



DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA AUTÔNOMO DE
NAVEGAÇÃO E CONTROLE PARA O MAGLEV-COBRA COM
SENSORIAMENTO GPS DE ALTA PRECISÃO

César Augusto Gonçalves Amado

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Eletrônica e de Computação da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro.

Orientadores:

Luís Henrique Maciel Kosmalski Costa

Miguel Elias Mitre Campista

Rio de Janeiro
Outubro de 2025

DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA AUTÔNOMO DE
NAVEGAÇÃO E CONTROLE PARA O MAGLEV-COBRA COM
SENSORIAMENTO GPS DE ALTA PRECISÃO

César Augusto Gonçalves Amado

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO CURSO
DE ENGENHARIA ELETRÔNICA E DE COMPUTAÇÃO DA ESCOLA PO-
LITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO
PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU
DE ENGENHEIRO ELETRÔNICO E DE COMPUTAÇÃO

Autor:



César Augusto Gonçalves Amado

Orientador:



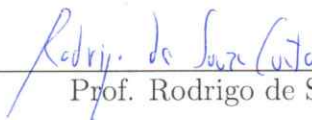
Prof. Luís Henrique Maciel Kosmalski Costa, Dr.

Orientador:



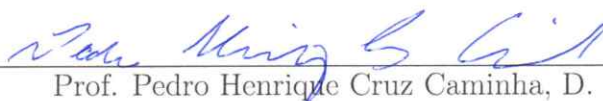
Prof. Miguel Elias Mitre Campista, D.Sc.

Examinador:



Prof. Rodrigo de Souza Couto, D. Sc.

Examinador:



Prof. Pedro Henrique Cruz Caminha, D. Sc


Rio de Janeiro

Outubro de 2025

Declaração de Autoria e de Direitos

Eu, *César Augusto Gonçalves Amado*, autor da monografia *DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA AUTÔNOMO DE NAVEGAÇÃO E CONTROLE PARA MAGLEV-COBRA COM SENSORIAMENTO GPS DE ALTA PRECISÃO*, subcrevo para os devidos fins, as seguintes informações:

1. O autor declara que o trabalho apresentado na disciplina de Projeto de Graduação da Escola Politécnica da UFRJ é de sua autoria, sendo original em forma e conteúdo.
2. Excetua-se do item 1. eventuais transcrições de texto, figuras, tabelas, conceitos e idéias, que identifiquem claramente a fonte original, explicitando as autorizações obtidas dos respectivos proprietários, quando necessárias.
3. O autor permite que a UFRJ, por um prazo indeterminado, efetue em qualquer mídia de divulgação, a publicação do trabalho acadêmico em sua totalidade, ou em parte. Essa autorização não envolve ônus de qualquer natureza à UFRJ, ou aos seus representantes.
4. O autor pode, excepcionalmente, encaminhar à Comissão de Projeto de Graduação, a não divulgação do material, por um prazo máximo de 01 (um) ano, improrrogável, a contar da data de defesa, desde que o pedido seja justificado, e solicitado antecipadamente, por escrito, à Congregação da Escola Politécnica.
5. O autor declara, ainda, ter a capacidade jurídica para a prática do presente ato, assim como ter conhecimento do teor da presente Declaração, estando ciente das sanções e punições legais, no que tange a cópia parcial, ou total, de obra intelectual, o que se configura como violação do direito autoral previsto no Código Penal Brasileiro no art.184 e art.299, bem como na Lei 9.610.
6. O autor é o único responsável pelo conteúdo apresentado nos trabalhos acadêmicos publicados, não cabendo à UFRJ, aos seus representantes, ou ao(s) orientador(es), qualquer responsabilização/ indenização nesse sentido.
7. Por ser verdade, firmo a presente declaração.



César Augusto Gonçalves Amado

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

Escola Politécnica - Departamento de Eletrônica e de Computação

Centro de Tecnologia, bloco H, sala H-217, Cidade Universitária

Rio de Janeiro - RJ CEP 21949-900

Este exemplar é de propriedade da Universidade Federal do Rio de Janeiro, que poderá incluí-lo em base de dados, armazenar em computador, microfilmear ou adotar qualquer forma de arquivamento.

É permitida a menção, reprodução parcial ou integral e a transmissão entre bibliotecas deste trabalho, sem modificação de seu texto, em qualquer meio que esteja ou venha a ser fixado, para pesquisa acadêmica, comentários e citações, desde que sem finalidade comercial e que seja feita a referência bibliográfica completa.

Os conceitos expressos neste trabalho são de responsabilidade do(s) autor(es).

AGRADECIMENTO

A jornada até o final deste Trabalho de Conclusão de Curso foi repleta de desafios, aprendizados e crescimento pessoal. Durante esse percurso, muitas pessoas foram essenciais, oferecendo apoio, incentivo e orientação, e a elas expresso minha mais sincera gratidão.

Primeiramente, agradeço aos meus pais, Marta Elisabete Gonçalves e Carlos José Amado Augusto, por todo o amor, suporte incondicional e ensinamentos que me acompanharam ao longo da vida. Sua dedicação e incentivo foram fundamentais para que eu chegasse até aqui, e este trabalho é, em grande parte, fruto do que aprendi com vocês.

Aos meus orientadores, Luís Henrique Maciel Kosmowski Costa e Miguel Elias Mitre Campista, meu profundo reconhecimento pela paciência, orientação precisa e incentivo constante. Suas contribuições foram essenciais para o desenvolvimento deste trabalho, e aprendi muito sob sua orientação.

Também expresso minha gratidão ao professor Richard Magdalena Stephan, cuja orientação e apoio durante minha iniciação tecnológica foram fundamentais para o amadurecimento das ideias que culminaram neste projeto de graduação. Seu incentivo e ensinamentos foram uma base sólida para minha trajetória acadêmica.

Por fim, agradeço a todos os amigos, colegas e professores que, direta ou indiretamente, contribuíram para essa caminhada. O conhecimento compartilhado, os momentos de apoio e as experiências vividas ao longo do curso foram essenciais para a realização deste trabalho.

RESUMO

Este Projeto de Graduação propõe o desenvolvimento de uma estrutura de automação veicular e sensoriamento remoto para o veículo de levitação magnética MagLev-Cobra, visando sua operação autônoma. A abordagem se baseia em um sistema de controle híbrido, que integra um microcomputador de alto nível (Raspberry Pi) para tomada de decisão e um Controlador Lógico Programável (CLP) industrial para a atuação em baixo nível. O sistema de percepção foi projetado em torno de um sensor GPS (*Global Positioning System*) de alta precisão com a funcionalidade RTK (Real Time Kinematics), complementado por sensores óptico de velocidade e ultrassônico de posição para adicionar redundância e confiabilidade. Para a validação da solução, foi desenvolvida um protótipo em bancada de laboratório. Primeiramente, implementou-se a interface elétrica de controle, adequando a incompatibilidade de tensões entre o microcomputador e o CLP. Em seguida, foi desenvolvida e programada no SoftPLC do inversor uma lógica de automação em linguagem Ladder, capaz de gerenciar todo o ciclo de operação do veículo. O sistema integrado foi então validado com sucesso ao controlar um motor rotativo que simulou a dinâmica do motor linear do MagLev. A arquitetura de automação se mostrou funcional, executando a lógica programada com tempos de resposta satisfatórios. Contudo, o estudo do sistema de sensoriamento demonstrou que o GPS RTK, ainda apresentou precisão insuficiente para garantir, de forma isolada, a segurança da aplicação. Em contrapartida, a calibração em laboratório dos sensores óptico e ultrassônico confirmou seu desempenho linear e preciso, validando-os como componentes essenciais para uma solução de automação robusta. Concluiu-se que a arquitetura de controle é viável, mas a autonomia do MagLev-Cobra requer uma abordagem de fusão de sensores. Como próximos passos, propõe-se a fusão de dados para combinar as medições dos diferentes sensores e, subsequentemente, a implementação do sistema de automação completo no protótipo final do veículo.

Palavras-Chave: MagLev; automação veicular; sensoriamento remoto; Controlador Lógico Programável (CLP); GPS de alta precisão; veículo de levitação magnética.

ABSTRACT

This Graduation Project proposes the development of a vehicular automation and remote sensing framework for the MagLev-Cobra magnetic levitation vehicle, aiming for its autonomous operation. The approach is based on a hybrid control system, which integrates a high-level microcomputer (Raspberry Pi) for decision-making with an industrial Programmable Logic Controller (PLC) for low-level actuation. The perception system was designed around a high-precision GPS (Global Positioning System) sensor with RTK (Real-Time Kinematics) functionality, complemented by optical velocity and ultrasonic position sensors to add redundancy and reliability. To validate this solution, a functional laboratory benchtop prototype was developed. First, the electrical control interface was implemented, addressing the voltage incompatibility between the microcomputer and the PLC. Subsequently, a complete automation logic in Ladder language, capable of managing the vehicle's entire operational cycle, was developed and programmed on the inverter's SoftPLC. The integrated system was then successfully validated by controlling a rotary motor that simulated the dynamics of the MagLev's linear motor. The automation architecture proved to be functional, executing the programmed logic with satisfactory response times. However, the study of the perception system demonstrated that the GPS RTK sensor showed insufficient precision to ensure the application's safety on its own. In contrast, the laboratory calibration of the complementary optical and ultrasonic sensors confirmed their linear and precise performance, validating them as essential components for a robust automation solution. It is concluded that the control architecture is viable, but the safe autonomy of the MagLev-Cobra requires a sensor fusion approach. As next steps, a data fusion algorithm to combine the measurements from the different sensors is proposed, followed by the implementation of the complete automation system on the final vehicle prototype.

Key-words: MagLev; vehicular automation; remote sensing; Programmable Logic Controller (PLC); high-precision GPS; data processing; magnetic levitation vehicle.

ACRÔNIMOS

CA - Corrente Alternada

C/A - *Coarse/Acquisition*

CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

CC - Corrente Contínua

CLP - Controlador Lógico Programável

CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

COPPE - Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia

CT - Centro de Tecnologia

EDL - Levitação Eletrodinâmica

EML - Levitação Eletromagnética

FAPERJ - Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro

GNSS - *Global Navigation Satellite System*

GPIO - *General Purpose Input/Output*

GPS - *Global Positioning System*

HACC - *Horizontal Accuracy*

HMI - Interface Homem-Máquina (do inglês, *Human-Machine Interface*)

HTS - Supercondutores de Alta Temperatura Crítica (do inglês, *High-Temperature Superconductors*)

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IGBT - *Insulated Gate Bipolar Transistor*

LAMBDA - *Least-squares AMBiguity Decorrelation Adjustment*

LASUP - Laboratório de Aplicações de Supercondutores

LSM - Motor Linear Síncrono (do inglês, *Linear Synchronous Motor*)

MagLev - *Magnetic Levitation*

NdFeB - Neodímio-Ferro-Boro

NTRIP - *Networked Transport of RTCM via Internet Protocol*

PDOP - *Positional Dilution of Precision*

PE - *Protective Earth*

PLC - *Programmable Logic Controller*

PRN - *Pseudo-Random Noise*

PWM - Modulação por Largura de Pulso (do inglês, *Pulse Width Modulation*)

RBMC - Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS

RMS - *Root Mean Square*

RPM - Rotações por Minuto

RTCM - *Radio Technical Commission for Maritime Services*

RTK - *Real Time Kinematic*

SML - Levitação Magnética Supercondutora

TRL - Nível de Maturidade Tecnológica (do inglês, *Technology Readiness Level*)

UFRJ - Universidade Federal do Rio de Janeiro

VLT - Veículo Leve sobre Trilhos

WLP - *WEG Ladder Programmer*

YBCO - Óxido de Ítrio Bário Cobre (do inglês, *Yttrium Barium Copper Oxide*)

Sumário

1	Introdução	1
2	Fundamentação Teórica	5
2.1	Princípios da Levitação Magnética para Transporte	5
2.1.1	Levitação Eletromagnética - Atração Controlada	6
2.1.2	Levitação Eletrodinâmica - Repulsão Induzida	6
2.1.3	Levitação Magnética Supercondutora - Fluxo Ancorado	6
2.2	O Sistema MagLev-Cobra: Uma Solução Supercondutora	7
2.3	Arquitetura de Controle e Atuação	8
2.4	Sensoriamento para Localização e Controle	12
2.4.1	Sensores Complementares: Óptico e Ultrassônico	19
3	Metodologia	21
3.1	Definição da Interface entre Controladores	22
3.2	Realização de Testes Preliminares	23
4	Estudos dos Sensores	30
4.1	Sensor GPS RTK	30
4.2	Sensor óptico de velocidade	34
4.3	Sensor ultrassônico de posição	36
5	Resultados	39
5.1	Validação do Sistema de Controle em Bancada	39
5.2	Análise Experimental dos Sensores	40
5.2.1	Resultados do Sensor GPS RTK	40
5.2.2	Resultados do Sensor Óptico de Velocidade	42

5.2.3	Resultados do Sensor Ultrassônico de Distância	43
5.3	Observações Finais sobre os Resultados	45
6	Conclusões	46
6.1	Observações finais	46
6.2	Trabalhos futuros	47
	Bibliografia	49
A	Pseudocódigo do Sistema de Navegação	52
B	Pseudocódigo do Algoritmo Ladder	55

Lista de Figuras

2.1	Figura ilustrativa do princípio magnético das diferentes tecnologias de inovação (adaptada de [1]).	7
2.2	Configuração de levitação do MagLev-Cobra (adaptada de [1]).	8
2.3	Conexões elétricas do CFW11 (fonte: [2]).	11
2.4	Diagrama do CLP utilizado (fonte: [2]).	11
2.5	Imagem ilustrativa da frente da HMI e a parte traseira, onde há a extremidade VGA macho (adaptada de [2]).	12
2.6	Esquema de montagem do conjunto dos componentes (fonte: [2]). . .	12
2.7	Representação em alto nível do funcionamento do GPS sem correção RTK.	15
2.8	Diagrama da comunicação entre a estação base (ONRJ) e o <i>rover</i> (GPS RTK) via NTRIP.	18
2.9	Posicionamento da câmera do sensor de velocidade no chassi (fonte: [3]).	20
2.10	Posicionamento do sensor ultrassônico no chassi (fonte: [3]).	20
3.1	Diagrama esquemático da estratégia de comunicação abordada. . . .	23
3.2	Teste realizado com motor rotativo de bancada.	24
3.3	Esquema elétrico testado em bancada.	25
3.4	Os dois diferentes sentidos do mesmo percurso realizado pelo MagLev-Cobra.	26
3.5	Lógica de automação implementada.	26
4.1	Tela do programa PyGPSClient do GPS sem conexão NTRIP.	31
4.2	Tela de configuração de conexão NTRIP funcionando.	32
4.3	Tela do programa PyGPSClient do GPS com conexão NTRIP.	33

4.4	Teste do sensor em espaço aberto.	34
4.5	Equipamentos utilizados na calibração do sensor de velocidade.	35
4.6	Equipamentos utilizados na calibração do sensor de posição.	37
4.7	Primeiro teste de locomoção pós-reforma, com o veículo equipado com os sensores calibrados.	38
5.1	Medições feitas no campo de futebol.	41
5.2	Medições realizadas na residência do aluno.	41
5.3	Medições feitas no campo de futebol.	42
5.4	Medições realizadas na residência do aluno.	42
5.5	Dados em RPM.	43
5.6	Dados em km/h.	43
5.7	Curvas de calibração dos sete sensores ultrassônicos utilizados no projeto.	44

Lista de Tabelas

3.1	Parâmetros de configuração do inversor CFW11 para operação remota via SoftPLC. H: sentido horário; AH: sentido anti-horário.	29
5.1	Tabela comparativa dos resultados dos sensores.	45

Capítulo 1

Introdução

A mobilidade urbana contemporânea enfrenta desafios crescentes, impulsionados pelo avanço tecnológico e pela demanda por sustentabilidade e eficiência energética. Neste contexto, os sistemas de transporte baseados em levitação magnética (MagLev) emergem como uma solução promissora, combinando alta eficiência energética, baixo ruído operacional e redução de impactos ambientais [4]. Esses sistemas representam um paradigma tecnológico que desafia os modelos convencionais de transporte sobre trilhos.

O MagLev-Cobra, o veículo de levitação magnética da UFRJ, desenvolvido conjuntamente pela COPPE através do LASUP (Laboratório de Aplicações de Supercondutores), constitui um marco na tecnologia de transportes sustentáveis, tendo sido o primeiro veículo no mundo a transportar passageiros em escala real utilizando levitação magnética. Nesse sentido, a invenção teve início em 2000, e, até o ano de 2006, avançou até o nível TRL (*Technology Readiness Level* - Níveis de Maturidade Tecnológica) 3, atingindo o ponto de prova de conceito experimental. De 2008 a 2012, o projeto avançou até o TRL 5, se tornando um protótipo de laboratório em escala real, e, até 2019, atingiu o nível TRL 6, tendo sido capaz de transportar passageiros nos trilhos magnéticos da UFRJ. Esse é o TRL em que o projeto se encontra até o momento atual, almejando avançar até o TRL 9 para poder ser aplicado ao ambiente urbano.

Porém, sua operação ainda manual limita seu potencial de aplicação em larga escala. A automação veicular surge como um campo interdisciplinar que integra

engenharia eletrônica, sistemas de controle e sensoriamento, visando desenvolver veículos capazes de operar de forma autônoma e segura. Este trabalho insere-se especificamente na interseção entre sistemas de controle, sensoriamento de precisão e automação aplicada a veículos de levitação magnética.

O objeto de estudo deste projeto concentra-se no desenvolvimento de um sistema automatizado para o MagLev-Cobra, entre as estações CT1 e CT2 da UFRJ, separadas por 160 metros. A abordagem proposta baseia-se em três pilares principais:

- Sensoriamento de alta precisão utilizando GPS RTK (*Real Time Kinematic*) com correção NTRIP (*Networked Transport of RTCM via Internet Protocol*) [5], complementado por um sensor óptico de velocidade e um sensor ultrassônico de distância; [6]
- Arquitetura de controle híbrida, combinando microcomputadores embarcados (Raspberry Pi) com um Controlador Lógico Programável (CLP) industrial; [7]
- Algoritmo de processamento geodésico para cálculo preciso de distâncias na superfície terrestre.

A implementação deste sistema requer a solução de desafios técnicos significativos, em específico no que diz respeito à precisão do posicionamento em ambientes urbanos e ao controle dinâmico da velocidade. Como demonstrado em [8], os sistemas GNSS em ambientes urbanos enfrentam limitações devido a efeitos de multicaminho e obstruções, exigindo abordagens complementares de sensoriamento. Nesse âmbito, o êxito do controle da velocidade requer leituras sensoriais suficientemente precisas e a interface entre o inversor de frequência e o encoder sensorial.

A relevância deste trabalho está presente em duas dimensões principais:

1. Avanço tecnológico: desenvolvimento de uma solução para automação de veículos MagLev.
2. Sustentabilidade: contribuição para sistemas de transporte mais eficientes energeticamente.

O projeto adotou uma abordagem de aprendizado e implementação, iniciando pelo estudo do funcionamento do CLP e sensores, por meio da leitura dos manuais dos softwares e dos respectivos componentes de hardware. Posteriormente, o trabalho se direcionou para o entendimento prático do CLP, com testes preliminares de comunicação e ativação de entradas e saídas do dispositivo, o que demandou a formulação de uma estratégia de interface. Neste ponto, foi criada uma coesão entre linguagens Python, Ladder e interface física. Por fim, testes em bancada com motor rotativo foram realizados com o objetivo de obter uma situação mais próxima da real, que seria o motor linear do MagLev-Cobra transitando entre as estações CT1 e CT2.

Os principais resultados deste trabalho consolidam a concepção e validação de um protótipo de sistema de automação. No hardware, foi estabelecida e testada a interface de controle entre o microcomputador Raspberry Pi e o inversor de frequência CFW-11, superando a incompatibilidade de tensão por meio de um relé. No software, foi implementada e validada em bancada uma lógica Ladder no SoftPLC do inversor, capaz de executar um ciclo completo de operação (partida, aceleração, parada e reversão), simulando com sucesso o trajeto do veículo.

A análise experimental de diferentes tecnologias de sensoriamento constitui outro resultado central. Demonstrou-se que o sistema GPS RTK, embora funcional e capaz de atingir o modo *RTK-FLOAT*, apresentou uma precisão limitada em torno de 1 metro em cenários com obstruções, evidenciando os desafios do ambiente urbano. Em contrapartida, a calibração em laboratório dos sensores óptico de velocidade e ultrassônico de posição confirmou seu desempenho linear e preciso, alinhado às especificações dos fabricantes. Em conjunto, esses resultados indicam a viabilidade técnica da arquitetura de controle proposta, mas sugerem a necessidade de uma convergência de sensores para atender aos requisitos de posicionamento do projeto.

A estrutura deste documento foi organizada nos capítulos a seguir. O Capítulo 2 estabelece a fundamentação teórica, abordando os princípios da levitação magnética supercondutora, a arquitetura de controle e atuação do veículo, e as tecnologias de sensoriamento de precisão, com especial detalhe ao sistema GPS RTK. Em seguida, o Capítulo 3 detalha a metodologia de desenvolvimento, apresentando a integração de

hardware entre o Raspberry Pi e o inversor de frequência, a implementação da lógica de controle em Ladder e a validação do sistema em testes de bancada. O Capítulo 4 explora o estudo experimental dos sensores, descrevendo a configuração do sistema GPS e, em detalhes, os processos de calibração dos sensores óptico de velocidade e ultrassônico de posição. No Capítulo 5, são apresentados e analisados os resultados quantitativos, incluindo a análise de desempenho do GPS em diferentes cenários e as curvas de calibração que validam a performance dos sensores complementares. Por fim, o Capítulo 6 conclui o trabalho, apresentando os principais resultados, discutindo as limitações do projeto e propondo direções para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Fundamentação Teórica

Este capítulo apresenta os fundamentos teóricos que sustentam o desenvolvimento do sistema de automação para o MagLev-Cobra. Primeiramente, são apresentados os princípios da levitação magnética, com uma análise comparativa das principais tecnologias existentes: a Levitação Eletromagnética (EML), a Levitação Eletrodinâmica (EDL) e a Levitação Magnética Supercondutora (SML), esta última utilizada pelo MagLev-Cobra. Em seguida, são detalhados os componentes da arquitetura de controle e atuação do veículo, incluindo o Motor Linear Síncrono (LSM) responsável pela propulsão, o inversor de frequência que o alimenta e o Controlador Lógico Programável (CLP) que executa a lógica de automação. Por fim, são exploradas em profundidade as tecnologias de sensoriamento de precisão essenciais para a autonomia veicular, com ênfase no sistema de posicionamento por satélite com correção em tempo real (GPS RTK) e uma introdução aos sensores complementares, óptico e ultrassônico.

2.1 Princípios da Levitação Magnética para Transporte

Os sistemas de levitação magnética (MagLev) para transporte evoluíram em três abordagens tecnológicas distintas, cada uma com princípios físicos, vantagens e desvantagens que determinam suas aplicações práticas.

2.1.1 Levitação Eletromagnética - Atração Controlada

O sistema EML [9], exemplificado pelo Transrapid alemão que opera em Xangai, utiliza a força de atração entre eletroímãs instalados no veículo e trilhos ferromagnéticos na via. Um sistema de controle ativo de alta frequência ajusta continuamente a corrente dos eletroímãs para manter um vão de levitação (*gap*) estável, tipicamente entre 8 e 10 mm. Embora atinja altas velocidades (430 km/h em operação comercial), a tecnologia EML demanda consumo contínuo de energia: estima-se uma potência de 1 a 2 kW por tonelada do veículo apenas para a levitação e o guiamento [9]. Esta é uma desvantagem fundamental em relação aos sistemas SML, nos quais a força de levitação é gerada passivamente pelas próprias estruturas supercondutoras.

2.1.2 Levitação Eletrodinâmica - Repulsão Induzida

O sistema EDL [9], característico do trem SCMaglev japonês, baseia-se na força de **repulsão** magnética. Ímãs supercondutores de alta intensidade no veículo, ao se moverem em alta velocidade, induzem correntes elétricas (correntes de Foucault) em bobinas condutoras na via, conforme a Lei de Indução de Lenz. A interação entre os campos magnéticos gera uma força repulsiva que sustenta o veículo. Sua principal limitação é a necessidade de atingir uma velocidade mínima (acima de 120 km/h) para que a levitação seja efetiva, exigindo um sistema de rodas auxiliares para baixas velocidades, o que aumenta a complexidade mecânica, o peso e os custos de manutenção.

2.1.3 Levitação Magnética Supercondutora - Fluxo Ancorado

O MagLev-Cobra utiliza a tecnologia SML [1], que se baseia no ancoramento de fluxo magnético em supercondutores de alta temperatura crítica (HTS, do inglês *High-Temperature Superconductors*), representados também na Figura 2.1. Essa abordagem oferece levitação passiva e intrinsecamente estável em todas as velocidades, inclusive em repouso, eliminando a necessidade de controle ativo para a levitação ou rodas auxiliares, o que a torna ideal para aplicações de transporte urbano, em que há a necessidade de o veículo operar em velocidades menores que 40 km/h.

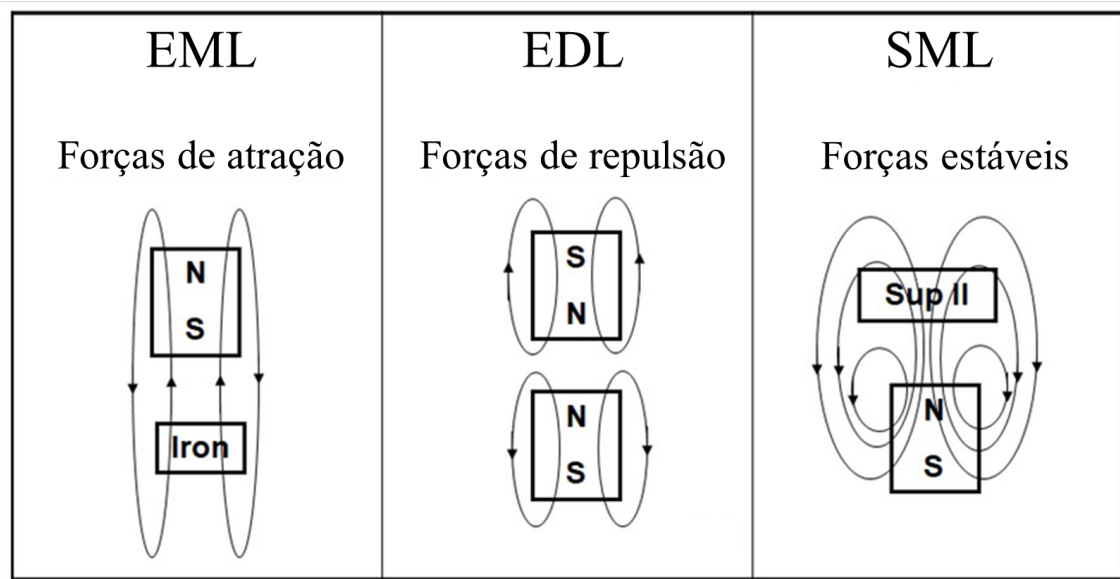


Figura 2.1: Figura ilustrativa do princípio magnético das diferentes tecnologias de inovação (adaptada de [1]).

2.2 O Sistema MagLev-Cobra: Uma Solução Supercondutora

Desenvolvido na UFRJ, o MagLev-Cobra [10] representa um avanço disruptivo na tecnologia de transporte. O sistema utiliza supercondutores HTS (YBCO - $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$) que, ao serem resfriados a -196°C com nitrogênio líquido, entram em estado supercondutor. Nesta condição, eles aprisionam as linhas de campo magnético geradas por ímãs permanentes de NdFeB (Neodímio-Ferro-Boro) dispostos na via. Essa interação cria forças repulsivas e atrativas que resultam em uma suspensão e um guiamento lateral extremamente estáveis, sem qualquer consumo energético para a sustentação.

A configuração única do MagLev-Cobra oferece vantagens em comparação com sistemas convencionais. Primeiramente, a eliminação completa do contato físico entre veículo e trilho evita o desgaste mecânico e o ruído operacional. Isso se traduz em maior eficiência energética em relação aos ônibus urbanos, por exemplo. Adicionalmente, o sistema detém flexibilidade operacional, com capacidade para operar em rampas e em curvas.

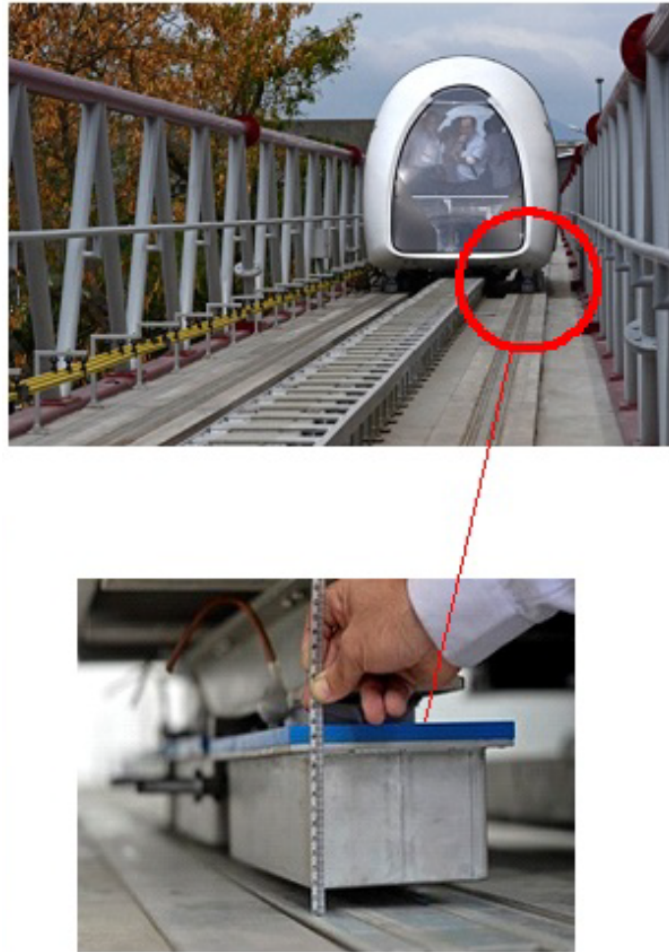


Figura 2.2: Configuração de levitação do MagLev-Cobra (adaptada de [1]).

O sistema de resfriamento, baseado em criostatos com nitrogênio líquido, garante a autonomia operacional necessária. Como detalhado em [10], esta abordagem supera significativamente as limitações das tecnologias EDL e EML, posicionando o MagLev-Cobra como uma referência em transporte urbano sustentável.

2.3 Arquitetura de Controle e Atuação

Para que o veículo opere de forma autônoma, uma arquitetura de controle é necessária para gerenciar a propulsão. Os componentes centrais para a atuação do MagLev-Cobra são:

- **Motor Linear Síncrono (LSM):** O sistema de propulsão é composto por um motor linear com armadura longa (bobinas) na via e um campo magnético

móvel (ímãs permanentes) no veículo. A ausência de partes móveis e contato físico no sistema de tração reduz os custos de manutenção em aproximadamente 60% em comparação aos VLTs convencionais [10]. Como, neste trabalho, foi utilizado o motor rotativo de bancada, foi preciso estudar e aplicar a conexão elétrica correta para a operação do inversor de frequência, presente na Figura 3.3. Nessa ilustração, é detalhado o fluxo de energia desde a fonte de alimentação até o motor, passando pelos componentes de proteção e pelo inversor. A fonte de alimentação trifásica, representada pelos terminais R, S e T, fornece a energia ao sistema. Antes de chegar ao inversor, a alimentação passa por uma chave seccionadora (*Disconnect Switch*), que permite a interrupção segura da energia para manutenção, e por fusíveis, que protegem o circuito contra sobrecorrentes. O inversor de frequência, o componente central do controle, recebe essa energia em seus bornes de entrada (R, S, T) e a converte, modulando sua frequência e tensão para controlar o motor. As saídas do inversor, identificadas como U, V e W, são então conectadas aos terminais correspondentes do motor. A conexão de aterramento, que liga a fonte, a carcaça do inversor e a carcaça do motor a um ponto de terra comum, garantindo a segurança do sistema. O esquema também destaca a importância do uso de cabos com blindagem na conexão entre o inversor e o motor, com a malha aterrada em ambas as extremidades para minimizar a emissão de ruído eletromagnético.

- **Inversor de Frequência CFW11:** Este equipamento do fabricante WEG, ilustrado na Figura 2.6, é o atuador de potência responsável por controlar a alimentação das bobinas do LSM. Operando como uma interface entre a fonte de alimentação e o motor, sua função primária é converter a corrente alternada (CA) da rede, de frequência e tensão fixas, em uma corrente contínua (CC) intermediária através de uma etapa retificadora. Posteriormente, uma etapa inversora, utilizando chaves semicondutoras de alta potência (IGBT, do inglês *Insulated Gate Bipolar Transistor*), reconverte essa tensão CC em uma nova onda CA de tensão e frequência variáveis.

Este processo é realizado através da técnica de Modulação por Largura de Pulso (PWM, do inglês *Pulse width modulation*), onde os IGBTs comutam em alta frequência para sintetizar uma forma de onda senoidal na saída. Para o

controle de um Motor Linear Síncrono, que exige alta precisão de torque e resposta dinâmica, o CFW11 emprega o método de controle vetorial. Diferente do controle escalar V/Hz mais simples, o controle vetorial desacopla matematicamente as componentes da corrente do estator que produzem o fluxo magnético e o torque. Isso permite que o inversor controle o torque do motor de forma direta e instantânea — análogo ao controle de um motor CC —, o que é fundamental para garantir o controle preciso da velocidade e aceleração do veículo. Adicionalmente, o inversor gerencia a energia de frenagem regenerativa, que ocorre quando o LSM atua como gerador durante as desacelerações.

- **Controlador Lógico Programável (CLP):** O cérebro da operação de baixo nível é o CLP. No inversor CFW11, essa funcionalidade é altamente modular, como visto na Figura 2.4, que mostra sua estrutura de expansão. Nessa imagem, os espaços XC1 são entradas e saídas, distribuídas entre analógicas e digitais. Os slots enumerados de 1 a 4 são utilizados para a instalação de módulos que customizam as funcionalidades do controlador. Especificamente, os slots 1, 2 e 3 podem receber uma variedade de módulos, como expansões de I/O, interfaces de comunicação e até mesmo módulos de CLP em hardware, que possuem processadores dedicados para rotinas de automação complexas. O Slot 4, por sua vez, é reservado para redes de comunicação industrial (*fieldbus*). Apesar da possibilidade de expansão com hardware dedicado, neste projeto, a função de CLP é implementada através do módulo SoftPLC [7], uma funcionalidade integrada ao próprio inversor. Diferente de um CLP de hardware tradicional, que é um equipamento físico separado, o SoftPLC é uma solução baseada em software que executa no processador interno do inversor. Esta abordagem oferece a vantagem de ocupar menos espaço físico e de garantir uma comunicação de alta velocidade entre a lógica de controle e a atuação do motor. Programado em linguagem Ladder através do software WLP [11], o SoftPLC é o responsável por executar as sequências lógicas de partida, parada e frenagem, traduzindo os comandos recebidos do Raspberry Pi em ações diretas de controle do motor. O slot 5, destacado no mesmo diagrama, corresponde ao espaço dedicado ao módulo de memória FLASH, que permite que o inversor armazene a programação em Ladder adquirida e a

configuração de parâmetros preenchida na Interface Homem-Máquina (HMI, do inglês *Human-Machine Interface*) ilustrada na Figura 2.5.

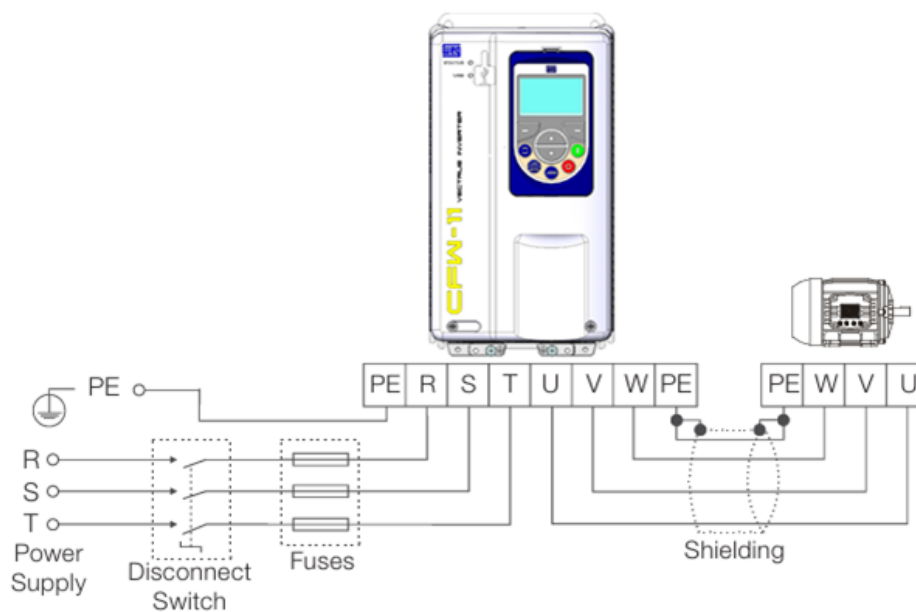


Figura 2.3: Conexões elétricas do CFW11 (fonte: [2]).

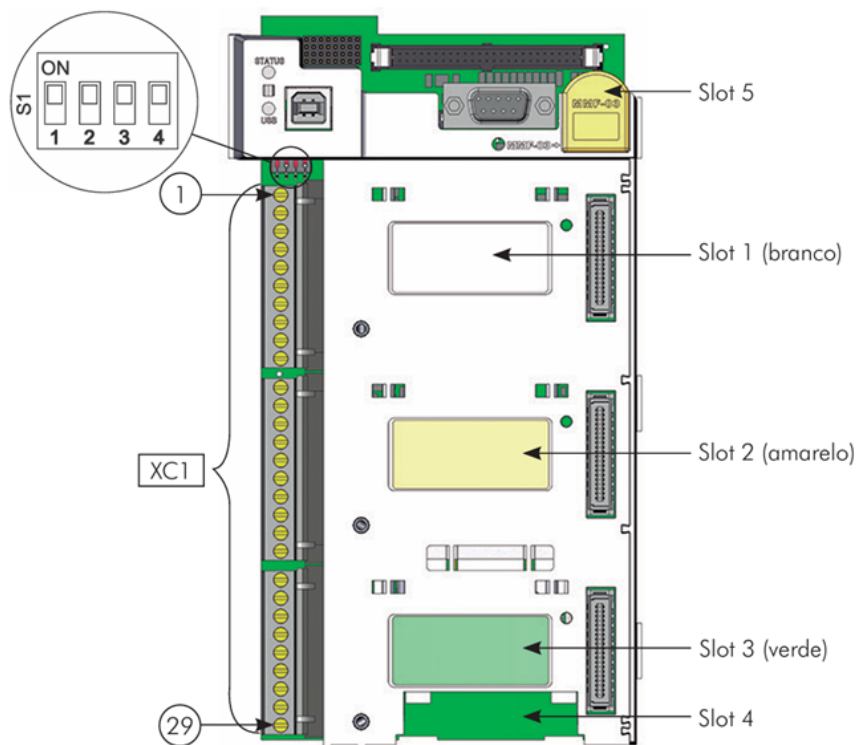


Figura 2.4: Diagrama do CLP utilizado (fonte: [2]).



Figura 2.5: Imagem ilustrativa da frente da HMI e a parte traseira, onde há a extremidade VGA macho (adaptada de [2]).

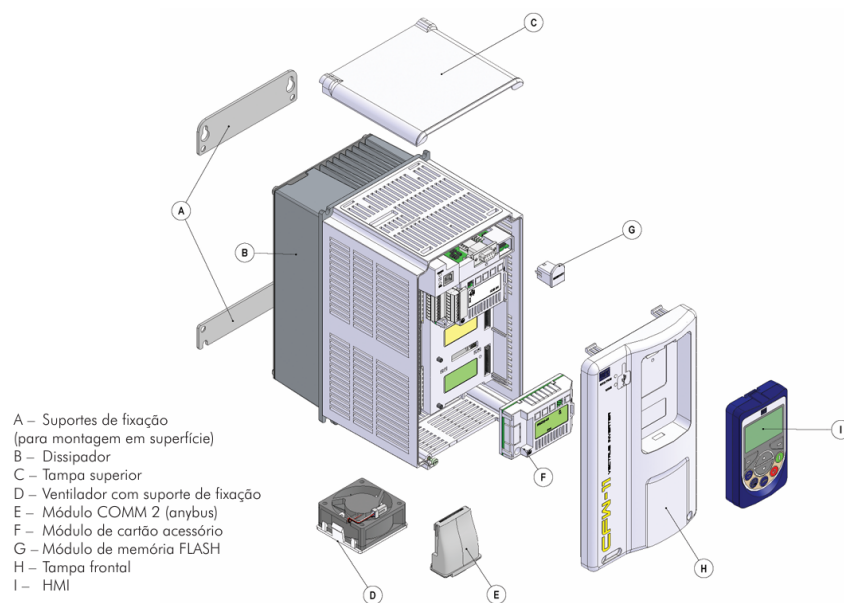


Figura 2.6: Esquema de montagem do conjunto dos componentes (fonte: [2]).

2.4 Sensoriamento para Localização e Controle

A autonomia veicular depende da capacidade do sistema de perceber sua própria posição e velocidade com suficiente precisão e confiabilidade. Este projeto explora um conjunto de sensores, composto pelo sensor GPS de alta precisão, o sensor óptico de velocidade e o sensor ultrassom de distância de levitação para essa finalidade.

2.4.0.1 Posicionamento por Satélite de Alta Precisão: GPS RTK

A autonomia do MagLev-Cobra exige um conhecimento de sua posição com precisão centimétrica, um requisito que o GPS convencional não consegue atender.

Por essa razão, este projeto emprega a tecnologia RTK, utilizando um receptor multi-banda (L1/L2) modelo ZED-F9P-01B-01 da u-blox [12]. Para compreender a metodologia RTK, é preciso detalhar o funcionamento do GPS padrão.

Posicionamento Convencional O método de posicionamento de um receptor GPS padrão baseia-se no cálculo de sua distância em relação a múltiplos satélites. Cada satélite da constelação transmite continuamente um sinal de rádio que contém, entre outras informações, sua posição orbital exata e o instante preciso em que o sinal foi emitido. Modulado neste sinal, há uma sequência digital única para cada satélite, conhecida como código de pseudo-ruído (PRN, do inglês *Pseudo-Random Noise*). Para uso civil, como é o aplicado a este projeto, o código principal é o C/A (do inglês, *Coarse/Acquisition*). O C/A pode ser interpretado como a “impressão digital” de cada satélite GPS. É um sinal digital, uma sequência de 1s e 0s, que é única para cada satélite.

O processo de medição ocorre da seguinte forma:

1. **Geração de Réplica:** O receptor GPS no solo conhece os códigos C/A de todos os satélites. Ao rastrear um satélite específico, ele gera uma réplica interna do código C/A daquele satélite.
2. **Correlação de Códigos:** O receptor compara a sequência de código recebida do satélite com uma réplica interna idêntica. Ele ajusta o tempo de sua réplica, deslocando-a até que as duas sequências se sobreponham e alinhem perfeitamente. Esse processo de encontrar o alinhamento exato é chamado de correlação, e o valor do deslocamento temporal necessário revela o tempo de viagem do sinal.
3. **Cálculo do Tempo de Voo:** A magnitude do deslocamento temporal (Δt) necessário para a correlação é precisamente o tempo que o sinal levou para viajar do satélite até o receptor.
4. **Cálculo da Pseudodistância:** Conhecendo o tempo de voo e a velocidade da luz (c), o receptor calcula a distância, ou **pseudodistância** (ρ), pela equação $\rho = c \cdot \Delta t$. O termo “pseudo” é utilizado porque esta medição contém erros

significativos, principalmente o erro de sincronismo entre o relógio de quartzo do receptor (de baixo custo) e os relógios atômicos de altíssima precisão dos satélites.

Sincronismo Temporal e a Correção da Relatividade. Para que o (Δt) seja significativo, é preciso que o tempo medido pelo satélite e pelo receptor esteja em uma base de referência comum. Contudo, os relógios atômicos dos satélites são afetados pela Teoria da Relatividade de Einstein: devido à sua alta velocidade (que atrasa o relógio em 7 $\mu\text{s}/\text{dia}$) e à menor força gravitacional em órbita (que adianta o relógio em 45 $\mu\text{s}/\text{dia}$) [13]. O efeito é um adiantamento de aproximadamente 38 microssegundos por dia em relação a um relógio na Terra, o que, se não fosse corrigido, geraria um erro de 10 km por dia. Para resolver esta discrepância, o sistema GPS emprega uma correção de engenharia: a frequência dos relógios dos satélites é fabricada para operar um pouco mais lentamente. Essa pré-correção anula o adiantamento relativístico, garantindo que, da perspectiva do receptor, o tempo transmitido pelo satélite já esteja no referencial correto. Portanto, a correção principal da relatividade não é parte do cálculo de Δt no receptor, mas sim uma pré-condição que o viabiliza.

Para determinar sua posição tridimensional (latitude, longitude e altitude) e corrigir o erro de seu próprio relógio, o receptor precisa resolver um sistema com quatro incógnitas. Portanto, ele requer a medição da pseudodistância de, no mínimo, quatro satélites simultaneamente, conforme a figura 2.7. A precisão deste método é intrinsecamente limitada pela estrutura do código C/A: o “comprimento” de cada bit do código é de aproximadamente 300 metros, o que restringe a precisão do alinhamento por correlação e resulta em erros de posicionamento da ordem de metros.

O RTK, por sua vez, explora a própria onda portadora do sinal (ex: portadora L1 em 1575,42 MHz, com comprimento de onda $\lambda \approx 19$ cm). Ao medir a fase dessa onda, o receptor obtém uma medição de distância com uma precisão potencial muito superior. A equação de observação da fase da portadora pode ser expressa simplificada como:

$$\Phi = \frac{r}{\lambda} + N + \delta_{ion/trop} + \delta_{clock} + \epsilon, \quad (2.1)$$

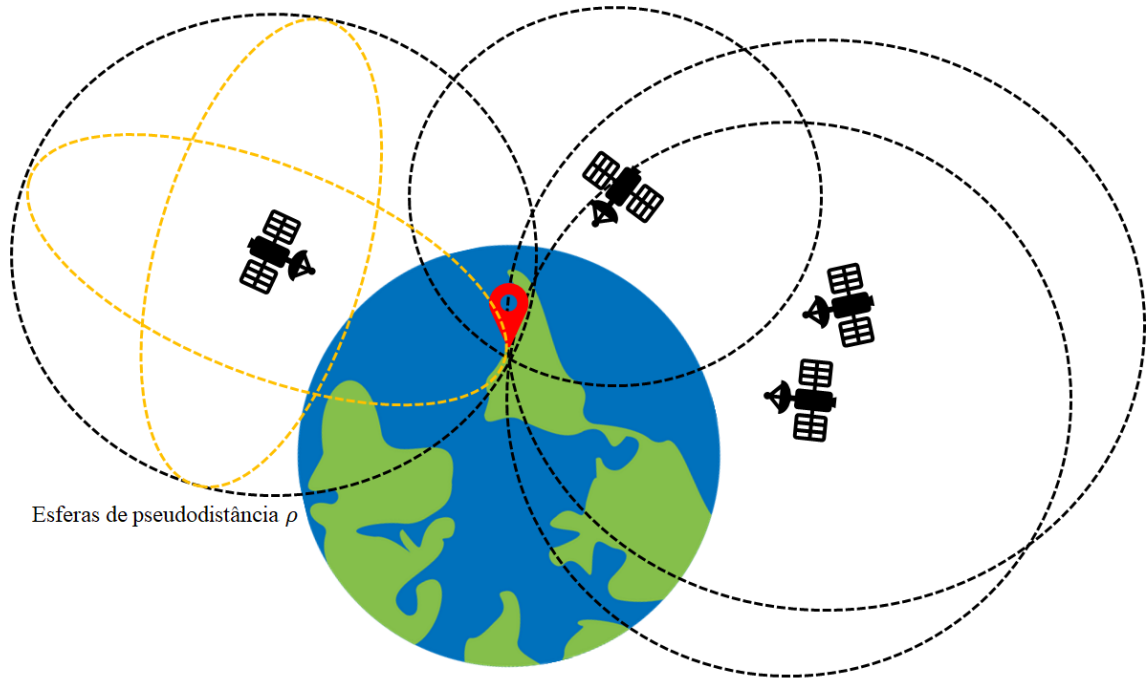


Figura 2.7: Representação em alto nível do funcionamento do GPS sem correção RTK.

onde Φ é a fase medida, r é a distância real, λ é o comprimento de onda, e os termos δ representam os erros. O termo crucial é N , o número inteiro e desconhecido de ciclos completos da portadora entre o satélite e a antena do receptor no instante inicial da medição. O problema central do RTK é resolver essa ambiguidade N para cada satélite visível.

Arquitetura Diferencial para Resolução da Ambiguidade. Resolver o valor de N para um único receptor é matematicamente inviável devido aos múltiplos erros correlacionados. A solução RTK utiliza uma arquitetura diferencial com dois receptores, uma Estação de Referência (Base) e um Receptor Móvel (*Rover*), operando em sincronia, conforme ilustrado na Figura 2.8:

1. **Estação de Referência (Base):** A estação ONRJ do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), pertencente à Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC) [5], funciona como a base. Suas coordenadas geodésicas são conhecidas com precisão milimétrica. Em vez de apenas calcular erros, ela gera um fluxo contínuo de medições de pseudodistância e de fase da portadora para todos os satélites visíveis. Essas informações, junto com

as coordenadas exatas da estação, são empacotadas em mensagens padronizadas, que são então disponibilizadas em um servidor na Internet para serem acessadas por receptores móveis (*rovers*) que necessitem de correção.

2. **Transmissão de Correções (NTRIP e RTCM):** Essas medições da base são transmitidas em tempo real para o *rover* através da internet. A camada de transporte utilizada é o NTRIP, um protocolo projetado para streaming de dados GNSS sobre a Internet. O formato dos dados é o RTCM (Radio Technical Commission for Maritime Services), um padrão binário para dados de correção diferencial.
3. **Receptor Móvel (*Rover*) e o Processamento de Dupla Diferença:** O receptor ZED-F9P no MagLev, atuando como *rover*, recebe o fluxo RTCM. Seu processador interno executa então um algoritmo baseado em dupla diferença. A ideia básica deste processo é cancelar erros que são comuns a múltiplas medições. Ocorre em duas etapas: primeiro, subtrai-se as medições de um mesmo satélite vistas simultaneamente pela base e pelo *rover* (primeira diferença), o que elimina erros daquele satélite. Em seguida, subtrai-se o resultado dessa operação para dois satélites diferentes (segunda diferença), o que elimina os erros comuns aos receptores. Este processo matemático combina as observações do *rover* e da base para dois satélites simultaneamente, efetivamente cancelando os erros mais comuns, de relógio e orbitais.

Este processo é importante porque sua principal função é cancelar ou mitigar as fontes de erro. Ele elimina completamente os erros de relógio — que são as discrepâncias entre os precisos relógios atômicos dos satélites e os de quartzo mais simples dos receptores — e os erros orbitais (efemérides), que correspondem a pequenas imprecisões entre a posição orbital do satélite transmitida em sua mensagem e sua posição real. Adicionalmente, os erros atmosféricos, atrasos no sinal causados por sua passagem pela ionosfera e troposfera, são significativamente reduzidos. A redução ocorre pois se assume que, para a curta distância entre a base e o *rover*, os sinais de ambos atravessam a mesma porção de atmosfera, tornando o erro comum e, portanto, cancelável. Na aplicação deste projeto, essa condição é atendida, uma vez que a distância entre

o *rover* e a estação base ONRJ é de apenas 6 km.

A equação de dupla diferença resultante é “limpa” desses erros, deixando a ambiguidade inteira N como a principal incógnita.

A equação de dupla diferença [14] para a fase da portadora pode ser expressa de forma simplificada como:

$$\nabla\Delta\Phi_{AB}^{ij} = \frac{1}{\lambda}(\nabla\Delta r_{AB}^{ij}) + \nabla\Delta N_{AB}^{ij} + \epsilon \quad (2.2)$$

onde:

- $\nabla\Delta\Phi_{AB}^{ij}$ é a medição de dupla diferença da fase da portadora, que é o valor conhecido, medido pelos receptores A (Base) e B (*Rover*) para os satélites i e j .
- $\nabla\Delta r_{AB}^{ij}$ é o termo da dupla diferença da distância geométrica real entre os receptores e os satélites. Este termo contém a informação da posição do *rover*, que se deseja encontrar.
- $\nabla\Delta N_{AB}^{ij}$ é a dupla diferença da ambiguidade inteira, um número inteiro desconhecido que é a principal incógnita a ser resolvida pelo sistema RTK.
- ϵ representa os erros remanescentes não modelados, como o efeito de multicaminho e o ruído do receptor.

Com os erros de relógio, orbitais e a maior parte dos erros atmosféricos cancelados, a Equação 2.2 estabelece uma relação entre o valor medido ($\nabla\Delta\Phi_{AB}^{ij}$) e as duas incógnitas restantes: a posição do *rover* (contida em $\nabla\Delta r_{AB}^{ij}$) e a ambiguidade inteira. Uma vez que N é um número inteiro, o processador do receptor pode utilizar métodos estatísticos robustos, como o algoritmo LAMBDA (do inglês, *Least-squares AMBiguity Decorrelation Adjustment*), para testar combinações e encontrar a solução inteira mais provável para as ambiguidades de todos os satélites, o que finalmente permite o cálculo da posição com precisão centimétrica.

Estados da Solução RTK: Float e Fix. O processo de resolução das ambiguidades leva tempo e depende da qualidade dos sinais. Durante este período, o receptor

opera em modo RTK Float, onde as ambiguidades são estimadas como valores reais (não inteiros), resultando em uma precisão de nível decimétrico (10-40 cm). Uma vez que o algoritmo converge com alta confiança estatística para uma solução inteira para as ambiguidades, o estado muda para RTK Fix. Neste momento, a precisão salta para o nível centimétrico, pois o sistema está “travado” na solução correta. Este processo explica o tempo de *warm-up* observado nos testes e a dependência de uma linha de visada clara para os satélites.

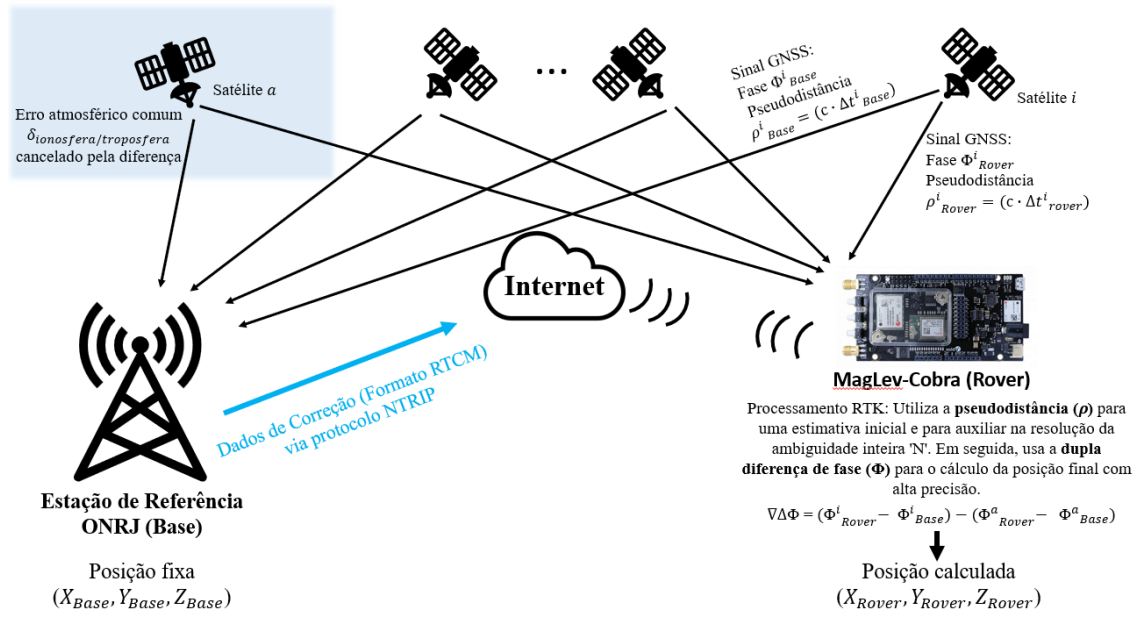


Figura 2.8: Diagrama da comunicação entre a estação base (ONRJ) e o *rover* (GPS RTK) via NTRIP.

Cálculo de Distâncias Geodésicas com Haversine. Uma vez que o GPS fornece a posição em coordenadas angulares (latitude ϕ , longitude λ), é necessário um método para converter essas coordenadas em distâncias lineares sobre a superfície terrestre. Para isso, utiliza-se a fórmula de Haversine, que considera a curvatura da Terra:

$$\begin{aligned}
 a &= \sin^2 \left(\frac{\Delta \phi}{2} \right) + \cos(\phi_1) \cdot \cos(\phi_2) \cdot \sin^2 \left(\frac{\Delta \lambda}{2} \right), \\
 c &= 2 \cdot \text{atan2} \left(\sqrt{a}, \sqrt{1-a} \right), \\
 d &= R \cdot c,
 \end{aligned} \tag{2.3}$$

onde $\Delta \phi$ e $\Delta \lambda$ são as diferenças de latitude e longitude em radianos, R é o raio médio da Terra (6371 km) e d é a distância resultante. No contexto do MagLev-Cobra, esta

modelagem foi crucial para analisar os deslocamentos entre medições consecutivas do GPS e para determinar a posição do veículo em relação aos pontos de parada.

Limitações do GPS RTK em Ambiente Urbano. Apesar da alta precisão teórica, a performance do GPS RTK é sensível ao ambiente. Os principais desafios são o efeito de multicaminho (sinais de satélite refletidos em edifícios, que chegam ao receptor por múltiplos caminhos e distorcem a medição) e a obstrução do sinal. Além disso, o sistema requer um período de inicialização (*warm-up*) para obter a primeira solução de alta precisão e depende da disponibilidade contínua dos dados da estação de referência, estes que dependem de internet para o recebimento.

2.4.1 Sensores Complementares: Óptico e Ultrassônico

Para mitigar as limitações do GPS e adicionar redundância, foram estudados sensores complementares:

- **Sensor Óptico de Velocidade (Correvit L-350):** Este sensor mede a velocidade do veículo em relação ao solo sem contato físico, usando correlação de imagens, iluminando a superfície do solo, conforme seu posicionamento na Figura 2.9 e analisando o padrão de reflexão com um sensor de imagem para calcular o movimento com alta precisão. Sua principal vantagem é fornecer dados de velocidade precisos (precisão de $\pm 0,1\%$) e de alta frequência, imunes a problemas de radiofrequência, sendo ideal para o controle dinâmico da velocidade. Atualmente, o sensor opera no veículo para realização de testes acerca do seu funcionamento.
- **Sensores Ultrassônicos de Posição (Balluff M18K0):** Originalmente usados para medir a altura de levitação, estes sensores foram investigados para medir o deslocamento horizontal, conforme a Figura 2.10. Eles operam medindo o tempo de voo de um pulso ultrassônico até um alvo e de volta. A calibração detalhada destes sensores revelou uma resposta altamente linear dentro de sua faixa operacional (80 a 130 mm), com uma saída analógica proporcional (0-10 V). Dessa forma, podem ser usados para detecção de proximidade e posicionamento fino nas estações. Estes sensores são utilizados no

projeto desde antes do estudo da automação do veículo, para monitoramento da variação da distância de levitação.

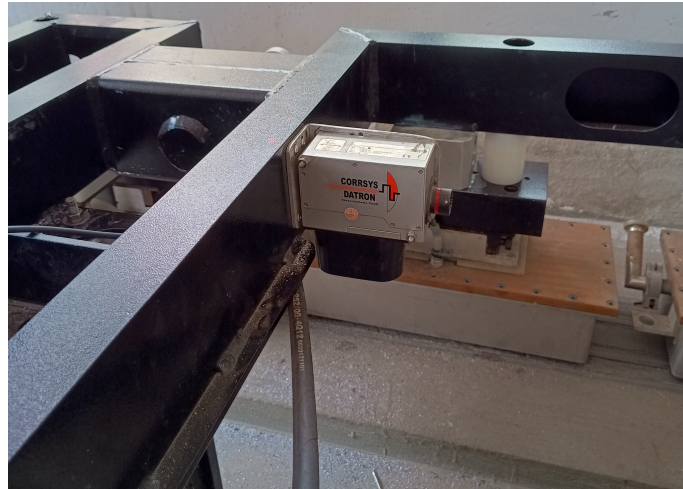


Figura 2.9: Posicionamento da câmera do sensor de velocidade no chassi (fonte: [3]).



Figura 2.10: Posicionamento do sensor ultrassônico no chassi (fonte: [3]).

Capítulo 3

Metodologia

Este capítulo detalha a metodologia empregada no desenvolvimento e validação do sistema de controle para o MagLev-Cobra. Primeiramente, é apresentada a arquitetura de controle e a interface de hardware entre o microcomputador Raspberry Pi e o inversor de frequência, abordando a solução de compatibilização elétrica para a comunicação entre os dispositivos. Em seguida, descreve-se o desenvolvimento da lógica de automação em linguagem Ladder, responsável pelo controle de movimento do veículo, e sua validação através de testes preliminares em uma bancada com motor rotativo. Por fim, é detalhada a etapa de configuração e parametrização do inversor de frequência, fundamental para delegar o controle do motor ao programa desenvolvido no SoftPLC.

A metodologia adotada para a automação do MagLev-Cobra [15] iniciou-se com pesquisas sobre o tema, por meio de fontes do próprio laboratório GTA [16], que já haviam publicado trabalhos acerca do aprimoramento do uso do GPS. Sobre esse ponto, objetivou-se atingir uma precisão maior que a do estudo anterior [17], que usou múltiplos sensores GPS. Dessa forma, nesse estudo antecessor, a abordagem de uso de 3 sensores GPS objetivou atingir uma precisão maior na medição resultante de posição, atingindo um resultado final de aproximadamente 1 metro. Ademais, este projeto também utilizou como referência de estudo outros Trabalhos de Conclusão de Curso que abordaram diferentes aspectos do MagLev-Cobra [18] [19]. Além disso, o presente projeto também visou suplantando a necessidade de um algoritmo que compensa o tempo de resposta sensorial [20]. Conforme esse artigo anterior

explica, com um sensor GPS normal, a averiguação do momento de frenagem pode ocorrer em um hiato de medição, o que geraria uma colisão, ao se tratar de um veículo em deslocamento. Logo, foi preciso desenvolver um método de, com base na velocidade da última medida, estimar se a próxima ocorreria ainda antes do momento ideal de frenagem ou depois.

A principal estratégia foi o desenvolvimento de um sistema de controle veicular integrado. Para isso, foram utilizados um inversor de frequência CFW-11 acionado por sinais lógicos de um Raspberry Pi, um sensor GPS RTK de alta precisão e um sensor de velocidade e outro de distância, também para coleta de dados de posição e velocidade.

3.1 Definição da Interface entre Controladores

Na Figura 3.1 são representados os diagramas de um satélite GPS e de uma torre do serviço RBMC do IBGE enviando dados NTRIP para o sensor de GPS RTK ZED-F9P-01B-01. À direita desse dispositivo, há um minicomputador Raspberry Pi 3 que interpreta os dados do sensor e envia sinais ao CLP [7] do inversor de frequência CFW11 [2]. Este inversor foi configurado por meio da linguagem Ladder utilizando o programa WLP (*WEG Ladder Programmer*) [11]. O motor rotativo indicado na imagem é meramente ilustrativo para mostrar a aplicação de testes em bancada.

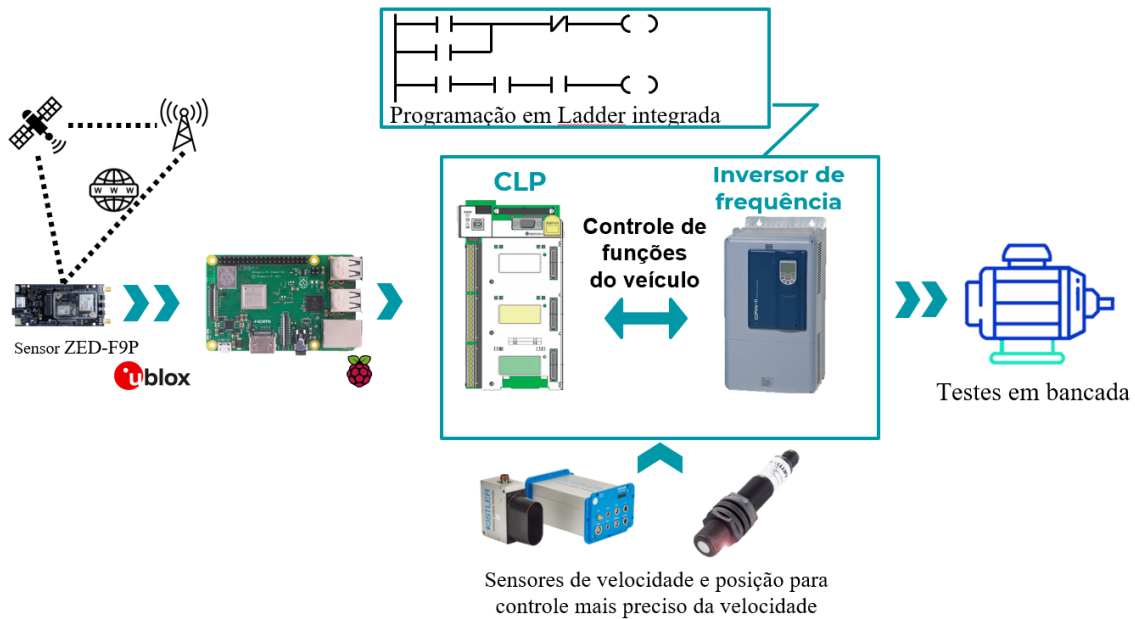


Figura 3.1: Diagrama esquemático da estratégia de comunicação abordada.

De início, foi estudado o manual do inversor de frequência CFW-11 para que fosse entendido qual seria a forma mais apropriada de se enviar a ele sinais. Nessa linha, optou-se por fazer uso das entradas digitais do dispositivo. Para isso, foi utilizada a fonte de 24 V que o dispositivo detém para ativar as suas entradas digitais, vinculadas a contadoras do código em Ladder, por meio do Raspberry Pi. Com essa estratégia, foi planejado que o microcomputador enviaria sinais lógicos nas saídas digitais dele, pinos GPIO (*General Purpose Input/Output*), para que um relé ativasse uma entrada digital do inversor. Nessa metodologia, o sinal enviado do Raspberry Pi correspondeu a um nível lógico de 3,3 V ativando a rotina de frenagem do veículo. Outras entradas, cujo acionamento era preciso para função de inicialização, foram ativadas digitalmente pelo Notebook utilizado.

3.2 Realização de Testes Preliminares

Ao longo de vários testes, foi desenvolvido um código em Ladder capaz de simular, com um motor de bancada, a situação do MagLev indo e voltando de suas duas estações. Os testes iniciais eram compostos pela análise da reação da estrutura às ativações forçadas de entradas e saídas digitais. Nas simulações posteriores, os sinais de frenagem passaram a ser advindos do envio do sinal real às entradas

do dispositivo CLP pelo Raspberry Pi intermediado por um relé. O uso do relé se justifica pelo fato de que a faixa de tensão de operação da interface com meio externo do microcomputador em questão é muito inferior à requerida pelo CLP. Nesse sentido, o Raspberry Pi interpreta os dados de posição e comanda a abertura do relé, que autoriza o envio de corrente e tensão da fonte de tensão do próprio controlador a suas entradas.

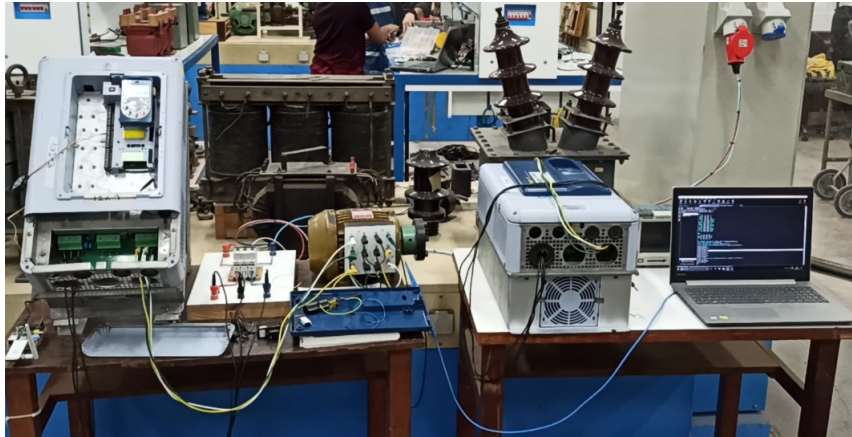


Figura 3.2: Teste realizado com motor rotativo de bancada.

Em detalhes, na Figura 3.2, o microcomputador está atuando como ponto de acesso, sendo acessado pelo notebook à direita da imagem. Devido ao fato de, no momento da foto, que é um quadro do vídeo disponível em [21], ainda não se tinha adquirido o sensor de GPS, o notebook acessava remotamente o Raspberry Pi e enviava dados de posição emulados por meio de um código Python. Nesse momento, uma saída digital do controlador enviava, por meio do relé, uma tensão de ativação da entrada do inversor de frequência que desencadeava as funções de controle do veículo. No teste da imagem, foi feito o modelo mais simples de apenas inverter o sentido após temporização. Nas simulações posteriores, foram contemplados mais detalhes sobre o protótipo do MagLev disponível, sendo esses a frenagem por meio da aceleração do sentido oposto e a simulação de parada nas estações.

De forma simplificada, a Figura 3.3 ilustra o exemplo de ativação de uma das entradas do controlador por meio do microcomputador.

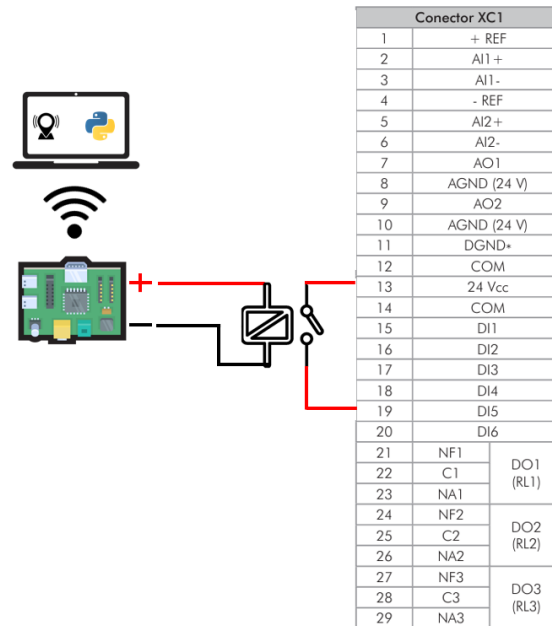


Figura 3.3: Esquema elétrico testado em bancada.

O esquema elétrico da interface, simplificado na Figura 3.3, demonstra a estratégia para superar a incompatibilidade de tensão entre os dispositivos. O Raspberry Pi opera com sinais lógicos de 3,3V em seus pinos GPIO. Para acionar a entrada digital do inversor, que requer um sinal de 24 V, foi empregado um módulo relé. O pino GPIO do Raspberry Pi energiza a bobina do relé. Isso fecha o contato do relé, que completa um circuito independente alimentado pela própria fonte interna de 24 V do inversor (+24 V), conectando-a à entrada digital desejada (DIx). Sobre esse ponto, o desenvolvedor pode programar, por meio da linguagem Ladder, qual entrada digital utilizará. Existem entradas com funções predefinidas, e outras não, mas todas podem exercer esta função destacada na seção. Dessa forma, o sinal de baixa tensão do microcomputador controla com segurança o circuito de alta tensão do inversor, garantindo isolamento elétrico entre os controladores

A estrutura disponível na Ilha do Fundão corresponde a uma plataforma que levita sobre os trilhos magnéticos que ligam a estação CT1 à CT2, que ficam, respectivamente, nos prédios do Centro de Tecnologia (CT1) e Centro de Tecnologia 2 (CT2) da cidade universitária. A distância entre as estações é de 160 m, sendo que a estação CT2 localiza-se a uma altitude 1,5 m superior à CT1.

Quando o conjunto, na bancada, estava sendo simulado em direção à estação CT2, o desligamento do motor era sucedido pelo sinal do comando de parada temporizado e reiniciando no outro sentido (indo para CT1) após determinado tempo. Nesse novo sentido, o processo se repetia, mas o método de frenagem consistia em inverter o sentido de rotação do veículo e acelerar no sentido oposto por alguns segundos, reduzindo a velocidade do veículo, pois esse sentido possui a aceleração da gravidade ao seu favor, conforme ilustrado na Figura 3.4.

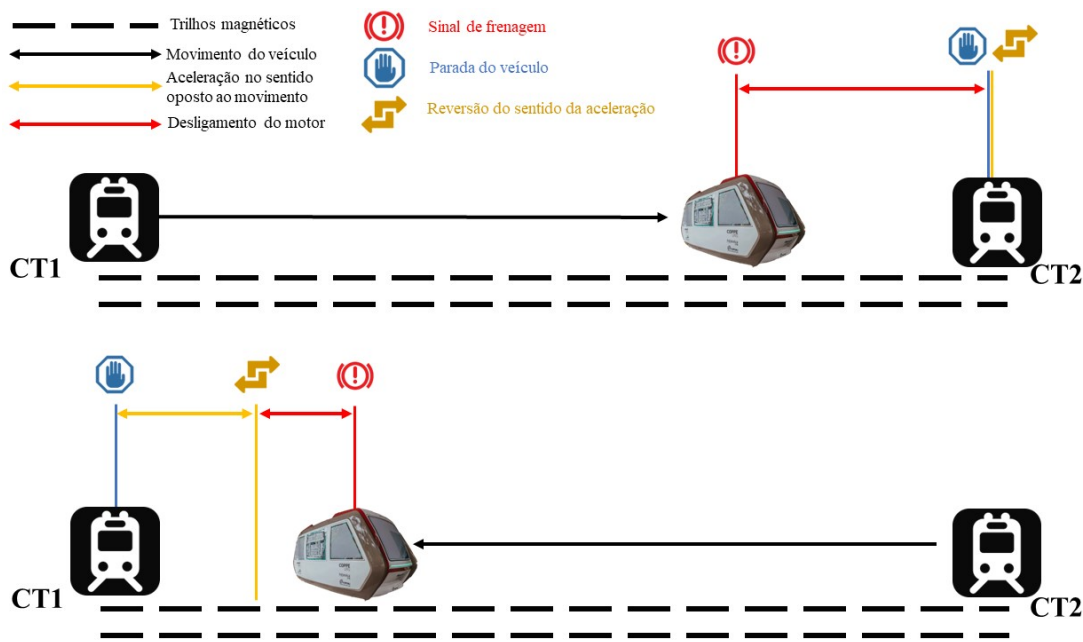


Figura 3.4: Os dois diferentes sentidos do mesmo percurso realizado pelo MagLev-Cobra.

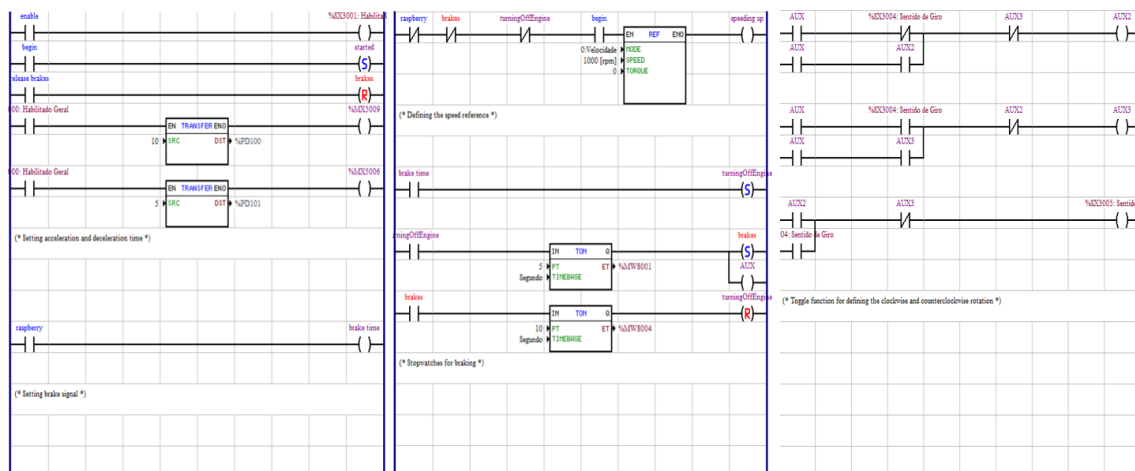


Figura 3.5: Lógica de automação implementada.

O programa em Ladder implementado no CLP do inversor de frequência, detalhada em três partes, conforme a Figura 3.5, gerencia a operação completa do motor. A figura é dividida em seções devido ao fato de o programa utilizado [11] limitar o tamanho da lógica contida em cada página. A primeira seção é responsável pela habilitação e parametrização do sistema. A operação geral é condicionada por um contato de **enable** e um de **begin**, que juntos ativam a saída principal de habilitação do inversor (**%SX3001**). Como esses contatos são utilizados somente uma vez após o início do programa, foram configurados para serem ativados manualmente pelo computador, mas podem ser configurados para a ativação por meio de uma botoeira. É um requisito de segurança do dispositivo CFW11 a manutenção do valor positivo de uma bobina atrelada ao parâmetro de habilitação, ou seja, o inversor é projetado de forma que o sinal de saída de habilitação do inversor (**%SX3001**) precisa estar sempre positivo para ele funcionar. Este é um requisito de segurança manter uma condição de desativação deste parâmetro para, em caso de emergência, ser possível desabilitar o inversor de frequência.

Uma vez habilitado, o programa utiliza blocos **TRANSFER** para configurar parâmetros essenciais do motor: o valor 10 é movido para o parâmetro **%PD100** (tempo de aceleração) e o valor 5 para o **%PD101** (tempo de desaceleração). Nesta mesma seção, uma entrada digital nomeada **raspberry** atua como o gatilho principal enviado pelo microcomputador para iniciar o processo de frenagem, ativando a bobina que representa a memória **brake time**.

A segunda seção da lógica representa o controle de velocidade e a sequência de frenagem. Em condições normais de operação (sinal **begin** ativo e sem comando de frenagem), um bloco de referência de velocidade (**REF**) comanda o motor a girar a uma velocidade configurável, podendo ser atrelada a uma variável do sistema. Quando a bobina **brake time** é ativada pelo Raspberry Pi, ela usa um contato do tipo **SET** para ligar a memória **turningOffEngine**, iniciando a rotina de parada. Esta, por sua vez, ativa imediatamente a memória **brakes** e a memória auxiliar **AUX**, além de iniciar dois temporizadores (**TON**). O primeiro temporizador, de 5 segundos, e o segundo, de 10 segundos, como definidos na primeira seção, controlam a duração da sequência. Ao final dos 10 segundos, a memória **turningOffEngine** e a memória **brakes** são desligadas através de um contato **RESET**, finalizando o ciclo de frenagem

e deixando o sistema pronto para um novo comando.

A terceira e última parte da lógica implementa uma função de “toggle”, ou alternância, responsável por inverter o sentido de giro do motor a cada ciclo de frenagem, automatizando o percurso de ida e volta. A memória **AUX**, que é ativada momentaneamente durante cada ciclo de frenagem, serve como pulso para este circuito de alternância. A cada pulso de **AUX**, o estado das memórias **AUX2** e **AUX3** é invertido. Essa inversão altera diretamente as saídas de sentido de giro (**%SX3004** e **%SX3005**), fazendo com que, após uma parada, o motor seja preparado para girar na direção oposta na próxima partida. Essa automação é essencial para que o veículo possa retornar à sua estação de origem sem a necessidade de um comando manual de inversão.

Ademais, para que o inversor de frequência CFW11 pudesse ser controlado pelo Raspberry Pi, foi necessária uma etapa de configuração inicial. Primeiramente, a lógica de automação desenvolvida em linguagem Ladder, detalhada nesta seção, foi carregada na memória do SoftPLC, o controlador programável interno do dispositivo. Contudo, apenas carregar o programa não é suficiente; é preciso instruir o inversor a ignorar os comandos da sua interface homem-máquina (IHM) local e a delegar o controle de suas funções ao programa recém-carregado. Essa delegação é realizada através da alteração de parâmetros específicos. A Tabela 3.1 apresenta os parâmetros que foram ajustados para habilitar a operação remota via SoftPLC. Parâmetros como o **P0222** e o **P0227**, por exemplo, foram alterados de “HMI” e “Teclas I,O” para “SoftPLC”, transferindo o controle da referência de velocidade e dos comandos de partida/parada para a lógica Ladder. Finalmente, o parâmetro **P1001** foi ajustado para o valor 1, comandando a execução da aplicação do SoftPLC e efetivamente ativando todo o sistema de controle automatizado.

Tabela 3.1: Parâmetros de configuração do inversor CFW11 para operação remota via SoftPLC. H: sentido horário; AH: sentido anti-horário.

Parâmetros	Funções	Operação local	Operação Remota
P0221	Sel. Referência LOC	0 = HMI	12 = SoftPLC
P0222	Sel. Referência REM	0 = HMI	12 = SoftPLC
P0223	Seleção Giro LOC	2 = Tecla Sentido de Giro (H) 3 = Tecla Sentido de Giro (AH)	12 = SoftPLC (H) 13 = SoftPLC (AH)
P0224	Seleção Gira/Para LOC	0 = Teclas I,O	5 = SoftPLC
P0225	Seleção JOG LOC	1 = Tecla JOG	6 = SoftPLC
P0226	Seleção Giro REM	2 = Tecla SG (H) 3 = Tecla SG (AH)	12 = SoftPLC (H) 13 = SoftPLC (AH)
P0227	Seleção Gira/Para REM	0 = Teclas I,O	5 = SoftPLC
P0228	Seleção JOG REM	1 = Tecla JOG	6 = SoftPLC
P1001	Comando para SoftPLC	0 = Para Aplicação 1 = Executa Aplicação 2 = Exclui Aplicação	

Capítulo 4

Estudos dos Sensores

Este capítulo aborda o estudo de caso e a calibração experimental das tecnologias de sensoriamento selecionadas para o projeto. Primeiramente, é detalhada a configuração e a avaliação inicial do sensor GPS RTK, demonstrando o processo de conexão à rede de correção NTRIP e a interface de aquisição de dados. Em seguida, motivado pelas limitações de precisão do GPS em cenário urbano, descreve-se a metodologia de calibração do sensor óptico de velocidade, incluindo o arranjo experimental e o procedimento de coleta de dados. Por fim, é apresentado o processo de calibração dos sensores ultrassônicos de posição, detalhando as etapas de ajuste de zero e fundo de escala e a verificação de sua curva característica de resposta.

4.1 Sensor GPS RTK

O sensor GPS RTK escolhido foi o ZED-F9P-01B-01 da u-blox. Neste projeto, ele atua como receptor móvel (rover) que se move e cuja posição precisa é desejada. Ele recebe dados NTRIP de uma estação base e calcula correções ao comparar sua posição conhecida com a posição calculada com base nos sinais dos satélites. Essas correções são necessárias devido a vários erros, como o atraso do sinal na ionosfera e na troposfera, e a imprecisão na órbita dos satélites. As correções calculadas pela estação base são transmitidas ao receptor móvel, e, por definição, esse sensor é capaz de atingir um erro de 2 cm quando alimentado com dados advindos de uma estação a menos de 50 km de distância.

A estação que fornece os dados NTRIP é a estação ONRJ [5] do serviço RBMC do IBGE. Situada em São Cristóvão, muito próxima dos locais de teste realizados com o dispositivo, era esperado que o erro alcançado fosse da ordem de grandeza de unidades de centímetro em um cenário urbano, mas, nessa situação, o desvio padrão das amostras foi de 40 cm. A hipótese mais provável para um erro ainda significativo é a de que as interferências advindas das estruturas físicas ao redor do ponto de medição interferem na acurácia do sensor, além do fato de o sensor apresentar elevado erro no início das medições.

Para a coleta e análise de medições, o sensor requer o uso de programas específicos para o seu funcionamento. A opção oficial do fabricante é o U-center [22], que tem funcionamento limitado ao sistema Windows. Portanto, para a aplicação no Raspberry Pi, foi utilizado o programa PyGPSClient [23]. Esse programa não contém tantas funcionalidades quanto o da u-blox, mas possibilita a conexão com a rede RBMC e a extração das coordenadas com e sem correção RTK pela geração de um *log*.

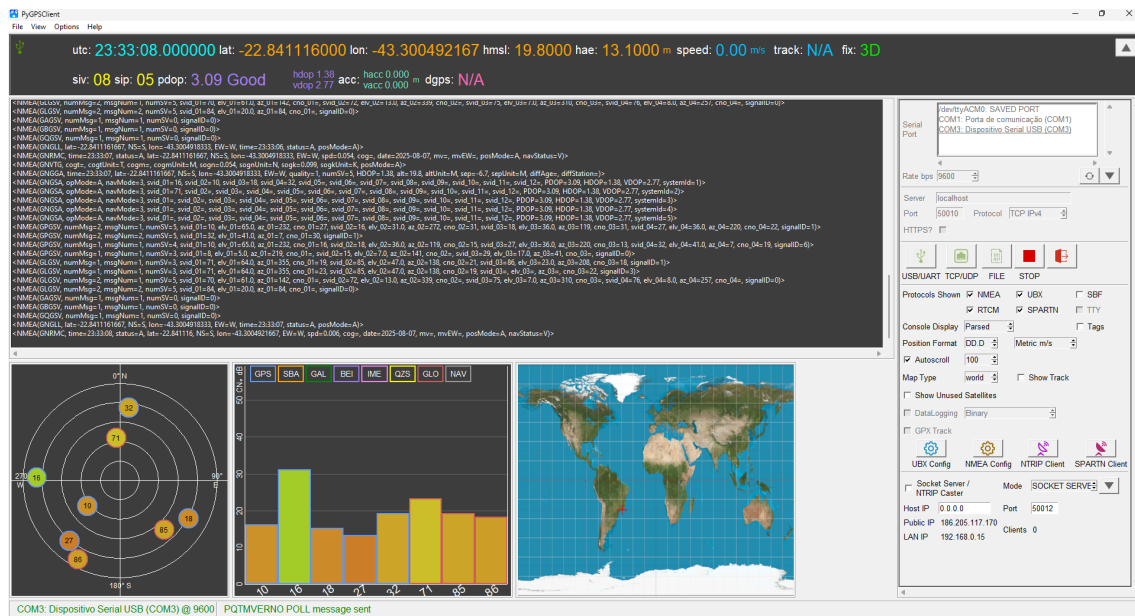


Figura 4.1: Tela do programa PyGPSClient do GPS sem conexão NTRIP.

A tela do programa PyGPSClient do GPS, conforme mostrado na Figura 4.1, exibe a interface do sensor GPS RTK sem a conexão NTRIP. Nesse modo, o programa ainda é capaz de coletar e registrar as coordenadas do sensor, porém sem a correção

diferencial fornecida pela estação base. A interface mostra as informações de GPS como latitude, longitude, altitude, e a quantidade de satélites visíveis, permitindo a visualização da precisão do posicionamento. Embora sem a correção RTK, o programa possibilita monitorar o desempenho do sensor em tempo real, registrando os dados para análise posterior. A conexão com a rede NTRIP, necessária para alcançar a precisão de centímetros, não estava ativa nesse momento, resultando em uma precisão inferior à esperada para o projeto.

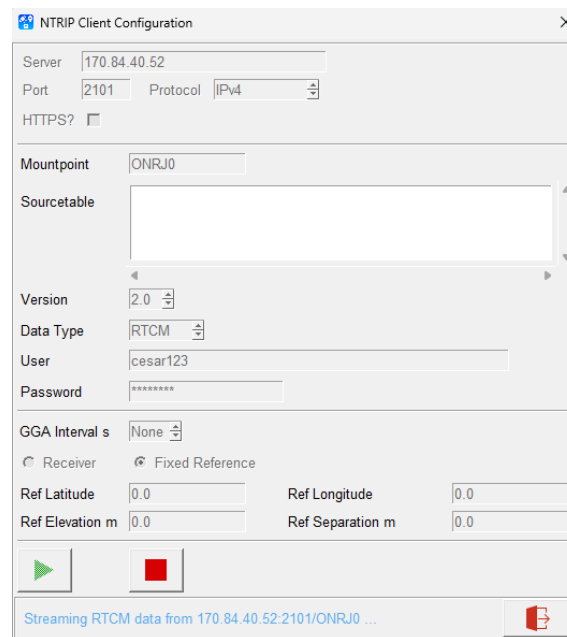


Figura 4.2: Tela de configuração de conexão NTRIP funcionando.

A Figura 4.2 detalha a tela de configuração do cliente NTRIP no programa PyGPSClient, já com a conexão estabelecida. Nela, são inseridos os dados de conexão com o servidor da estação base, como o endereço de IP (170.84.40.52) e a porta (2101). O campo **Mountpoint** é preenchido com **ONRJ0**, que é o identificador específico da estação de referência da RBMC utilizada no projeto. Para a autenticação no serviço, foram fornecidos um nome de usuário (**User**) e uma senha (**Password**), necessários para o acesso aos dados de correção RTCM. A mensagem na parte inferior da janela, *Streaming RTCM data from 170.84.40.52:2101/ONRJ0...*, confirma que a conexão foi estabelecida com sucesso e que o receptor está recebendo o fluxo de dados de correção em tempo real.

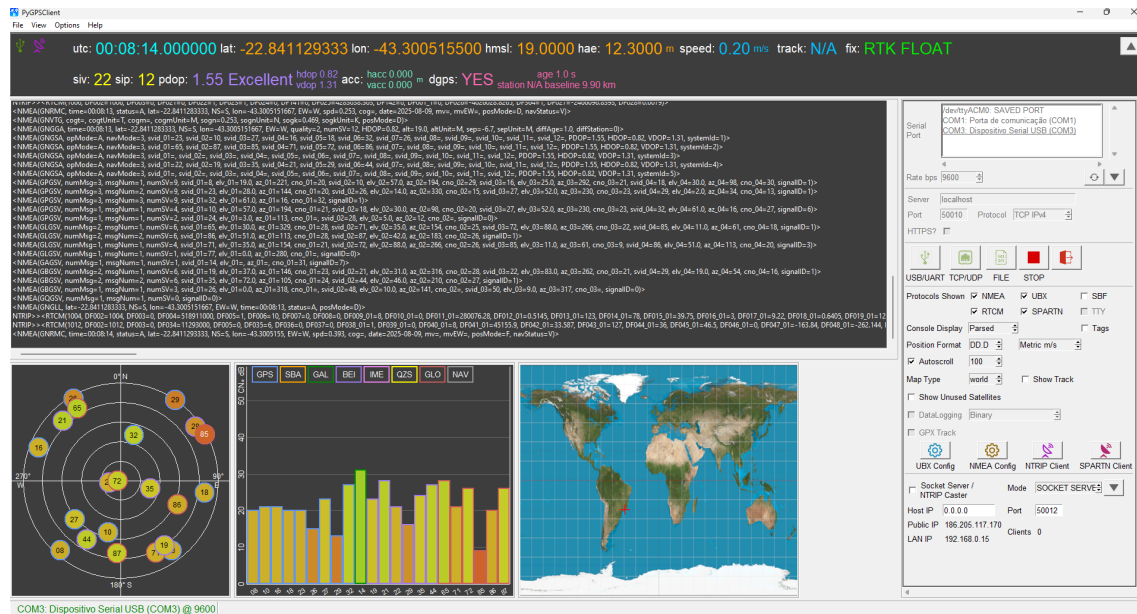


Figura 4.3: Tela do programa PyGPSClient do GPS com conexão NTRIP.

A Figura 4.3 apresenta a tela principal do PyGPSClient com a conexão NTRIP ativa e recebendo correções. O destaque principal está na barra de status superior, onde o campo **fix** indica o modo RTK-FLOAT. Este modo confirma que o receptor está utilizando as correções diferenciais da estação base para calcular uma posição de alta precisão. A solução “FLOAT” é uma etapa intermediária para a solução “FIXED”, que representa a maior acurácia possível, mas já oferece uma precisão significativamente superior à de um GPS convencional, como o visto na Figura 4.1. Na mesma barra, observa-se o **pdop** (*Positional Dilution of Precision*) com valor “Excellent” e uma acurácia horizontal (**hacc**) estimada em 0,82m.

Como a estratégia do sistema desenvolvido requer a leitura em tempo real das coordenadas corrigidas, foi preciso desenvolver um método de extração contínua das coordenadas corrigidas. Para isso, foi modificado o código do programa PyGPSClient para que, a cada coordenada coletada, o arquivo .txt de log fosse imediatamente atualizado. Com esse método, o código Python desenvolvido é capaz de ler continuamente as novas linhas escritas e extrair para o ambiente virtual os dados.

Além disso, o estudo do sensor requereu, como ilustrado na Figura 4.4, coleta de dados em espaço aberto. Dessa forma, foi feita a coleta de medidas corrigidas com os dados NTRIP, em um local com mínima interferência de prédios e com condições



Figura 4.4: Teste do sensor em espaço aberto.

atmosféricas favoráveis. Nessa situação, objetivou-se obter medidas com o menor erro possível. Nesse ponto, é válido ressaltar que as correções advindas do RTK eliminam erros advindos de condições em comum entre a estação base e o sensor (rover), como incertezas atreladas às condições atmosféricas e as interferências da ionosfera do planeta. Erros advindos de interferência de sinal por obstáculos físicos, como é o caso de prédios, não são mitigados pela correção.

4.2 Sensor óptico de velocidade

Devido ao fato de o sensor GPS RTK não ter atendido às expectativas, foram realizados estudos com outros sensores disponíveis no laboratório.

Nesse âmbito, foi realizada a calibração do sensor de velocidade Correxit L-350, da fabricante Kistler, um sistema óptico de alta performance projetado para medições slip-free de dinâmica longitudinal. Segundo suas especificações [24], este sensor se destaca por sua precisão, com linearidade de velocidade $< \pm 0,2\%$ e resolução de distância de 1,5 mm, além de capacidade de medição contínua em velocidades de 0,3 a 250 km/h.

Nesse sentido, houve dificuldades a serem superadas nesse procedimento, de início, devido ao fato de que o único cabo disponível para transferência de dados para um

computador possuía extremidade DB-9, que é uma conexão obsoleta. Apesar deste desafio técnico, o esforço foi justificado pelo desempenho superior do equipamento. Assim, foi preciso encontrar e consertar um computador antigo para o cumprimento dessa etapa, garantindo que fosse possível realizar a calibração.

O processo ocorreu por meio da exposição do sensor óptico a um disco rotativo disponível no laboratório, tendo sua velocidade variada de 100 a 550 RPM. O registro de valores em RPM foi feito por meio de um tacômetro óptico, enquanto o registro do valor de tensão da respectiva velocidade, transmitida pelo encoder do sensor, foi através do osciloscópio. Dessa forma, foram feitas as tomadas de dados. Cada uma delas correspondia ao conjunto de medidas feitas após incrementos de 50 RPM, totalizando 8 tomadas de dados. Foi cumprida a cautela de uma tomada consecutiva após o incremento necessariamente ser efetuada com o decremento de velocidade, indo de 550 até 100 RPM. Dessa forma, foi possível garantir que os valores iniciais e finais não estivessem variando.

Os resultados finais foram satisfatórios. O desvio padrão calculado foi de 0,048 V, e gráficos condizentes com as expectativas, representados pelas Figuras 5.5 e 5.6.



Figura 4.5: Equipamentos utilizados na calibração do sensor de velocidade.

A Figura 4.5 apresenta, de forma respectiva à numeração: 1 - a lâmpada do sensor óptico de velocidade, 2 - o disco rotativo, 3 - o corpo do sensor, 4 - o osciloscópio e 5 - a bateria utilizada para alimentação do medidor.

Dessa forma, a finalidade da etapa de calibração desse sensor se justificou pela proposta de utilizá-lo como sensor principal do projeto, sendo capaz de medir com precisão a velocidade e, conseqüentemente, a posição. Com isso, o sensor, equipado com um encoder próprio, se conecta a uma entrada analógica do inversor de frequência para a transferência de dados de tensão.

4.3 Sensor ultrassônico de posição

Além do estudo do sensor de velocidade, foi feita a coleta de medidas para calibração do sensor de distância, de modelo BUS M18K0-XAER-040-S92K, da fabricante Balluff. Esse sensor foi utilizado primariamente em [6], com a finalidade de auferir dados da posição instantânea da base do veículo em relação à superfície dos ímãs (altura de levitação). Contudo, ele é capaz também de medir o deslocamento horizontal veicular.

Nesse sentido, foi realizada a calibração dos 7 sensores distribuídos pelo MagLev. Diferentemente do caso do sensor de velocidade, este não é munido de um software próprio dedicado à configuração para calibração. O procedimento era equivalente, porém, a variação de posição foi feita com o programa que controla o incremento de altura da máquina de ensaio mecânico disponível no LASUP.

O procedimento de calibração foi iniciado posicionando o sensor com sua face frontal encostada no anteparo de madeira, estabelecendo assim a referência de posição zero. Utilizando um dispositivo de controle de altura, elevou-se a plataforma até atingir a altura mínima de operação do sensor (80 mm), conforme especificado em seu manual técnico. A variação de posição foi então incrementada progressivamente até o limite máximo de 130 mm, que corresponde ao range operacional do equipamento.

O processo de configuração seguiu três etapas críticas:

1. **Ajuste do ponto zero:** Com o sensor encostado no anteparo, sem fletí-lo, a plataforma foi elevada até 80 mm, utilizando a função de “ensino” do sensor para calibrar esta posição como correspondente à saída 0 V.
2. **Ajuste do fundo de escala:** A plataforma foi então elevada até 130 mm, utilizando novamente a função de ensino para associar esta posição à tensão máxima de saída (10 V).
3. **Verificação da curva característica:** Realizou-se um ensaio de caracterização, posicionando inicialmente o sensor a 70 mm (10 mm abaixo do mínimo operacional), onde se observou saturação do sinal. A partir daí, incrementou-se a altura em passos de 1 mm, registrando a tensão de saída em cada posição. Verificou-se que:
 - Entre 70-80 mm: saída permaneceu em 0 V (região de saturação inferior);
 - Acima de 80 mm: resposta linear progressiva;
 - Em 130 mm: saturação superior com 10 V de saída.



Figura 4.6: Equipamentos utilizados na calibração do sensor de posição.

Respeitando a ordem de numeração da imagem, os respectivos componentes representados são: 1 - o sensor de distância, 2 - o anteparo de madeira, 3 - a caixa de acrílico que contém a placa de circuito impresso que energiza o sensor (desenvolvida em [25]) e 4 - as baterias que alimentam esse circuito.

Com a conclusão dessa etapa meticulosa de calibração, que incluiu seis conjuntos de medidas para cada um dos sete sensores, os equipamentos foram reinstalados no novo chassi do veículo MagLev. A instalação concentrou-se na plataforma de levitação, embora limitações temporárias na infraestrutura de automação tenham restringido os testes iniciais a movimentações curtas (de poucos metros) nos trilhos remanescentes que aguardavam substituição.



Figura 4.7: Primeiro teste de locomoção pós-reforma, com o veículo equipado com os sensores calibrados.

Este processo de calibração garantiu que todos os sensores operassem dentro de sua faixa linear ótima (80-130 mm), com resolução de 1 mm e saída analógica proporcional (0-10 V), essencial para o controle preciso da levitação magnética.

Capítulo 5

Resultados

Este capítulo apresenta e analisa os resultados experimentais obtidos no desenvolvimento do sistema de automação e no estudo comparativo dos sensores. Primeiramente, são discutidos os resultados da validação do sistema de controle em bancada, que confirmaram a funcionalidade da lógica de automação implementada, ao mesmo tempo que se delineia o escopo limitado dos testes. Em seguida, é realizada uma análise quantitativa detalhada do desempenho do sensor GPS RTK, onde os dados coletados em diferentes cenários são apresentados em gráficos para avaliar sua precisão e limitações práticas. Por fim, são exibidos os resultados da calibração dos sensores complementares, o óptico de velocidade e os ultrassônicos de distância, por meio de curvas características que validam seu comportamento para a aplicação no projeto.

5.1 Validação do Sistema de Controle em Bancada

Os resultados obtidos delineiam um progresso significativo no caminho para a automação do MagLev-Cobra. A implementação inicial do sistema de automação veicular mostrou-se promissora nos testes realizados com o motor de bancada, indicando que o controle de aceleração e frenagem é viável por meio do esquema proposto. As simulações refletiram com razoável precisão o comportamento esperado do MagLev em um ambiente controlado, com a ativação e desativação das entradas e saídas digitais do inversor de frequência, sinalizando a funcionalidade do código em Ladder desenvolvido.

O microcomputador, agindo como um ponto de acesso, demonstrou a capacidade de comunicação efetiva com os componentes do sistema, permitindo o controle remoto necessário para simular as condições de parada. No entanto, a ausência de testes no protótipo do MagLev, devido a problemas técnicos presentes ao longo do ano, não permitiu ainda uma validação completa da abordagem. Apesar de o trabalho, no momento de idealização, ter proposto testes no MagLev, estes não puderam ser realizados em função das obras no veículo e nos trilhos. Por conta disso, o escopo deste projeto final se limitou a testes em bancada.

5.2 Análise Experimental dos Sensores

5.2.1 Resultados do Sensor GPS RTK

As análises acerca da precisão do sensor GPS RTK ZED-F9P-01B-01 da u-blox tiveram resultados que ficaram aquém das expectativas iniciais. A integração com os dados NTRIP da estação ONRJ gerou um erro elevado para situações não ideais, que, embora não atinja a referência de 2 cm, ainda representa uma melhoria em comparação com os sistemas GPS tradicionais [17], visto que o desvio padrão foi de aproximadamente 40 cm entre amostras, em um ambiente urbano, enquanto a precisão horizontal registrada foi de 82 cm nesse meio. Nas Figuras 5.1(a) até 5.2(b), foram analisadas as diferenças, em metros, entre uma medição e a medição anterior, ou seja, os valores de latitude e longitude convertidos por meio da fórmula de haversine (2.3). Essa coleta de dados corresponde aos valores medidos com o sensor no campo de futebol, ambiente mais propenso ao melhor desempenho.

Dessa forma, foi visualizado, no eixo horizontal, o índice de cada uma das 500 amostras de distâncias, e no eixo vertical o valor delas. Nessa análise, foi possível notar que o sensor requer um tempo de *warm-up* para atingir menor variação, em metros, entre as medições consecutivas.

Os gráficos das Figuras 5.3(a) até 5.4(b) representam os valores de latitude e longitude das 500 amostras analisadas, em que no eixo horizontal tem-se o valor da coordenada, e no eixo vertical a frequência com que ela ocorre. Analisando-os,

é possível concluir que o erro atrelado às medições em um cenário não ideal foi maior, com medidas mais dispersas. Assim, ficou nítido que o sensor depende de condições ideais para operar com um diferencial significativo em relação a um sensor de GPS sem correção RTK, condições estas difíceis de se conseguir em um cenário de mobilidade urbana.

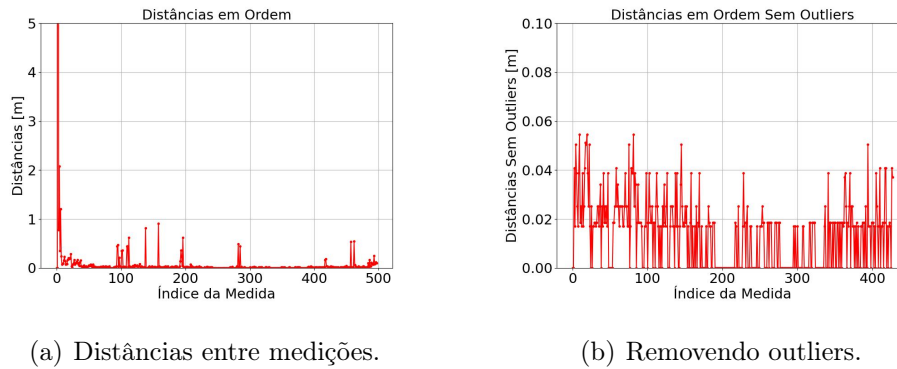


Figura 5.1: Medições feitas no campo de futebol.

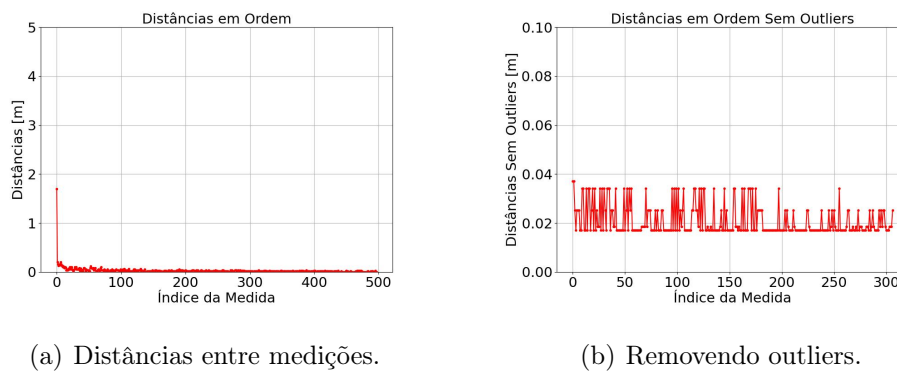
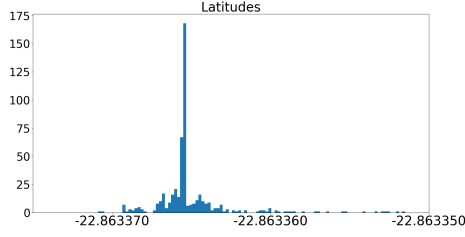
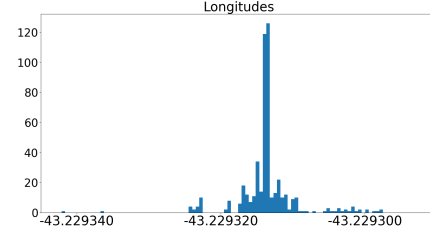


Figura 5.2: Medições realizadas na residência do aluno.

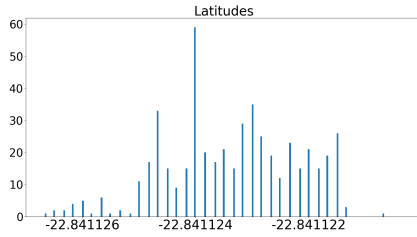


(a) Histograma de latitudes.

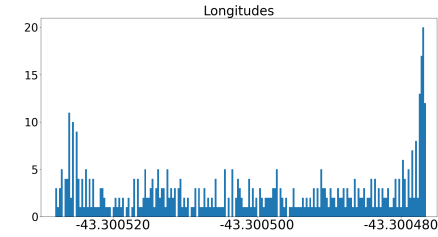


(b) Histograma de longitudes.

Figura 5.3: Medições feitas no campo de futebol.



(a) Histograma de latitudes.



(b) Histograma de longitudes.

Figura 5.4: Medições realizadas na residência do aluno.

5.2.2 Resultados do Sensor Óptico de Velocidade

Os resultados da calibração e configuração do sensor Correvit L-350, de velocidade, podem ser visualizados por meio destes gráficos, com o plot apresentado, inicialmente em [3]. Pontos extremos do gráfico da Figura 5.5 expuseram, conforme previsto, medidas assintóticas devido à saturação ao ultrapassar a faixa de operação de velocidade configurada. No gráfico da Figura 5.6, foi feita a conversão de RPM para km/h para facilitar a comparação com a velocidade do MagLev.

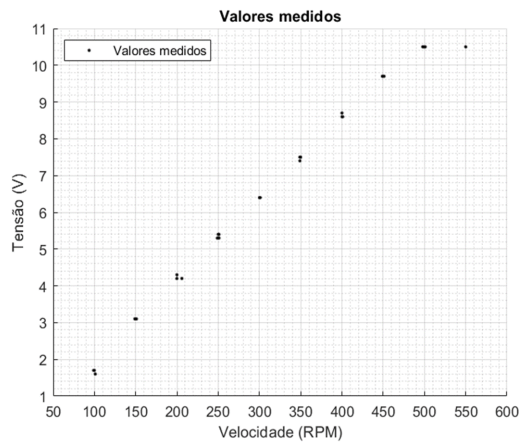


Figura 5.5: Dados em RPM.

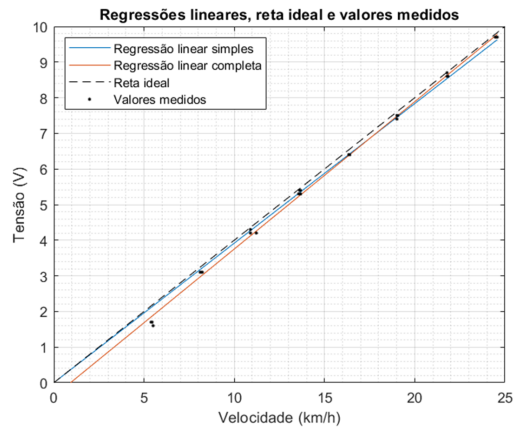
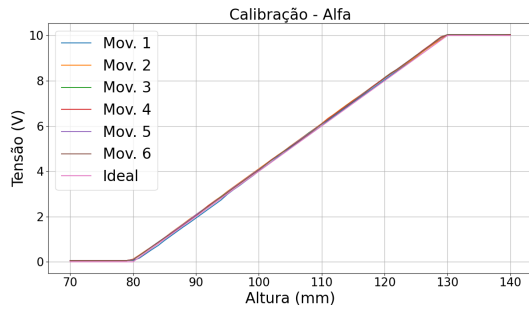


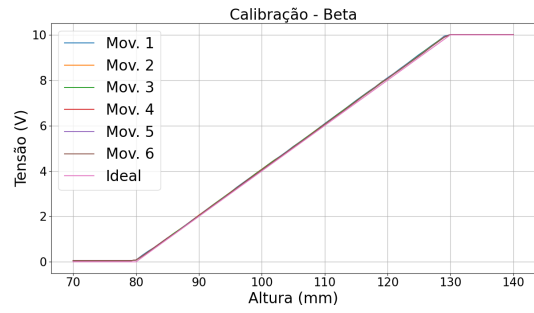
Figura 5.6: Dados em km/h.

5.2.3 Resultados do Sensor Ultrassônico de Distância

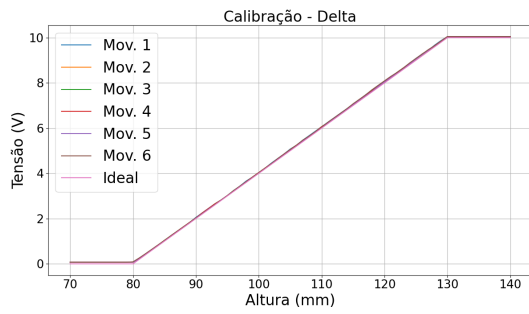
No que diz respeito ao sensor de distância, os resultados atenderam às expectativas, dado que a especificação do sensor determinava que um incremento de 1 mm geraria uma variação de 0,2 V. A Figura 5.7 exibe os resultados das coletas de amostras, denominadas de “Mov” com o gráfico ideal condizente com as especificações. O único gráfico ligeiramente destoante é o do sensor Epsilon.



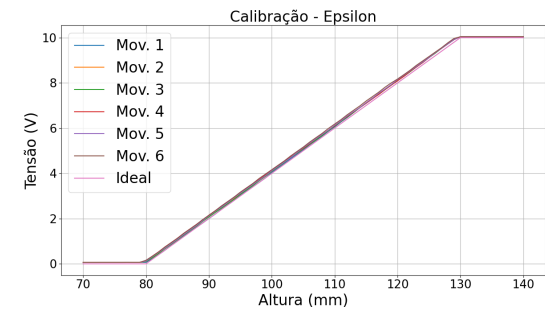
(a) Sensor Alfa.



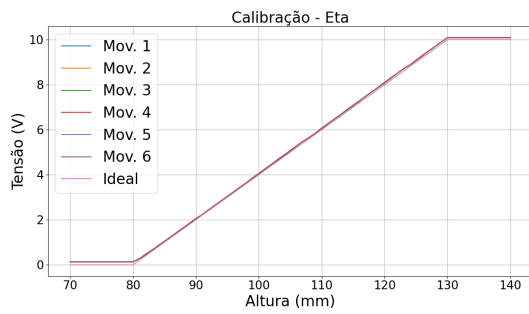
(b) Sensor Beta.



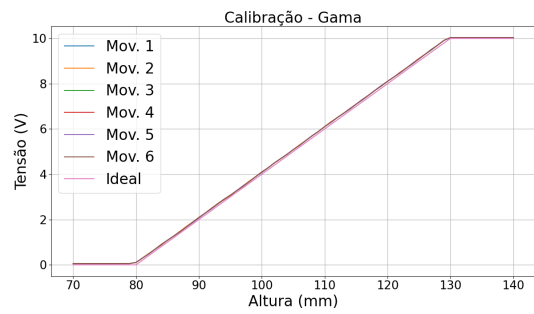
(c) Sensor Delta.



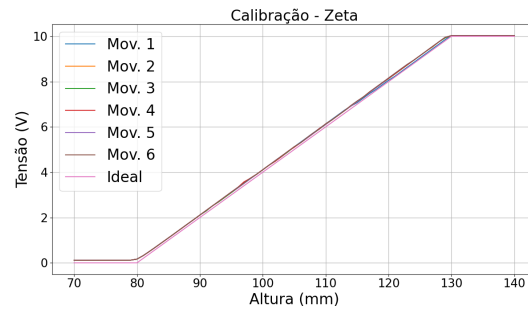
(d) Sensor Epsilon.



(e) Sensor Eta.



(f) Sensor Gama.



(g) Sensor Zeta.

Figura 5.7: Curvas de calibração dos sete sensores ultrassônicos utilizados no projeto.

5.3 Observações Finais sobre os Resultados

Um dos resultados centrais deste trabalho foi a caracterização e a análise comparativa do desempenho das tecnologias de sensoriamento. A Tabela 5.1 consolida os resultados quantitativos obtidos, evidenciando uma conclusão de grande importância prática. Enquanto o sensor GPS RTK, apesar de sua alta precisão teórica de 2 cm, apresentou em cenário não ideal um desvio padrão de 40 cm, os sensores complementares demonstraram alta fidelidade às suas especificações em ambiente controlado. A calibração do sensor óptico validou sua alta repetibilidade (desvio padrão de 0,048 V na medição) e a dos sensores ultrassônicos confirmou a resposta linear esperada (próxima de 0,2 V/mm). Esta análise quantitativa não apenas validou a funcionalidade de cada componente, mas também expôs a necessidade de uma abordagem multissensorial, onde as fraquezas de uma tecnologia são compensadas pelas forças das outras.

Tabela 5.1: Tabela comparativa dos resultados dos sensores.

Sensor	Grandeza Medida	Precisão Especificada	Resultado Verificado no Projeto
GPS RTK (u-blox)	Posição Absoluta	Erro < 2 cm (ideal)	Desvio Padrão de 40 cm
Óptico (Kistler)	Velocidade Relativa	Linearidade $\pm 0.2\%$	< Calibração linear
Ultrassônico (Balluff)	Posição Relativa	Sensibilidade de 0,2 V/mm	Resposta linear

Capítulo 6

Conclusões

Este capítulo finaliza o trabalho, consolidando os resultados e as conclusões obtidas no desenvolvimento do sistema de automação para o MagLev-Cobra. Primeiramente, será apresentada uma síntese dos principais resultados alcançados, tanto na validação da arquitetura de controle em bancada quanto na análise comparativa das tecnologias de sensoriamento. Em seguida, serão discutidas as contribuições do projeto, as limitações encontradas durante sua execução e as implicações dos resultados. Por fim, com base nos aprendizados, serão propostas direções para trabalhos futuros, visando a evolução do protótipo para um sistema operacional completo.

6.1 Observações finais

A principal contribuição deste projeto reside na demonstração prática de que a arquitetura de controle proposta é funcional. A interface de hardware entre o Raspberry Pi e o inversor de frequência CFW-11 foi implementada com sucesso, e a lógica de automação em Ladder, validada em testes de bancada, provou ser capaz de executar um ciclo completo de operação (partida, aceleração, frenagem e reversão), simulando o percurso do veículo, utilizando um motor de bancada. Este resultado representa um avanço na automação de veículos seguidores de trilhos, em especial, o MagLev-Cobra.

A validação experimental do sistema em bancada foi parcialmente bem sucedida. Por um lado, a arquitetura de controle baseada em CLP demonstrou eficácia, com

tempos de resposta satisfatórios nas operações simuladas de aceleração e frenagem. Por outro lado, a análise dos dados do sensor principal, o GPS RTK, revelou limitações significativas de precisão, com variações que se aproximaram de 1 metro em ambientes simulados. Este resultado indicou que, embora a lógica de controle seja funcional, a percepção sensorial do veículo exigiria uma abordagem complementar para atingir os objetivos do projeto.

No que diz respeito a este ponto do sensoriamento, o GPS RTK demonstrou ser insuficiente para garantir, de forma isolada, a precisão exigida pela aplicação. Em contrapartida, a calibração meticulosa dos sensores óptico de velocidade e ultrassônico de posição validou seu desempenho linear e confiável, posicionando-os como componentes essenciais para uma solução de automação robusta.

Apesar das restrições operacionais que limitaram os testes a um ambiente de bancada, o projeto concluiu pontos importantes que validam a arquitetura proposta: foi demonstrada a integração bem-sucedida entre o microcomputador de alto nível Raspberry Pi e o CLP industrial (SoftPLC); foi estabelecida uma comunicação via protocolo NTRIP com a estação ONRJ do IBGE; e, por fim, a caracterização dos sensores complementares forneceu as curvas características necessárias para sua futura integração em um sistema de controle em malha fechada.

6.2 Trabalhos futuros

Com base nas lições aprendidas e limitações identificadas, propõe-se as seguintes direções para pesquisas futuras:

1. **Implementação de Controle em Malha Fechada:** Utilizar a estimativa de velocidade gerada pela fusão de sensores para implementar um controle de velocidade em malha fechada no CLP, que envie referências de velocidade em tempo real ao inversor.
2. **Validação em Escala Real:** Realizar testes operacionais completos no veículo MagLev-Cobra assim que a infraestrutura estiver disponível, para validar

o desempenho do sistema de controle e sensoriamento em condições dinâmicas e de carga reais.

3. **Integração Sistêmica e Expansão Funcional:** Conectar a arquitetura de controle desenvolvida com outros projetos correlatos, como os de controle de levitação [6], e expandir suas funcionalidades para incluir subsistemas auxiliares, como o controle de portas e a sinalização audiovisual para passageiros.
4. **Otimização de Custos:** Desenvolvimento de análise econômica comparativa entre diferentes configurações sensoriais.
5. **Análise de Modos de Falha e Efeitos (FMEA):** Realizar um estudo sistemático de modos de falha para toda a arquitetura de automação, incluindo sensores, comunicação e atuadores. O objetivo é desenvolver lógicas de controle de exceção e mecanismos de *fail-safe* que garantam a parada segura do veículo em cenários adversos, aumentando a robustez e a segurança operacional do sistema.

Estes desenvolvimentos permitirão a transição do estágio atual de protótipo funcional para um sistema operacional completo, contribuindo para o avanço da mobilidade urbana sustentável através da levitação magnética.

Referências Bibliográficas

- [1] STEPHAN, R. M., AMARO O. PEREIRA, J., “The Vital Contribution of MagLev Vehicles for the Mobility in Smart Cities”, *Electronics*, , 2020. Publisher: MDPI.
- [2] WEG, *CFW-11 Manual de Programação*. Documento: 0899.5664 / 04, Idioma: Português.
- [3] MESSER, G. K., *Avaliação da Instrumentação do Veículo de Levitação Magnética MagLev-Cobra*. Ph.D. dissertation, Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 09 2025. Dissertação de Mestrado (em andamento).
- [4] TecMundo, “O trem MagLev: como ele funciona?”, <https://www.tecmundo.com.br/mobilidade-urbana-smart-cities/261621-o-trem-maglev-ele-funciona.htm>, 2025, Acesso em: 18 ago. 2025.
- [5] IBGE - Centro de Controle Eng. Kátia Duarte Pereira - RBMC, *RBMC - Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS: Relatório de Informação de Estação ONRJ - Rio de Janeiro*. IBGE, 2007. Última atualização em 17/11/2017. Esta estação pertence à Rede de Densificação do IGS.
- [6] MESSER, G. K., RODRIGUEZ VELANDIA, E. F., STEPHAN, R. M., *et al.*, “Data Acquisition for a Magnetic Levitation Vehicle”. In: *Brazilian Power Electronics Conference (COBEP 2023)*, Federal University of Rio de Janeiro (UFRJ), Florianopolis, Brazil, 2023.
- [7] WEG, *Manual da SoftPLC CFW-11*. WEG, 2010.

- [8] GALHARDO, P. H. S., *Análise do posicionamento GNSS cinemático em ambiente urbano com uso da técnica RTK via Ntrip*. Dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018. Orientador: Prof. Dr. João Francisco Galera Monico.
- [9] LEE, H. W., KIM, K. C., LEE, J., “Review of Maglev Train Technologies”, *IEEE Transactions on Magnetism*, v. 42, n. 7, 2006.
- [10] STEPHAN, R. M., DAVID, E. G., “MAGLEV-COBRA: Um Veículo para Transporte Urbano Energeticamente Eficiente e Ambientalmente Correto”. In: *Simpósio da Sociedade Brasileira de Eletrônica de Potência (SOBRAEP)*, SOBRAEP – Sociedade Brasileira de Eletrônica de Potência, s.d. Disponível em: <https://www.sbpnet.org.br/livro/60ra/textos/C0-RichardStephan.pdf>. Acesso em: 1 jun. 2025.
- [11] WEG, *Manual do Usuário Software WLP*. WEG, jun 2016.
- [12] u-blox AG, *u-blox ZED-F9P: Interface Description*. Ublox, 2022. UBX-18010854 – R07.
- [13] VIVACQUA, L. G., FERNANDEZ, J. H., “Efeitos relativísticos nos relógios dos satélites de navegação”, *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 46, 2024.
- [14] European Space Agency (ESA), “RTK Fundamentals”, Navipedia, 2025, Disponível em: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php?title=RTK_Fundamentals. Acesso em: 23 de agosto de 2025.
- [15] “Maglev Cobra”, 2023, Acessado em 23 de dezembro de 2023.
- [16] Grupo de Teleinformática e Automação (GTA), “Página Oficial do GTA/UFRJ”, Disponível em: <https://www.gta.ufrj.br/>, 2025, Acessado em: 03/05/2025.
- [17] NETO, J. B. P., GOMES, L. C., ORTIZ, F. M., *et al.*, “An accurate cooperative positioning system for vehicular safety applications”, *Computers and Electrical Engineering*, v. 83, pp. 106591, 2020.

- [18] CARNEIRO, J. G. S., SERRANO, L. E. M., *Descrição do Funcionamento dos Componentes do Veículo de Levitação MagLev-Cobra*. Projeto de graduação em engenharia elétrica, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, fev 2019.
- [19] ESTEVE, A. B., *Elaboração dos circuitos de comando e controle do veículo MagLev-Cobra e proposta de sistema de condução automática*. Projeto de graduação em engenharia elétrica, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, mar 2014.
- [20] PINTO NETO, J. B., GOMES, L. C., CASTANHO, E. M., *et al.*, “Um Algoritmo para Cálculo de Distância Segura de Frenagem para Prevenção de Colisão Dianteira em Redes Veiculares”. Universidade Federal do Rio de Janeiro - PEE/COPPE/GTA e Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Rondônia - IFRO, 2016.
- [21] AMADO, C. A. G., “Teste da interface entre Raspberry Pi e CFW11 (vídeo completo)”, YouTube, s.d., Canal: Cesar Augusto.
- [22] u-blox, “u-center: Powerful evaluation software for u-blox GNSS receivers”, 2025, Acesso em: 08 ago. 2025.
- [23] CONSULTING, S., “PyGPSClient: Python GNSS/GPS Graphical Client”, 2025, Repositório GitHub. Acesso em: 7 ago. 2025.
- [24] CORRSYS-DATRON Sensorsysteme GmbH, *CORREVIT L-350 Aqua - 1-axis optical sensor for slip-free measurement of longitudinal dynamics*. CORRSYS-DATRON Sensorsysteme GmbH, 2015. Manual técnico. Número do artigo: L-350 Aqua, 15099.
- [25] MESSER, G. K., *Instrumentação do Veículo de Levitação MagLev-Cobra*. Projeto de graduação, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 10 2022. Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica.

Apêndice A

Pseudocódigo do Sistema de Navegação

Algoritmo 1: Sistema de Navegação Autônoma MagLev-COBRA (Parte 1)

Entrada *Arquivo GPX com dados RTK, Coordenadas das estações* **Saída**

Controle de frenagem e navegação autônoma

Constantes:

$R \leftarrow 6371000$ ▷ *[r]Raio da Terra em metros

$CT1 \leftarrow (-22.862539, -43.229347)$ ▷ *[r]Coordenadas CT1

$CT2 \leftarrow (-22.863380, -43.230671)$ ▷ *[r]Coordenadas CT2

$DIST_THRESHOLD \leftarrow 1$ ▷ *[r]Limiar de frenagem (m)

$haversine(lat1, lon1, lat2, lon2)$ Converter $lat1, lon1, lat2, lon2$ para radianos;

$dlat \leftarrow lat2 - lat1;$

$dlon \leftarrow lon2 - lon1;$

$a \leftarrow \sin^2(dlat/2) + \cos(lat1) \cdot \cos(lat2) \cdot \sin^2(dlon/2);$

$c \leftarrow 2 \cdot \text{atan2}(\sqrt{a}, \sqrt{1-a});$

retorna $c \cdot R$ ▷ *[r]Distância em metros

$\text{calculateVelocity}(distance, time)$ **if** $time = 0$ **then**

 | **retorna** 0

else

 | **retorna** $distance/time$

$\text{shouldBrake}(distance, velocity)$ **if** $distance < DIST_THRESHOLD$ **then**

 | **retorna verdadeiro**

else

 | **retorna falso**

Algoritmo 2: Sistema de Navegação Autônoma MagLev-COBRA (Parte

2)

```
Função processGPX(line, last_lat, last_lon, last_time)  
  while linha contém dados RTK válidos do  
    Extrair lat, lon da linha GPX;  
    current_time  $\leftarrow$  tempo atual;  
    if last_lat  $\neq$  nulo then  
      distance  $\leftarrow$  haversine(lat, lon, last_lat, last_lon);  
      velocity  $\leftarrow$  calculateVelocity(distance, current_time – last_time);  
      dist_to_station  $\leftarrow$  haversine(lat, lon, CT1.lat, CT1.lon);  
      if shouldBrake(dist_to_station, velocity) then  
        | Ativar sinal de frenagem  $\triangleright$  *[r]GPIO.set_high(BRAKE_PIN)  
      Atualizar last_lat, last_lon, last_time;  
  retorna last_lat, last_lon, last_time
```

Função Principal:

```
while verdadeiro do  
  Ler novas linhas do arquivo GPX;  
  last_lat, last_lon, last_time  $\leftarrow$   
    processGPX(linha, last_lat, last_lon, last_time);  
  Dormir 100ms  $\triangleright$  *[r]Evitar uso excessivo da CPU
```

Pseudocódigo do Algoritmo Ladder

Entrada Sinais de controle: *Enable, Begin, Sinal_Raspberry* **Saída** Sinais de estado: *Habilitado Geral, Brake_Time; Parâmetros do motor*

$$Enable = LIGADO \wedge Begin = LIGADO \text{ then}$$

else

```
if Habilitado_Geral then
```

*[r]Define desaceleração (ex: 0.5s)

```
Brake Time ← Sinal_Raspberry ▷ *r| Repassa o sinal de frenagem
```

