



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO,
CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO AMAZONAS
CAMPUS MANAUS – DISTRITO INDUSTRIAL
DEPARTAMENTO DE ENSINO SUPERIOR
TECNOLOGIA EM MECATRÔNICA INDUSTRIAL**

JACKSON GERVÁSIO DE ALECRIM JÚNIOR

**ESTUDO DE VIABILIDADE E PROTOTIPAGEM DE UM SISTEMA DE METRÔ
SUSPENSO PARA MANAUS: UM ENFOQUE NA MOBILIDADE URBANA
SUSTENTÁVEL**

**Manaus
Janeiro de 2025**

JACKSON GERVÁSIO DE ALECRIM JÚNIOR

**ESTUDO DE VIABILIDADE E PROTOTIPAGEM DE UM SISTEMA DE METRÔ
SUSPENSO PARA MANAUS: UM ENFOQUE NA MOBILIDADE URBANA
SUSTENTÁVEL**

Trabalho de Conclusão de Curso do Instituto Federal do Amazonas apresentado como requisito parcial para obtenção do certificado em Tecnologia Mecatrônica Industrial.

Orientador:
Prof. Dr. Vitor Bremgartner da Frota

Manaus - AM
2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

A366e Alecrim Júnior, Jackson Gervásio.
Estudo de viabilidade e prototipagem de um sistema de metrô suspenso para Manaus: um enfoque na mobilidade urbana sustentável / Jackson Gervásio Alecrim Júnior. — Manaus, 2025. 42f.: il. color.

Monografia (Graduação) — Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas, *Campus* Manaus Distrito Industrial, Curso de Tecnologia em Mecatrônica Industrial, 2025. Orientador: Prof.º Vítor Bremgartner da Frota, Dr.

1. Mecatrônica Industrial. 2. Prototipagem. 3. Metrô suspenso. I. Frota, Vítor Bremgartner da. II. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas. III. Título.

CDD 629.892

Elaborada por Oziane Romualdo de Souza (CRB11/ nº 734).

JACKSON GERVÁSIO DE ALECRIM JÚNIOR

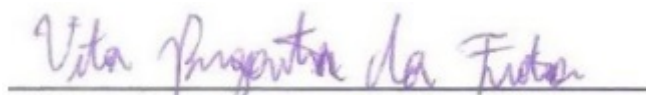
**Estudo de viabilidade e prototipagem de um sistema de metrô suspenso para
Manaus: Um enfoque na mobilidade urbana sustentável**

Monografia apresentada ao Instituto Federal do Amazonas como requisito parcial para a obtenção do título de Tecnólogo em Mecatrônica Industrial. Trabalho desenvolvido na área de concentração em Mobilidade Urbana Sustentável.

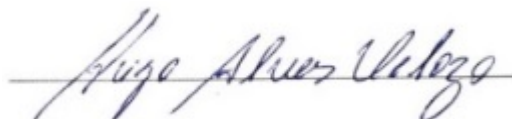
Orientador:
Prof. Dr. Vitor Bremgartner da Frota

Aprovado em: 17 de Janeiro de 2025.

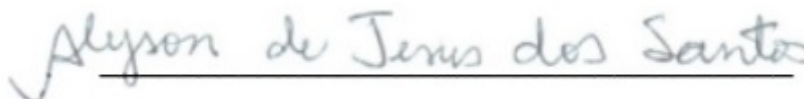
Banca Avaliadora:



Prof. Dr. Vitor Bremgartner da Frota
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas



Prof. Me. Hugo Alves Velozo
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas



Prof. Dr. Alyson de Jesus dos Santos
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas

Manaus
Janeiro de 2025

AGRADECIMENTOS

A Deus, meu guia, meu eterno farol,
Que ilumina a vida, da aurora ao arrebol.
Por tudo que fez, e ainda fará,
Minha fé em Ti jamais se apagará.

Ao orientador, mestre de paciência e saber,
Que motiva, encoraja, faz desenvolver,
Desde o início, o tema a analisar,
Até o fim, o resultado aprimorar.

Aos professores, guardiões do aprender,
Que com instruções nos fazem compreender.
Seus ensinamentos, adequado proceder,
São valioso tesouro no futuro a percorrer.

Aos familiares, alicerce e calor,
Incentivo e apoio, o mais puro amor.
Nos dias difíceis, valiosa companhia,
Fonte de força, equilíbrio, harmonia.

Aos colegas, parceiros na estrada,
Amigos leais, companheiros de jornada.
Guardaremos pra sempre, com muita saudade,
As boas lembranças da nossa amizade.

Este trabalho não teria sido possível,
Sem suporte, apoio, auxílio imprescindível,
Compreensão, atenção, disposição, colaboração.
A eles, a mais sincera gratidão e consideração.

RESUMO:

O trabalho propõe o desenvolvimento de um sistema de metrô suspenso para Manaus, inspirado no metrô elevado de Wuppertal, na Alemanha, reconhecido por sua eficiência operacional e adaptação inteligente ao ambiente urbano. A proposta busca enfrentar desafios relacionados à mobilidade urbana e à sustentabilidade, considerando fatores como o crescimento populacional, o aumento do tráfego e as características geográficas e hidrológicas. A implementação desse sistema poderia reduzir congestionamentos, otimizar deslocamentos e minimizar impactos ambientais ao utilizar uma estrutura elevada que evita interferências no tráfego terrestre. Para demonstrar a viabilidade técnica do projeto, foi desenvolvido um protótipo em escala reduzida, utilizando um microcontrolador ESP32 para controle remoto via Bluetooth. Esse modelo permite simular o funcionamento de um sistema de transporte suspenso, avaliando aspectos como desempenho, estabilidade e controle de deslocamento. O estudo destaca a importância da modernização da infraestrutura urbana, promovendo um meio de transporte coletivo mais eficiente, seguro e sustentável. O projeto não apenas sugere uma solução inovadora para a mobilidade de Manaus, mas também poderá servir como base para estudos futuros e ampliar o debate sobre alternativas viáveis para o transporte público. De acordo com os testes e simulações realizadas, esse modelo pode servir como referência para a implantação de um sistema real, trazendo benefícios econômicos, sociais e ambientais para a cidade.

Palavras-chave: Mobilidade urbana. Metrô suspenso. Prototipagem. ESP32.

ABSTRACT:

The work proposes the development of a suspended subway system for Manaus, inspired by the elevated subway of Wuppertal, Germany, recognized for its operational efficiency and intelligent adaptation to the urban environment. The proposal seeks to address challenges related to urban mobility and sustainability, considering factors such as population growth, increased traffic and geographical and hydrological characteristics. The implementation of this system could reduce congestion, optimize travel and minimize environmental impacts by using a high structure that avoids interference in ground traffic. To demonstrate the technical feasibility of the project, a small-scale prototype was developed using an ESP32 microcontroller for remote control via Bluetooth. This model allows to simulate the operation of a suspended transport system, evaluating aspects such as performance, stability and displacement control. The study highlights the importance of modernizing urban infrastructure, promoting a more efficient, safe and sustainable means of public transport. The project not only suggests an innovative solution for mobility in Manaus, but may also serve as a basis for future studies and broaden the debate on viable alternatives for public transport. According to the tests and simulations carried out, this model can serve as a reference for the implementation of a real system, bringing economic, social and environmental benefits to the city.

Keywords: Urban mobility. Suspended subway. Prototyping. ESP32.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<i>Figura 1. Ilustrações do metrô suspenso de Wuppertal (Wuppertaler Schwebebahn).....</i>	<i>11</i>
<i>Figura 2. Ilustrações do Esp32, Esp32-C3 e Esp32-S3 UNO (On-board WROOM).....</i>	<i>12</i>
<i>Figura 3. Monotrilhos suspensos em Wuppertal e no Cairo.....</i>	<i>14</i>
<i>Figura 4. Monotrilhos suspensos em Tóquio e São Paulo.....</i>	<i>14</i>
<i>Figura 5. Imagens do monotrilho suspenso de Wuppertal.....</i>	<i>15</i>
<i>Figura 6. Mapa urbano e mapa hidrológico de Manaus.....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 7. ESP32-WROOM32, módulo ponte H L298N e motor 3-6V com caixa de redução.....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 8. Microcontrolador ESP32 (30 pinos).....</i>	<i>24</i>
<i>Figura 9. Disposição geral de pinos ESP32.....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 10. Representação dos pinos GPIO e PWM do ESP32.....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 11. Módulo Ponte H.....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 12. Configuração da Ponte H.....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 13. Ciclo de trabalho PWM (Pulse Width Modulation) e variações no tempo.....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 14. Esquema de conexão dos componentes do circuito.....</i>	<i>28</i>
<i>Figura 15. Suporte de pilhas, protoboard 400 furos, perfil, interruptor e motor com roda acoplada..</i>	<i>29</i>
<i>Figura 16. A IDE do Arduino pode se comunicar com o ESP32.....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 17. Aplicativo Android Bluetooth Eletronics.....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 18. Itens para montagem dos testes.....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 19. Montagem de protótipo para testes.....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 20. Reajuste do esquema principal.....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 21. Testes sendo realizados.....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 22. Representação dos Bairros de Manaus e rota pretendida.....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 23. Passarelas de Manaus poderiam ser adaptadas para servir como estações.....</i>	<i>40</i>

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 1. Sequência de ativação do motor A.....</i>	<i>27</i>
--	-----------

SUMÁRIO

1	Introdução.....	11
1.1	Contextualização e justificativa para o projeto.....	11
1.2	Objetivo geral e objetivos específicos.....	12
1.3	Metodologia.....	12
2	Mobilidade Urbana e Sustentabilidade.....	13
2.1	Conceitos de mobilidade sustentável.....	13
2.2	Desafios de infraestrutura e transporte em Manaus.....	13
2.3	Sistemas de Transporte Suspenso.....	14
2.4	Histórico e evolução do transporte suspenso.....	15
2.5	Estudo de caso: O metrô suspenso de Wuppertal.....	15
2.6	Tecnologias de Automação e Protótipos em Transporte.....	16
2.7	Principais avanços na automação de protótipos.....	16
2.8	Uso de microcontroladores e comunicação wireless.....	16
2.9	Trabalhos relacionados.....	17
3	Características Urbanísticas e Desafios Geográficos de Manaus.....	18
3.1	Características da região e impactos na implantação.....	18
3.2	Análise de Viabilidade do Metrô Suspenso em Manaus.....	19
3.3	Aspectos Econômicos e Ambientais.....	19
3.4	Comparativo de custo e viabilidade econômica.....	20
3.5	Potencial de redução de emissões de poluentes.....	20
3.6	Adaptações Inspiradas no Sistema de Wuppertal.....	21
3.7	Similaridades e adaptações ao contexto manauara.....	21
3.8	Desenvolvimento do Protótipo.....	21
4	Concepção e Projeto do Mini Metrô.....	22
4.1	Especificações técnicas do protótipo.....	22
4.2	Escolha dos materiais e funcionalidades principais.....	22
4.3	Implementação com ESP32 e Controle Bluetooth.....	23
4.4	Estrutura do circuito e componentes.....	24
4.5	Funcionamento do controle remoto via Bluetooth.....	30
4.6	Testes e Ajustes.....	34
4.7	Metodologia de testes.....	34
4.8	Análise dos resultados obtidos.....	36
4.9	Impactos e Benefícios da Implantação.....	36

4.10 Benefícios Socioeconômicos.....	37
4.11 Potenciais melhorias na mobilidade urbana.....	37
4.12 Benefícios para a população e o comércio local.....	38
4.13 Impacto Ambiental e Sustentabilidade.....	38
4.14 Redução de veículos nas vias.....	39
4.15 Contribuição para um sistema de transporte ecológico.....	39
4.16 Considerações para uma Implantação Real.....	39
4.17 Avaliação de infraestrutura necessária.....	40
4.18 Possíveis etapas de execução e implementação.....	40
5 Conclusão.....	41
5.1 Síntese dos principais pontos abordados.....	41
5.2 Limitações e sugestões para pesquisas futuras.....	42
5.3 Considerações finais.....	42
REFERÊNCIAS.....	43
ANEXOS.....	46

1 Introdução

O objetivo deste trabalho de conclusão de curso é apresentar uma proposta para um sistema de metrô suspenso em Manaus, inspirado no Wuppertaler Schwebebahn (Figura 1), o tradicional metrô suspenso da cidade de Wuppertal, Alemanha. Este modelo de transporte, desenvolvido no início do século XX, permanece um exemplo de engenharia inovadora e tem se mostrado eficaz para cidades com terrenos e tráfego complexos, características compartilhadas com Manaus. A infraestrutura suspensa é uma solução vantajosa para regiões urbanas de geografia incomum, como áreas ribeirinhas e relevo irregular, proporcionando uma alternativa de mobilidade menos invasiva em termos de espaço urbano e impacto ambiental.

1.1 Contextualização e justificativa para o projeto

Para contextualizar e materializar essa proposta, este projeto inclui o desenvolvimento de um protótipo em escala reduzida de um mini metrô suspenso, que utiliza um microcontrolador ESP32 controlado via Bluetooth. Esse protótipo visa simular a operação do sistema, permitindo uma visão prática da viabilidade técnica e funcional do modelo. O uso do ESP32, além de acessível, oferece conectividade Bluetooth eficiente e capacidade de processamento adequada, o que possibilita a implementação de controles em tempo real para uma operação precisa e segura do mini-trem. A integração dessa tecnologia com um modelo de transporte urbano reforça o potencial das novas soluções tecnológicas na modernização de sistemas de transporte e urbanização sustentável.

O trabalho também discute a aplicabilidade de um sistema similar para a capital amazonense, considerando aspectos como o crescimento demográfico, as condições ambientais e os desafios de infraestrutura urbana. Em Manaus, onde o tráfego urbano é marcado por congestionamentos e limitações de vias, a implementação de um metrô suspenso poderia se tornar uma alternativa eficiente e sustentável para o transporte público, reduzindo os problemas logísticos e o impacto sobre o meio ambiente local.

Figura 1. Ilustrações do metrô suspenso de Wuppertal (Wuppertaler Schwebebahn)



Fonte: Internet.

1.2 Objetivo geral e objetivos específicos

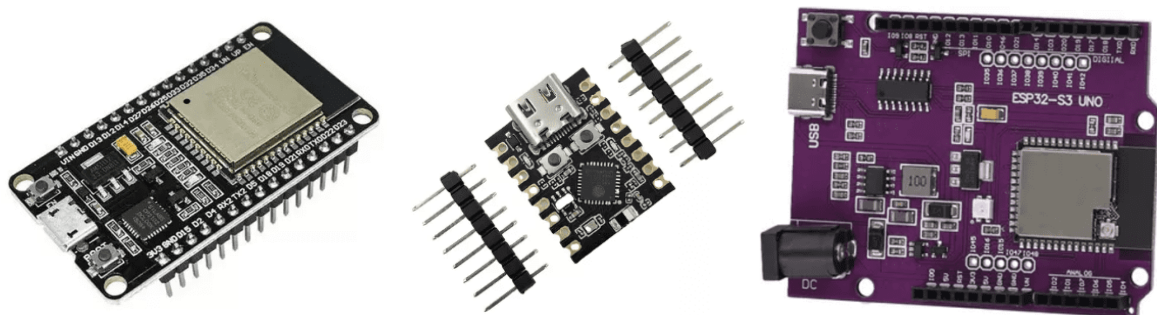
O objetivo geral deste trabalho é investigar a viabilidade e desenvolver a proposta de um sistema de metrô suspenso em Manaus, inspirado no sistema de transporte da cidade alemã de Wuppertal. Este projeto busca atender à necessidade crescente de alternativas para o transporte público na cidade, oferecendo uma solução eficiente, sustentável e de baixa interferência no tráfego terrestre. O sistema visa oferecer um transporte seguro, ágil e adequado às características climáticas e geográficas próprias de Manaus, considerando a complexa hidrologia urbana marcada pela presença de vários igarapés (pequenos rios ou riachos).

Para alcançar este propósito, foram estabelecidos objetivos específicos: primeiro, realizar uma análise urbanística de Manaus para identificar adaptações ao projeto; em seguida, aprofundar o estudo do sistema de Wuppertal, explorando como seus componentes e tecnologias podem ser adaptados à realidade manauara. Outro objetivo é construir um protótipo em miniatura, controlado por um ESP32 via Bluetooth, o que permitirá avaliar aspectos práticos e de automação do modelo. Por fim, são exploradas as implicações e impactos de um sistema de transporte desse tipo para a mobilidade, economia e meio ambiente local, criando uma base para o debate sobre sua implementação em maior escala.

1.3 Metodologia

Para alcançar os objetivos propostos, foi adotada uma metodologia que combina pesquisas, análise de caso e desenvolvimento prático. Primeiramente, realizou-se uma pesquisa sobre mobilidade urbana e tecnologias de transporte sustentável, com foco em sistemas de metrô suspenso como o de Wuppertal, e em microcontroladores, como o ESP32 (Figura 2), e tecnologia Bluetooth para automação. Uma análise da geografia e das necessidades de Manaus também foi realizada para adaptar o projeto às condições locais. O desenvolvimento do protótipo ocorreu em etapas: seleção de componentes, design e programação, seguidos da montagem e de testes de funcionalidade e controle. Durante os testes, buscou-se simular condições operacionais para avaliar o protótipo e obter dados sobre sua viabilidade técnica e potencial para ser uma solução de transporte realista para Manaus. Ao final, os resultados foram analisados quanto aos benefícios e limitações do projeto, destacando-se as considerações e adaptações necessárias para sua implementação em escala real, contribuindo para uma alternativa sustentável em termos de mobilidade urbana.

Figura 2. Ilustrações do Esp32, Esp32-C3 e Esp32-S3 UNO (On-board WROOM).



Fonte: Internet.

2 Mobilidade Urbana e Sustentabilidade

A mobilidade urbana sustentável visa atender à necessidade crescente de deslocamento nas cidades de forma a minimizar impactos ambientais e melhorar a qualidade de vida da população. Em um contexto de urbanização acelerada, como o de Manaus, soluções que promovam a sustentabilidade e atendam às demandas de trânsito são essenciais. Um sistema de transporte eficaz e limpo ajuda a reduzir as emissões de gases poluentes e contribui para a diminuição do tráfego, além de promover um ambiente urbano mais saudável. Adotar um metrô suspenso como alternativa se destaca pela menor ocupação de solo e capacidade de operar em áreas com relevo irregular e igarapés, respeitando a hidrologia e a geografia local. O uso de tecnologias modernas, como o controle automatizado, otimiza operações, reduz o consumo de energia e aumenta a confiabilidade, garantindo maior eficiência e integração. A criação de modelos como esse contribui para a descentralização dos transportes terrestres, favorecendo o desenvolvimento sustentável e incentivando a população a adotar melhores hábitos de mobilidade.

2.1 Conceitos de mobilidade sustentável

Mobilidade sustentável é um conceito que propõe a criação de sistemas de transporte urbano que promovam a eficiência e a redução de impactos ambientais, ao mesmo tempo em que garantem o acesso acessível e seguro aos cidadãos. Ela é baseada em princípios como a redução do uso de combustíveis fósseis, o incentivo a transportes coletivos e alternativos (bicicletas, metrô, e ônibus), e a promoção de espaços urbanos integrados e acessíveis a diferentes perfis de usuários. O conceito destaca a importância de soluções que considerem os limites ecológicos, minimizando emissões de gases de efeito estufa e promovendo uma ocupação mais inteligente e saudável dos espaços urbanos. Dentro desse modelo, prioriza-se o transporte coletivo de baixa emissão e as infraestruturas que respeitam as características locais, como a preservação de áreas verdes e corpos hídricos. A mobilidade sustentável, portanto, não é apenas uma questão ambiental, mas também social e econômica, buscando oferecer uma qualidade de vida melhor aos habitantes das cidades, reduzindo desigualdades e promovendo um ambiente urbano mais inclusivo e saudável.

2.2 Desafios de infraestrutura e transporte em Manaus

Manaus enfrenta desafios significativos na infraestrutura de transporte devido à sua hidrografia e relevo irregular, que dificulta a construção de vias e amplia os custos e complexidade de projetos de mobilidade urbana. A cidade possui cerca de 150 igarapés na área urbana, o que exige pontes e estruturas elevadas para conectar bairros e permitir o fluxo contínuo de veículos e pedestres. Esses cursos d'água, combinados ao relevo nem sempre regular, dificultam a implementação de sistemas de transporte eficientes e acessíveis, aumentando a vulnerabilidade a alagamentos e limitando a expansão das vias. Além disso, os igarapés sofrem com a poluição e o acúmulo de sedimentos e detritos (assoreamento), o que demanda ações de saneamento integradas a qualquer planejamento de transporte. Em conjunto, esses fatores tornam a mobilidade urbana em Manaus um desafio complexo, que requer soluções inovadoras e sustentáveis, como a proposta de um metrô suspenso, capaz de adaptar-se à geografia local, preservando os igarapés e melhorando o deslocamento diário da população.

2.3 Sistemas de Transporte Suspenso

Monotrilhos elevados são sistemas de transporte suspenso que oferecem soluções de mobilidade prática e inovadora para áreas urbanas com topografias e demandas complexas. Implantado em 1901, o Schwebebahn de Wuppertal (Figura 3 à esquerda) se destaca por operar sobre o Rio Wupper, numa extensão de cerca de 13 km, sendo um dos sistemas mais antigos e bem-sucedidos do tipo no mundo. Ele demonstra como um transporte elevado pode se integrar ao ambiente urbano, vencendo obstáculos geográficos sem comprometer o espaço em terra. Cada trem é composto por dois vagões articulados, mede 24 metros de comprimento e pode transportar até 130 pessoas, sendo 65 por vagão. O metrô suspenso percorre um trajeto de 13,3 km a uma velocidade média de 60 km/h e uma altura que varia de 8 a 12 metros. O trem suspenso de Wuppertal se tornou uma atração turística e inspirou outros projetos, como os monotrilhos de Tóquio, São Paulo e do Cairo (Figura 3 à direita), que está em construção e terá 97 km de extensão.

Figura 3. Monotrilhos suspensos em Wuppertal e no Cairo.



Fonte: Internet.

As cidades de Tóquio e São Paulo (Figura 4) adotaram sistemas de monotrilho suspenso para aliviar o trânsito e evitar intervenções no espaço urbano. Um projeto semelhante em Manaus permite explorar uma integração harmônica entre transporte moderno e as características geográficas locais, como os numerosos igarapés, sem sobrecarregar as ruas. O modelo de Wuppertal destaca-se como um exemplo viável, sustentável e histórico que oferece um meio rápido e acessível, servindo como referência de transporte sustentável.

Figura 4. Monotrilhos suspensos em Tóquio e São Paulo.



Fonte: Internet.

2.4 Histórico e evolução do transporte suspenso

O transporte suspenso evoluiu como uma alternativa eficiente para atender demandas urbanas, especialmente em cidades com restrições de espaço e desafios geográficos. Um marco histórico importante é o Schwebbahn de Wuppertal, na Alemanha, em funcionamento desde sua inauguração em 1901. Este sistema demonstrou como um transporte elevado pode ser integrado ao ambiente urbano, oferecendo um meio de deslocamento seguro e eficiente sem ocupar espaço ou áreas terrestres congestionadas. Desde então, outros sistemas de monotrilho suspenso foram implementados em diversas partes do mundo, como Tóquio, que adotou o monotrilho para conectar regiões periféricas ao centro urbano, e Xangai, que utiliza tecnologias avançadas para viabilizar um transporte público mais rápido e eficiente. No Egito, o monotrilho do Cairo representa um dos projetos mais recentes e ambiciosos desse tipo, planejado para reduzir o trânsito e melhorar a acessibilidade em uma cidade que enfrenta sérios desafios de mobilidade. O sistema, ainda em construção, é um reflexo da evolução tecnológica dos monotrilhos modernos, com foco em sustentabilidade e eficiência. Essa trajetória ilustra a relevância dos sistemas suspensos, que continuam a se adaptar e expandir, desempenhando um papel fundamental em cidades que buscam soluções inovadoras para os crescentes desafios de mobilidade urbana.

2.5 Estudo de caso: O metrô suspenso de Wuppertal

O metrô suspenso de Wuppertal, conhecido como “Schwebbahn”, que em alemão significa “ferrovia suspensa”, é um modelo de transporte inovador. Consiste de um sistema de monotrilho suspenso com estrutura elevada, que acompanha o curso do rio Wupper ao longo de aproximadamente 13,3 km, conectando diferentes áreas da cidade, e permitindo um transporte eficiente e direto. Desenvolvido durante a Revolução Industrial, o Schwebbahn visava superar os desafios de mobilidade urbana em uma cidade com topografia complexa e com limitados espaços disponíveis em solo. Desde sua inauguração, ele se tornou uma solução prática e sustentável para o tráfego urbano, inspirando outros projetos em cidades com desafios similares. Com mais de um século de operação, o Schwebbahn (Figura 5) passou por diversas modernizações, incluindo a troca de trilhos e atualizações nas cabines para manter a segurança e o conforto dos passageiros. Ele transporta, em média, 25 milhões de pessoas por ano e é reconhecido tanto como um patrimônio histórico quanto como um símbolo de eficiência no transporte público alemão. O sistema é também um exemplo de como uma estrutura de transporte elevada pode ser integrada ao ambiente urbano, permitindo a preservação de espaços verdes e áreas de convivência no nível do solo. Além de Wuppertal, cidades como Tóquio e Chiba, no Japão, também implementaram sistemas de transporte elevados inspirados em soluções semelhantes, reforçando a relevância dos monotrilhos suspensos como alternativa para áreas urbanas densamente povoadas.

Figura 5. Imagens do monotrilho suspenso de Wuppertal.



Fonte: Internet.

2.6 Tecnologias de Automação e Protótipos em Transporte

As tecnologias de automação têm desempenhado um importante papel no avanço dos sistemas de transporte, tornando-os mais eficientes, seguros e adaptados às demandas urbanas contemporâneas. A automação permite operações com menos intervenção humana, maior precisão e eficiência energética, além de possibilitar soluções mais acessíveis e sustentáveis para grandes centros urbanos.

Com o uso de sensores, inteligência artificial e controle remoto, sistemas de transporte são hoje capazes de monitorar e ajustar suas operações em tempo real, adaptando-se a condições variáveis de tráfego e clima. No desenvolvimento de protótipos de veículos autônomos para transporte público, plataformas como Arduino e ESP32 se destacam pelo baixo custo e pela flexibilidade na implementação de sistemas de controle e monitoramento, viabilizando a análise de variadas soluções experimentais e educacionais.

O uso do ESP32, por exemplo, permite o desenvolvimento de protótipos de veículos de transporte em escala reduzida com capacidade de operação autônoma ou semiautônoma, através de conexões Wi-Fi e Bluetooth. Isso facilita a aplicação de conceitos de automação em projetos de pequeno porte, como protótipos de trens, simulando a lógica de sistemas reais. Estudos e experimentos com esses protótipos têm sido realizados em várias instituições de ensino e centros de pesquisa, gerando percepções para a integração de tecnologias de automação em sistemas de transporte. Esses experimentos fornecem base para o desenvolvimento de soluções aplicáveis em escala real, contribuindo para a melhoria da mobilidade urbana.

2.7 Principais avanços na automação de protótipos

Nos últimos anos, os avanços na automação de protótipos em transporte têm permitido o desenvolvimento de modelos cada vez mais autônomos e precisos, o que facilita o teste de soluções inovadoras em escala reduzida. Com o uso de microcontroladores, como o ESP32 e o Arduino, é possível implementar sensores para monitoramento e controle de velocidade, direção, e reações a eventos em protótipos. A integração de módulos de comunicação, como Bluetooth e Wi-Fi, também amplia a capacidade de controle remoto e de troca de dados em tempo real, possibilitando a análise de desempenho e a execução de ajustes imediatos. A aplicação de inteligência artificial em protótipos é outra tendência crescente, proporcionando processos de aprendizado e adaptação ao ambiente, o que simula o funcionamento de sistemas reais em condições controladas, impulsionando a pesquisa e o desenvolvimento de novas soluções para o transporte urbano.

2.8 Uso de microcontroladores e comunicação wireless

O uso de microcontroladores, como o ESP32, em conjunto com comunicação wireless, tem impulsionado o desenvolvimento de protótipos, tornando-os práticos e funcionais. Os microcontroladores possibilitam a execução de tarefas complexas de controle e monitoramento com baixo consumo de energia e custo reduzido. A comunicação wireless (sem fio) permite a conexão em tempo real entre o protótipo e dispositivos externos, como celulares e computadores, facilitando o controle remoto, o acompanhamento de dados e a reconfiguração de parâmetros sem necessidade de cabos. Esta tecnologia é amplamente empregada em sistemas experimentais e modelos de automação, oferecendo uma alternativa viável para testar funcionalidades e comportamento em ambientes de teste controlados.

2.9 Trabalhos relacionados

A pesquisa sobre monotrilhos suspensos no Brasil, especificamente no âmbito acadêmico, revela uma carência de estudos aprofundados, conforme se observa nas fontes disponíveis. A maior parte da literatura existente foca em casos internacionais ou em sistemas de transporte mais tradicionais.

O trabalho analisa a mobilidade urbana, tecnologias de automação, aspectos econômicos e ambientais, incluindo um protótipo. Porém, o estudo é um Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) e não um artigo acadêmico revisado. O TCC menciona casos de monotrilhos em Tóquio, São Paulo e Cairo, mas não detalha pesquisas acadêmicas. O estudo justifica a proposta devido aos desafios de infraestrutura e transporte em Manaus. Embora a monografia cite várias referências bibliográficas, poucas são artigos acadêmicos. A maioria das fontes são notícias, sites de empresas, e documentos de órgãos governamentais. Isso demonstra que a literatura acadêmica sobre monotrilhos suspensos no Brasil é escassa.

A busca por artigos acadêmicos em bases de dados acadêmicas e periódicos de engenharia e transporte revelou poucos estudos específicos sobre monotrilhos suspensos no Brasil. É possível encontrar trabalhos que mencionam o tema, mas raramente como foco principal, sendo mais comum em contextos de estudos de caso ou análises comparativas. A falta de trabalhos acadêmicos específicos sobre o assunto sugere uma lacuna de pesquisa importante. Incentivar estudos sobre o tema poderia contribuir para o desenvolvimento de projetos mais eficientes e adaptados à realidade brasileira. É recomendável estimular pesquisas mais aprofundadas sobre o tema, com foco no contexto brasileiro e suas particularidades.

A respeito de trabalhos pesquisados relacionados com o tema, temos:

Transporte Público e Mobilidade Urbana: Embora não diretamente sobre monotrilhos suspensos, existem diversos estudos sobre planejamento de transporte público e mobilidade urbana no Brasil, como por exemplo:

- Vasconcellos, Eduardo Alcântara. (2016). **Transporte urbano, espaço e equidade: análise das políticas públicas**. Este livro aborda a complexidade do transporte urbano e a necessidade de políticas públicas que promovam a equidade e a sustentabilidade.
- Braga, Ricardo de Souza. (2019). **Mobilidade urbana: desafios e perspectivas**. Brasília: IPEA. Este estudo analisa os desafios da mobilidade urbana nas grandes cidades brasileiras.

Transporte sobre Magnetismo (Maglev): Pesquisas sobre levitação magnética são mais comuns, com foco em trens de alta velocidade e sistemas de transporte que usam magnetismo.

- Oliveira, Marcos. (2012). **Levitação Magnética em Transportes: Um estudo sobre o sistema Maglev**. Revista Brasileira de Engenharia, Vol 15, n 2, p. 120-135. Esse estudo explora os princípios e tecnologias do sistema maglev.
- Silva, C. (2017). **Trens Maglev: Estado da Arte e Perspectivas para o Brasil**. Anais do Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Belo Horizonte. Este artigo apresenta um panorama sobre o desenvolvimento de trens maglev e suas perspectivas no Brasil.

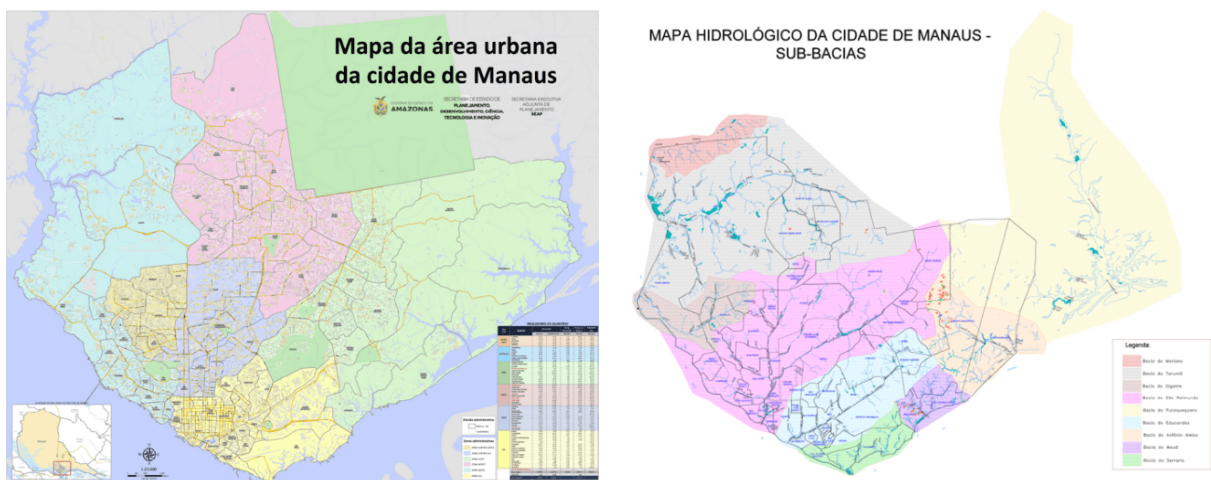
3 Características Urbanísticas e Desafios Geográficos de Manaus

Manaus enfrenta desafios urbanos e geográficos únicos que influenciam diretamente o desenvolvimento de soluções de mobilidade. A cidade está inserida em uma região com relevo irregular e uma grande rede de igarapés, o que exige soluções que preservem as características naturais e promovam o uso racional dos espaços. Com área territorial de 11.402 km² (IBGE, 2022) e 2.063.689 habitantes (IBGE, 2022), a capital amazonense lida com uma infraestrutura de transporte sobrecarregada e limitações de expansão viária devido à presença de cursos de água, áreas de preservação e características de relevo. Essas condições reforçam a necessidade de um sistema de transporte adaptado às particularidades locais, que possa proporcionar mobilidade sem impactar o espaço urbano. Projetos de transporte elevado ou suspenso, tais como o modelo de Wuppertal, surgem como alternativas viáveis, pois aproveitam o espaço aéreo sem afetar o meio ambiente. A implementação de tecnologias sustentáveis, aliadas a uma infraestrutura eficiente, poderia oferecer soluções de mobilidade que respeitem as características urbanas de Manaus e promovam uma melhor qualidade de vida para seus moradores.

3.1 Características da região e impactos na implantação

A cidade de Manaus, situada em uma região de características geográficas peculiares, apresenta uma densidade demográfica de 181,01 habitantes por km², de acordo com dados do IBGE (2022). A distribuição populacional e a densidade da região urbana trazem desafios à expansão de infraestrutura, especialmente no que diz respeito à mobilidade e ao transporte coletivo. A cidade é composta por uma rede complexa de igarapés e áreas de relevo irregular (Figura 6), que limitam a expansão horizontal das vias e, conseqüentemente, a criação de novos corredores de transporte público. Além disso, esses aspectos geográficos e a alta densidade em áreas urbanizadas impactam diretamente os custos e a viabilidade de implementação de sistemas de transporte suspenso, exigindo soluções adaptadas à preservação ambiental e ao uso eficiente dos espaços disponíveis.

Figura 6. Mapa urbano e mapa hidrológico de Manaus.



Fontes: SEDECTI-AM, 2019 e IPAAM, 2022.

3.2 Análise de Viabilidade do Metrô Suspenso em Manaus

A análise de viabilidade de um sistema de metrô suspenso em Manaus envolve a consideração de fatores técnicos, econômicos, sociais e ambientais específicos para a cidade. Primeiramente, o contexto geográfico local, marcado pela presença de mais de 150 igarapés urbanos e áreas de relevo irregular, influencia diretamente a adequação do projeto. Um sistema suspenso, como o modelo de Wuppertal, poderia ser vantajoso, pois evitaria a ocupação do solo, minimizando interferências na hidrografia e reduzindo o impacto ambiental sobre as áreas de preservação. No entanto, o investimento inicial seria significativo, especialmente devido à necessidade de tecnologias e materiais adaptados ao clima e às condições locais, que incluem altas temperaturas e umidade, exigindo um planejamento cuidadoso para assegurar a durabilidade e segurança da infraestrutura.

Além disso, é necessário avaliar o impacto econômico, tanto no custo de implantação quanto na manutenção do sistema, e a expectativa de retorno com base na demanda por transporte público em Manaus. A implantação de um metrô suspenso poderia descongestionar o tráfego urbano, melhorando a qualidade de vida dos moradores e reduzindo as emissões de gases poluentes, alinhando-se com metas de sustentabilidade e de preservação ambiental. Em termos sociais, a construção de um sistema dessa natureza deve considerar a aceitação da população e a adequação ao perfil socioeconômico local, incluindo tarifas acessíveis para que a população em geral possa usufruir do serviço. Por fim, estudos de viabilidade precisam examinar se esse modelo de transporte pode ser integrado com o sistema viário existente, possibilitando uma mobilidade urbana mais eficiente e adaptada às necessidades e características geográficas únicas de Manaus.

3.3 Aspectos Econômicos e Ambientais

Alguns aspectos econômicos e ambientais devem ser considerados para o planejamento de um transporte público suspenso. Para 2024, a Prefeitura de Manaus aprovou um orçamento de R\$ 9 bilhões, dos quais 18,5% deveriam ser alocados para a área de urbanismo, resultando em aproximadamente R\$ 1,681 bilhão para investimentos em infraestrutura urbana e transporte. Esse montante seria essencial para a implementação de projetos para a melhoria do transporte público e de qualidade de vida dos cidadãos, especialmente em um contexto onde a cidade enfrenta desafios significativos devido ao crescimento populacional e à mobilidade urbana ineficiente. O metrô suspenso em Manaus poderia melhorar a eficiência do transporte, reduzindo emissões de poluentes e respeitando a hidrologia local. Além de beneficiar o sistema de transporte, um investimento em projetos sustentáveis poderia gerar empregos e promover inclusão social, fortalecendo a economia local. Assim, a viabilidade econômica e proteção ambiental deve ser uma prioridade nas discussões sobre soluções de mobilidade urbana na cidade.

Um estudo de 2018 revelou que as viagens solicitadas pelo aplicativo 99 em Manaus demoram, em média, 67% mais nos horários de pico em comparação com períodos de tráfego livre. Este dado faz parte do Índice 99 de Tempo de Viagem (ITV 99), que analisa o congestionamento em 10 capitais brasileiras, posicionando Manaus como a 6ª mais afetada. A pesquisa foi realizada entre outubro e dezembro de 2017, focando em corridas de táxis e do 99Pop. Recife lidera o ranking com uma média de 77% de aumento no tempo de viagem durante os horários de pico. O ITV 99 busca fornecer dados que ajudem a melhorar a mobilidade urbana, permitindo que as autoridades implementem estratégias para minimizar congestionamentos nas grandes cidades.

3.4 Comparativo de custo e viabilidade econômica

É essencial analisar os custos e as condições que tornam o projeto viável. A Prefeitura de Manaus, em parceria com empresas especializadas em transporte e engenharia, assumiria a coordenação e execução do projeto, incluindo a aquisição dos vagões e a construção da infraestrutura necessária para o trajeto. O monotrilho suspenso de Wuppertal possui vagões que medem 24 metros de comprimento e podem transportar até 130 pessoas, com capacidade um pouco superior a um ônibus articulado, que pode transportar até 100 passageiros.

A negociação para a compra de supostos dez vagões com tecnologia semelhante envolveria um custo aproximado de R\$ 15 milhões por unidade, somando cerca de R\$ 150 milhões. A construção da estrutura de sustentação, para um trajeto em torno de 50 km, representaria uma parte significativa do investimento, com custo estimado de R\$ 10 milhões por quilômetro, totalizando cerca de R\$ 500 milhões. Outros elementos essenciais, como a construção de estações de embarque e desembarque, planejamento de rotas, ajustes, campanhas de conscientização e monitoramento após a implementação, representam cerca de 20% do total, um custo adicional de R\$ 130 milhões. O custo total estimado para a execução do projeto, com dez vagões e 50 km de extensão, é de R\$ 780 milhões, considerando a infraestrutura completa.

A viabilidade econômica deste projeto está atrelada à obtenção de recursos públicos e à busca por parcerias estratégicas, visto que se espera um retorno indireto na forma de melhoria da mobilidade urbana, potencial redução de congestionamentos e menor impacto ambiental. Avaliar essa viabilidade envolve também considerar possíveis economias a longo prazo, devido à maior eficiência do transporte em relação ao sistema viário convencional, e os benefícios relativos a melhoria da qualidade de vida no município.

Para fins comparativos, pode-se considerar que a construção do sistema suspenso de Wuppertal, conhecido como Schwebbahn, teve um custo inicial de cerca de 16 milhões de marcos de ouro, o equivalente a aproximadamente 4,2 milhões de dólares da época (ou cerca de 110 milhões de dólares em valores corrigidos). Esse sistema foi projetado para contornar os desafios geográficos do local, incluindo o terreno montanhoso e a presença do rio Wupper. A escolha por um sistema suspenso evitou a necessidade de escavações subterrâneas, que seriam caras e complexas devido ao solo rochoso e ao nível elevado de lençóis freáticos na região. Além do custo inicial de construção, a Schwebbahn passou por várias renovações e modernizações de estrutura e estações, como a realizada em 1997.

3.5 Potencial de redução de emissões de poluentes

A implementação de um metrô suspenso em Manaus oferece um potencial significativo para a redução de emissões de poluentes na cidade. Em uma área marcada por congestionamentos e um sistema de transporte urbano dependente de veículos movidos a combustíveis fósseis, a transição para um sistema de transporte elevado movido a eletricidade poderia diminuir drasticamente a emissão de dióxido de carbono (CO₂) e outros gases poluentes. O Schwebbahn de Wuppertal, é um exemplo de como esse tipo de transporte pode operar com baixo impacto ambiental. Ao substituir parte dos transportes rodoviários por sistemas eficientes de alta capacidade e baixa emissão, como um metrô suspenso, espera-se que Manaus consiga reduzir o número de veículos nas ruas, o que, por sua vez, diminuiria a poluição e melhoraria a qualidade do ar. Além disso, essa alternativa poderia contribuir para mitigar os impactos do trânsito nos horários de pico, reduzindo o tempo de deslocamento e o consumo de combustível na cidade.

3.6 Adaptações Inspiradas no Sistema de Wuppertal

A adaptação de um sistema de metrô suspenso para Manaus, inspirada no modelo do Schwebbahn de Wuppertal, requer ajustes técnicos e estruturais para atender às particularidades da região amazônica. O Schwebbahn, construído sobre o Rio Wupper, destaca-se pela estrutura de sustentação elevada e pelo traçado que preserva o espaço urbano ao redor, características que podem ser vantajosas para uma cidade como Manaus. A adaptação envolveria o planejamento de um sistema de trilhos suspensos para atravessar áreas de igarapés e superar o relevo irregular da cidade, reduzindo o impacto no solo e na vegetação local. Além disso, as estações e os pontos de manutenção seriam projetados para o clima tropical úmido, com materiais resistentes à alta umidade e ao calor. Outra adaptação importante seria a integração de tecnologias de monitoramento e automação para garantir a segurança e a eficiência do sistema, especialmente considerando a possibilidade de altas demandas durante horários de pico. A experiência de Wuppertal evidencia a viabilidade de uma estrutura de transporte aéreo em áreas urbanas e sugere que o uso inteligente do espaço aéreo pode ser uma solução para cidades com desafios de mobilidade e limitações de expansão.

3.7 Similaridades e adaptações ao contexto manauara

As semelhanças entre o sistema de Wuppertal e uma proposta para Manaus incluem o uso de trilhos elevados para preservar o espaço urbano e evitar interferências com o trânsito no solo. Ambos os locais enfrentam desafios de espaço e infraestrutura: enquanto Wuppertal se adapta ao traçado urbano e ao Rio Wupper, Manaus tem áreas de igarapés e relevo variado que também requerem uma solução aérea para o transporte. Contudo, a adaptação para o contexto manauara exigiria modificações adicionais de estrutura e material devido ao clima tropical e à umidade elevada, que podem impactar a durabilidade da construção. Nesse sentido, o sistema em Manaus poderia incorporar tecnologias de controle climático nas estações e vagões para conforto dos passageiros, além de contar com sistemas de monitoramento adaptados à realidade da cidade. Essas adaptações são importantes para garantir a eficiência, a durabilidade e a adequação do sistema ao contexto amazônico, onde as condições ambientais e as demandas urbanas apresentam características singulares.

3.8 Desenvolvimento do Protótipo

O desenvolvimento do protótipo de metrô suspenso inspirado no sistema de Wuppertal será uma representação simplificada, projetada para ilustrar a operação de um trem elevado em um ambiente controlado. O modelo consistirá de um conjunto funcional em miniatura, movido por dois motores de baixa potência, controlados remotamente através de um microcontrolador ESP32, que permite a comunicação sem fio. A estrutura será composta por trilhos básicos e algumas pequenas unidades de suporte. Esse protótipo funcionará principalmente como uma demonstração visual e prática do conceito de mobilidade suspensa, destacando aspectos de controle e movimentação. Com ele, será possível avaliar a viabilidade de um sistema elevado no contexto de Manaus, ainda que em escala reduzida e com recursos simplificados, priorizando a funcionalidade básica e o controle remoto como principais atributos.

4 Concepção e Projeto do Mini Metrô

O projeto do mini metrô suspenso visa construir uma maquete que simule um sistema de transporte elevado, inspirada no Schwebbahn de Wuppertal. A concepção desse protótipo envolve o desenvolvimento de vagões em miniatura que se deslocarão sobre trilhos suspensos, representando o conceito de um metrô suspenso adaptado para o contexto de Manaus. O controle do modelo será feito por um microcontrolador ESP32, permitindo o acionamento remoto do veículo por meio de dois motores simples. Embora o protótipo não inclua elementos complexos, como resistência a intempéries ou simulação de estações de parada, ele busca reproduzir a lógica de funcionamento e o controle básico do sistema. Essa concepção permite visualizar a operação em um ambiente simplificado, destacando a importância de tecnologias de automação e controle para sistemas de transporte elevados.

4.1 Especificações técnicas do protótipo

Para o desenvolvimento do protótipo do metrô suspenso, foram escolhidos componentes que simulam funcionalidades básicas de um sistema de transporte elevado. A base do projeto será o microcontrolador ESP32, que permite controle remoto por meio de comunicação wireless, possibilitando o envio de comandos de movimentação. O ESP32 é conhecido pela sua capacidade de processamento, baixo consumo de energia e facilidade de integração com módulos de comunicação, como o Bluetooth. O protótipo incluirá pequenos motores que possibilitarão a movimentação do modelo de forma suave e contínua ao longo de uma estrutura elevada, simulando o funcionamento de um metrô suspenso. No entanto, este modelo é de caráter experimental e, portanto, não contará com adaptações para resistência a umidade nem incluirá estruturas de estações. Essas especificações focam na funcionalidade básica do sistema, permitindo uma demonstração visual do conceito de transporte suspenso controlado remotamente.

4.2 Escolha dos materiais e funcionalidades principais

Para a construção do protótipo do metrô suspenso, foi realizada uma seleção criteriosa dos materiais e funcionalidades, focando na simplicidade, acessibilidade e adequação ao objetivo experimental. A escolha principal foi o uso do microcontrolador ESP32, devido às suas características de baixo consumo de energia e suporte integrado para comunicação wireless. Esse módulo permite o controle remoto do protótipo, emulando o sistema de operação de um metrô suspenso. Para a movimentação, foram selecionados motores elétricos de pequeno porte, que serão conectados à estrutura e acionados pelo ESP32, simulando o deslocamento do veículo ao longo de um trilho.

A estrutura do protótipo será construída com materiais leves e resistentes, visando estabilidade e facilidade de montagem. O modelo inclui apenas as partes essenciais para ilustrar o funcionamento básico de um sistema de transporte elevado, sem componentes adicionais para resistência climática, dada sua aplicação em ambiente controlado. A combinação desses materiais e funcionalidades permitirá uma visualização prática e funcional do conceito de metrô suspenso, mantendo o foco em aspectos de controle e movimentação para representar, de forma simplificada, o funcionamento de um sistema real.

4.3 Implementação com ESP32 e Controle Bluetooth

Para a implementação do protótipo do metrô suspenso, foi utilizado o microcontrolador ESP32, que inclui conectividade Bluetooth e Wi-Fi. A escolha do ESP32 deve-se à sua versatilidade e baixo consumo de energia, características que facilitam a integração de comandos sem fio e o controle remoto do protótipo. Com o Bluetooth, o sistema permitirá que os usuários enviem comandos ao microcontrolador, gerenciando a ativação e o controle dos motores para simular o movimento do protótipo ao longo de um trilho elevado.

No processo de implementação, a programação do ESP32 envolve a configuração da interface Bluetooth para receber dados do dispositivo controlador, como um smartphone ou tablet, que funciona como um “controle” para o protótipo. A lógica programada no microcontrolador responde aos comandos recebidos, acionando os motores conectados, o que permite o deslocamento do protótipo conforme os comandos do usuário. Além disso, o ESP32 possui uma arquitetura que permite o processamento rápido, garantindo que os comandos sejam interpretados em tempo real, o que contribui para uma operação mais fluida e responsiva.

A implementação com o microcontrolador ESP32 (Figura 7) e o controle Bluetooth visa demonstrar o conceito de transporte autônomo, ilustrando como tecnologias de automação e controle podem ser aplicadas no desenvolvimento de sistemas de mobilidade urbana.

Figura 7. ESP32-WROOM32, módulo ponte H L298N e motor 3-6V com caixa de redução.



Fonte: Internet.

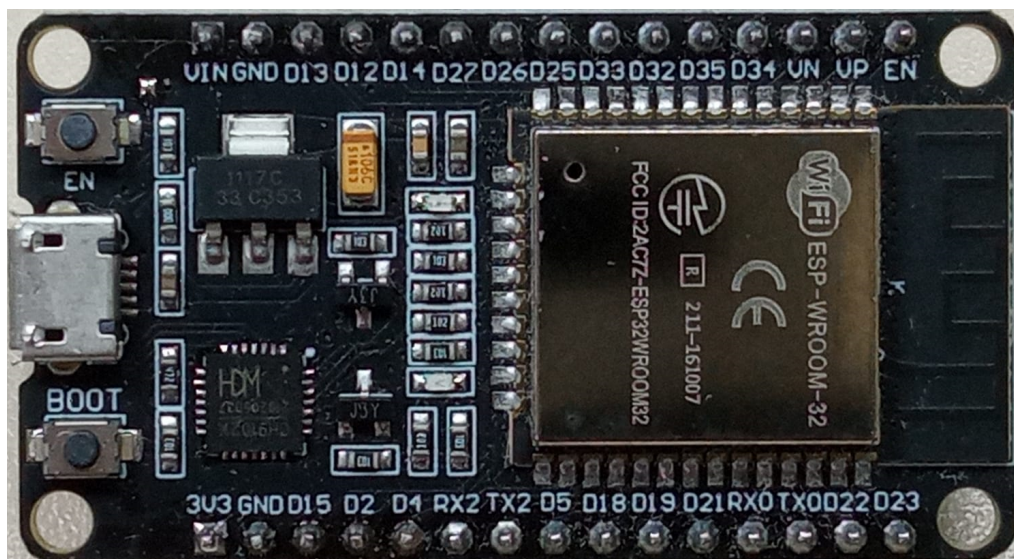
O circuito será composto pelo microcontrolador ESP32, que será responsável pelo controle do sistema, e pelo módulo ponte H L298N, que controlará os motores do protótipo (Figura 7) e regulará a tensão de alimentação do ESP32 de 6V para 5V. O ESP32 enviará comandos ao L298N via GPIOs, ou General Purpose Input/Output (Entradas/Saídas de Uso Geral), que são pinos presentes no microcontrolador que podem ser configurados tanto para entrada quanto para saída de sinais digitais, permitindo o controle da direção e velocidade dos motores DC. O módulo L298N é uma ponte H que permite controlar a rotação dos motores em ambas as direções, fornecendo a capacidade de mover o protótipo para frente ou para trás, além de controlar a velocidade por modulação de largura de pulso (PWM). O L298N possui transistores internos que gerenciam a corrente necessária para o acionamento dos motores. Para alimentar o conjunto, será utilizado um conjunto de 4 pilhas de 1,5V, totalizando 6V, o que fornecerá energia suficiente tanto para o ESP32 quanto para o módulo L298N e os motores. Essa configuração simples e eficiente permite que o sistema funcione de maneira autônoma e controlável.

4.4. Estrutura do circuito e componentes

O circuito será baseado no microcontrolador ESP32, que será responsável pelo controle e comunicação do protótipo, utilizando conectividade Bluetooth e Wi-Fi para o controle remoto. O ESP32 é um microcontrolador de alto desempenho desenvolvido pela Espressif Systems, amplamente utilizado em projetos de IoT devido à sua integração de Wi-Fi e Bluetooth. Ele possui um processador dual-core de 32 bits baseado no Xtensa LX6, com clock que pode chegar a 240 MHz, além de memória RAM de 520 Kbytes, memória flash de 4 MB, e capacidade para executar tarefas em tempo real. O ESP32 é altamente versátil, com uma variedade de pinos GPIO (General Purpose Input/Output) configuráveis para entrada ou saída, permitindo interações com sensores, atuadores e displays.

O número de pinos do ESP32 pode variar de acordo com o modelo, podendo ter 30 ou 38 pinos. A principal diferença entre o ESP32 de 30 pinos e o de 38 pinos está no número de pinos de entrada e saída disponíveis, o que pode influenciar a aplicação em projetos. O modelo de 38 pinos possui oito pinos adicionais, que podem incluir GPIOs extras ou pinos de alimentação, dependendo do fabricante. Esses pinos extras são úteis em projetos que exigem maior conectividade ou mais dispositivos periféricos. Por outro lado, o ESP32 de 30 pinos é mais compacto e pode ser recomendado para projetos onde o espaço físico é limitado. Apesar dessa diferença, ambos os modelos compartilham as mesmas capacidades de processamento, conectividade Wi-Fi e Bluetooth, e são programados de maneira idêntica. A escolha entre os dois modelos depende das necessidades específicas do projeto, como espaço disponível e quantidade de conexões requeridas. O ESP32 utilizado no protótipo será o modelo de 30 pinos (Figura 8).

Figura 8. Microcontrolador ESP32 (30 pinos).

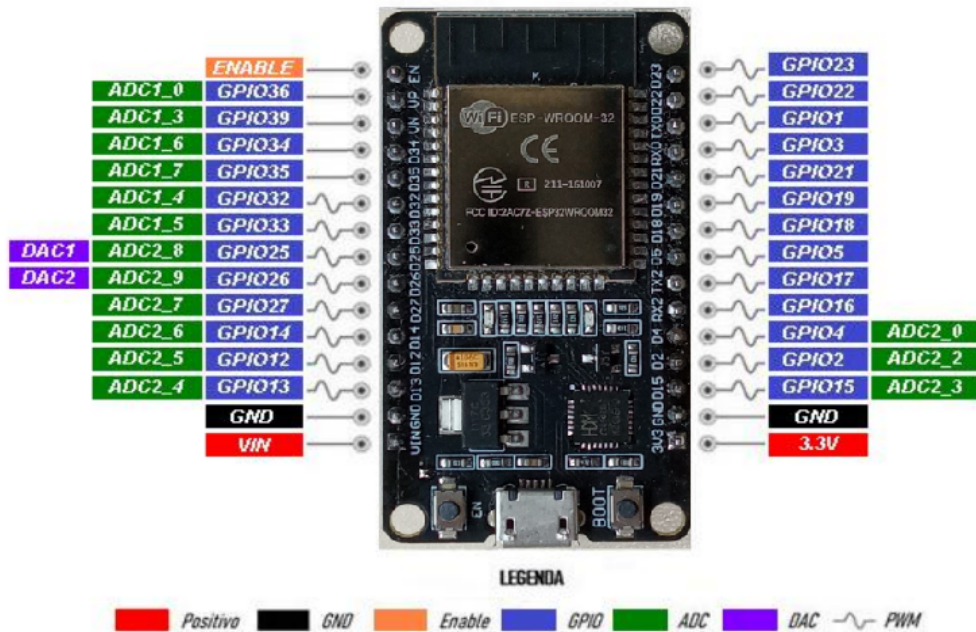


Fonte: Autor.

A alimentação do ESP32 pode ser feita com uma tensão de 5.0V, através do conector USB ou do pino VIN. O ESP32 estará conectado ao módulo ponte H L298N, responsável por regular a tensão de alimentação para 5V e controlar os motores DC que movimentam o protótipo. O L298N receberá os sinais enviados pelo ESP32 via Bluetooth, permitindo o controle do movimento. Além do microcontrolador e do módulo L298N, o circuito inclui pequenos motores DC, uma protoboard de 400 furos e um micro interruptor liga-desliga. A alimentação do conjunto de componentes será feita por uma fonte de 6V, composta de 4 pilhas AA de 1.5V, que alimentará o ESP32, o L298N e os motores DC.

Os pinos do ESP32 são multifuncionais, podendo ser usados para comunicação I2C, SPI, UART, PWM, ADC (conversor analógico-digital) e DAC (conversor digital-analógico). Alguns pinos, como GPIO2 e GPIO0, possuem funções especiais, como inicialização e boot. Possui até 18 canais ADC de 12 bits, permitindo medições analógicas. Certos pinos, como GPIO6 ao GPIO11, são reservados para o controle da memória flash e não devem ser usados em projetos. O ESP32 possui pinos de alimentação, como o VIN (5V) e GND (terra). Pode ser programado via IDE Arduino ou ESP-IDF. Os pinos são mostrados na Figura 9.

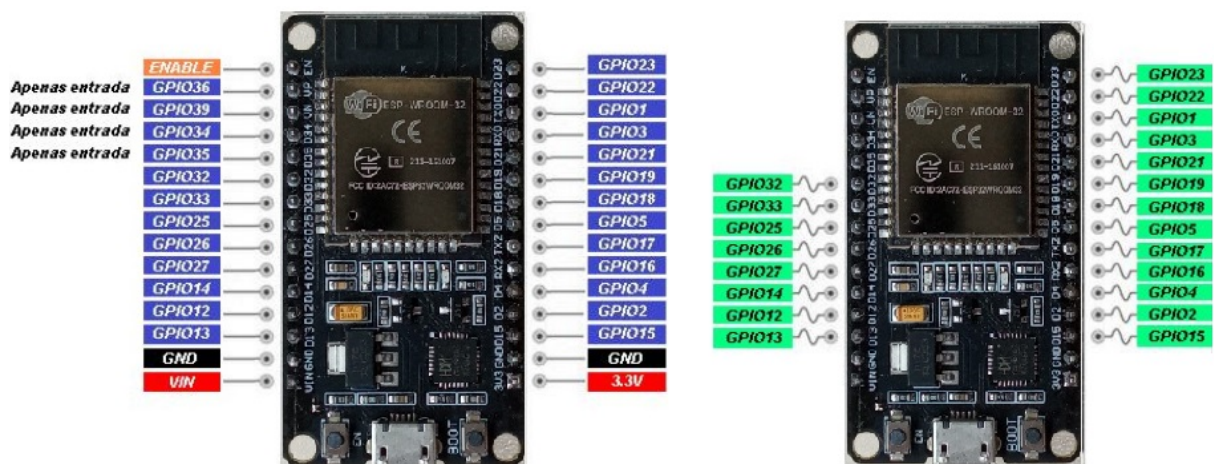
Figura 9. Disposição geral de pinos ESP32.



Fonte: Autor.

O ESP32 possui 25 pinos GPIO: 34, 35, 36 e 39 (somente entrada); 14, 16, 17, 18, 19, 21, 22 e 23 (com pull-up); 13, 25, 26, 27, 32 e 33 (sem pull-up). Possui 21 pinos PWM: 15, 02, 04, 16, 17, 05, 18, 19, 21, 03, 01, 22, 23, 13, 12, 14, 27, 26, 25, 33, 32. Há 15 pinos analógicos (ADC) de 12 bits, que convertem sinais de 0V e 3,3V em valores digitais de 0 a 4095: 02, 04, 15, 13, 12, 14, 27, 26, 25, 33, 32, 35, 34, 39, 36. Tem 2 canais DAC (Conversor digital-analógico), convertendo valores de 0 a 256 para tensões de 0 a 3,3V: 25 e 26. Os pinos são mostrados na Figura 10.

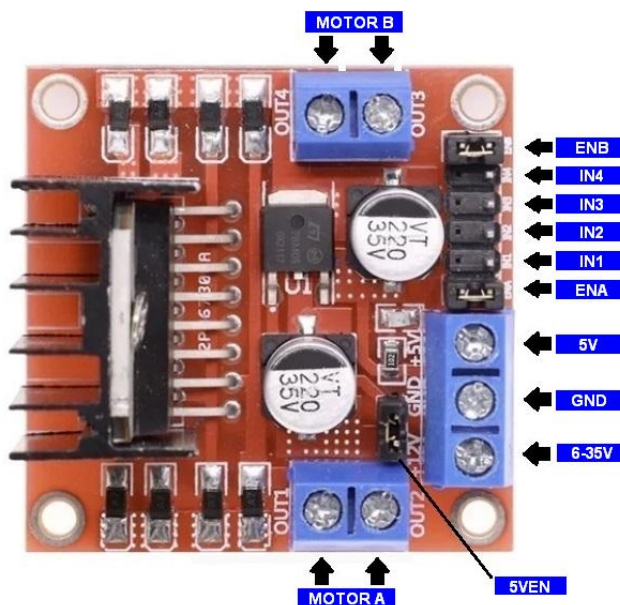
Figura 10. Representação dos pinos GPIO e PWM do ESP32.



Fonte: Autor.

O módulo Ponte H L298N (Figura 11) é muito usado para controlar motores DC, motores de passo e outros dispositivos que requerem controle de direção e velocidade. Ele funciona com uma configuração de transistores que permite inverter a polaridade da tensão aplicada ao motor, controlando assim o sentido de rotação. O L298N possui dois pares de canais, capazes de controlar dois motores DC ou um motor de passo. Possui também entradas de habilitação (ENA e ENB) que permitem a recepção de sinais PWM, permitindo controlar a velocidade dos motores.

Figura 11. Módulo Ponte H.



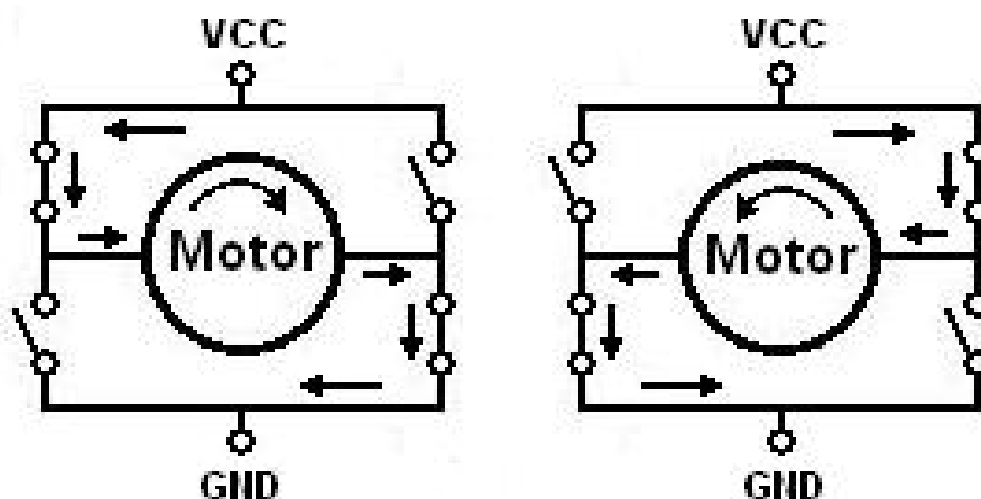
Descrição dos pinos do L298N:

- Motor A e Motor B: Conectam motores DC ou de passo.
- ENA e ENB: Controlam a velocidade dos motores via PWM. Com o jumper, a velocidade é fixa em 5V.
- 5VEN e 5V: Regulam a tensão interna. Se alimentado com 6V a 35V, o pino 5V fornece tensão estável para outros dispositivos.
- IN1, IN2, IN3 e IN4: Controlam a direção dos motores. IN1/IN2 para Motor A e IN3/IN4 para Motor B.
- 6-35V e GND: Alimentam os motores.

Fonte: Autor.

Conforme a Aula 7 do IFSC (2024), a ponte H pode determinar o sentido da corrente, a polaridade da tensão e a magnitude da tensão, em um dado sistema ou componente, através do chaveamento de componentes eletrônicos para determinar o módulo da tensão, em um dado ponto de um circuito. O termo Ponte "H", é derivado da representação gráfica do circuito. A Figura 12 ilustra essa configuração.

Figura 12. Estrutura da Ponte H para controle bidirecional.

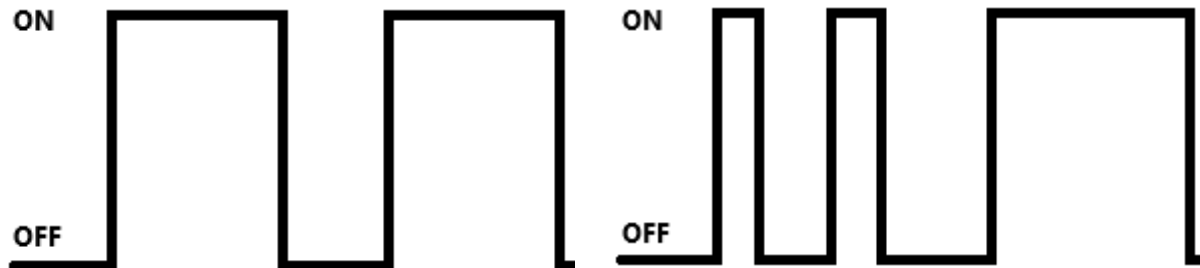


Fonte: Autor.

O uso da Ponte H é comum no controle de motores DC e de passo, permitindo não apenas a inversão do sentido de rotação, mas também o ajuste da velocidade por meio da modulação por largura de pulso (PWM - Pulse Width Modulation).

Conforme a Aula 6 do IFSC (2024), O PWM (Pulse Width Modulation – Modulação por Largura de Pulso) é uma técnica para obter resultados analógicos por meios digitais. Essa técnica consiste na geração de uma onda quadrada em uma frequência alta em que pode ser controlada a porcentagem do tempo em que a onda permanece em nível lógico alto. Esse tempo é chamado de Duty Cycle (Ciclo de trabalho) e sua alteração provoca mudança no valor médio da onda, indo desde 0V (0% de Duty Cycle) a 5V (100% de Duty Cycle) no caso do Arduino, ou 3.3V no caso do Esp32. O PWM é ilustrado na Figura 13.

Figura 13. Representação do PWM (Pulse Width Modulation), com variações no tempo.



Fonte: Autor.

Ainda conforme a Aula 6 do IFSC (2024), o sinal PWM possui um ciclo de trabalho que determina com que frequência o sinal muda do nível lógico HIGH para o nível lógico LOW e vice versa. O valor do Duty Cycle usado pelo Arduino e Esp32 é um inteiro de 8 bits, de forma que seu valor vai de 0 (0%) a 255 (100%).

$$\text{Duty cycle} = (100\% * \text{largura do pulso}) / \text{período}$$

A Tabela 1 demonstra a sequência de ativação do Motor A com os pinos IN1 e IN2, podendo ser aplicada aos pinos IN3 e IN4 para o Motor B.

Tabela 1. Sequência de ativação do motor A.

Motor A	IN1	IN2
Horário	HIGH	LOW
Anti-horário	LOW	HIGH
Desligado	LOW	LOW
Freio	HIGH	HIGH

Fonte: Autor.

Em microcontroladores como Arduino e ESP32, o sinal PWM pode variar de 0 a 255 e para ativá-lo basta usar a seguinte instrução em uma das portas PWM:

```
analogWrite(PINO, VALOR_ANALOGICO)
```

Esse método possibilita o controle preciso da velocidade de motores DC.

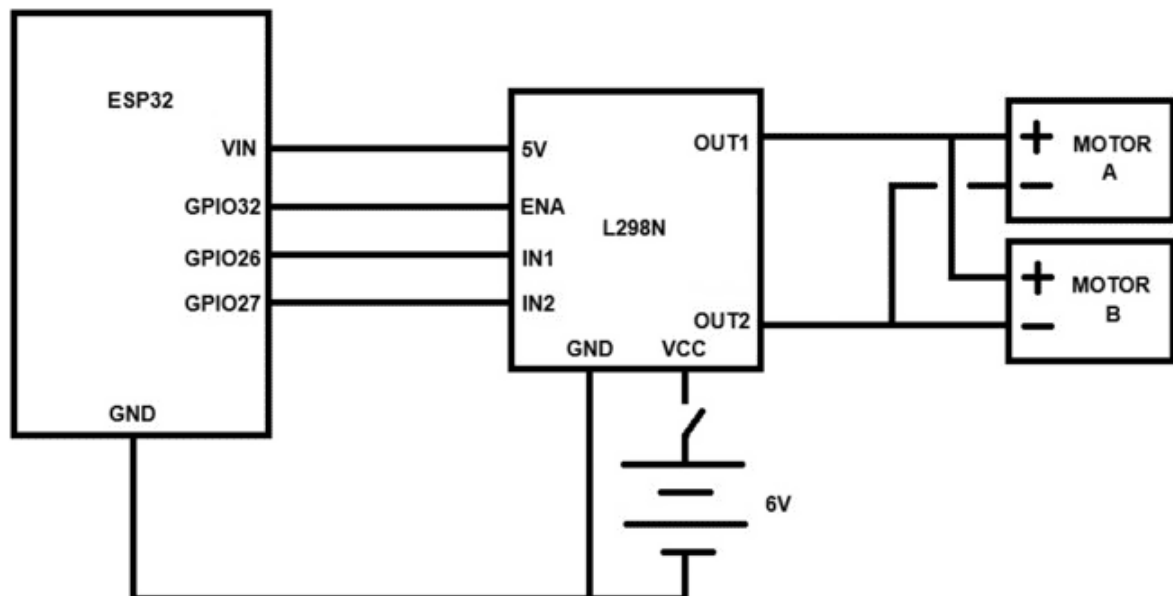
Na maioria das abordagens em robótica faz-se necessária a utilização de motores DC em diversos tipos de movimentação de braços mecânicos, robôs, etc. Os motores DC são cargas indutivas que demandam uma quantidade de corrente superior à que as portas do microcontrolador conseguem fornecer (IFSC, 2024).

O ESP32 opera com sinais lógicos de 3.3V, enquanto o módulo Ponte H L298N é compatível com sinais de 5V. No entanto, o L298N pode funcionar normalmente com sinais de 3.3V, pois sua entrada de controle reconhece níveis lógicos altos a partir de 2.3V. Isso significa que o ESP32 pode se conectar diretamente ao L298N sem a necessidade de conversores de nível lógico. A única ressalva é que o L298N deve ser alimentado com uma fonte externa de 5V a 12V para os motores, enquanto o ESP32 pode ser alimentado separadamente com 3.3V ou 5V. Assim, a integração entre os dois é simples e funcional.

Os componentes terão as seguintes conexões apresentadas na Figura 14:

1. Positivo da fonte 6V ligado no VCC do módulo L298N
2. Negativo da fonte ligado no GND do L298N e no GND do ESP32
3. Pino VIN do ESP32 ligado no borne 5V do L298N
4. Pino GPIO32 do ESP32 ligado ao pino ENA do L298N
5. Pino GPIO26 do ESP32 ligado ao pino IN1 do L298N
6. Pino GPIO27 do ESP32 ligado ao pino IN2 do L298N
7. Fio positivo dos motores ligados ao borne OUT1 do L298N
8. Fio negativo dos motores ligados ao borne OUT2 do L298N

Figura 14. Esquema de conexão dos componentes do circuito.



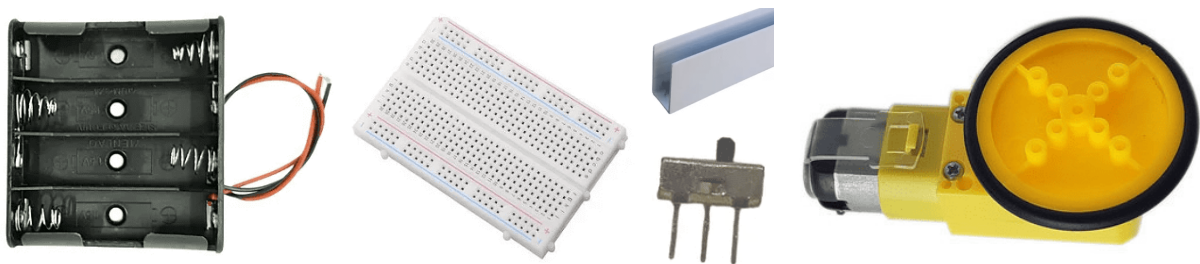
Fonte: Autor.

O esquema de conexões utiliza um ESP32 e um módulo L298N para controlar dois motores DC de forma eficiente. A fonte de alimentação conecta o positivo ao VCC do L298N e o negativo ao GND do L298N, que também é conectado ao GND do ESP32. O pino VIN do ESP32 é conectado ao borne 5V do L298N, permitindo que o regulador interno do módulo alimente o microcontrolador com segurança. Os sinais de controle do ESP32 são enviados pelos pinos GPIO26 e GPIO27, conectados respectivamente aos pinos IN1 e IN2 do L298N. O pino GPIO32 enviará o sinal PWM para o pino ENA do L298N. O L298N direciona os comandos recebidos para os bornes OUT1 e OUT2, ligados ao positivo e ao negativo dos motores, respectivamente. Os dois motores serão ligados em paralelo para garantir que ambos os motores girem na mesma direção e com a mesma velocidade.

O uso de uma fonte de 6V em um projeto com o L298N e o ESP32 traz diversas vantagens. Primeiro, o L298N possui um regulador de tensão integrado que permite fornecer 5V ao ESP32, simplificando o circuito ao dispensar um regulador externo e garantindo que o microcontrolador receba a alimentação adequada. Adicionalmente, a fonte de 6V é compatível com motores DC que operam na faixa de 3-6V, fornecendo energia suficiente para seu funcionamento sem risco de sobrecarga. Usar uma única fonte para o ESP32 e os motores reduz o número de componentes e facilita o cabeamento. O L298N também protege os motores e o ESP32 contra variações de tensão. Essa abordagem centraliza a alimentação, tornando o projeto mais compacto e eficiente.

O protótipo desenvolvido apresenta uma estrutura geral composta por materiais acessíveis e adaptados para simular o funcionamento de um metrô suspenso, mostrados na Figura 15. Os vagões foram confeccionados utilizando representações plásticas adaptadas, garantindo resistência e leveza. Para a sustentação, utilizou-se tubos e conexões de PVC hidráulicos soldáveis de 20 mm, uma escolha prática e robusta para fornecer estabilidade à estrutura. Os trilhos do protótipo foram adaptados a partir de um perfil em “U” de alumínio com 10 mm de espessura, escolhido por sua leveza e resistência à deformação. Esse material também garante a precisão necessária para o deslocamento suave dos vagões ao longo do percurso, simulando adequadamente a funcionalidade de trilhos reais.

Figura 15. Suporte de pilhas, protoboard 400 furos, perfil, interruptor e motor com roda acoplada.



Fonte: Internet.

Os motores utilizados no sistema foram equipados com pequenas rodas revestidas de borracha, que além de proporcionar boa aderência, ajudam a amortecer possíveis vibrações, aproximando-se da realidade de um metrô suspenso. O conjunto proporciona uma visão clara de como um monotrilho suspenso poderia operar, combinando simplicidade de montagem, economia de materiais e fidelidade a aspectos mecânicos básicos. O resultado é uma estrutura funcional e didática, ideal para simulações e estudos.

O protótipo foi desenvolvido com ênfase na simplicidade e na funcionalidade, foram utilizados cabos de 1 mm para realizar as conexões elétricas. A ordenação dos pinos do ESP32 permitiu que as conexões fossem feitas utilizando uma das fileiras de pinos da placa, incluindo os terminais de alimentação (VCC e GND) e os pinos de controle (GPIO 26, 27 e 32). Foi implementado um arranjo que integra uma chave liga/desliga ao circuito. Para fins didáticos e de análise, os componentes foram deixados expostos no protótipo. Essa configuração facilita tanto a observação do funcionamento em tempo real quanto a realização de ajustes ou substituições de componentes durante testes. O circuito eletrônico e a estrutura serão compostos por elementos compactos e funcionais, visando a verificação da aplicação de um sistema de transporte suspenso análogo ao de Wuppertal.

4.5 Funcionamento do controle remoto via Bluetooth

O sistema Bluetooth do microcontrolador ESP32 é uma funcionalidade muito proveitosa e conveniente, permitindo comunicação sem fio eficiente e flexível. O ESP32 é compatível com Bluetooth Clássico (BR/EDR) e Bluetooth Low Energy (BLE), sendo adequado para diferentes aplicações, como transferência de dados rápida ou dispositivos de baixo consumo. No modo Bluetooth Clássico, ele pode se conectar a aparelhos como fones de ouvido, alto-falantes ou computadores, permitindo streaming de áudio ou compartilhamento de arquivos. Já no modo BLE, funciona como um periférico de baixo consumo, transmitindo e recebendo pequenos pacotes de dados, ideal para aplicações IoT, como sensores, controladores e outros dispositivos de automação.

O Bluetooth no ESP32 é configurado e controlado por sua pilha de software integrada, seguindo os padrões da Bluetooth SIG. Desenvolvedores podem usar bibliotecas como Espressif IDF ou Arduino Framework para programar o módulo. O ESP32 pode ser configurado como cliente (que busca conexões) ou servidor (que oferece serviços a outros dispositivos). A comunicação ocorre por perfis predefinidos, como GATT (Generic Attribute Profile) no BLE, que organiza dados em serviços e características, ou SPP (Serial Port Profile) no Bluetooth Clássico, simulando uma porta serial para transmissão contínua de dados. O sistema Bluetooth oferece segurança avançada, incluindo emparelhamento, autenticação e criptografia, protegendo os dados transmitidos. O módulo pode ser controlado por comandos AT (Attention) ou programação em C ou Python, garantindo flexibilidade. Essa funcionalidade é amplamente usada em automação, monitoramento remoto e dispositivos móveis devido à sua confiabilidade e integração com outros sistemas.

Utilizaremos o Bluetooth clássico pelos seguintes motivos:

1. **Facilidade de Implementação:** A comunicação via Bluetooth Clássico com a biblioteca `BluetoothSerial` é simples, simulando uma comunicação serial (UART) entre o dispositivo e o celular ou computador.
2. **Compatibilidade:** A maioria dos aplicativos de controle disponíveis para dispositivos móveis suporta Bluetooth Clássico de maneira nativa.
3. **Taxa de Transferência:** Embora o projeto lide apenas com comandos simples, o Bluetooth Clássico oferece uma maior largura de banda em comparação com o BLE, caso fosse necessário enviar mais dados.

O protótipo foi projetado para Bluetooth Clássico devido à simplicidade e adequação às funções propostas. Para usar Bluetooth Low Energy, seria necessário alterar a implementação para configurar um servidor GATT (Generic Attribute Profile) e definir características específicas para enviar e receber dados. Isso envolveria o uso da biblioteca `BLEDevice.h` e aumentaria a complexidade do programa.

A programação do ESP32 será realizada utilizando a IDE do Arduino, uma plataforma amigável e amplamente utilizada para o desenvolvimento de projetos com microcontroladores. Após a instalação da IDE e a configuração do suporte ao ESP32 (via gerenciador de placas), o código será escrito e compilado na própria interface. O carregamento do programa no ESP32 será feito conectando o dispositivo ao computador por meio de um cabo USB. Após verificar que a porta serial correta está selecionada na IDE, o botão "Upload" será acionado, iniciando o processo de gravação. A IDE compilará o código, transferirá os dados para a memória do ESP32 e confirmará a conclusão do processo.

O download do software IDE do Arduino pode ser realizado no site oficial da plataforma (www.arduino.cc), onde é possível selecionar a versão compatível com o sistema operacional utilizado. Após a instalação, a placa Arduino deve ser conectada ao computador por meio de um cabo USB. Na interface da IDE, mostrada na Figura 16, é necessário configurar a porta de comunicação em Ferramentas > Porta e selecionar o modelo da placa em Ferramentas > Placa. Com a configuração concluída, o programa pode ser transferido para a placa utilizando o botão de upload (ícone de seta). Após o envio bem-sucedido, a placa pode ser desconectada com segurança. Esse processo garante a correta programação do microcontrolador.

Figura 16. A IDE do Arduino pode se comunicar com o ESP32.

```

sketch_jan3a.ino
1 #include <BluetoothSerial.h>
2
3 BluetoothSerial SerialBT; // Inicializa o Bluetooth
4 const int pumPin = 32; // Pino para PWM
5 const int dirPin1 = 26; // Pino de direção 1
6 const int dirPin2 = 27; // Pino de direção 2
7 enum Direction { STOPPED, FORWARD, REVERSE }; // Estados de direção
8 Direction currentDirection = STOPPED; // Direção inicial
9 int currentSpeed = 0; // Velocidade inicial
10 char command;
11
12 void setup() {
13   Serial.begin(9600); // Início comunicação serial
14   SerialBT.begin("ESP32_Motor_Control_A"); // Nome do dispositivo
15   pinMode(pumPin, OUTPUT);
16   pinMode(dirPin1, OUTPUT);
17   pinMode(dirPin2, OUTPUT);
18 }
19
20 void controlCommand(char command) {
21   switch (command) {
22     case 'A': gradualPWM(255, 10, FORWARD); break; // Mov. suave (frente)
23     case 'B': if (currentSpeed > 0 && currentDirection == FORWARD)
24         gradualPWM(0, -10, FORWARD); break; // Parada suave (frente)
25     case 'C': moveMotor(255, FORWARD); break; // Movim. abrupto (frente)
26     case 'D': stopMotor(); break; // Parada abrupta
27     case 'E': gradualPWM(255, 10, REVERSE); break; // Mov. suave (reverso)
28     case 'F': moveMotor(255, REVERSE); break; // Mov. abrupto (reverso)
29     case 'G': if (currentSpeed > 0 && currentDirection == REVERSE)
30         gradualPWM(0, -10, REVERSE); break; // Parada suave (reverso)
31   }
32 }
33
34 void gradualPWM(int targetSpeed, int step, Direction direction) {
35   setDirection(direction);
36   for (int speed = currentSpeed; speed != targetSpeed; speed += step) {
37     moveMotor(speed, direction);
38   }
39 }
40
41 void moveMotor(int speed, Direction direction) {
42   digitalWrite(dirPin1, direction == FORWARD ? HIGH : LOW);
43   digitalWrite(dirPin2, direction == FORWARD ? LOW : HIGH);
44   analogWrite(pumPin, speed);
45 }
46
47 void stopMotor() {
48   digitalWrite(pumPin, LOW);
49 }
50
51 void setDirection(Direction direction) {
52   currentDirection = direction;
53 }
54
55 void serialEvent() {
56   if (SerialBT.available()) {
57     command = SerialBT.read();
58     controlCommand(command);
59   }
60 }
61
62 void loop() {
63   serialEvent();
64 }

```

```

sketch_dec19a.ino
26
27 // Funções auxiliares
28 void ControlCommand(char command) {
29   switch (command) {
30     case 'A': gradualPWM(255, 10, FORWARD); break; // Mov. suave (frente)
31     case 'B': if (currentSpeed > 0 && currentDirection == FORWARD)
32         gradualPWM(0, -10, FORWARD); break; // Parada suave (frente)
33     case 'C': moveMotor(255, FORWARD); break; // Movim. abrupto (frente)
34     case 'D': stopMotor(); break; // Parada abrupta
35     case 'E': gradualPWM(255, 10, REVERSE); break; // Mov. suave (reverso)
36     case 'F': moveMotor(255, REVERSE); break; // Mov. abrupto (reverso)
37     case 'G': if (currentSpeed > 0 && currentDirection == REVERSE)
38         gradualPWM(0, -10, REVERSE); break; // Parada suave (reverso)
39   }
40 }
41
42 void gradualPWM(int targetSpeed, int step, Direction direction) {
43   setDirection(direction);
44   for (int speed = currentSpeed; speed != targetSpeed; speed += step) {
45     moveMotor(speed, direction);
46   }
47 }
48
49 void moveMotor(int speed, Direction direction) {
50   digitalWrite(dirPin1, direction == FORWARD ? HIGH : LOW);
51   digitalWrite(dirPin2, direction == FORWARD ? LOW : HIGH);
52   analogWrite(pumPin, speed);
53 }
54
55 void stopMotor() {
56   digitalWrite(pumPin, LOW);
57 }
58
59 void setDirection(Direction direction) {
60   currentDirection = direction;
61 }
62
63 void serialEvent() {
64   if (SerialBT.available()) {
65     command = SerialBT.read();
66     ControlCommand(command);
67   }
68 }
69
70 void loop() {
71   serialEvent();
72 }

```

Fonte: Autor.

Conforme dito anteriormente, o ESP32 pode ser programado para controlar um motor DC usando sinais PWM (Pulse Width Modulation), que ajustam a velocidade e o comportamento do motor. O controle é feito variando o ciclo de trabalho (duty cycle) do PWM, que determina a quantidade de energia entregue ao motor. Abaixo estão as funções e comportamentos programados pretendidos:

1. Aumentar velocidade a frente: Gradualmente aumenta o PWM para 100%, acelerando os motores progressivamente.
2. Diminuir velocidade a frente: Gradualmente reduz o PWM ao valor mínimo, desacelerando os motores.
3. Máxima velocidade a frente: Configura diretamente o PWM para 100%, ativando os motores em máxima potência imediatamente.
4. Parar ou desligar os motores: Configura diretamente PWM para 0%, parando o motor instantaneamente.
5. Diminuir velocidade reversa: Reduz o PWM ao valor mínimo no sentido reverso, alternando os pinos de controle.
6. Máxima velocidade reversa: Alterna os pinos de controle e configura o PWM para 100%, ativando a reversão em máxima potência.
7. Diminuir velocidade reversa: Gradualmente reduz o PWM, desacelerando o motor no sentido reverso.

O código apresentado a seguir faz uso da biblioteca padrão do Arduino para implementar o controle de PWM, além de integrar a funcionalidade de comunicação Bluetooth para interação com dispositivos móveis, como celulares. Durante o desenvolvimento, buscou-se adotar uma abordagem que priorizasse a organização, a clareza e a eficiência, garantindo que o programa fosse facilmente compreensível e adaptável para futuras melhorias. Essa estrutura visa atender de forma eficaz aos objetivos propostos, promovendo um equilíbrio entre funcionalidade e simplicidade.

```

#include <BluetoothSerial.h>

BluetoothSerial SerialBT; // Inicializa o Bluetooth
const int pwmPin = 32;    // Pino para PWM
const int dirPin1 = 26;   // Pino de direção 1
const int dirPin2 = 27;   // Pino de direção 2
enum Direction { STOPPED, FORWARD, REVERSE }; // Estados de direção
Direction currentDirection = STOPPED;         // Direção inicial
int currentSpeed = 0;                          // Velocidade inicial

void setup() {
  SerialBT.begin("ESP32_Motor_Control");      // Nome do dispositivo
  pinMode(pwmPin, OUTPUT);
  pinMode(dirPin1, OUTPUT);
  pinMode(dirPin2, OUTPUT);
  Serial.begin(115200); // Comunicação serial para monitoramento
}

void loop() {
  if (SerialBT.available()) {
    char command = SerialBT.read(); // Lê o comando enviado pelo celular
    ControlCommand(command);
  }
}

void ControlCommand(char command) {
  switch (command) {
    case 'A': if (currentSpeed < 255 && currentDirection != REVERSE)
              moveMotor(currentSpeed + 30, FORWARD); break; // Frente Low
    case 'B': if (currentSpeed > 165 && currentDirection == FORWARD)
              moveMotor(currentSpeed - 30, FORWARD); break; // Parar Low
    case 'C': if (currentSpeed == 0)
              moveMotor(255, FORWARD); break;                // Frente High
    case 'D': moveMotor(0, STOPPED); break;                    // Parada Total
    case 'E': if (currentSpeed < 255 && currentDirection != FORWARD)
              moveMotor(currentSpeed + 30, REVERSE); break; // Reverso Low
    case 'F': if (currentSpeed == 0)
              moveMotor(255, REVERSE); break;                 // Reverso High
    case 'G': if (currentSpeed > 165 && currentDirection == REVERSE)
              moveMotor(currentSpeed - 30, REVERSE); break; // Parar Low
  }
}

void moveMotor(int speed, Direction direction) {
  if (speed == 30) speed=165; // Valor minimo de funcionamento
  setDirection(direction);
  analogWrite(pwmPin, speed);
  currentSpeed = speed; // Atualiza a velocidade atual
  currentDirection = direction; // Atualiza a direção
}

void setDirection(Direction direction) {
  if (direction == FORWARD) {
    digitalWrite(dirPin1, HIGH); digitalWrite(dirPin2, LOW);
  } else if (direction == REVERSE) {
    digitalWrite(dirPin1, LOW); digitalWrite(dirPin2, HIGH);
  }
}

```

O programa exposto permite o controle remoto do protótipo por Bluetooth, oferecendo a implementação simples e eficiente de comandos no microcontrolador ESP32. O dispositivo a ser controlado é denominado "ESP32_motor_control". O PWM é gerenciado pelo pino definido em pwmPin para controlar a velocidade do motor. A direção é alternada pelos pinos dirPin1 e dirPin2. Após a inicialização, o bluetooth é configurado para receber comandos do celular conforme a seguir.

Comandos:

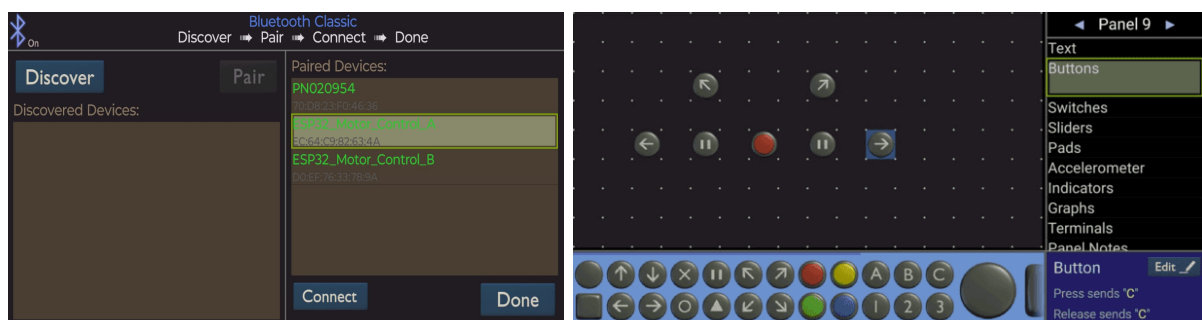
- 'A': Incrementar o movimento para frente.
- 'B': Reduzir o movimento para frente.
- 'C': Movimento máximo para frente.
- 'D': Parada abrupta.
- 'E': Incrementar o movimento para trás (reverso).
- 'F': Movimento máximo para trás (reverso).
- 'G': Reduzir o movimento para trás (reverso).

O programa apresentado possui três funções principais. A função setup() inicializa o Bluetooth e define os pinos de controle do motor como saídas. A função loop() verifica continuamente se há comandos recebidos via Bluetooth e os encaminha para a função ControlCommand(), que interpreta os comandos e executa ações específicas, como alterar a direção ou a velocidade dos motores. A função moveMotor() ajusta a velocidade, enquanto a função setDirection() define a direção de rotação dos motores, ativando os pinos de controle correspondentes. Juntas, essas funções permitem um controle dinâmico e preciso dos motores.

O programa foi desenvolvido e compilado na interface IDE do Arduino, utilizando a opção de placa "ESP32 Dev Module". O microcontrolador ESP32 foi conectado ao computador via cabo USB, permitindo a transferência do código para o dispositivo. Após a compilação bem-sucedida, o programa foi carregado no ESP32, habilitando a execução do controle de motor por comandos Bluetooth.

O controle via Bluetooth do ESP32 é facilitado por aplicativos disponíveis para smartphones, que permitem a interação com o microcontrolador. Entre os aplicativos mais utilizados estão o Bluetooth Serial Monitor, o Serial Bluetooth Terminal, o Bluetooth Electronics, e o Blynk. Cada aplicativo oferece funcionalidades específicas que podem ser exploradas de acordo com as necessidades do projeto. O Bluetooth Serial Monitor e o Serial Bluetooth Terminal são voltados para projetos que exigem simplicidade, permitindo o envio e recebimento de comandos em formato de texto. O Bluetooth Electronics, mostrado na Figura 17, oferece uma interface gráfica personalizável, permitindo criar botões, sliders e outros controles visuais, ideal para projetos mais avançados. O Blynk possui suporte para Bluetooth e Wi-Fi, oferecendo uma interface moderna e personalizável, e compatível com dashboards remotos.

Figura 17. Aplicativo Android Bluetooth Eletronics.



Fonte: Autor.

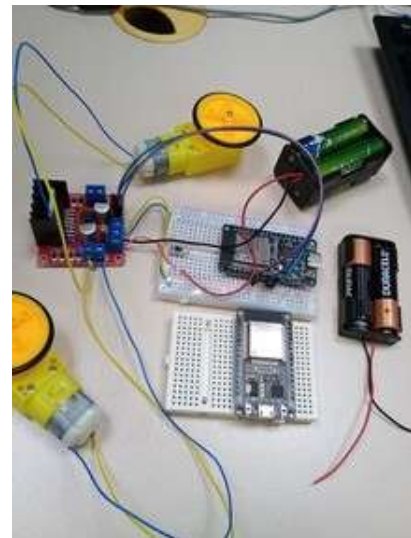
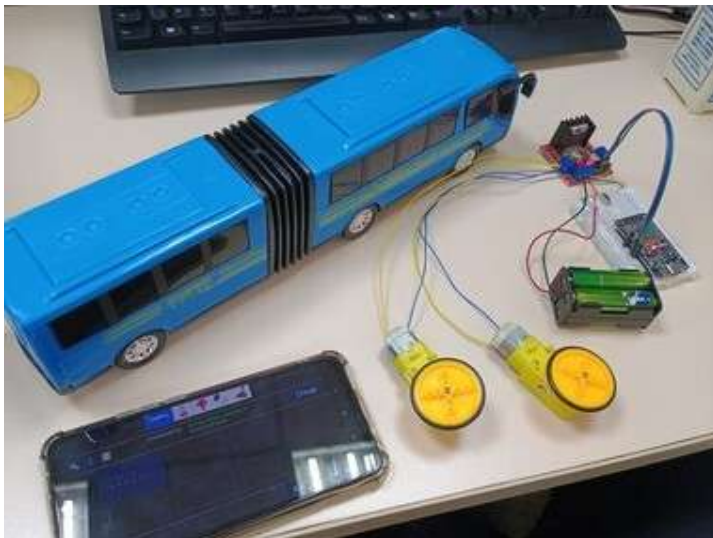
Para o protótipo do metrô suspenso, o Bluetooth Electronics é a melhor opção. Ele oferece a flexibilidade necessária para criar uma interface intuitiva com botões para iniciar, parar, reverter o motor e ajustar a velocidade, alinhando-se perfeitamente aos requisitos do projeto. Além disso, sua configuração é simples, e o aplicativo é compatível com dispositivos Android e iOS, garantindo acessibilidade.

4.6 Testes e Ajustes

A etapa de testes e ajustes é essencial para validar o funcionamento do protótipo e assegurar que ele atende aos requisitos mínimos de desempenho, segurança e eficiência. Inicialmente, os testes foram realizados para verificar a estabilidade estrutural do sistema, simulando condições de operação, como resistência e capacidade de suportar uma carga sem falhar, possíveis desvios e movimentos controlados ao longo do trajeto. O desempenho dos motores e sistema de controle foi avaliado buscando identificar eventuais falhas ou inconsistências.

Os ajustes incluíram a calibração dos sistemas de controle para garantir respostas precisas às mudanças de velocidade e direção, e avaliações de consumo energético. Foram realizados testes de comunicação entre o protótipo e o sistema de controle remoto, simulando situações reais de operação, como paradas emergenciais e mudanças de rota. Os testes contaram com o acompanhamento do orientador, confirmando a etapa como um refinamento contínuo indispensável para viabilidade do projeto. A Figura 18 apresenta os itens pré-montados para os testes.

Figura 18. Itens para montagem dos testes.



Fonte: Autor.

4.7 Metodologia de testes

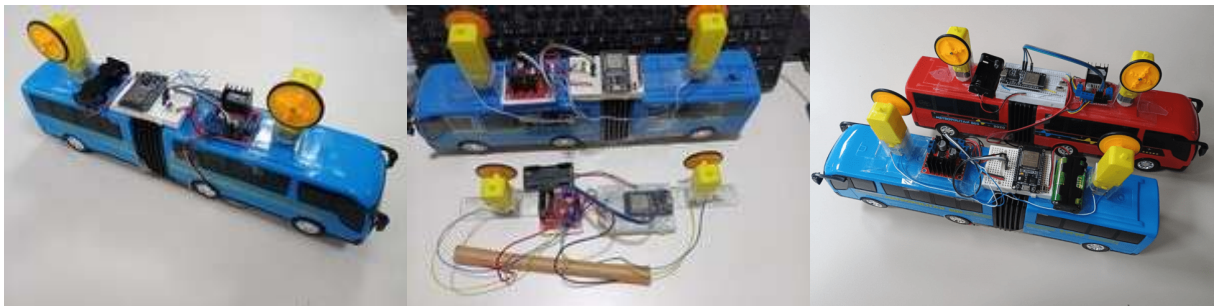
A metodologia de testes aplicada ao protótipo do metrô suspenso foi planejada para avaliar a eficiência, segurança e funcionalidade do sistema. Os testes foram divididos em categorias, abrangendo aspectos estruturais, mecânicos, eletrônicos e de comunicação.

Para os testes estruturais, verificou-se a estabilidade e a resistência da estrutura do protótipo em condições estáticas e dinâmicas, incluindo o peso do conjunto de pilhas, motores e demais componentes. No âmbito mecânico, avaliou-se o desempenho dos motores, sistemas de tração e componentes móveis, garantindo a mobilidade e o controle conforme as condições operacionais pretendidas.

Os testes eletrônicos incluíram a validação do funcionamento dos motores e do sistema de controle, mostrados na Figura 19, assegurando respostas precisas às entradas de comando e a integração entre os módulos. A comunicação Bluetooth foi testada para avaliar a confiabilidade na transmissão de dados.

Durante os testes eletrônicos, constatou-se que, ao acionar os motores, a conexão Bluetooth era momentaneamente perdida, e o microcontrolador deixava de receber comandos, fazendo com que os motores continuassem funcionando até serem desligados manualmente pela chave geral. Após análises, verificou-se que o uso de uma única fonte para alimentar todos os componentes provocava quedas de tensão ao ligar os motores, gerando instabilidade no módulo Bluetooth e interrompendo a comunicação. A queda de tensão também poderia desestabilizar ou reiniciar o microcontrolador, impossibilitando o recebimento de novos comandos.

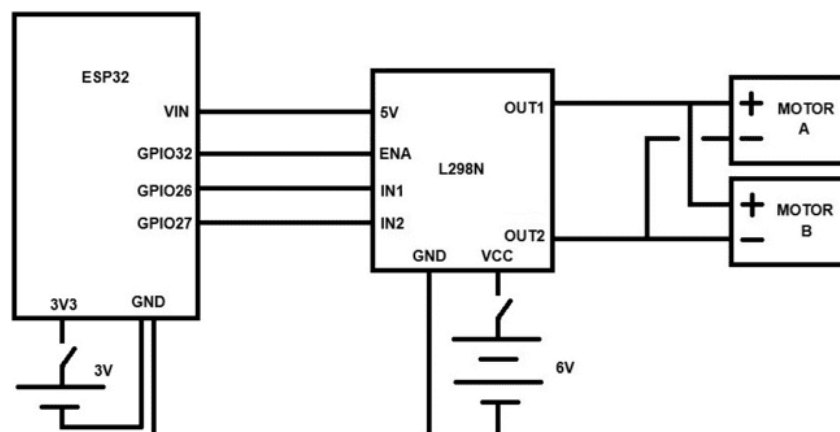
Figura 19. Montagem de protótipo para testes.



Fonte: Autor.

Algumas soluções possíveis para os problemas encontrados seriam substituir as pilhas por uma fonte de maior capacidade de corrente ou fazer uma separação de fontes, alimentando os motores e o microcontrolador com fontes independentes para evitar interferências. Novos testes e verificações demonstraram maior estabilidade do circuito ao se adicionar uma fonte de 3V, com 2 pilhas, ligada diretamente ao pino 3.3V do Esp32, com eliminação do problema de queda do bluetooth no momento de acionar os motores. O esquema principal foi reajustado conforme Figura 20 a seguir.

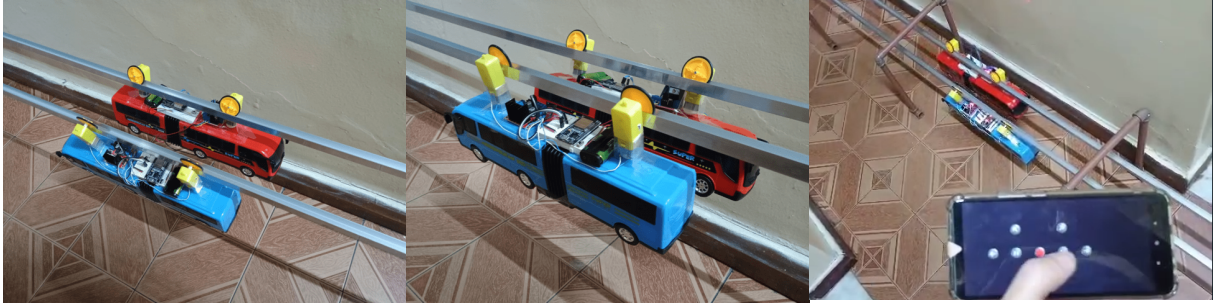
Figura 20. Reajuste do esquema principal.



Fonte: Autor.

Com a fonte adicional de 3V ligada ao microprocessador, os comandos de movimento abrupto para frente, parada total e movimento reverso funcionaram normalmente sem queda do Bluetooth. Ajustes foram feitos no programa para regulagem do PWM após verificar-se que os motores só iniciam o funcionamento com uma velocidade acima de 60% do valor máximo programado (255). A Figura 21 apresenta os testes sendo realizados.

Figura 21. Testes sendo realizados.



Fonte: Autor.

Cada teste foi permitiu a coleta de dados consistentes e a identificação de falhas ou pontos de melhoria. Após cada verificação, os resultados foram analisados e validados, orientando os ajustes necessários.

4.8 Análise dos resultados obtidos

Os resultados obtidos durante os testes do protótipo foram analisados de forma criteriosa, considerando os objetivos previamente estabelecidos. Os dados coletados indicaram que o sistema apresentou desempenho satisfatório em diversos aspectos, confirmando a viabilidade técnica do projeto. No que diz respeito à estrutura, os testes demonstraram que o modelo suportou com segurança as cargas simuladas, mantendo a estabilidade em condições estáticas e dinâmicas.

Na análise do desempenho mecânico, verificou-se que motores e sistemas de tração operaram dentro dos parâmetros esperados de eficiência. Contudo, foram identificados pequenos ajustes necessários no programa para otimizar a suavidade das transições de direção e frenagem. Os componentes eletrônicos responderam eficientemente, garantindo precisão nas operações. A comunicação via Bluetooth apresentou alta confiabilidade, atendendo aos requisitos de integração com o operador. O protótipo atende aos critérios de operacionalidade, representando um avanço significativo na proposta de um sistema de metrô suspenso funcional.

4.9 Impactos e Benefícios da Implantação

A implantação de um sistema de metrô suspenso em Manaus traria impactos significativos e benefícios amplos para a cidade e sua população. Entre os principais impactos positivos estão a redução do trânsito nas vias urbanas, promovendo maior fluidez no deslocamento diário e diminuindo o tempo de viagem. Adicionalmente, o projeto contribuiria para a melhoria da qualidade do ar, reduzindo emissões de gases poluentes graças ao uso de motores elétricos. No âmbito econômico, o sistema incentivaria o comércio local, fortaleceria o turismo ao facilitar o acesso a pontos estratégicos e promoveria a integração entre regiões, incluindo o Centro Histórico, o Distrito Industrial e bairros mais afastados. A preservação ambiental também seria favorecida, uma vez que o design elevado do metrô minimiza intervenções no solo e protege áreas verdes. Esses fatores, combinados, reforçam o potencial do metrô suspenso como uma solução inovadora e sustentável para os desafios da mobilidade urbana em Manaus.

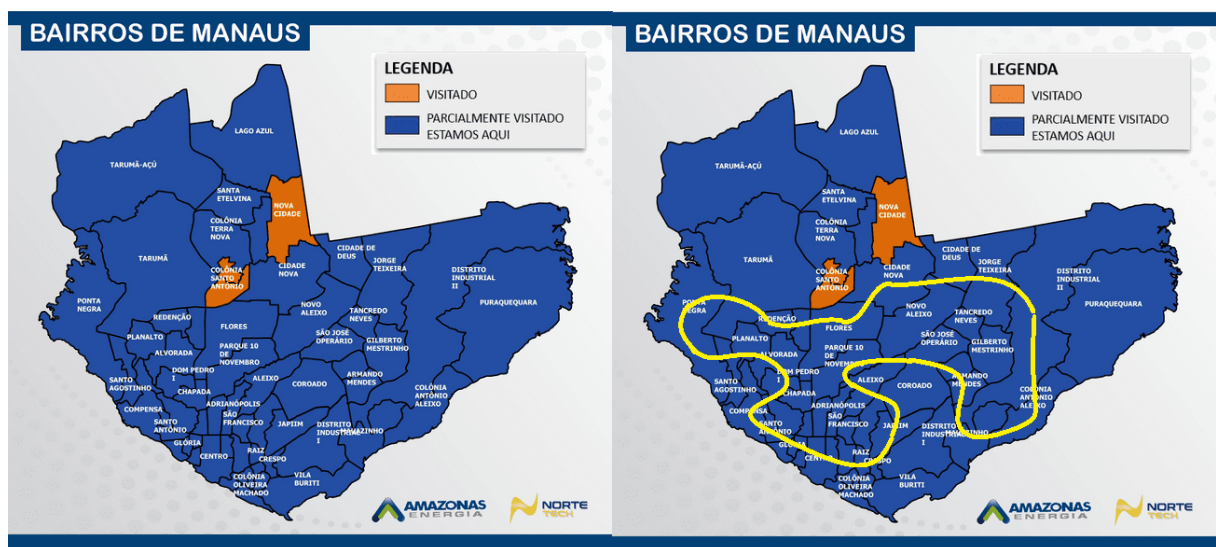
4.10 Benefícios Socioeconômicos

A implantação de um metrô suspenso em Manaus, inspirado no modelo de Wuppertal, traria diversos benefícios socioeconômicos para a cidade. O transporte mais eficiente reduziria custos do deslocamento, beneficiando os cidadãos com menor gasto de tempo e dinheiro no trajeto diário. O sistema suspenso minimiza o impacto no solo, preservando áreas urbanas já ocupadas e diminuindo custos com desapropriações. No aspecto ambiental, a redução de veículos particulares nas ruas contribui para a melhoria da qualidade do ar e a diminuição da emissão de gases de efeito estufa, gerando economia em saúde pública, pois menos poluição resulta em menor incidência de doenças respiratórias. A construção e operação do metrô criariam empregos diretos e indiretos, estimulando a economia local. Além disso, o projeto promoveria a inclusão social ao oferecer um meio de transporte acessível e confiável, conectando bairros periféricos ao centro e facilitando o acesso a serviços essenciais como educação, saúde e trabalho. A modernização da mobilidade urbana tornaria Manaus mais atrativa para investimentos e turismo, impulsionando o desenvolvimento econômico da cidade de maneira sustentável e equilibrada.

4.11 Potenciais melhorias na mobilidade urbana

A implementação do projeto de metrô suspenso promete revolucionar a mobilidade urbana, trazendo benefícios para diversos setores. O trajeto proposto, apresentado na Figura 22, busca interligar o Centro histórico ao Distrito Industrial e a bairros mais afastados, com uma trajetória que percorre pontos estratégicos. Essa configuração não só facilita o deslocamento dos trabalhadores para o polo industrial, mas também integra áreas com potencial turístico, comercial e residencial. Com o metrô suspenso, a conectividade entre diferentes regiões da cidade será ampliada, reduzindo o tempo de viagem e o trânsito nas vias principais. Isso incentivará o uso do transporte público em lugar de veículos particulares, promovendo maior eficiência no transporte coletivo e reduzindo congestionamentos. Além disso, o projeto beneficia o turismo, permitindo acesso rápido a pontos históricos e culturais de Manaus, e favorece o comércio local, ao facilitar o fluxo de pessoas entre centros comerciais e bairros residenciais. Essa integração fortalece a economia, aumenta a produtividade e melhora a qualidade de vida da população.

Figura 22. Representação dos Bairros de Manaus e rota pretendida.



Fonte: Adaptada da Amazonas Energia.

4.12 Benefícios para a população e o comércio local

A implementação do metrô suspenso em Manaus, com uma trajetória circular conectando o Centro Histórico, o Distrito Industrial e os bairros mais populosos e afastados, trará benefícios significativos tanto para a população quanto para o comércio local. Para os moradores, o projeto oferece um transporte público eficiente, reduzindo o tempo de deslocamento diário e proporcionando maior acessibilidade a diferentes áreas da cidade. Isso impacta positivamente a qualidade de vida, permitindo mais tempo para atividades pessoais e profissionais. O comércio local será beneficiado pela maior mobilidade das pessoas, ampliando o fluxo de clientes em diferentes regiões. O Centro Histórico, além de diversas lojas da Zona Franca de Manaus, possui pontos culturais como o Teatro Amazonas, Mirante Lúcia Almeida e o Largo de São Sebastião com o Monumento de Abertura dos Portos, e poderá atrair mais visitantes, incentivando o turismo e a revitalização econômica. Nos bairros periféricos, a facilidade de acesso ao transporte moderno estimulará o crescimento de novos negócios e a valorização imobiliária. No Distrito Industrial, o metrô facilitará o deslocamento de trabalhadores, contribuindo para a produtividade e para a redução de custos operacionais com transporte. Adicionalmente, a conectividade urbana proporcionada pelo trajeto circular criará novas oportunidades de integração econômica entre os diferentes polos da cidade, consolidando Manaus como uma metrópole moderna e funcional.

4.13 Impacto Ambiental e Sustentabilidade

A implantação de um metrô suspenso em Manaus representa uma solução inovadora e sustentável para a mobilidade urbana, com impactos ambientais significativamente positivos. Uma das principais vantagens desse sistema é a redução da emissão de gases poluentes, como o dióxido de carbono (CO₂), que contribuem para o efeito estufa. Ao oferecer uma alternativa eficiente ao transporte individual, o metrô suspenso incentiva a redução do uso de veículos particulares, diminuindo o tráfego nas vias e, conseqüentemente, a poluição atmosférica. O uso de motores elétricos no metrô suspenso oferece vantagens, como maior eficiência energética e operação silenciosa, contribuindo para a redução da poluição sonora nas áreas urbanas. Sua manutenção é mais simples e econômica em comparação aos motores a combustão, garantindo maior confiabilidade e durabilidade ao sistema de transporte.

Por outro lado, o design suspenso minimiza a necessidade de grandes intervenções no solo, preservando áreas verdes e ecossistemas urbanos sensíveis. Em uma cidade como Manaus, localizada no coração da Amazônia, essa característica é fundamental para evitar danos ao meio ambiente. A estrutura elevada permite que o sistema seja integrado ao ambiente urbano sem comprometer a biodiversidade local, preservando as espécies de animais e plantas típicas da região. O impacto positivo também se estende à qualidade de vida da população. Com menos congestionamentos e uma mobilidade mais ágil, há uma redução na poluição sonora e no estresse urbano. O projeto pode servir como modelo de como desenvolvimento e preservação ambiental podem coexistir, fortalecendo a conscientização sobre práticas sustentáveis. Portanto, o metrô suspenso em Manaus além de ser uma solução de transporte, constitui também um marco em termos de sustentabilidade, alinhando progresso urbano à preservação ambiental.

4.14 Redução de veículos nas vias

A implantação do metrô suspenso em Manaus tem o potencial de reduzir significativamente o número de veículos nas vias, promovendo uma mobilidade mais eficiente e sustentável. Ao oferecer uma alternativa de transporte público moderna, rápida e confiável, o projeto incentiva a população a optar pelo metrô em vez de veículos convencionais, como carros e motocicletas. Essa redução no tráfego resulta em menor congestionamento nas principais avenidas, diminuindo o tempo de deslocamento e melhorando a fluidez do trânsito. Com menos veículos em circulação, há uma redução na emissão de gases poluentes, contribuindo para a melhoria da qualidade do ar e redução de impactos ambientais. A diminuição da demanda por estacionamento nas áreas centrais também é um benefício direto, liberando espaço para outras atividades urbanas. O metrô suspenso, com sua trajetória conectando o Centro Histórico, o Distrito Industrial e os bairros mais afastados, proporciona uma integração eficiente entre diferentes regiões da cidade. Isso não somente facilita o acesso ao trabalho e ao comércio, mas também promove o turismo de forma mais sustentável. Com menos veículos nas vias, a cidade experimentará uma redução na poluição sonora e no desgaste da infraestrutura rodoviária, como ruas e pontes. Dessa forma, o projeto se apresenta como uma solução transformadora para os desafios de mobilidade urbana em Manaus.

4.15 Contribuição para um sistema de transporte ecológico

A instalação do metrô suspenso em Manaus é um passo importante para desenvolver um sistema de transporte mais sustentável e amigável ao meio ambiente. Com o uso de motores elétricos mais eficientes, o metrô diminui significativamente a emissão de poluentes, como o dióxido de carbono (CO₂), em relação aos veículos movidos a combustão. Essa característica é fundamental para reduzir os impactos ambientais em uma cidade situada no coração da Amazônia, onde a conservação do meio ambiente é altamente prioritária. Além disso, a estrutura elevada do metrô reduz a necessidade de intervenções significativas no solo, protegendo áreas verdes e ecossistemas locais. O uso de energia elétrica, especialmente quando proveniente de fontes renováveis, reforça o compromisso com a sustentabilidade e a diminuição da emissão de carbono. O metrô suspenso também estimula o uso do transporte público, ajudando a reduzir a quantidade de veículos particulares nas ruas, o que melhora a qualidade do ar e diminui a poluição sonora. Combinando tecnologia avançada e cuidado ambiental, o projeto se destaca como um marco na busca por uma mobilidade urbana mais sustentável e ecológica.

4.16 Considerações para uma Implantação Real

A implantação de um metrô suspenso em Manaus exige análise de fatores técnicos, econômicos e sociais. É necessário realizar estudos de viabilidade que considerem o impacto na infraestrutura urbana e a integração com outros meios de transporte. O planejamento deve incluir estratégias para minimizar transtornos durante a construção, preservando a rotina da população. A escolha de materiais duráveis e sustentáveis é essencial para garantir a viabilidade a longo prazo. Parcerias público-privadas são fundamentais para viabilizar o financiamento e a operação. A transparência no processo e o envolvimento da comunidade são importantes para a aceitação pública. Por fim, a capacitação de mão de obra local ajudará no sucesso do projeto e no desenvolvimento regional.

4.17 Avaliação de infraestrutura necessária

A análise da infraestrutura necessária para a implantação do metrô suspenso em Manaus deve abranger aspectos como a adequação das vias urbanas, a capacidade de suporte das fundações e a viabilidade de integração com outros sistemas de transporte. É essencial avaliar a resistência do solo para garantir a estabilidade das estruturas elevadas e o impacto das obras na infraestrutura existente, como as apresentadas na Figura 23. Deve-se considerar a disponibilidade de energia elétrica e a necessidade de adaptar a rede elétrica para suportar a demanda do sistema. O planejamento também deve incluir a avaliação de acessibilidade e a criação de estações que atendam adequadamente a população. Por fim, a consideração de aspectos de segurança, tanto durante a construção quanto na operação do metrô, é fundamental para o sucesso do projeto.

Figura 23. Passarelas de Manaus poderiam ser adaptadas para servir como estações



Fonte: Internet.

4.18 Possíveis etapas de execução e implementação

A execução e implementação do metrô suspenso em Manaus pode ser dividida em várias etapas, cada uma com objetivos e desafios específicos. A primeira fase envolve o planejamento detalhado, com estudos de viabilidade técnica, econômica e ambiental, além da definição do trajeto, das estações e da integração com outros meios de transporte. Em seguida, inicia-se o processo de licenciamento ambiental e obtenção das autorizações necessárias, incluindo a análise de impactos urbanos e sociais. A construção da infraestrutura, como a instalação das fundações, pilares e trilhos elevados, é uma etapa crítica que exige precisão e coordenação. Paralelamente, ocorre a aquisição e instalação dos sistemas elétricos, como a rede de alimentação e os vagões do metrô. Após a conclusão das obras civis e sistemas, é realizada a fase de testes operacionais, que visa garantir a segurança e o funcionamento adequado do sistema. Finalmente, a operação inicial e o monitoramento contínuo asseguram que o metrô funcione de maneira eficiente e segura, com ajustes conforme necessário. Durante todas as fases, é fundamental o acompanhamento constante para garantir o cumprimento dos prazos, orçamento e qualidade do projeto.

5 Conclusão

O presente estudo analisou a viabilidade e os benefícios da implementação de um sistema de metrô suspenso em Manaus, com foco na mobilidade urbana sustentável. A pesquisa abordou aspectos técnicos, econômicos, sociais e ambientais, destacando a necessidade de soluções inovadoras para os desafios de transporte enfrentados pela cidade. A prototipagem realizada demonstrou a funcionalidade básica do sistema proposto, servindo como uma etapa inicial para a visualização prática do projeto.

A implantação de um metrô suspenso apresenta-se como uma alternativa viável e estratégica para melhorar a mobilidade urbana, reduzindo congestionamentos, promovendo a integração de bairros afastados e fortalecendo o turismo e a economia local. Além disso, a utilização de tecnologias sustentáveis, como motores elétricos e estruturas elevadas de baixo impacto ambiental, reforça o compromisso com a preservação do meio ambiente, especialmente em uma cidade localizada na região amazônica.

Embora os resultados do estudo sejam promissores, a concretização do projeto dependerá de análises mais aprofundadas, parcerias estratégicas e uma gestão eficiente. A integração da comunidade e o alinhamento com políticas públicas serão fundamentais para garantir a aceitação e o sucesso do empreendimento. Assim, conclui-se que o metrô suspenso não apenas atenderia às necessidades de transporte de Manaus, mas também se tornaria um marco de inovação e sustentabilidade, alinhado aos desafios e oportunidades do século XXI.

5.1 Síntese dos principais pontos abordados

Ao longo desta monografia, foi realizado um estudo detalhado sobre a viabilidade e a prototipagem de um sistema de metrô suspenso para a cidade de Manaus, com ênfase na mobilidade urbana sustentável. Inicialmente, foram apresentados os desafios enfrentados pela cidade, como o crescimento populacional, os congestionamentos e a insuficiência do transporte público, que demandam soluções inovadoras e eficientes.

Em seguida, explorou-se a viabilidade técnica e econômica do projeto, destacando a escolha de tecnologias sustentáveis, como motores elétricos, que são mais eficientes e menos poluentes, e a utilização de estruturas elevadas que minimizam impactos ambientais. Foi ressaltada a importância de um planejamento cuidadoso, que incluía estudos de impacto ambiental, análise da infraestrutura necessária e estratégias de integração com outros modais de transporte.

A prototipagem do sistema demonstrou a funcionalidade básica do metrô suspenso, evidenciando sua aplicabilidade em cenários reais. Além disso, foram discutidos os benefícios socioeconômicos, como a redução de veículos nas vias, a melhoria da qualidade do ar e a valorização do comércio local e do turismo. Também foram abordados os potenciais ganhos em mobilidade urbana, conectando o Centro Histórico, o Distrito Industrial e bairros mais afastados em um trajeto circular estratégico.

Por fim, foram apresentadas considerações sobre a sustentabilidade do projeto, a importância de parcerias público-privadas e o engajamento da comunidade para garantir o sucesso da implantação. Essa síntese reflete o compromisso do estudo em propor uma solução que não apenas atenda às necessidades de transporte da cidade, mas também promova um modelo de desenvolvimento urbano alinhado aos princípios da sustentabilidade.

5.2 Limitações e sugestões para pesquisas futuras

Embora este estudo tenha explorado vários aspectos relacionados à viabilidade e à prototipagem de um sistema de metrô suspenso para Manaus, algumas limitações devem ser reconhecidas. Primeiramente, a análise econômica foi realizada com base em estimativas preliminares, não contemplando um levantamento detalhado de custos específicos para a construção, operação e manutenção do sistema. Estudos futuros poderiam aprofundar a análise e incluir projeções financeiras robustas e o impacto de possíveis flutuações econômicas.

Além disso, o protótipo desenvolvido teve caráter simplificado, voltado para a demonstração conceitual. Pesquisas futuras poderiam explorar modelos em escala ampliada, incorporando tecnologias mais avançadas, como sensores inteligentes e outros sistemas de automação, para simular as condições reais de operação. Outro ponto a ser aprofundado é a integração do metrô suspenso com outros modais de transporte urbano, analisando rotas, fluxos de passageiros e a logística de conexão entre diferentes sistemas.

Do ponto de vista ambiental, este trabalho abordou de forma geral os benefícios do sistema, mas estudos específicos sobre o impacto ambiental em áreas urbanas e ecossistemas sensíveis da Amazônia seriam essenciais para embasar decisões futuras. Também seria relevante avaliar o uso de fontes de energia renováveis para alimentar o sistema, como energia solar ou hidrelétrica, ampliando o potencial sustentável do projeto.

Por fim, sugere-se a realização de estudos de percepção pública para avaliar a receptividade da população ao metrô suspenso, além de pesquisas sobre os impactos sociais e culturais em comunidades diretamente afetadas pela implantação do sistema. Essas abordagens podem contribuir para o aprimoramento do projeto e para sua adaptação às necessidades reais da cidade de Manaus.

5.3 Considerações finais

Esta monografia apresentou um estudo abrangente sobre a viabilidade e a prototipagem de um sistema de metrô suspenso para Manaus, abordando aspectos técnicos, econômicos, ambientais e sociais. A proposta busca oferecer uma solução inovadora para os desafios de mobilidade enfrentados pela cidade, marcada por um alto crescimento populacional e infraestrutura de transporte público insuficiente. O metrô suspenso, com design elevado e o uso de tecnologias sustentáveis, destaca-se como uma alternativa viável para atender às demandas de transporte com menor impacto ambiental. Ao longo do estudo, evidenciou-se que o sistema proposto reduziria a dependência de veículos particulares, e contribuiria para a melhoria da qualidade do ar, a redução da poluição sonora e a preservação das áreas verdes. Adicionalmente, o trajeto planejado, conectando o Centro Histórico, o Distrito Industrial e bairros populosos, tem o potencial de fomentar o turismo, impulsionar o comércio e integrar diferentes regiões, promovendo inclusão social e econômica.

Embora o protótipo desenvolvido tenha cumprido seu objetivo de demonstrar a viabilidade conceitual do projeto, reconhece-se que a implantação real exige estudos mais aprofundados e planejamento detalhado. Questões como o financiamento, a integração com outros modais e o impacto ambiental precisam ser cuidadosamente analisadas para garantir o sucesso do empreendimento. Por fim, o estudo reforça a importância de soluções de transporte urbano que aliem inovação tecnológica, sustentabilidade e respeito às características da cidade. Este trabalho espera servir como base para futuras pesquisas e debates, incentivando a busca por alternativas que transformem a mobilidade urbana da capital amazonense em um modelo de eficiência e sustentabilidade para o Brasil e o mundo.

REFERÊNCIAS

ACRÍTICA. Viagens durante horários de pico em Manaus levam 67% a mais de tempo, aponta índice. Disponível em: <<https://www.acritica.com/manaus/viagens-durante-horarios-de-pico-em-manaus-levam-67-a-mais-de-tempo-aponta-indice-1.183906>>. Acesso em: 05 nov. 2024.

AMANTES DA FERROVIA. *Schwebbahn de Wuppertal: um sistema de trânsito centenário.* Disponível em: <<https://amantesdaferrovia.com.br/blog/schwebbahn-de-wuppertal-um-sistema-de-transito-centenario>>. Acesso em: 30 dez. 2024.

AMAZONAS ENERGIA. *Atualiza Aí: atualização cadastral de clientes.* Disponível em: <<https://website.amazonasenergia.com/atualizaai/>>. Acesso em: 12 dez. 2024.

AMAZONAS. Secretaria de Estado de Desenvolvimento Econômico, Ciência, Tecnologia e Inovação (SEDECTI). Mapa da Área Urbana da Cidade de Manaus. 2019. Disponível em: <https://www.seducti.am.gov.br/wp-content/uploads/2019/07/Mapa_%C3%A1rea_urbana_da_cidade_de_Manaus.pdf>. Acesso em: 5 nov. 2024.

AMUSING PLANET. *Wuppertal Schwebbahn: Germany's Hanging Monorail.* Disponível em: <<https://www.amusingplanet.com/2012/06/wuppertal-schwebbahn-germanys-hanging.html>>. Acesso em: 05 nov. 2024.

ASSOCIAÇÃO CIVIL AMAZONENSE (ACA). Os igarapés que cortam Manaus. Disponível em: <<https://aca.org.br/os-igarapes-que-cortam-manaus/>>. Acesso em: 28 out. 2024.

BRAGA, Ricardo de Souza. *Mobilidade urbana: desafios e perspectivas.* Brasília: IPEA, 2019.

ELETROGATE. *Conhecendo o ESP32 – Introdução (Parte 1).* Disponível em: <<https://blog.eletrogate.com/conhecendo-o-esp32-introducao-1/>>. Acesso em: 28 nov. 2024.

EMBARCADOS. *Como programar o ESP32 na Arduino IDE.* Disponível em: <<https://embarcados.com.br/como-programar-o-esp32-na-arduino-ide/>>. Acesso em: 18 dez. 2024.

G1. Câmara aprova orçamento de R\$ 9 bilhões para Manaus em 2024. Disponível em: <<https://g1.globo.com/am/amazonas/noticia/2023/12/14/camara-aprova-orcamento-de-r-9-bilhoes-para-manaus-em-2024.ghtml>>. Acesso em: 05 nov. 2024.

IFSC. Aula 6 - Microcontroladores - Engenharia. Disponível em: <https://wiki.ifsc.edu.br/mediawiki/index.php/AULA_6_-_Microcontroladores_-_Engenharia>. Acesso em: 12 dez. 2024.

IFSC. Aula 7 - Microcontroladores - Engenharia. Disponível em: <https://wiki.ifsc.edu.br/mediawiki/index.php/AULA_7_-_Microcontroladores_-_Eng>. Acesso em: 12 dez. 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Cidades e Estados: Manaus, AM. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/am/manaus.html>>. Acesso em: 04 nov. 2024.

INSTITUTO DE PROTEÇÃO AMBIENTAL DO AMAZONAS (IPAAM). Mapa das Bacias Hidrográficas Urbanas de Manaus. 2022. Disponível em: <https://www.ipaam.am.gov.br/wp-content/uploads/2022/03/MAPA-BACIAS_MANAUS.pdf>. Acesso em: 5 nov. 2024.

OLIVEIRA, Marcos. Levitação Magnética em Transportes: Um estudo sobre o sistema Maglev. *Revista Brasileira de Engenharia*, v. 15, n. 2, p. 120-135, 2012.

PETTEC – Programa de Educação Tutorial da Engenharia de Computação. ESP32: Carrinho de controle remoto controlado via Bluetooth. Disponível em: <<https://pettec.unifei.edu.br/wp-content/uploads/2022/05/Tutorial-Carrinho-de-controle-remoto.pdf>>. Acesso em: 28 nov. 2024.

PLAMURB. Monotrilho da Linha 15-Prata completa 10 anos de operação em meio a muitas desinformações. Disponível em: <<https://plamurblog.wordpress.com/2024/09/02/monotrilho-da-linha-15-prata-completa-10-anos-de-operacao-em-meio-a-muitas-desinformacoes/>>. Acesso em: 01 nov. 2024.

ROBOBUILDERS. Como instalar e programar o ESP32 com a IDE do Arduino. Disponível em: <<https://blog.robobuilders.com.br/como-instalar-e-programar-o-esp32-com-a-ide-do-arduino/>>. Acesso em: 18 dez. 2024.

SILVA, C. Trens Maglev: Estado da Arte e Perspectivas para o Brasil. In: *Anais do Congresso Nacional de Engenharia Mecânica*, Belo Horizonte, 2017.

SILVA, Diego Kerber. Conheça o monotrilho de Wuppertal: o primeiro trem suspenso do mundo. Tecmundo, 2013. Disponível em: <<https://www.tecmundo.com.br/trem/40297-conheca-o-monotrilho-de-wuppertal-o-primeiro-trem-suspenso-do-mundo.htm>>. Acesso em: 22 out. 2024.

TIE, Yuhe; CHEN, Peiming; MA, Yingqi. BLE Bluetooth remote-controlled car based on ESP32. *Applied and Computational Engineering*, v. 81, n. 1, p. 25-32, nov. 2024. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/385709260_BLE_Bluetooth_remote-controlled_car_based_on_ESP32>. Acesso em: 30 dez. 2024.

USINAINFO. *Programar ESP32 com a IDE Arduino: tutorial completo.* Disponível em: <<https://www.usinainfo.com.br/blog/programar-esp32-com-a-ide-arduino-tutorial-completo/>>. Acesso em: 18 dez. 2024.

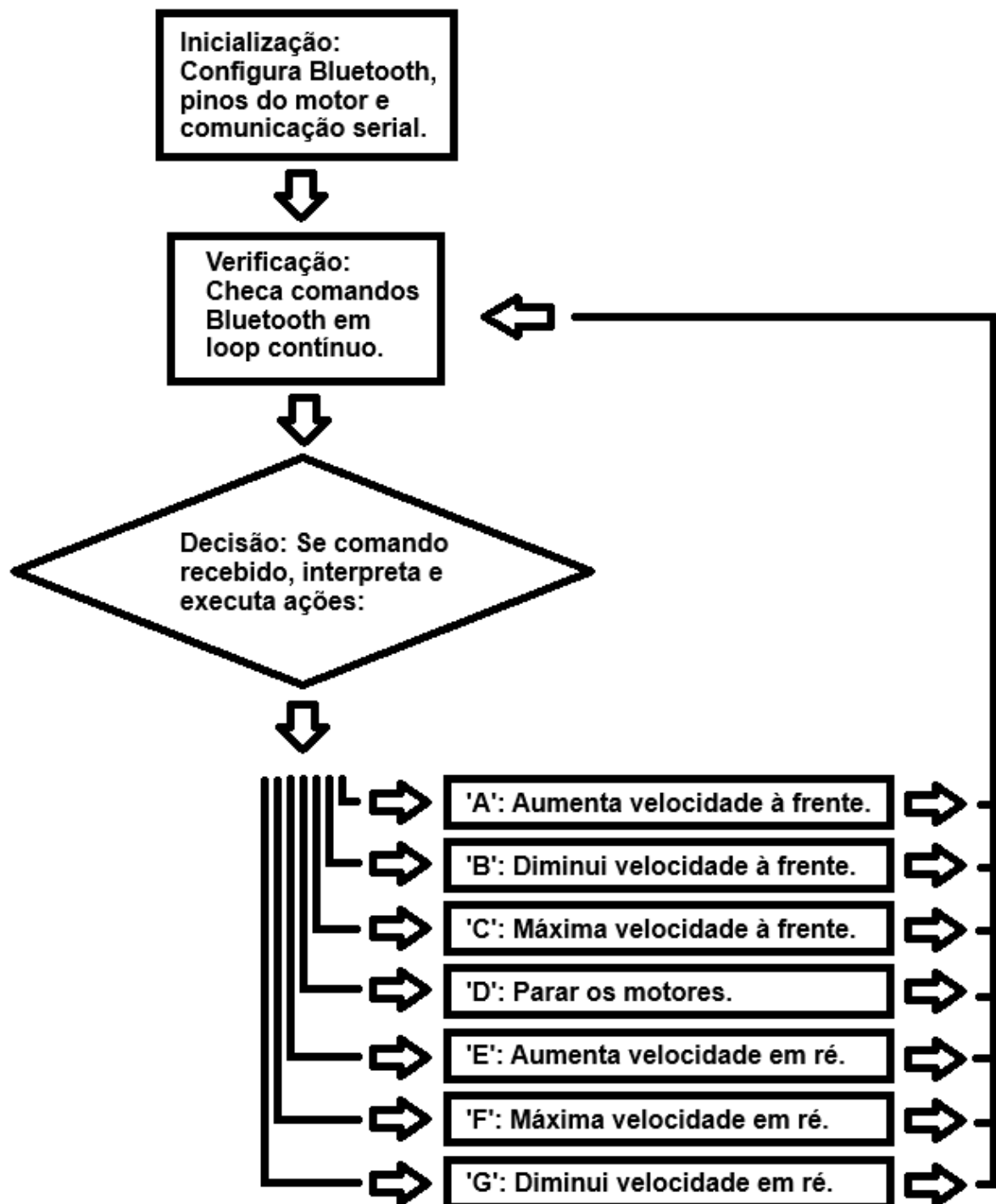
VASCONCELLOS, Eduardo Alcântara. *Transporte urbano, espaço e equidade: análise das políticas públicas.* São Paulo: Annablume, 2016.

VIATROLEBUS. *Alemanha renova frota de monotrilho suspenso.* Disponível em: <<https://viatrolebus.com.br/2015/11/alemanha-renova-frota-de-monotrilho-suspenso/>>. Acesso em: 30 dez. 2024.

VIATROLEBUS. *Que fim levou o projeto do monotrilho de Manaus?* Disponível em: <<https://viatrolebus.com.br/2022/07/que-fim-levou-o-projeto-do-monotrilho-de-manaus/>>. Acesso em: 26 nov. 2024.

WIRED. *Wuppertal Monorail Opens.* Disponível em: <<https://www.wired.com/2010/03/0331wuppertal-monorail-opens/>>. Acesso em: 05 nov. 2024.

ANEXOS

ANEXO A – Fluxograma do funcionamento da programação ESP32
(Autoria própria)

ANEXO B – ESP32-WROOM-32 Specifications

https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wroom-32_datasheet_en.pdf

Categories	Items	Specifications
Certification	RF certification	See certificates for ESP32-WROOM-32
	Wi-Fi certification	Wi-Fi Alliance
	Bluetooth certification	BQB
	Green certification	RoHS/REACH
Test	Reliability	HTOL/HTSL/uHAST/TCT/ESD
Wi-Fi	Protocols	802.11 b/g/n (802.11n up to 150 Mbps) A-MPDU and A-MSDU aggregation and 0.4 μ s guard interval support
	Center frequency range of operating channel	2412 ~ 2484 MHz
Bluetooth	Protocols	Bluetooth v4.2 BR/EDR and Bluetooth LE specification
	Radio	NZIF receiver with -97 dBm sensitivity
		Class-1, class-2 and class-3 transmitter
		AFH
Audio	CVSD and SBC	
Hardware	Module interfaces	SD card, UART, SPI, SDIO, I2C, LED PWM, Motor PWM, I2S, IR, pulse counter, GPIO, capacitive touch sensor, ADC, DAC, Two-Wire Automotive Interface (TWAI®), compatible with ISO11898-1 (CAN Specification 2.0)
	Integrated crystal	40 MHz crystal
	Integrated SPI flash	4 MB
	Operating voltage/Power supply	3.0 V ~ 3.6 V
	Operating current	Average: 80 mA
	Minimum current delivered by power supply	500 mA
	Recommended operating ambient temperature range	-40 °C ~ $+85$ °C
	Package size	18 mm \times 25.5 mm \times 3.10 mm
	Moisture sensitivity level (MSL)	Level 3

ANEXO C – Resumo de Referências Online

1.Título:

“Alemanha renova frota de monotrilho suspenso”

2.Conteúdo:

A reportagem destaca a modernização do monotrilho suspenso de Wuppertal (Alemanha), um dos sistemas mais antigos do mundo, em operação desde 1901. Em 2015, o governo local apresentou novas composições fabricadas pela Vossloh (Espanha), como parte de um plano de renovação da frota para 20 anos. O sistema de sinalização, desenvolvido pela Alstom, utiliza tecnologia "Atlas 400 ETCS Nível 2+". O texto faz comparações acerca da inovação alemã com os projetos de monotrilho em São Paulo, evidenciando a longevidade e adaptabilidade desse modelo de transporte (VIATROLEBUS, 2015).

3.Referência:

Alemanha renova frota de monotrilho suspenso. 2015. Disponível em:
<https://viatrolebus.com.br/2015/11/alemanha-renova-frota-de-monotrilho-suspenso/>
Acesso em: 30 dez. 2024.

ANEXO D – Resumo de Referências Online

1.Título:

“Schwebebahn de Wuppertal: um sistema de trânsito centenário”

2.Conteúdo:

O Schwebebahn de Wuppertal, na Alemanha, é um metrô suspenso pioneiro, inaugurado em 1901, que se tornou símbolo da cidade. Com 13 km de extensão e 20 estações, o sistema percorre grande parte de seu trajeto a 12 metros de altura, cruzando o rio Wupper e operando com tecnologia ETCS Nível 3, que elimina a necessidade de detectores de trilho convencionais.

Cada trem comporta 200 passageiros por carro, com operação eficiente que transporta mais de 65.000 pessoas/dia. O sistema é reconhecido por sua confiabilidade, evitando engarrafamentos e problemas com neve ou folhas nos trilhos. Após um longo fechamento em 2019 para modernização (o maior desde a Segunda Guerra Mundial), o Schwebebahn retomou as operações com novos trens e sinalização digital fornecidos pela Alstom.

Além de sua função urbana, o monotrilho atrai turistas e entusiastas ferroviários, destacando-se por suas estações arquitetônicas e pela experiência única de "voar" sobre a cidade, descrita poeticamente como uma viagem nas costas de um "Dragão de Aço" (AMANTES DA FERROVIA, [s.d.]).

3.Referência:

AMANTES DA FERROVIA. Schwebebahn de Wuppertal: Um sistema de trânsito centenário. [s.d.]. Disponível em:

<https://amantesdaferrovia.com.br/blog/schwebebahn-de-wuppertal-um-sistema-de-transito-centenario>

Acesso em: 30 dez. 2024.

ANEXO E – Resumo de Referências Online

1.Título:

“Que fim levou o projeto do monotrilho de Manaus?”

2.Conteúdo:

A reportagem aborda o projeto não implementado do monotrilho de Manaus, inserido no contexto de obras públicas não concluídas no Brasil pré-Copa de 2014. Proposto pelo governador do Estado, o projeto foi orçado em R\$ 1,4 bilhões e previa 10 trens de seis carros em um trajeto de 20 km, executado por um consórcio com CR Almeida, Mendes Junior, Serveng e a malásia Scomi Rail. Em 2013, a Justiça Federal cancelou a licitação a pedido do MPF, seguindo o mesmo destino da Linha 17-Ouro (SP) e da Linha 18-Bronze (SP-SBC), que também envolviam a Scomi (VIATROLEBUS, 2022).

3.Referência:

VIATROLEBUS. *Que fim levou o projeto do monotrilho de Manaus?* 2022.

Disponível em:

<https://viatrolebus.com.br/2022/07/que-fim-levou-o-projeto-do-monotrilho-de-manaus/>

Acesso em: 26 nov. 2024.