conference on Sensing, Control and Automation Technologies for Agriculture AGRICONTROL 2016: Seattle, WA, USA. **IFAC-PapersOnLine**, v. 49, n. 16, p. 271-276, 2016.

CHRISTIANSON, L. L. *et al.* **Electric tractor**. United States Patent, n. US4662472A, May. 5, 1987. Disponível em: <https://patents.google.com/patent/US4662472A/en>. Acesso em: 19 jul. 2018.

CLEAN ENERGY LEADER. **NH<sup>2</sup> a sustainable reality on your farm**. Disponível em: [http://www.thecleanenergyleader.com/en/nh2\\_tm\\_hydrogen.html](http://www.thecleanenergyleader.com/en/nh2_tm_hydrogen.html). Acesso em:12 set. 2018.

CORRIGAN, S. Introduction to the controller area network (CAN). **Texas Instruments Application Report**, SLOA101, 2002.

CROLLA, D. A. (Ed.). **Automotive engineering**: powertrain, chassis system and vehicle body. USA: Butterworth-Heinemann, 2009.

CUI, G. *et al.* Slip control of electric vehicle based on tire-road friction coefficient estimation. **Mathematical problems in engineering**, v. 2017, 2017.

DENTON, T. **Veículos elétricos e híbridos**. São Paulo: Blucher, 2018.

DOMINGUES-OLAVARRÍA, G. *et al.* Optimization of electric ´powertrains based on scalable cost and performance models. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 55, n. 1, p. 751–764, 2019.

DU, G. *et al.* Design and assessment of an electric vehicle powertrain model based on real-world driving and charging cycles. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, v. 68, n. 2, p. 1178–1187, 2019.

ECKERT, J. J. *et al.* Electric vehicle drivetrain optimisation. **IET Electrical Systems in Transportation**, v. 7, n. 1, p. 32–40, 2016.

EDMOND, B. W. Multifunction electric tractor. **European patent application**, n. EP1645456A2, Apr. 12, 2006. Disponível em: <https://patents.google.com/patent/EP1645456A2/en>. Acesso em: 19 jul. 2018.

EHSAN, A.; YANG, Q. Optimal integration and planning of renewable distributed generation in the power distribution networks: A review of analytical techniques. **Applied Energy**, v. 210, p. 44–59, 2018.

EHSANI, M. *et al.* **Modern electric, hybrid electric and fuel cell vehicles**. 3rd ed. Boca Raton FL: CRC Press, 2010.

ELIPSE SOFTWARE LTDA. **Manual do Elipse SCADA**. Disponível em: <https://www.elipse.com.br/downloads/?cat=69&key=&language=ptbr>. Acesso em: 25 fev. 2018.

ERICSON, R. W.; MAKSIMOVIC, D. **Fundamentals of power electronics**. 2nd ed. Norwell: Kluwer Academic Publishers, 2000.

FAO. **The state of food and agriculture** – leveraging food systems for inclusive rural transformation, 2017. Disponível em: <http://www.fao.org/3/a-i7658e.pdf>. Acesso em: 07 mar. 2019.

FENDT. Press release. **Fendt e100 vario**: the battery-powered compact tractor. 2017. Disponível em: <https://www.fendt.com/int/fendt-e100-vario.html>. Acesso em: 17 jul. 2018.

FERNANDEZ, B.; HERRERA, P. J.; CERRADA, J. A. Robust digital control for autonomous skid-steered agricultural robots. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 153, p. 94–101, 2018a.

FERNANDEZ, B.; HERRERA, P. J.; CERRADA, J. A. Self-tuning regulator for a tractor with varying speed and hitch forces. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 145, p. 282–288, 2018b.

FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY JR, C.; UMANS, S. D. **Máquinas Elétricas**. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.

FOLLE, S. M; FRANZ, C. A. B. **Trator agrícola**: características e fundamentos para sua seleção. Planaltina: EMBRAPA-CPAC, 1990.

FUEL CELLS BULLETIN. New Holland NH2 fuel cell powered tractor. **Fuel Cells Bull**, v. 2012, n. 1, p. 3-4, 2012.

FUTURE FARMING. **Tractor maker launches Indias first electric power tractor**. 2017. Disponível em: <https://www.futurefarming.com/Machinery/Articles/2017/11/Tractor-maker-launches-Indias-first-electric-power-tractor-4115WP/>. Acesso em: 18 jul. 2018.

GAGLIORDI, N. How self-driving tractors, AI, and precision agriculture will save us from the impending food crisis. **TechRepublic**, December 2018. Disponível em: <https://www.techrepublic.com/article/how-self-driving-tractors-ai-and-precision-agriculture-will-save-us-from-the-impending-food-crisis/>. Acesso em: 19 dez. 2018.

GINGERICH, N. R. **Electric powered small tractor**. United States Patent, n. US5743347A, Apr. 28, 1998. Disponível em: <https://patents.google.com/patent/US5743347A/en>. Acesso em: 19 jul. 2018.

GUIMARÃES, A. A. **Eletrônica automotiva embarcada**. São Paulo: Érica, 2007.

GUPTA, C. *et al.* Automatic tractor slip-draft embedded control system. **Computers and electronics in agriculture**, v. 165, p. 104947, 2019.

HAN, K. *et al.* Development of a traction control system using a special type of sliding mode controller for hybrid 4WD vehicles. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, v. 67, n. 1, p. 264–274, 2018.

HEATH, S. **Embedded systems design**. 2nd ed. Newnes, 2003.

HECKEROTH, S. **Electric tractor**. United States Patent, n. US7828099B2, Nov. 9, 2010. Disponível em: <https://patents.google.com/patent/US7828099B2/en>. Acesso em: 11 set. 2018.

HOARAU, Q.; PEREZ, Y. Interactions between electric mobility and photovoltaic generation: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 94, p. 510–522, 2018.

HORI, Y.; TOYODA, Y.; TSURUOKA, Y. Traction control of electric vehicle: basic experimental results using the test EV "UOT electric march. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 34, n. 5, p. 1131-1138, sept. oct., 1998.

HU, X. *et al.* Optimal energy management and sizing of a dual motor-driven electric powertrain. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 34, n. 8, p. 7489–7501, 2019.

HUSAIN, I. **Electric and hybrid vehicles - design fundamentals**. CRC Press, 2003.

IBGE. **Censo agropecuário 2006**. Disponível em: [http://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/51/agro\\_2006.pdf](http://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/51/agro_2006.pdf). Acesso em: 21 mar. 2017.

IBGE. **Censo agropecuário 2017 – resultados preliminares, 2017**. Disponível em: [https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/3093/agro\\_2017\\_resultados\\_preliminares.pdf](https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/3093/agro_2017_resultados_preliminares.pdf). Acesso em: 16 jan. 2019.

ISO. **ISO 11898-1:2003(E) - Road vehicles - Controller area network (CAN) - Part 1: Data link layer and physical signalling**. 2003.

IVANOV, V.; SAVITSKI, D.; SHYROKAU, B. A survey of traction control and antilock braking systems of full electric vehicles with individually controlled electric motors, **IEEE Trans. Veh. Technol.**, v. 64, n. 9, p. 3878–3896, Sep. 2015.

JIA, C.; QIAO, W.; QU, L. Modeling and control of hybrid electric vehicles: a case study for agricultural tractors. *In: IEEE VEHICLE POWER AND PROPULSION CONFERENCE (VPPC)*, 2018, Chicago. **Proceedings...** Chicago: IEEE, 2018. p. 1–6.

JOHN DEERE. **SIMA awards for innovation**. 2017. Disponível em: <https://www.deere.co.uk/en/our-company/news-and-media/press-releases/2017/feb/sima-awards-for-innovation.html>. Acesso em: 17 jul. 2018.

KEPPLE, A. W.; SEGALL-CORRÊA, A. M. Food security monitoring in Brazil and other Latin American countries: support for governance with the participation of civil society. **Glob. Food Sec.**, v. 14, p. 79–86, 2017.

KIENCKE, U.; NIELSEN, L. **Automotive control systems**: for engine, driveline, and vehicle. 2nd ed. Berlin: Springer, 2005.

LAJUNEN, A. *et al.* Overview of powertrain electrification and future scenarios for non-road mobile machinery. **Energies** **2018**, v. 11, n. 5, p. 1–22, 2018.

LANDAU, I. D.; ZITO, G. **Digital control systems**: design, identification and implementation. London: Springer-Verlag, 2006.

LI, S. *et al.* The control system design of middle-horsepower electric tractor based on CAN Bus. **The open automation and control systems journal**, v. 6, p. 1541-1546, 2014.

LILJEDAHN, J. B. *et al.* **Tractors and their power units**. 4th ed. New York: AV1 Book, 1989.

LIU, M. *et al.* Design of a load torque based control strategy for improving electric tractor motor energy conversion efficiency. **Mathematical problems in engineering**, v. 2016, 14 p, 2016.

LIYOU, X. *et al.* Control algorithm and energy management strategy for extended range electric tractors. **International journal of agricultural and biological engineering**, v. 10, n. 5, p. 35–44, 2017.

MACMILLAN, R. H. The mechanics of tractor-implement performance: theory and worked examples: a textbook for students and engineers. **Minerva Access**, 2002. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11343/33718>. Acesso em: 18 set. 2019.

MAGALHÃES, R. O. *et al.* Review on applications of electric vehicles in the countryside. **Cienc. Rural**, v. 47, n. 7, 2017.

MARQUEZ, L. **Tractores agrícolas**: tecnología y utilización. España: B&H, 2012.

MÁS, F. R.; ZHANG, Q.; HANSEN, A. C. **Mechatronics and intelligent systems for off-road vehicles**. USA: Springer Science & Business Media, 2010.

MELO, R. P. **Desenvolvimento e avaliação do protótipo de uma semeadora puncionadora para agricultura familiar**. 2017. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.

MELO, R. R. **Conversor cc-cc bidirecional intercalado aplicado a supercapacitores para veículos elétricos**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2014.

MICROCHIP. **DsPIC30F4013 Data sheet**: high-performance digital signal controllers. microchip, 2004. Disponível em: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/70138G.pdf>. Acesso em: 20/10/2017.

MODBUS. **MODBUS over serial line specification and implementation guide V1.02**. Modbus.org, Dec 20, 2006.

MONNAY, C. **Benchmark survey: potential and trends in off-highway vehicles' electrification**. Semcon, 2017. Disponível em: [https://go.semcon.com/hubfs/content/Semcon\\_Potential-and-trends-in-off-highway-vehicles%E2%80%99-electrification\\_Aug2017.pdf](https://go.semcon.com/hubfs/content/Semcon_Potential-and-trends-in-off-highway-vehicles%E2%80%99-electrification_Aug2017.pdf). Acesso em: 25/09/2019.

MONTGOMERY, D. C. **Introdução ao controle estatístico da qualidade**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2004.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Applied statistics and probability for engineers**. 3rd ed. USA: John Wiley & Sons, 2002.

MOREDA, G. P. *et al.* High voltage electrification of tractor and agricultural machinery – a review. **Energy conversion and management**, v. 115, p. 117-131, 2016.

NAM, K.; HORI, Y.; LEE, C. Wheel slip control for improving traction-ability and energy efficiency of a personal electric vehicle. **Energies** **2015**, n. 8, p. 6820–6840, 2015.

NAVET, N.; SIMONOT-LION, F. **Automotive embedded systems handbook**. CRC Press, 2008.

OECD. **CODE 7** - OECD Standard code for the official testing of rear mounted roll-over protective structure on narrow track agricultural and forestry tractors. Disponível em: <https://www.oecd.org/agriculture/tractors/codes/07-oecd-tractor-codes-code-07.pdf>. Acesso em: 17 set. 2019.

OECD. **CODE 2** - OECD Standard code for the official testing of agricultural and forestry tractor performance. Disponível em: <http://www.oecd.org/agriculture/tractors/codes/02-oecd-tractor-codes-code-02.pdf>. Acesso em: 22 ago. 2017.

ORSOLINI, M. **Electric tractor vehicle**. United States Patent, n. USD355148S, Feb. 7, 1995. Disponível em: <https://patents.google.com/patent/USD355148S/en>. Acesso em: 11 set. 2018.

PARK, R. H. Two-reaction theory of synchronous machines generalized method of analysis – Part I. **Transactions of the American institute of electrical engineers**, v. 48, n. 3, p. 716–727, July 1929.

PAULA, V. R. **Viabilidade operacional do uso da energia elétrica como fonte de potência em tratores agrícolas**. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Lavras. Lavras, 2014.

POULLIKKAS, A. Sustainable options for electric vehicle technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 41, p. 1277–1287, 2015.

PRANAV, P. K. *et al.* Automatic wheel slip control system in field operations for 2WD tractors. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 84, p. 1–6, 2012.

RICHARDS, P. **A CAN Physical Layer Discussion**. AN228, MICROCHIP, 2002. Disponível em: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/appnotes/00228a.pdf>. Acesso em: 07 nov. 2019.

RODRIGUES, D. E. *et al.* Desempenho de um microtrator utilizando-se motores com diferentes alternativas energéticas. **Acta Sci. Technol.** Maringá, v. 28, n. 1, p. 55-63, 2006.

SEAD. Disponível em: <http://www.mda.gov.br/sitemda/noticias/nordeste-abriga-o-maior-numero-de-agricultores-familiares-do-pais>. Acesso em: 21 mar. 2017.

SEO, J. M. *et al.* **Permanent magnet synchronous motor for electric tractor of 35 horsepower**. 2013. IEEE ECCE Asia Downunder, Melbourne, VIC, Australia.

SILVEIRA, G. M. da. **Os cuidados com o trator**. Rio de Janeiro: Globo, 1987. (Coleção do agricultor (Mecanização)).

SOYLU, S. (Ed.). **Electric vehicles – modelling and simulations**. Croatia: IntechOpen, 2011.

SRIVASTAVA, A. K. *et al.* **Engineering principles of agricultural machines**. 2nd ed. St. Joseph: American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2006.

TAVERNINI, D. *et al.* Explicit nonlinear model predictive control for electric vehicle traction control. **IEEE Transactions on Control Systems Technology**, v. 27, n. 4, p. 1438–1451, 2019.

TIE, S. F.; TAN, C. W. A review of energy sources and energy management system in electric vehicles. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 20, p. 82–102, 2013.

TRZYNADLOWSKI, A. M. **Control of induction motors**. Academic Press, 2001.

UEKA, Y. *et al.* Study on the development of the electric tractor - specifications and traveling and tilling performance of a prototype electric tractor. **Engineering in Agriculture, Environment and Food**, v. 6, n. 4, p. 160-164, 2013.

VOGT, H. H. **Electric tractor system propelled by solar energy for small-scale family farming in semiarid regions of the northeast of Brazil**. 2018. Thesis (Doctoral in Agricultural Engineering) - Center Agricultural Sciences, Federal University of Ceará, Fortaleza, 2018.

VOGT, H. H.; ALBIERO, D.; SCHMUELLING, B. Electric tractor propelled by renewable energy for small-scale family farming. *In: INT. CONF. ECOLOGICAL VEHICLES AND RENEWABLE ENERGIES (EVER)*, 13th, 2018, Monte-Carlo. **Proceedings...** Monte-Carlo: IEEE, 2018. p. 1–4.

VOLPATO, C. E. S. *et al.* Evaluation of the operational viability of the use of electricity as a source of power in agricultural tractors. *In: ASABE ANNUAL INT. MEETING*, 2016, Orlando. **Proceedings...** Orlando: ASABE, 2016. p. 1.

WEG. **Inversor de Frequência para Tração Elétrica - CVW300**. Manual do Usuário. Número do documento: 10001832424 / 06. Brasil, 2016a.

WEG. **Modbus RTU - CVW300**. Manual do Usuário. Número do documento: 10002784475 / 02. Brasil, 2014.

WEG. **Motores de indução alimentados por inversores de frequência PWM**. Guia Técnico Cód. 50029351, Rev. 13, Brasil, 2016b.

YIN, D.; SUN, N.; HU, J. A wheel slip control approach integrated with electronic stability control for decentralized drive electric vehicles. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, v. 15, n. 4, p. 2244–2252, 2019.

YONG, J. Y. *et al.* A review on the state-of-the-art technologies of electric vehicle, its impacts and prospects. **Ideas**, v. 49, p. 365–385, 2015.

YOO, T. *et al.* Performance interpretation method for electrical tractor based on model-based design. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON IT CONVERGENCE AND SECURITY (ICITCS)*, 2013, Macao. **Proceedings...** Macao: IEEE, 2013. p. 1-4.

ZHANG, X.; GÖHLICH, D. Integrated traction control strategy for distributed drive electric vehicles with improvement of economy and longitudinal driving stability. **Energies** 2017, v. 10, n. 1, p. 1-18, 2017.

ZOZ, F. M. Predicting tractor field performance. **Transactions of the ASAE**, v. 15, n. 2, p. 249-255, 1972.

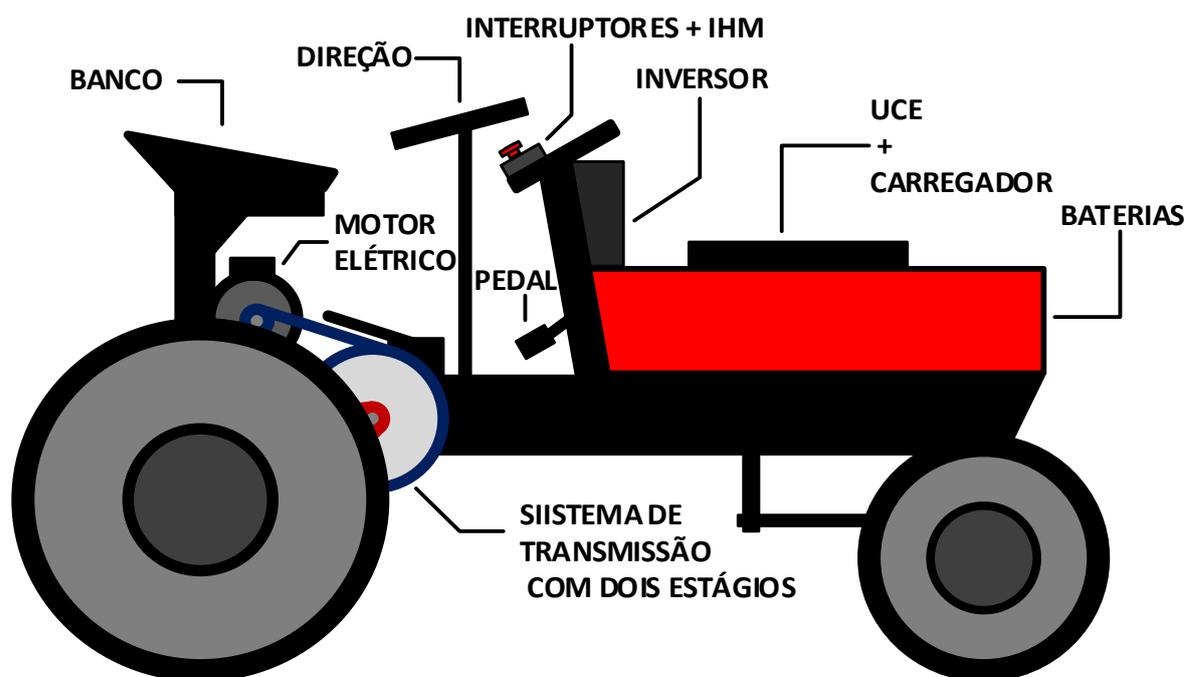
ZOZ, F. M.; GRISSO, R. D. Traction and tractor performance. **Tractor design**. n. 27. ASAE. USA, 2003.

## APÊNDICE A – PROTÓTIPO TRATOR ELÉTRICO

Com base em pesquisas desenvolvidas pelos departamentos de Engenharia Agrícola e Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará – UFC foi desenvolvido o protótipo de um trator elétrico com capacidade de utilizar a maioria dos implementos agrícolas compatíveis com a agricultura familiar. O projeto do protótipo do trator elétrico foi inicialmente apresentado por Vogt (2018) e para a concepção do projeto foi proposto uma potência de 9 kW no seu acionamento, compatível com potências de motocultores com MCI existentes atualmente no mercado.

O projeto estrutural do trator foi fundamentado na distribuição mais adequada dos componentes principais (baterias, inversores e motores elétricos) para uma proporção de peso ideal. Os motores do protótipo são colocados acima do eixo traseiro (abaixo do assento do motorista) e as baterias na parte frontal, diretamente fixadas no chassi, dando uma distribuição de peso de 43% no eixo dianteiro por 57% no eixo traseiro. A estrutura do trator elétrico projetado é observada na Figura 98.

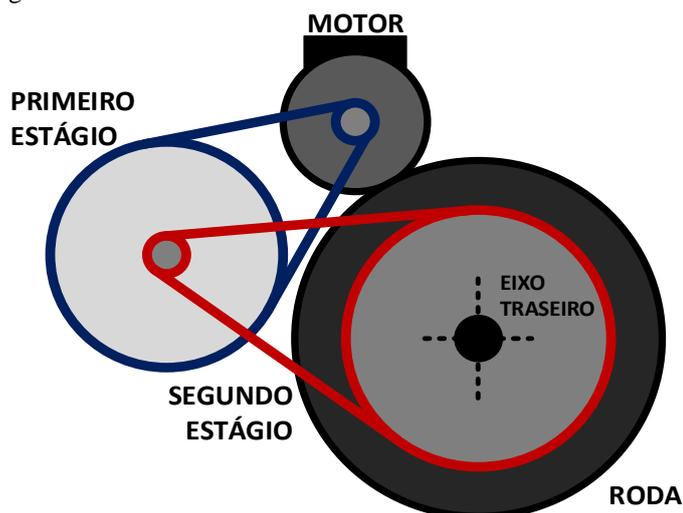
Figura 98 - Estrutura do Trator Elétrico



Fonte: Elaborada pelo autor.

Ainda sobre o projeto estrutural, é utilizado uma transmissão de corrente com dois estágios simples e uma relação de transmissão total de 34,6. Este sistema de transmissão por correntes com dois estágios é visto na Figura 99.

Figura 99 - Sistema de Transmissão Trator Elétrico



Fonte: Elaborada pelo autor.

Assim, com a velocidade de rotação nominal dos motores de 1715 rpm, tem-se uma velocidade de rotação máxima de 49,5 rpm nas rodas motrizes. Considerando os parâmetros apresentados, os seguintes valores teóricos de velocidade (não considerando patinagem) e força de tração (não considerando perdas mecânicas) são obtidos:

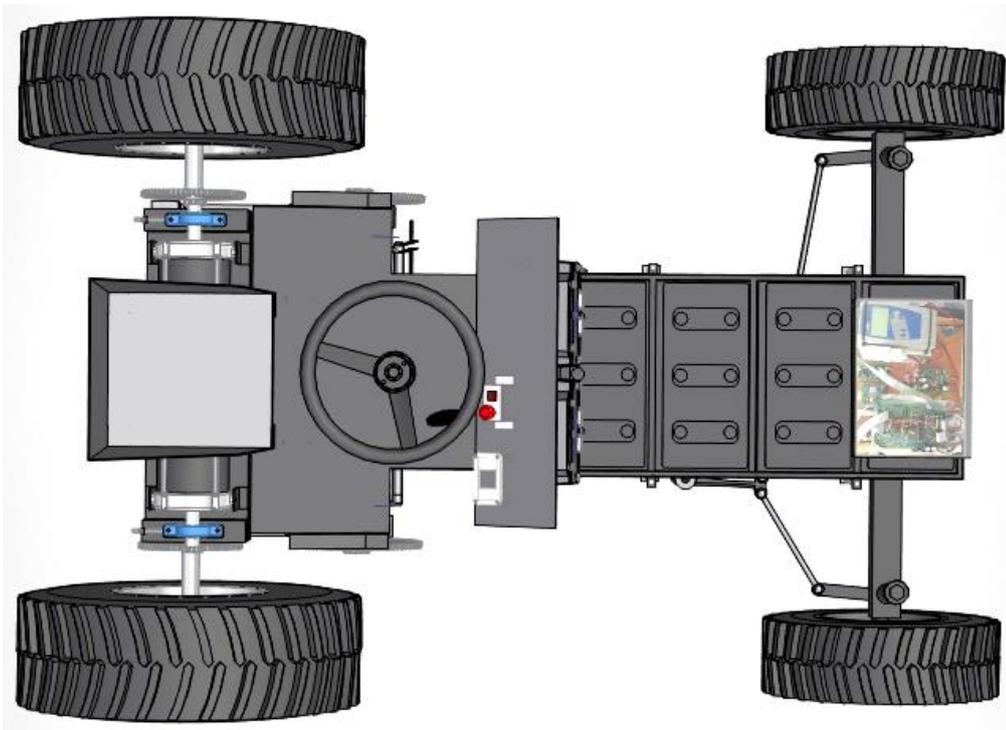
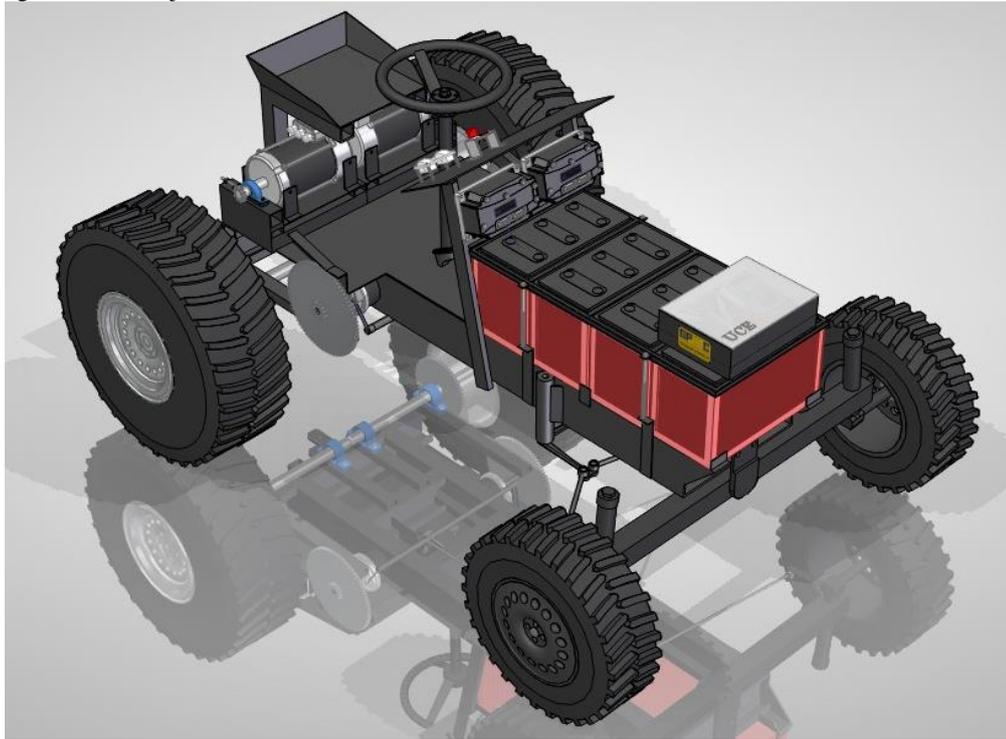
- Velocidade nominal (na rotação nominal do motor) = 7 km/h;
- Força de tração com torque nominal do motor (2 motores x 2316 N) = 4632 N; e
- Força de tração máxima a 330% de torque máximo permitido pelo motor (2 motores x 7643 N) = 15286 N.

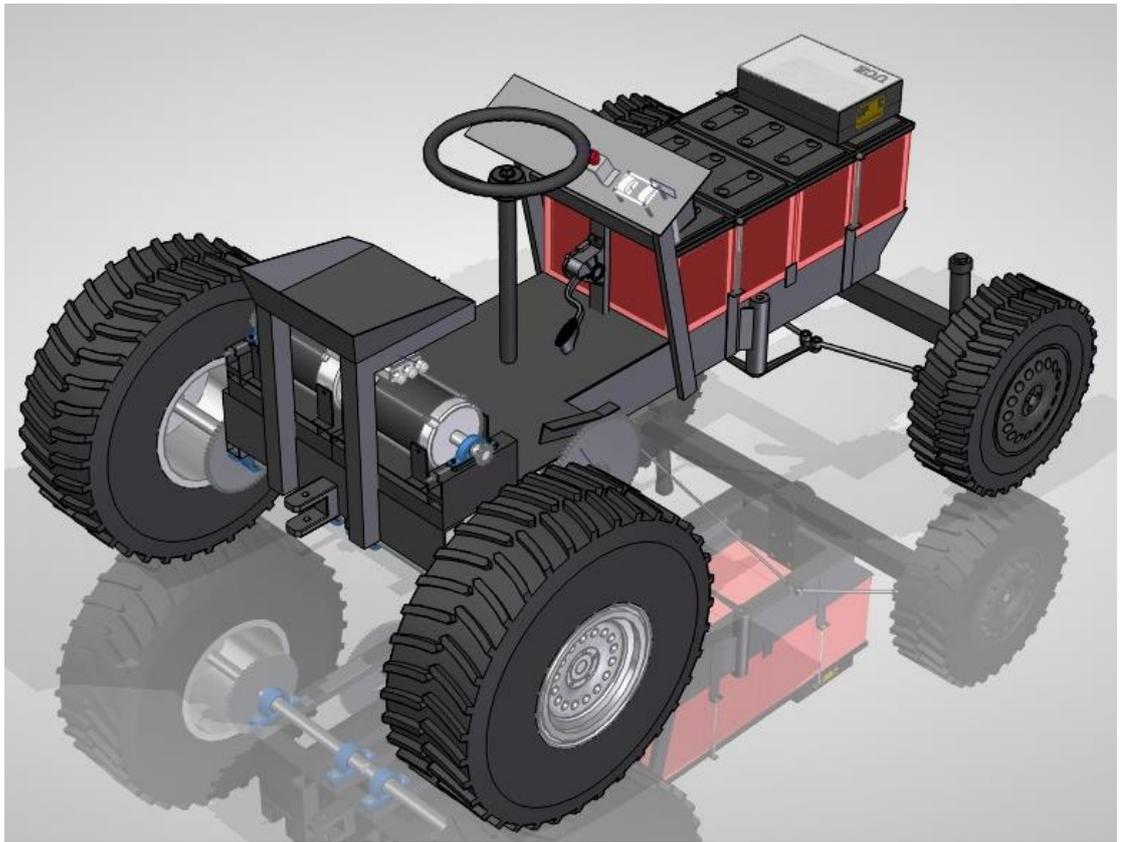
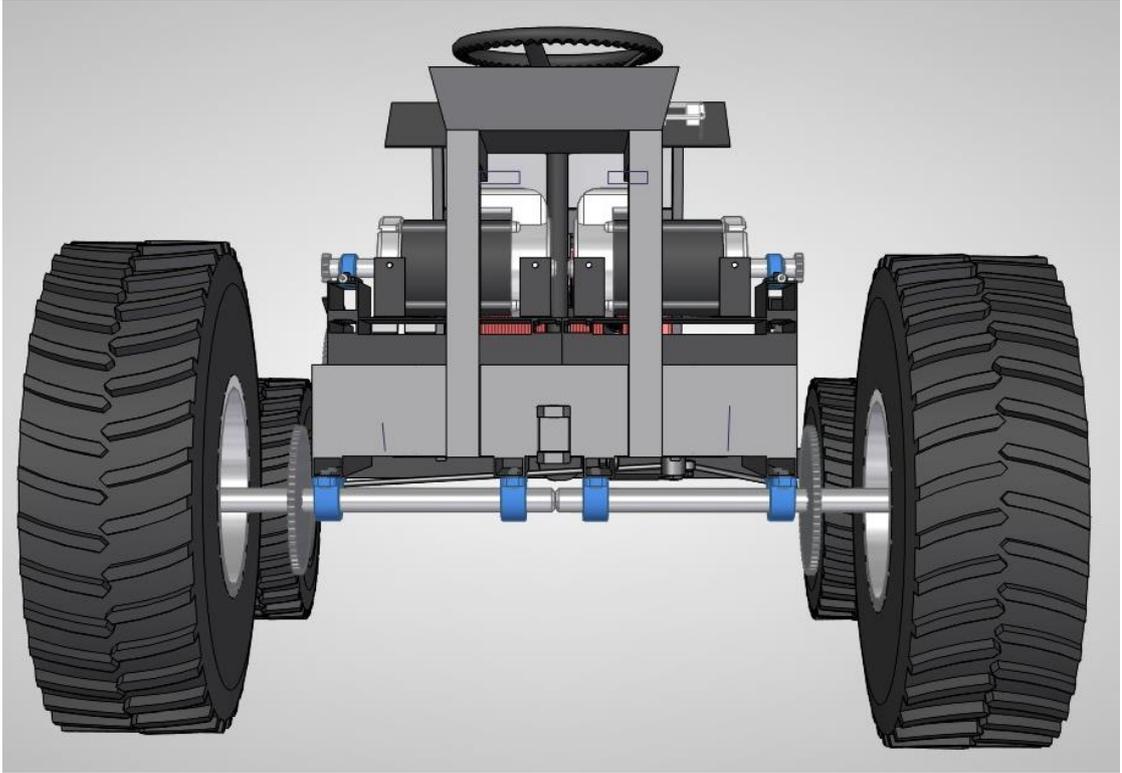
As dimensões gerais do protótipo são:

- Distância entre eixos: 1.700 mm
- Largura total: 1.400 mm
- Comprimento total: 2.000 mm
- Altura total (excluindo o condutor): 1.100 mm
- Distância ao solo: 280 mm

Tem-se na Figura 100 todo o projeto em 3D do trator elétrico.

Figura 100 - Projeto Trator Elétrico





Fonte: Arquivo do autor.

Tem-se na Figura 101 o ensaio de pesagem de eixos do trator elétrico.

Figura 101 - Pesagem Trator Elétrico



Fonte: Arquivo do autor.

Medições:

- Eixo dianteiro 300 kg (150 +150);
- Eixo traseiro 400 kg (200 + 200);
- Peso total 700 kg (300 + 400).

Na Figura 102, tem-se o trator elétrico em pré-teste de campo para avaliação de funcionamento em condições reais.

Figura 102 - Pré-teste de campo do trator elétrico

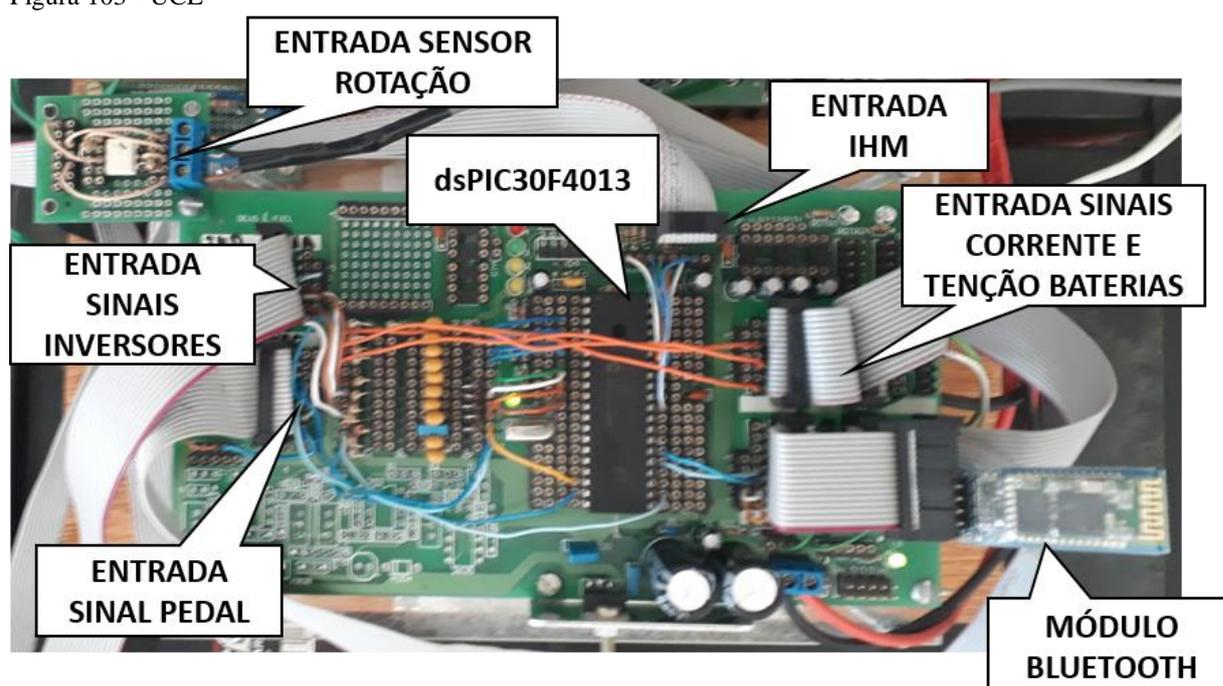


Fonte: Arquivo do autor.

## APÊNDICE B – PROGRAMAÇÃO UCE

Para a implementação da UCE (Figura 103) optou-se pela utilização de um dsPIC (Digital Signal Controller, ou DSC) da Microchip. Dessa forma, o processador dsPIC30F4013 foi adotado para executar as estratégias de controle e acionamento aqui expostas. A lógica de funcionamento do algoritmo executado pelo microcontrolador é desenvolvida em linguagem de programação C e o código de programação utilizado no processador do protótipo é apresentado a diante.

Figura 103 - UCE



Fonte: Elaborada pelo autor.

Abaixo seguem os códigos de implementação dos Controladores PI para acionamento dos dois inversores.

```
//----- IN01 -----
// Ts = 5.0e-02
// Kp = 1.20000e-01 (contínuo)
// Ki = 6.1840e-03 (continuo)

// Kpd = 10 (discreto*DIV_KP)
// DIV_KP = 83
// Kid = 10 (discreto*DIV_KI*DIV_SI)
// DIV_KI = 21
// DIV_SI = 77

// Error_max = 2905
// EMAX_P = 2905
// EMAX_I = 3000
// MAX_OUT = 350
// MIN_OUT = 0
```

```

//-----
static int erro_C_VELO_01;
static int SI_C_VELO_01,PI_TMP_C_VELO_01,PI_Out_C_VELO_01=0;
static int Flag_wind_C_VELO_01=0;
static int KP_C_VELO_01=10;
static int KI_C_VELO_01=10;
static int DIV_KP_C_VELO_01=83;
static int DIV_KI_C_VELO_01=21;
static int DIV_SI_C_VELO_01=77;
static int MAX_OUT_C_VELO_01=350;
static int MIN_OUT_C_VELO_01=0;
#define CTE_MAX_OUT_C_VELO_01 350
#define CTE_MIN_OUT_C_VELO_01 0
void C_VELO_01(void)
{
    if(erro_C_VELO_01>2905) erro_C_VELO_01 = 2905;
    if(erro_C_VELO_01<-2905) erro_C_VELO_01 = -2905;
    PI_TMP_C_VELO_01 = (SI_C_VELO_01/DIV_SI_C_VELO_01) +
((KP_C_VELO_01*erro_C_VELO_01)/DIV_KP_C_VELO_01);
    if(MAX_OUT_C_VELO_01>CTE_MAX_OUT_C_VELO_01) MAX_OUT_C_VELO_01 =
CTE_MAX_OUT_C_VELO_01;
    if(MIN_OUT_C_VELO_01<CTE_MIN_OUT_C_VELO_01) MIN_OUT_C_VELO_01 =
CTE_MIN_OUT_C_VELO_01;
    if(PI_TMP_C_VELO_01>MAX_OUT_C_VELO_01) PI_Out_C_VELO_01 =
MAX_OUT_C_VELO_01;
    else
    if(PI_TMP_C_VELO_01<MIN_OUT_C_VELO_01) PI_Out_C_VELO_01 =
MIN_OUT_C_VELO_01;
    else PI_Out_C_VELO_01=PI_TMP_C_VELO_01;

    if(erro_C_VELO_01>0){
        if(PI_TMP_C_VELO_01>MAX_OUT_C_VELO_01)Flag_wind_C_VELO_01=1; else
Flag_wind_C_VELO_01=0;
    }
    else
    if(erro_C_VELO_01<0){
        if(PI_TMP_C_VELO_01<MIN_OUT_C_VELO_01)Flag_wind_C_VELO_01=1; else
Flag_wind_C_VELO_01=0;
    }
    else Flag_wind_C_VELO_01=0;

    if(!((PI_Out_C_VELO_01!=PI_TMP_C_VELO_01)&&(Flag_wind_C_VELO_01))){
        PI_TMP_C_VELO_01 = ((KI_C_VELO_01*erro_C_VELO_01)/DIV_KI_C_VELO_01);
        if(PI_TMP_C_VELO_01==0){
            if(erro_C_VELO_01>0)PI_TMP_C_VELO_01=1;
            if(erro_C_VELO_01<0)PI_TMP_C_VELO_01=-1;
        };
        SI_C_VELO_01 = SI_C_VELO_01 + PI_TMP_C_VELO_01;
    }

    if(SI_C_VELO_01>(MAX_OUT_C_VELO_01*DIV_SI_C_VELO_01))SI_C_VELO_01=(MAX_OUT_C_VELO_01*DIV_SI_C_VELO_01);

    if(SI_C_VELO_01<(MIN_OUT_C_VELO_01*DIV_SI_C_VELO_01))SI_C_VELO_01=(MIN_OUT_C_VELO_01*DIV_SI_C_VELO_01);
}
//----- IN02 -----
// Ts = 5.0e-02
// Kp = 1.200000e-01 (continuo)

```

```

// Ki = 6.1840e-03 (continuo)

// Kpd = 10 (discreto*DIV_KP)
// DIV_KP = 83
// Kid = 10 (discreto*DIV_KI*DIV_SI)
// DIV_KI = 21
// DIV_SI = 77

// Error_max = 2905
// EMAX_P = 2905
// EMAX_I = 3000
// MAX_OUT = 350
// MIN_OUT = 0

//-----
static int erro_C_VELO_02;
static int SI_C_VELO_02,PI_TMP_C_VELO_02,PI_Out_C_VELO_02=0;
static int Flag_wind_C_VELO_02=0;
static int KP_C_VELO_02=10;
static int KI_C_VELO_02=10;
static int DIV_KP_C_VELO_02=83;
static int DIV_KI_C_VELO_02=21;
static int DIV_SI_C_VELO_02=77;
static int MAX_OUT_C_VELO_02=350;
static int MIN_OUT_C_VELO_02=0;
#define CTE_MAX_OUT_C_VELO_02 350
#define CTE_MIN_OUT_C_VELO_02 0
void C_VELO_02(void)
{
    if(erro_C_VELO_02>2905) erro_C_VELO_02 = 2905;
    if(erro_C_VELO_02<-2905) erro_C_VELO_02 = -2905;
    PI_TMP_C_VELO_02 = (SI_C_VELO_02/DIV_SI_C_VELO_02) +
((KP_C_VELO_02*erro_C_VELO_02)/DIV_KP_C_VELO_02);
    if(MAX_OUT_C_VELO_02>CTE_MAX_OUT_C_VELO_02) MAX_OUT_C_VELO_02 =
CTE_MAX_OUT_C_VELO_02;
    if(MIN_OUT_C_VELO_02<CTE_MIN_OUT_C_VELO_02) MIN_OUT_C_VELO_02 =
CTE_MIN_OUT_C_VELO_02;
    if(PI_TMP_C_VELO_02>MAX_OUT_C_VELO_02) PI_Out_C_VELO_02 =
MAX_OUT_C_VELO_02;
    else
    if(PI_TMP_C_VELO_02<MIN_OUT_C_VELO_02) PI_Out_C_VELO_02 =
MIN_OUT_C_VELO_02;
    else PI_Out_C_VELO_02=PI_TMP_C_VELO_02;

    if(erro_C_VELO_02>0){
        if(PI_TMP_C_VELO_02>MAX_OUT_C_VELO_02)Flag_wind_C_VELO_02=1; else
Flag_wind_C_VELO_02=0;
    }
    else
    if(erro_C_VELO_02<0){
        if(PI_TMP_C_VELO_02<MIN_OUT_C_VELO_02)Flag_wind_C_VELO_02=1; else
Flag_wind_C_VELO_02=0;
    }
    else Flag_wind_C_VELO_02=0;

    if(!((PI_Out_C_VELO_02!=PI_TMP_C_VELO_02)&&(Flag_wind_C_VELO_02))){
        PI_TMP_C_VELO_02 = ((KI_C_VELO_02*erro_C_VELO_02)/DIV_KI_C_VELO_02);
        if(PI_TMP_C_VELO_02==0){
            if(erro_C_VELO_02>0)PI_TMP_C_VELO_02=1;
            if(erro_C_VELO_02<0)PI_TMP_C_VELO_02=-1;
        }
    }
}

```

```

    };
    SI_C_VELO_02 = SI_C_VELO_02 + PI_TMP_C_VELO_02;
}

if(SI_C_VELO_02>(MAX_OUT_C_VELO_02*DIV_SI_C_VELO_02))SI_C_VELO_02=(MAX_OUT_C_
VELO_02*DIV_SI_C_VELO_02);

if(SI_C_VELO_02<(MIN_OUT_C_VELO_02*DIV_SI_C_VELO_02))SI_C_VELO_02=(MIN_OUT_C_VE
LO_02*DIV_SI_C_VELO_02);
}

```

### Código principal da Unidade de Comando Eletrônico – UCE.

```

#include "p30f4013.h"

_FOSC(0xBFEE); // 0xBFEE5 (XT-PLL-x4) 0xBFEE6 (XT-PLL-x8) 0xBFEE7 (XT-PLL-x16) 0xBFF3 (HS/2-
PLLx16)
_FWDT(WDT_OFF);

#define PINTESTE01_IS_OUTPUT TRISCbits.TRISC13 = 0
#define PINTESTE01_HIGH LATCbits.LATC13 = 1
#define PINTESTE01_LOW LATCbits.LATC13 = 0
unsigned char xTEST01;
#define DEBUG01 xTEST01++;if(xTEST01&0x01)PINTESTE01_HIGH;else PINTESTE01_LOW;

#define PINTESTE02_IS_OUTPUT TRISCbits.TRISC14 = 0
#define PINTESTE02_HIGH LATCbits.LATC14 = 1
#define PINTESTE02_LOW LATCbits.LATC14 = 0
unsigned char xTEST02;
#define DEBUG02 xTEST02++;if(xTEST02&0x01)PINTESTE02_HIGH;else PINTESTE02_LOW;

//===== GLOBAIS (MAIORIA EH DO KERNEL)
int div_con=0; int flag_con=0;
int div_calc=0; int flag_calc=0;
unsigned char MODO=0;
unsigned char FLAG_ERROR=0;
unsigned char flag_500us=0, div_500us=0;

int xx=0;
//=====VARIAVEIS GLOBAIS DO SISTEMA ESPECÍFICO
int RODA=0x03;
int K_Pedal=100;
int Pisada,Pisada_old,Pisada_Out_01,Pisada_Out_02,Pisada_Max;
int OFF_Pedal = 400;
int Duty1=0,Duty2=0,Old_Duty1=0,Old_Duty2=0;

int FAST_INT_tmp;
long FAST_LONG_tmp;

int VBAT_AVG=0;
long VBAT_SI=0;

int I_Bat;
int IBAT_AVG=0;
long IBAT_SI=0;

```

```

int I_Charge;
int ICHARGE_AVG=0;
long ICHARGE_SI=0;

int VPEDAL_AVG=0;
long VPEDAL_SI=0;

long AD5_SI=0;
int AD5_AVG;
long AD7_SI=0;
int AD7_AVG;

long RPM_INV1_SI;
int VELO_RT_01=0;
int GAIN_RPM_INV1 = 2035; // Calibracao do conversor A/D (conversao para RPM)
int OFF_RPM_INV1 = 2; // Calibracao do conversor A/D (conversao para RPM)

long RPM_INV2_SI;
int VELO_RT_02=0;
int GAIN_RPM_INV2 = 2045; // Calibracao do conversor A/D (conversao para RPM)
int OFF_RPM_INV2 = 2; // Calibracao do conversor A/D (conversao para RPM)

#define CAL_PISADA_MAX1          517
#define CAL_PISADA_MAX2          517

#define OFF1_DFT 169
#define OFF2_DFT 165

int OFF_PWM1 = OFF1_DFT; // qwert
int OFF_PWM2 = OFF2_DFT; // qwert

int PISADA_MAX1 = CAL_PISADA_MAX1 - OFF1_DFT; // Máximo valor a ser entregue ao PWM
(vai ser acrescido do offset_pwm)
int PISADA_MAX2 = CAL_PISADA_MAX2 - OFF2_DFT; // Máximo valor a ser entregue ao PWM
(vai ser acrescido do offset_pwm)

int RPM_auto=0;
int RPM_MAX_INV = 2000;
int RPM_GRAMP = 5000;
int ERROR_PAT1,ERROR_PAT2;
int RPM_PAT1=0,RPM_PAT2=0;
int SLIP_01=0,SLIP_02=0;

#define VELO_MIN_READ 40
int REF_SLIP = 10;
int REF_VELO_01 = 0; // Referencia do controlador de velocidade
int REF_VELO_02 = 0; // Referencia do controlador de velocidade

int
ERR_VELO_01,ERR_SLIP_01,REFF_01,EMAX_01,Kv_01,Ks_01,Pvelo_01,PsliP_01,ERR_SLIP_01_SI;
int
ERR_VELO_02,ERR_SLIP_02,REFF_02,EMAX_02,Kv_02,Ks_02,Pvelo_02,PsliP_02,ERR_SLIP_02_SI;

//===== BIBLIOTECAS
void FAST_MAIN(void);

#include "BLI_INTERPOLA.C"
#include "C_VELO_01K.C"
#include "C_VELO_02K.C"

```

```

#include "VELO_IC2.c"
#include "BLI_AD.c"
#include "DELAY_30F_C30.c"
#include "LTECV5_30F_C30.c"
#include "UART_BAS_30F.c"
#include "BLI_PWM_OC.c"
#include "BLI_EE.c"
#include "BLI_UNICOMTASK_30F.C"

//=====
INTERFACE =====
//=====

#define No_TELAS 7
#define No_SUB_TELAS 8
#define SAFE_GO_COUNT 3
#define SUBTELA_MAIN_DEFAULT 0
unsigned char SEL_TELA=1;
unsigned char SAFE_GO=SAFE_GO_COUNT;
int GLOBAL_inc=5;
unsigned char SUBTELA_MAIN=SUBTELA_MAIN_DEFAULT;
unsigned char Next_sub;
int Tec_Plus_Filter=0,Tec_Minus_Filter=0;

long L1tmp,L2tmp,L3tmp;

void TELA_01(unsigned char c) // TELA PRINCIPAL
{

//===== MAIN: PRIMEIRA LINHA
linha1();
    if(MODO==0){ // Desligado
        if(FLAG_ERROR){ // Teclas ajustam K_Pedal
            ed_lcd('E');
            mostra_hexabyte(FLAG_ERROR);
            ed_lcd(' ');
        }
        else
            epal_lcd("--");
            enum_lcd(RODA,1,0,0);
            ed_lcd(' ');

        if(c==COD_TEC4_MINUS){Tec_Minus_Filter+=20;}
        else {if(Tec_Minus_Filter)Tec_Minus_Filter--;}
        if(Tec_Minus_Filter>40){if(K_Pedal>10)K_Pedal-=10; Tec_Minus_Filter=0;}

        if(c==COD_TEC4_PLUS){Tec_Plus_Filter+=20;}
        else {if(Tec_Plus_Filter)Tec_Plus_Filter--;}
        if(Tec_Plus_Filter>40){ if(K_Pedal<200)K_Pedal+=10; Tec_Plus_Filter=0;}

    }
    if(MODO==1){ // Modo Manual (via pedal)
        epal_lcd("M"); // Tecla '-' ajusta as rodas ativas (RODA)
        enum_lcd(RODA,1,0,0);
        ed_lcd(' ');

        if(c==COD_TEC4_MINUS){Tec_Minus_Filter+=20;}
        else {if(Tec_Minus_Filter)Tec_Minus_Filter--;}
        if(Tec_Minus_Filter>80){if(RODA<3)RODA++; else RODA=0; Tec_Minus_Filter=0;}
    }
}

```

```

        if(MODO>=2){ // Modo de pitolo automático
            epal_lcd("A");
            enum_lcd(MODO,1,0,0);
        ed_lcd(' ');

        if(c==COD_TEC4_MINUS){Tec_Minus_Filter+=20;}
        else {if(Tec_Minus_Filter)Tec_Minus_Filter--;}
        if(Tec_Minus_Filter>80){if(RODA<3)RODA++; else RODA=0; Tec_Minus_Filter=0;}
        }
        epal_lcd("P");enum_lcd(Pisada,3,0,0); ed_lcd(' ');
        epal_lcd("R");enum_lcd(REF_VELO_01,4,0,0); ed_lcd(' ');
        epal_lcd(" ");
//===== MAIN: SEGUNDA LINHA
//===== MAIN: SEGUNDA LINHA
        linha2();
        if(SUBTELA_MAIN==0){ // xx AdBuf_A0 ICrpm_per VELO_REAL flag_send_black
            epal_lcd("P:"); enum_lcd(Pisada,3,0,0); ed_lcd(' ');
            enum_lcd(Pisada_Out_01,3,0,0); ed_lcd(' ');
            enum_lcd(REF_VELO_01,4,0,0); ed_lcd(' ');

            Next_sub=1;
        }
        if(SUBTELA_MAIN==1){
            epal_lcd("E:"); enum_lcd(VELO_REAL,4,0,0); ed_lcd(' ');
            enum_lcd(RPM_PAT1,4,1,0); ed_lcd(' ');
            enum_lcd(SLIP_01,3,1,0); ed_lcd(' ');
        }
        if(SUBTELA_MAIN==2){
            epal_lcd("P:");
            enum_lcd(ICrpm_per,5,0,0); ed_lcd(' ');
        }
        if(SUBTELA_MAIN==3){
            epal_lcd("R1:"); enum_lcd(VELO_RT_01,4,0,0); ed_lcd(' ');
            epal_lcd("R2:"); enum_lcd(VELO_RT_02,4,0,0); ed_lcd(' ');
        }
        if(SUBTELA_MAIN==4){
            epal_lcd("SI:");
//            enum_lcd(PAT_SI,5,0,0); ed_lcd(' ');
//            enum_lcd(SLIP_01,3,0,0); ed_lcd(' ');
//            enum_lcd(Pisada_Out_01,3,0,0); ed_lcd(' ');
        }
        if(SUBTELA_MAIN==5){
            epal_lcd("P1:"); enum_lcd(AdBuf_A3,4,0,0); ed_lcd(' ');
            epal_lcd("P2:"); enum_lcd(RPM_PAT2,4,0,0); ed_lcd(' ');
        }
        Next_sub=6;

        if(SUBTELA_MAIN==Next_sub){
            epal_lcd("CFG 01 :"); enum_lcd(SAFE_GO,1,0,0);
            if(c==COD_TEC4_MINUS){
                if(SAFE_GO)SAFE_GO--;
                if(SAFE_GO==0){
                    SEL_TELA=9;
                    SUBTELA_MAIN=1;
                    SAFE_GO=SAFE_GO_COUNT;
                    apaga_lcd();
                    delay__ms(1000);
                }
            }
        }
        Next_sub++;

```

```

if(SUBTELA_MAIN==Next_sub){
    epal_lcd("CFG 02 :"); enum_lcd(SAFE_GO,1,0,0);
    if(c==COD_TEC4_MINUS){
        if(SAFE_GO)SAFE_GO--;
        if(SAFE_GO==0){
            SEL_TELA=10;
            SUBTELA_MAIN=1;
            SAFE_GO=SAFE_GO_COUNT;
            apaga_lcd();
            delay__ms(1000);
        }
    }
}
Next_sub++;
if(SUBTELA_MAIN==Next_sub){
    epal_lcd("OUTRAS TELAS :"); enum_lcd(SAFE_GO,1,0,0);
    if(c==COD_TEC4_MINUS){
        if(SAFE_GO)SAFE_GO--;
        if(SAFE_GO==0){
            SEL_TELA=2;
            SUBTELA_MAIN=1;
            SAFE_GO=SAFE_GO_COUNT;
            apaga_lcd();
            delay__ms(1000);
        }
    }
}

epal_lcd("      ");
//----- TRATAMENTO DAS TECLAS
if(c==COD_TEC4_ENTER){
    SUBTELA_MAIN++;
    if(SUBTELA_MAIN>=No_SUB_TELAS){
        SUBTELA_MAIN=0;
    }
    SAFE_GO = SAFE_GO_COUNT;
}
if(c==COD_TEC4_ESC){
    MODO++;
    delay__ms (500);
    if(MODO>6)MODO=0;
    if(MODO==1){ // CONTROLE POR PEDAL
        delay__ms (200);
    }
    if(MODO==2){ // PILOTO AUTOMATICO
        delay__ms (200);
    }
}
} // FECHA void TELA_MAIN (unsigned char c)

//=====
//=====
//=====

void TELA_02(unsigned char c)
{
    linha1();
    enum_lcd(AdBuf_A0,4,0,0);      ed_lcd(' ');
    enum_lcd(AdBuf_A1,4,0,0);      ed_lcd(' ');
    linha2();
}

```

```

enum_lcd(AdBuf_A2,4,0,0);      ed_lcd(' ');
enum_lcd(AdBuf_A3,4,0,0);      ed_lcd(' ');
}
//=====
//=====
//=====

void TELA_03(unsigned char c)
{
  linha1();
  enum_lcd(AdBuf_A4,4,0,0);      ed_lcd(' ');
  enum_lcd(AdBuf_A5,4,0,0);      ed_lcd(' ');
  linha2();
  enum_lcd(AdBuf_A6,4,0,0);      ed_lcd(' ');
  enum_lcd(AdBuf_A7,4,0,0);      ed_lcd(' ');
}
//=====
//=====
//=====

void TELA_04(unsigned char c)
{
  linha1();
  epal_lcd("RI1:"); enum_lcd(VELO_RT_01,4,0,0); ed_lcd(' ');
  epal_lcd("RI2:"); enum_lcd(VELO_RT_02,4,0,0); ed_lcd(' ');
  linha2();
}
//=====
//=====
//=====

void TELA_05(unsigned char c)
{
  linha1();epal_lcd("XXXXXXXXXXXX");
}
//=====
//=====
//=====

void TELA_06(unsigned char c)
{
  linha1();epal_lcd("XXXXXXXXXXXX");
}
//=====
//=====
//=====

void TELA_07(unsigned char c)
{
  linha1();epal_lcd("TELA 07");
}
//=====
//=====
//=====

void TELA_08(unsigned char c)
{
  linha1();epal_lcd("TELA 08");
}
//=====

```

```

//=====
//=====

void TELA_09(unsigned char c)
{
  linha1();
  epal_lcd("CONFIG 01");

  linha2(); epal_lcd("          "); linha2();
  epal_lcd("K PEDAL: ");
  Pointer_read_int_tec4(&K_Pedal,5,300,3,0,0,1);
  delay__ms(500);

  linha2(); epal_lcd("          "); linha2();
  epal_lcd("RODAS: ");
  Pointer_read_int_tec4(&RODA,0,3,5,0,0,1);
  delay__ms(500);

  linha2(); epal_lcd("          "); linha2();
  epal_lcd("RPM AUTO: ");
  Pointer_read_int_tec4(&RPM_auto,0,3000,4,0,0,50);
  delay__ms(500);

  linha2(); epal_lcd("          "); linha2();
  epal_lcd("K_EQ: ");
  Pointer_read_int_tec4(&K_EQ_RPM,0,9999,4,0,0,50);
  delay__ms(500);

  linha2(); epal_lcd("          "); linha2();
  EEW_CFG();
  SEL_TELA=99; // SINALIZA PARA VOLTAR PARA A TELA MAIN
}
//=====
//=====
//=====

void TELA_10(unsigned char c)
{
  linha1();
  epal_lcd("CONFIG 02");

  linha2(); epal_lcd("          "); linha2();
  epal_lcd("OFF PEDAL: ");
  Pointer_read_int_tec4(&OFF_Pedal,0,999,3,0,0,1);
  delay__ms(500);

  linha2(); epal_lcd("          "); linha2();
  epal_lcd("OFFPWM(1): ");
  Pointer_read_int_tec4(&OFF_PWM1,0,999,3,0,0,1);
  delay__ms(500);

  linha2(); epal_lcd("          "); linha2();
  epal_lcd("OFFPWM(2): ");
  Pointer_read_int_tec4(&OFF_PWM2,0,999,3,0,0,1);
  delay__ms(500);

  linha2(); epal_lcd("          "); linha2();
  epal_lcd("Pmax(%):");
  Pointer_read_int_tec4(&REF_SLIP,0,200,2,0,0,1);
  delay__ms(500);
}

```

```

linha2(); epal_lcd("          "); linha2();
epal_lcd("RPM_MAX:");
Pointer_read_int_tec4(&RPM_MAX_INV,0,5000,4,0,0,200);
delay__ms(500);

linha2(); epal_lcd("          "); linha2();
EEW_CFG();
SEL_TELA=99; // SINALIZA PARA VOLTAR PARA A TELA MAIN
}
//=====
//=====
//=====

void seletor_telas(unsigned char c)
{
  if(SEL_TELA==1)TELA_01(c);      // TELA PRINCIPAL
  else
  if(SEL_TELA==2)TELA_02(c);
  else
  if(SEL_TELA==3)TELA_03(c);
  else
  if(SEL_TELA==4)TELA_04(c);
  else
  if(SEL_TELA==5)TELA_05(c);
  else
  if(SEL_TELA==6)TELA_06(c);
  else
  if(SEL_TELA==7)TELA_07(c);
  else
  if(SEL_TELA==8)TELA_08(c);
  else
  if(SEL_TELA==9)TELA_09(c);
  else
  if(SEL_TELA==10)TELA_10(c);

  if(((c==COD_TEC4_ENTER)&&(SEL_TELA!=1))||((SEL_TELA==99)){
    SEL_TELA++;
    if(SEL_TELA>No_TELAS){
      SEL_TELA=1;
      SUBTELA_MAIN=SUBTELA_MAIN_DEFAULT;
    }
    apaga_lcd();
    SAFE_GO=SAFE_GO_COUNT;
  }
}

//===== MAIN =====
//=====

int main (void)
{
  unsigned char c;

  PINTESTE01_IS_OUTPUT;
  PINTESTE02_IS_OUTPUT;
  //-----
  TRISB=0xFFFF;      // (1=ENTRADA)
  PORTB=0xFFFF;
  //-----
  Cfg_LCD();

```

```

Cfg_AD();
UNICOM_Cfg();
UARTBAS_Cfg();
Cfg_PWM_OCS();
Cfg_IC2_T2();
//-----
T1CON = 0x8000;    // Turn ON Timer 1
PR1  = 1106;      // TIMER1 Compare // 50 us @ 11.0592 x 8
//-----
IEC0bits.T1IE = 1;    // ENABLE TIMER 1 INTERRUPT
IEC0bits.IC2IE = 1;   // Enable AD interrupt
IEC0bits.ADIE = 0;    // Enable AD interrupt
IPC1bits.IC2IP = 7;   // highest priority to IC2

//-----

c = le_teclado4(0);
apaga_lcd();
EEread_CFG();

while(1){
  c = le_teclado4(0);
  seletor_telas(c);
  UART_MAIN();
} // Fecha while(1)
} // Fecha main()

//===== FAST_MAIN =====
//=====
//
// Pisada: valor referente ao PWM [0-PISADA_MAX](vai ser adicionado com o OFFSET)
// K_Pedal: [0-100] ==> atua no valor da entrada A/D para gerar o valor de pisada
// RPM_MAX_INV: deve estar de acordo com a configuracao dos inversores
// PISADA_MAX: constante relacionado com o PWM e com o valor máximo de tensão a ser gerado
// PISADA_MAX/RPM_MAX_INV: constante que transforma o valor em RPM em PWM (pisada)
// VELO_REAL, VELO_RT_01, VELO_RT_02: tudo em RPM (em termos do RPM do inversor)
// RPM_PAT1, RPM_PAT2: deslizamentos em RPM
// SLIP_01: valor em percentual de VELO_RT_01 (0 a 100)
//
//
//
void FAST_MAIN(void)
{

    int tmp;

    if(flag_500us){ // MINIMUM PERIOD: 1 ms !!!
        UniCom_Slave(UNICOM_DIN,UNICOM_DOUT);
        Send_Black();
        flag_500us=0;
    }

//=====
//=====
//=====
if(flag_calc){ // 2 ms

```

```

flag_calc = 0;

//=====
//=====
if(ICrpm_OverTime<=ICrpm_MAX_OVERTIME)ICrpm_OverTime++;
//=====
//===== Leituras analógicas

I_Bat = 2075 - AdBuf_A2;
I_Charge = AdBuf_A3 - 2065;

VPEDAL_SI = VPEDAL_SI + AdBuf_A0;
VBAT_SI = VBAT_SI + AdBuf_A1;
IBAT_SI = IBAT_SI + I_Bat;
ICHARGE_SI = ICHARGE_SI + I_Charge;
RPM_INV1_SI = RPM_INV1_SI + AdBuf_A4 - OFF_RPM_INV1;
AD5_SI = AD5_SI + AdBuf_A5;
RPM_INV2_SI = RPM_INV2_SI + AdBuf_A6 - OFF_RPM_INV2;
AD7_SI = AD7_SI + AdBuf_A7;
AD_Namo++;
}
//=====
//=====
//=====

if(flag_con){
flag_con=0;
DEBUG02;

VPEDAL_AVG = (int)(VPEDAL_SI/AD_Namo);          VPEDAL_SI = 0;
VBAT_AVG = (int)(VBAT_SI/AD_Namo);             VBAT_SI = 0;
IBAT_AVG = (int)(IBAT_SI/AD_Namo);             IBAT_SI = 0;
ICHARGE_AVG = (int)(ICHARGE_SI/AD_Namo);       ICHARGE_SI = 0;
VELO_RT_01 = (int)(RPM_INV1_SI/AD_Namo);       RPM_INV1_SI = 0;
VELO_RT_02 = (int)(RPM_INV2_SI/AD_Namo);       RPM_INV2_SI = 0;
AD5_AVG = (int)(AD5_SI/AD_Namo);               AD5_SI = 0;
AD7_AVG = (int)(AD7_SI/AD_Namo);               AD7_SI = 0;

AD_Namo=0;

PISADA_MAX1 = CAL_PISADA_MAX1 - OFF_PWM1;      // update PISADA MAX
PISADA_MAX2 = CAL_PISADA_MAX2 - OFF_PWM2;      // update PISADA MAX

//===== Normalizacao
FAST_LONG_tmp = VELO_RT_01;                    FAST_LONG_tmp =
(FAST_LONG_tmp*RPM_MAX_INV)/GAIN_RPM_INV1;
VELO_RT_01 = (int)FAST_LONG_tmp;

FAST_LONG_tmp = VELO_RT_02;                    FAST_LONG_tmp =
(FAST_LONG_tmp*RPM_MAX_INV)/GAIN_RPM_INV2;
VELO_RT_02 = (int)FAST_LONG_tmp;

FAST_LONG_tmp = (long)K_Pedal*((long)VPEDAL_AVG - OFF_Pedal);
Pisada = (int)(FAST_LONG_tmp/520);
if(Pisada<0)Pisada=0;

//=====
//=====

if(ICrpm_FaultHighSpeed>10){ // limite de alta frequência

```

```

PER_REAR_AVG = ICrpm_MIN_PER;
FAST_LONG_tmp = ( (long)288*(long)K_EQ_RPM)/((long)PER_REAR_AVG);
VELO_REAL = (int)FAST_LONG_tmp;
ICrpm_FaultLowSpeed = 0;
    }
    else
if(ICrpm_Namo>0){
    tmp = ICrpm_Namo;
    ICrpm_Namo = 0xffff; // disable update in ICper read
    FAST_LONG_tmp = (ICrpm_per_SUM / tmp);
    PER_REAR_AVG = (int)FAST_LONG_tmp;

    FAST_LONG_tmp = (
(long)288*(long)K_EQ_RPM*(long)tmp)/((long)ICrpm_per_SUM);
    VELO_REAL = (int)FAST_LONG_tmp;

    ICrpm_per_SUM = 0;
    ICrpm_Namo = 0; // reset and enable update in ICper read
        if(ICrpm_FaultLowSpeed)ICrpm_FaultLowSpeed--;
    }
    else{ // baixa velocidade ??
        if(ICrpm_OverTime >= ICrpm_MAX_OVERTIME)VELO_REAL = 0;
    }
}
//=====
RPM_PAT1 = VELO_RT_01 - VELO_REAL;
RPM_PAT2 = VELO_RT_02 - VELO_REAL;

if(VELO_RT_01>VELO_MIN_READ){
    FAST_LONG_tmp = RPM_PAT1;
    FAST_LONG_tmp = (FAST_LONG_tmp*100)/(long)(VELO_RT_01);
    SLIP_01 = (int)FAST_LONG_tmp;
    if(SLIP_01<0)SLIP_01=0;
    if(SLIP_01>100)SLIP_01=100;
}
else SLIP_01 = 0;

if(VELO_RT_02>VELO_MIN_READ){
    FAST_LONG_tmp = RPM_PAT2;
    FAST_LONG_tmp = (FAST_LONG_tmp*100)/(long)(VELO_RT_02);
    SLIP_02 = (int)FAST_LONG_tmp;
    if(SLIP_02<0)SLIP_02=0;
    if(SLIP_02>100)SLIP_02=100;
}
else SLIP_02 = 0;
//=====
if(Black_Task)error_send_black++; // Envio "no escuro" de dados pela UART
else{
    if(send_black){
        UARTBAS_LOAD_DATA(); // carrega os dados atuais
        Black_Task=1; // ativa o envio...
    }
}
//=====
//===== VELOCIDADES E PATINAGEM
if(MODO==0){ // MODO 0 DESLIGADO
    Pisada_Out_01=0;
    Pisada_Out_02=0;
    Pisada_old=0;
}
//=====

```

```

//=====
else
if(MODO==1){
// MODO 1: CONTROLE VIA PEDAL
if(RPM_GRAMP>0){
// Se existir limite estabelecido (via UNICOM)
FAST_LONG_tmp = RPM_GRAMP; FAST_LONG_tmp =
(FAST_LONG_tmp*PISADA_MAX1)/RPM_MAX_INV;
Pisada_Max = (int)FAST_LONG_tmp; // Converte RPM em Pisada
if(Pisada > Pisada_Max)Pisada = Pisada_Max;
}
Pisada_old = Pisada;
Pisada_Out_01 = Pisada;
Pisada_Out_02 = Pisada;
}
//=====
//=====
else
if(MODO==2){
// MODO 2: PILOTO AUTOMATICO (NÃO REALIMENTADO)
if(RPM_auto){
FAST_LONG_tmp = RPM_auto; FAST_LONG_tmp =
(FAST_LONG_tmp*PISADA_MAX1)/RPM_MAX_INV;
Pisada_Out_01=(int)FAST_LONG_tmp;
FAST_LONG_tmp = RPM_auto; FAST_LONG_tmp =
(FAST_LONG_tmp*PISADA_MAX2)/RPM_MAX_INV;
Pisada_Out_02=(int)FAST_LONG_tmp;
}
else{
Pisada_Out_01 = Pisada_old; // se não tiver um valor definido, utiliza o último valor do pedal
Pisada_Out_02 = Pisada_Out_01;
}
}
//=====
//=====
//=====
else
if(MODO==3){
// MODO 3: CONTROLE DE VELOCIDADE (SEM PATINACAO)
//=====
if(Pisada<10){
REF_VELO_01 = 0;
REF_VELO_02 = 0;
SI_C_VELO_01=0;
SI_C_VELO_02=0;
}
else
if(RPM_auto){
REF_VELO_01 = RPM_auto;
REF_VELO_02 = RPM_auto;
}
else{
REF_VELO_01 = Pisada*7;
if(REF_VELO_01>RPM_MAX_INV)REF_VELO_01=RPM_MAX_INV; // Limite do inversor
if(REF_VELO_01>RPM_GRAMP)REF_VELO_01=RPM_GRAMP; //Grampeamento velocidade
REF_VELO_02 = REF_VELO_01;
}
//=====

erro_C_VELO_01 = REF_VELO_01 - VELO_RT_01;
erro_C_VELO_02 = REF_VELO_02 - VELO_RT_02;

if(REF_VELO_01>0){

```

```

        C_VELO_01();
        C_VELO_02();
        Pisada_Out_01 = PI_Out_C_VELO_01;
        Pisada_Out_02 = PI_Out_C_VELO_02;
    }
    else{
        Pisada_Out_01 = 0; SI_C_VELO_01 = 0;
        Pisada_Out_02 = 0; SI_C_VELO_02 = 0;
    }
    Pisada_old=0;
}

//=====
//=====
//=====
//=====
else
    if(MODO==4){ // MODO 4: MINIMO
//=====
        if(Pisada<10){
            REF_VELO_01 = 0;
            REF_VELO_02 = 0;
            SI_C_VELO_01=0;
            SI_C_VELO_02=0;
            ERR_SLIP_01_SI=0;
            ERR_SLIP_02_SI=0;
        }
    else
        if(RPM_auto){
            REF_VELO_01 = RPM_auto;
            REF_VELO_02 = RPM_auto;
        }
    else{
        REF_VELO_01 = Pisada*7;
        if(REF_VELO_01>RPM_MAX_INV)REF_VELO_01=RPM_MAX_INV; // Limite do inversor
        if(REF_VELO_01>RPM_GRAMP)REF_VELO_01=RPM_GRAMP; //Grampeamento velocidade
        REF_VELO_02 = REF_VELO_01;
    }
//=====
ERR_VELO_01 = REF_VELO_01 - VELO_RT_01;
ERR_SLIP_01 = 100*(REF_SLIP - SLIP_01);
if(ERR_SLIP_01>400)ERR_SLIP_01=400;
if(ERR_SLIP_01<-400)ERR_SLIP_01=-400;

if(ERR_SLIP_01 < ERR_VELO_01)erro_C_VELO_01 = ERR_SLIP_01;
else erro_C_VELO_01 = ERR_VELO_01;

C_VELO_01();
if(REF_VELO_01)Pisada_Out_01 = PI_Out_C_VELO_01;
else Pisada_Out_01 = 0;

ERR_VELO_02 = REF_VELO_02 - VELO_RT_02;
ERR_SLIP_02 = 100*(REF_SLIP - SLIP_02);
if(ERR_SLIP_02>400)ERR_SLIP_02=400;
if(ERR_SLIP_02<-400)ERR_SLIP_02=-400;

if(ERR_SLIP_02 < ERR_VELO_02)erro_C_VELO_02 = ERR_SLIP_02;
else erro_C_VELO_02 = ERR_VELO_02;

```

```

C_VELO_02());
if(REF_VELO_02)Pisada_Out_02 = PI_Out_C_VELO_02;
else Pisada_Out_02 = 0;
//=====
Pisada_old=0;
}
//=====
//=====
//=====
//=====
else{ // MODO ?? DESLIGADO
Pisada_Out_01=0; Pisada_Out_02=0;
Pisada_old=0;
}
//=====
//=====
if(Pisada_Out_01)Duty1 = Pisada_Out_01 + OFF_PWM1; else Duty1=0; //Pisada_Out é o sinal de
controle
if(Pisada_Out_02)Duty2 = Pisada_Out_02 + OFF_PWM2; else Duty2=0; //está na faixa de [0 - 333]
aproximadamente

if(Duty1<0)Duty1=0;
if(Duty2<0)Duty2=0;
if(Duty1>PWM_MAX)Duty1=PWM_MAX;
if(Duty2>PWM_MAX)Duty2=PWM_MAX;
if(!(RODA&0x01))Duty1=0;
if(!(RODA&0x02))Duty2=0;
OC3RS = Duty2;
OC4RS = Duty1;
//=====
} // FECHA if(flag_con){
} // FECHA void FAST_MAIN(void)

//===== INTERRUPTCOES
//=====
//=====
//=====
//=====
//=====
//=====

// T = 50 us @ _FOSC(0xBF5); // 0xBF5 (XT-PLL-x4) @ XTAL = 11.50592 MHz
void __attribute__((interrupt, auto_psv)) _T1Interrupt(void)
{
static int div_debug;

//-----
AdBuf_A0 = ADCBUF0; // PEDAL
AdBuf_A1 = ADCBUF1; // VBAT
AdBuf_A2 = ADCBUF2; // IBAT
AdBuf_A3 = ADCBUF3; // I CARREGADOR
AdBuf_A4 = ADCBUF4; // RPM INV1
AdBuf_A5 = ADCBUF5; // CORRENTE INV1
AdBuf_A6 = ADCBUF6; // RPM INV2
AdBuf_A7 = ADCBUF7; // CORRENTE INV2
ADCON1bits.SAMP=1; // Start Conversion

IFS0bits.T1IF=0; // Clear TIMER1 interrupt flag

```

```

//-----
if(div_debug)div_debug--;
else{div_debug=(AdBuf_A0);DEBUG01;} // AdBuf_A0 44 ==> 1000 rpm ==> 222 Hz
//-----
if(div_500us)div_500us--;
else{
    div_500us=10;
    flag_500us=1;
}
//-----
if(div_calc)div_calc--;
else{div_calc=40;flag_calc=1;}

if(div_con)div_con--;
else{div_con=1000;flag_con=1;}

//-----
}

void __attribute__((interrupt, auto_psv)) _IC2Interrupt(void)
{
    IFS0bits.IC2IF = 0;
    // DEBUG01;

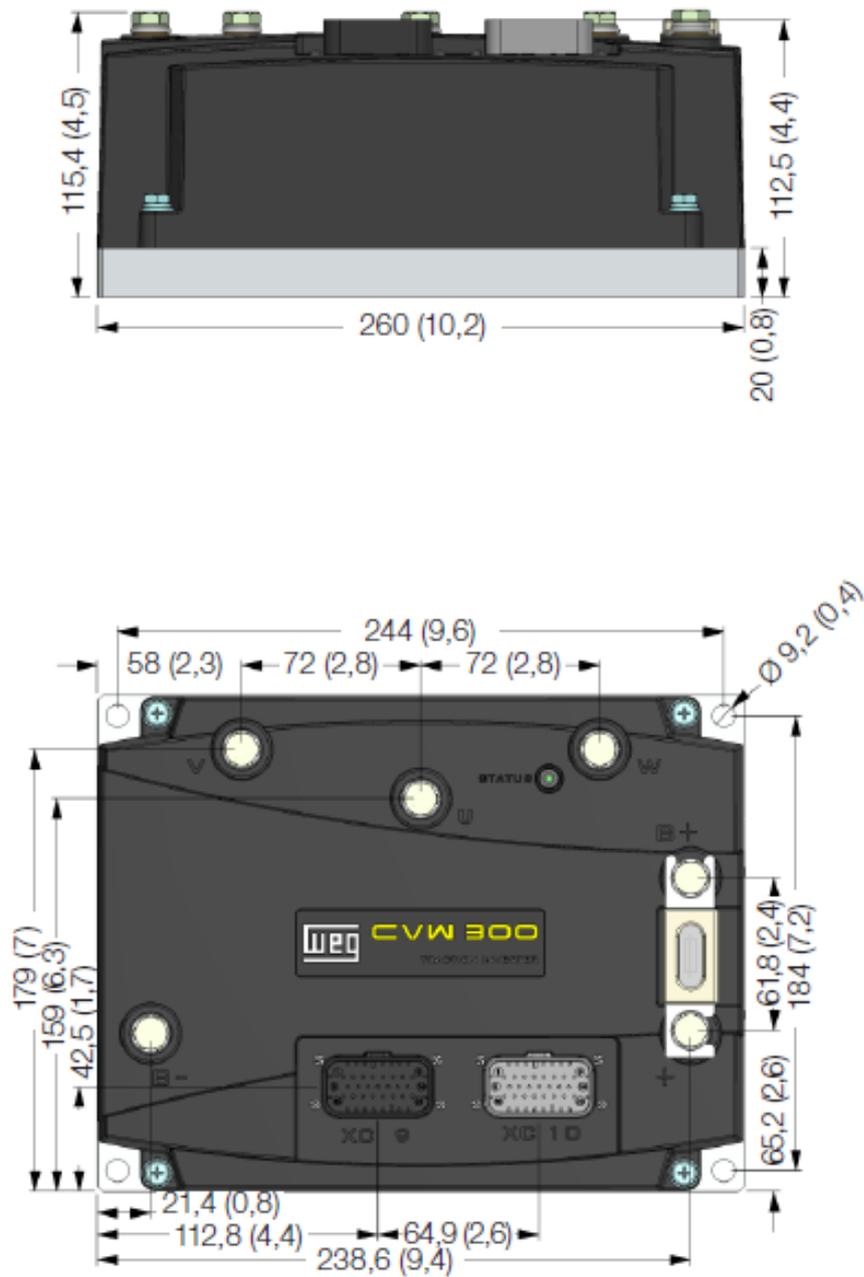
    ICrpm_tmp = IC2BUF;
    ICrpm_pera = ICrpm_per;
    ICrpm_per = (ICrpm_tmp - ICrpm_ICbufa);
    ICrpm_ICbufa = ICrpm_tmp;
    if((ICrpm_Namo != 0xffff)){
        if(ICrpm_per>=ICrpm_MIN_PER){
            ICrpm_per_SUM = ICrpm_per_SUM + ICrpm_per;
            ICrpm_Namo++;
            ICrpm_FaultHighSpeed=0;
        }
        else if(ICrpm_FaultHighSpeed<1000)ICrpm_FaultHighSpeed++;
    }
    if(ICrpm_OverTime
ICrpm_MAX_OVERTIME){ICrpm_per_SUM=0;ICrpm_Namo=0;}
    ICrpm_OverTime=0;
}

```

&gt;=

## ANEXO A – INVERSOR DE FREQUÊNCIA CVW300

Inversor de frequência WEG modelo CVW300 aplicado a veículos elétricos (WEG, 2016a).



Blocodiagrama do Inversor CVW300.

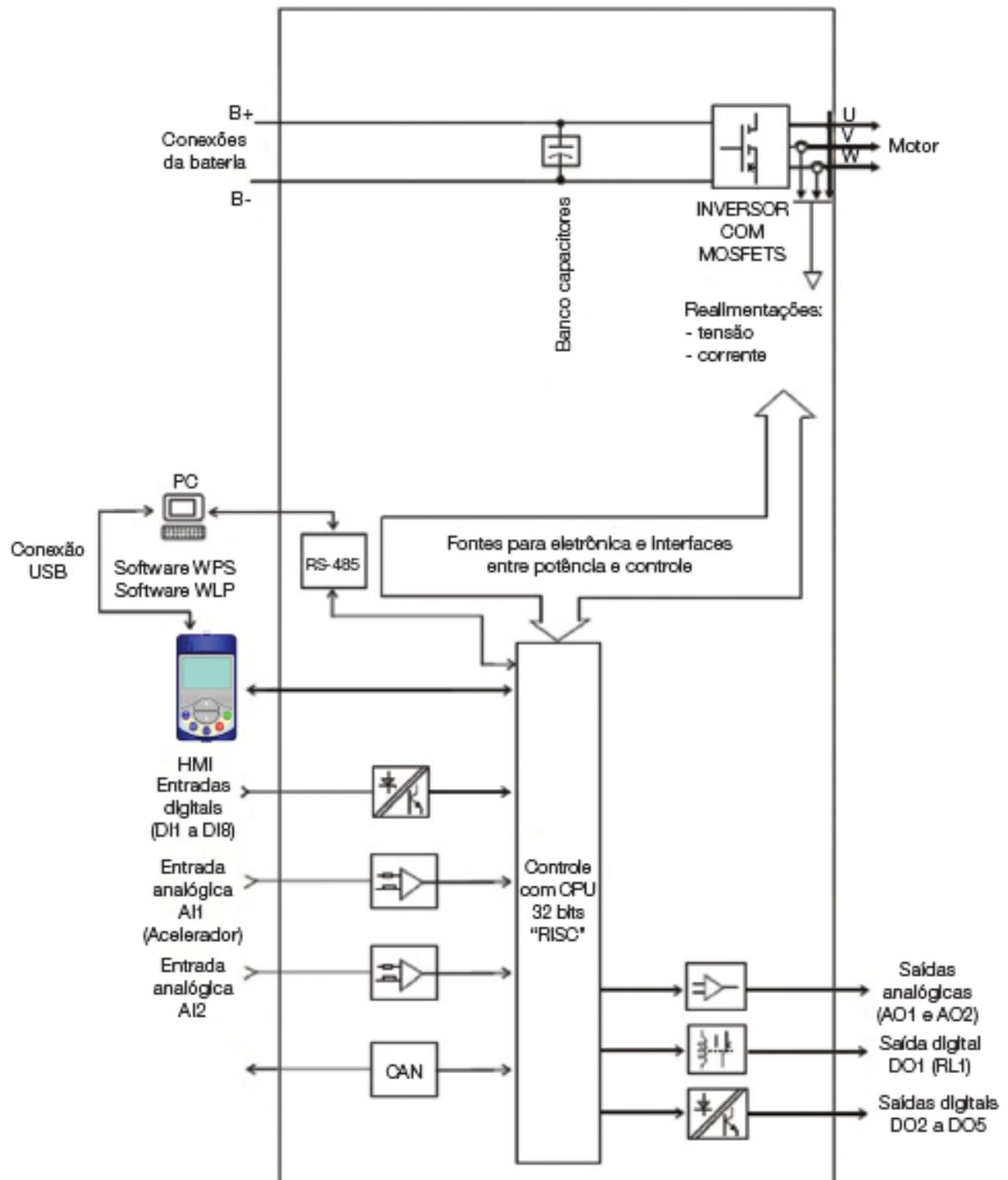
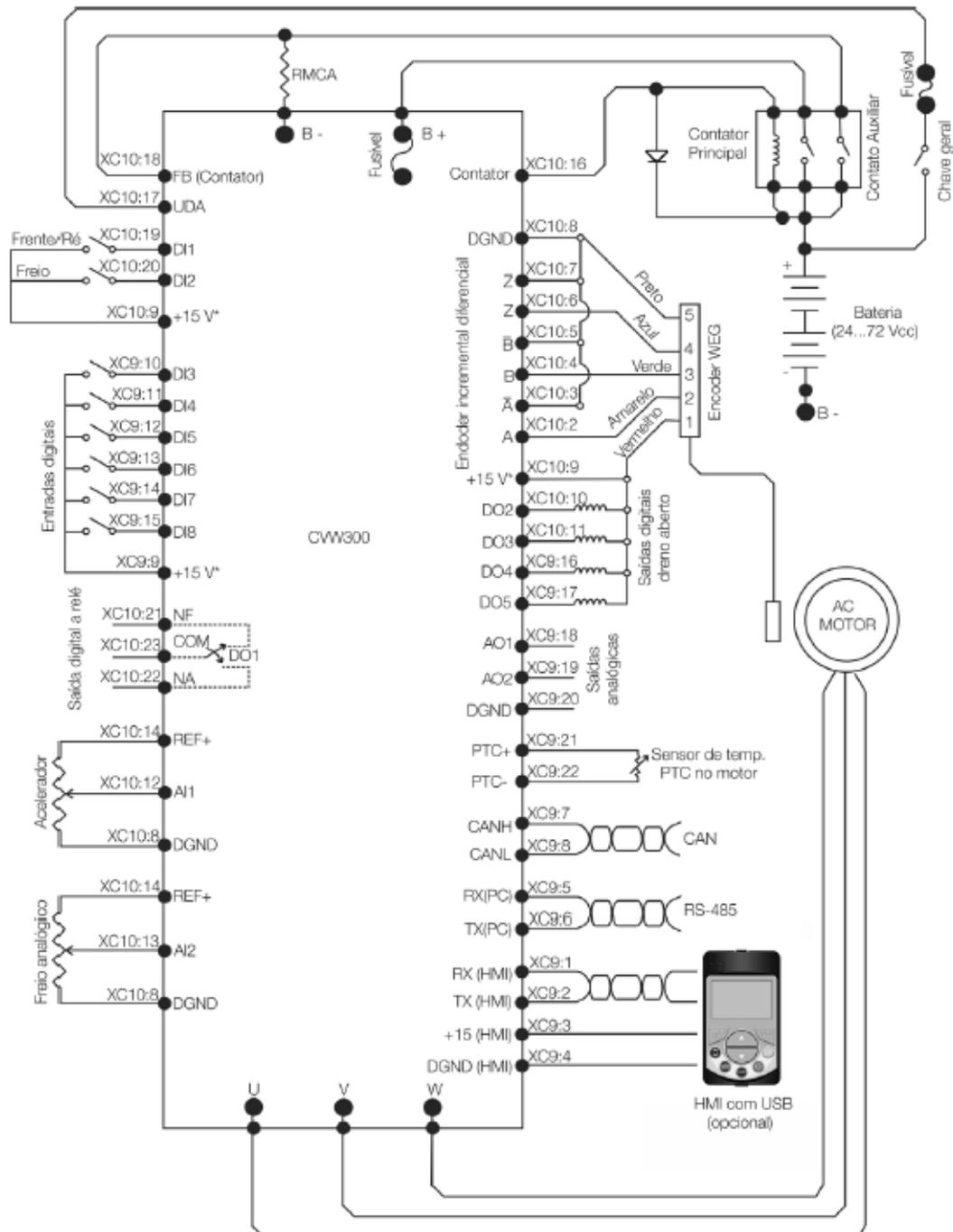


Diagrama de conexões do Inversor CVW300.



## ANEXO B – BATERIA DF 4001

Bateria Estacionária Freedom DF4001 12 V - C10 - 200Ah.



- Tensão de flutuação: 13,2 a 13,8 V @ 25°C
- Tensão de equalização e carga: 14,4 a 15,5 V @ 25°C

### Principais características elétricas

Modelos		DF300	DF500	DF700	DF1000	DF2000	DF2500	DF3000	DF4001
Capacidade @25°C (Ah)	10 h	24	30	41	54	94	130	156	200
	20 h	26	36	45	60	105	150	170	220
	100 h	30	40	50	70	115	165	185	240
Dimensões (mm)	Comprimento	175	175	210	244	330	511	511	525
	Largura	175	175	175	175	172	213	213	275
	Altura	175	175	175	175	240	230	230	250
Peso (Kg)		8,8	9,7	12,5	14,7	27,1	44,6	48,3	60,3

### Correntes de descarga (A) em diferentes regimes a 25°C (tensão final 10,5V)

Modelo	HORAS																MINUTOS		
	100hs	20hs	10hs	9hs	8hs	7hs	6hs	5hs	4,5hs	4hs	3,5hs	3hs	2,5hs	2hs	1,5hs	1h	45'	30'	15'
DF300	0,3	1,3	2,4	2,6	2,9	3,3	3,8	4,4	4,9	5,4	6,0	7,0	8,2	10,0	12,8	18,0	21,0	25,0	40,0
DF500	0,4	1,8	3,0	3,3	3,7	4,2	4,9	5,8	6,2	6,8	7,6	8,6	9,9	12,0	15,0	20,0	25,3	33,0	52,0
DF700	0,5	2,3	4,1	4,5	5,0	5,6	6,5	7,5	8,2	9,2	10,0	11,5	13,6	16,3	21,0	27,0	32,0	43,0	65,0
DF1000	0,7	3,0	5,4	5,8	6,4	7,3	8,2	9,8	10,5	11,5	12,5	14,5	17,0	19,0	25,2	35,0	42,5	55,0	84,0
DF2000	1,2	5,3	9,4	10,2	11,5	13,0	14,5	17,0	18,4	20,3	22,6	25,0	29,5	34,5	44,0	60,0	75,0	96,0	150,0
DF2500	1,7	7,5	13,0	14,4	16,2	18,0	20,0	23,0	25,0	28,0	31,0	34,0	40,0	47,0	58,0	81,0	99,0	130,0	200,0
DF3000	1,9	8,5	15,6	17,0	19,0	21,4	24,7	28,0	30,0	33,0	36,0	41,0	48,0	57,0	72,0	95,0	112,0	152,0	231,0
DF4001	2,4	11,0	20,0	21,5	24,0	26,5	30,0	35,0	38,0	41,5	46,0	52,0	60,0	72,0	90,0	120,0	145,0	191,0	290,0

## CURVAS DE DESCARGA - CORRENTE CONSTANTE - DF4001

