

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
ENG. DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

**THALLES AUGUSTO MAIA GOMES -
00278186**

**AUTOMÓVEL EM MINIATURA
OPERADO REMOTAMENTE COM
RESPOSTA VIBROTÁTIL E DE
IMAGENS**

Porto Alegre
2024

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
ENG. DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

THALLES AUGUSTO MAIA GOMES -
00278186

**AUTOMÓVEL EM MINIATURA
OPERADO REMOTAMENTE COM
RESPOSTA VIBROTÁTIL E DE
IMAGENS**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC-CCA)
apresentado à COMGRAD-CCA da Universi-
dade Federal do Rio Grande do Sul como parte
dos requisitos para a obtenção do título de *Ba-
charel em Eng. de Controle e Automação* .

ORIENTADOR:

Prof. Dr. Marcelo Götz

Porto Alegre
2024

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
ENG. DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

THALLES AUGUSTO MAIA GOMES -
00278186

**AUTOMÓVEL EM MINIATURA
OPERADO REMOTAMENTE COM
RESPOSTA VIBROTÁTIL E DE
IMAGENS**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para a obtenção dos créditos da Disciplina de TCC II do curso *Eng. de Controle e Automação* e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: _____

Prof. Dr. Marcelo Götz, UFRGS

Doutor pela Universität Paderborn - Paderborn, Alemanha

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Marcelo Götz, UFRGS

Doutor pela Universität Paderborn - Paderborn, Alemanha

Prof. Dr. Aurélio Tergolina Salton, UFRGS

Doutor pela Universidade de Newcastle – Newcastle, Austrália

Prof. Dr. Rafael Antônio Comparsi Laranja, UFRGS

Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, Brasil

Alceu Heinke Frigeri
Coordenador de Curso
Eng. de Controle e Automação

Porto Alegre, Fevereiro 2024

RESUMO

A demanda por equipamentos que, ao utilizar métodos digitais, sejam capazes de atuar no meio físico - como a operação remota de dispositivos ou experiências imersivas em videogames, por exemplo - promove o desenvolvimento e avanço tecnológico no que diz respeito a sistemas ciber-físicos. Na procura de novos progressos para este tipo de sistema, este trabalho realiza o projeto de um automóvel versátil em miniatura, e de seu sistema operacional em tempo real, capaz de receber comandos de dois dispositivos diferentes e de realimentar o usuário com imagens ou estimulação tátil. Desse modo, desenvolve-se uma arquitetura que permite o operador guiar remotamente o automóvel, utilizando um controle de comunicação Bluetooth, enquanto a vibração sofrida pelo automóvel é, proporcionalmente, estimulada em suas mãos; e também controle através de um *smartphone* compatível com Wi-Fi capaz de enviar comandos e receber, constantemente, imagens captadas pelo pequeno automóvel. O sistema ciber-físico desenvolvido é validado através da montagem de um protótipo capaz de executar todas as funções projetadas com performance satisfatória.

Palavras-chave: Engenharia de Controle e Automação, Embarcados, Resposta Vibrotátil, Sistema Ciber-Físico, Vídeo, Eletrônica e Instrumentação.

ABSTRACT

The demand for equipment that, by utilizing digital methods, can operate in the physical realm - such as the remote operation of devices or immersive experiences in video games, for example - drives the development and technological advancement of cyber-physical systems. In the pursuit of new progress for this type of system, this work undertakes the design of a versatile miniature automobile and its real-time operating system capable of receiving commands from two different devices and providing the user with images or tactile stimulation. Thus, an architecture is developed that allows the operator to remotely guide the automobile using a Bluetooth communication controller, while the vibration experienced by the automobile is proportionally stimulated in their hands. Additionally, control is too achieved through a Wi-Fi-compatible smartphone capable of sending commands and constantly receiving images captured by the small automobile. The developed cyber-physical system is validated through the assembly of a prototype capable of executing all designed functions with satisfactory performance.

Keywords: Control and Automation Engineering, Embedded Systems, Haptic Feedback, Cyber-Physical Systems, Video and Electronics and Instrumentation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

1	Esboço renderizado do automóvel em miniatura.	8
2	Diagrama de blocos de um microcontrolador.	11
3	Sistema simplificado de um acelerômetro capacitivo uniaxial.	12
4	Diagrama geral da arquitetura.	14
5	Visão geral do ESP32-C3.	16
6	Visão geral do ESP32-CAM.	17
7	Controle sem fio de Xbox modelo 1914.	18
8	MPU-6050.	19
9	Kit Chassi 4WD.	20
10	Ponte H L298N.	21
11	Esquemático de ligação dos componentes.	22
12	Posição de baterias e motores.	23
13	Distribuição de tarefas entre os sistemas embarcados e seus núcleos. . .	24
14	Diagrama de decisão do envio de comandos via serial.	25
15	Posição dos eixos X e Z do acelerômetro em relação ao veículo.	27
16	Rotinas de processamento realizadas.	29
17	Protótipo com componentes montados.	30
18	Visão do <i>smartphone</i> do operador ao acessar a interface via Wi-Fi. . . .	31
19	Terreno I.	32
20	Terreno II.	33
21	Acelerações obtidas no Terreno I.	34
22	Acelerações obtidas no Terreno II.	34
23	Percentual de acionamento dos motores no Terreno II.	35

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	7
1.1	Objetivos	8
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	9
2.1	Resposta Vibrotátil.....	9
2.2	Bluetooth.....	9
2.3	Wi-Fi	10
2.4	UART.....	10
2.5	Microcontroladores para Sistemas Embarcados.....	11
2.6	Acelerômetro Capacitivo	12
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	14
3.1	Visão Geral da Arquitetura.....	14
3.1.1	Veículo	14
3.1.2	Smartphone	15
3.1.3	Controle	15
3.2	Sistemas Embarcados	15
3.2.1	ESP32-C3.....	16
3.2.2	ESP32-CAM	17
3.3	Controle Bluetooth.....	18
3.4	Medição de Acelerações	18
3.5	Projeto do Automóvel.....	19
3.5.1	Chassi e Motores.....	19
3.5.2	Ponte H	21
3.5.3	Alimentação.....	21
3.5.4	Esquemático.....	22
3.5.5	Fixação de Componentes	23
3.6	Sistema Operacional em Tempo Real.....	23
3.6.1	Divisão de Tarefas Entre Núcleos	24
3.6.2	Comunicação Entre Microcontroladores.....	24
3.6.3	Interface do <i>Smartphone</i>	26
3.6.4	Processamento de Resposta Vibrotátil.....	27
3.6.5	Rotinas de Processamento	28

4	RESULTADOS E AVALIAÇÕES	30
4.1	Interação pelo <i>Smartphone</i>	31
4.2	Interação pelo Controle Bluetooth	32
4.2.1	Aplicação de Resposta Vibrotátil	32
5	CONCLUSÕES	36
	REFERÊNCIAS	37
	APÊNDICES	41
	APÊNDICE A - CÓDIGO DESENVOLVIDO	42
	APÊNDICE B - VÍDEO DE DEMONSTRAÇÃO	43

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o avanço da tecnologia empregada em sensores, o aumento do poder computacional e a maior robustez alcançada com novos protocolos de comunicação possibilitaram que novas formas de interação homem máquina fossem alcançadas. Sistemas Ciber-Físicos, ou *Cyber-Physical Systems* (CPS), em inglês - em que meios digitais para controle de processos físicos são utilizados - fazem parte da contínua busca por interfaces de controle mais eficazes e amigáveis, que tem sido impulsionada pela demanda de uma melhor experiência de usuário e uso da tecnologia de forma inclusiva e acessível (DOS REIS; SANDMANN, 2018).

Os CPS representam uma convergência entre o mundo digital e o físico, integrando computação, comunicação e controle em sistemas do mundo real (TEMELKOVA, 2022). Essa interconexão possibilita a coleta, processamento e troca de dados em tempo real entre dispositivos digitais e entidades que operam fisicamente em um sistema. Em essência, os sistemas ciber-físicos transformam fundamentalmente a maneira como interagimos com o ambiente físico, possibilitando a simulação de ambientes, tomadas de decisão inteligentes e automação de processos (NARDELLI, 2022). Suas aplicações são vastas e podem abranger diversos setores, como manufatura, saúde, locomoção e até mesmo entretenimento.

Quando se trata de operar máquinas de risco, por exemplo, CPS são aplicados no controle realizado remotamente com retorno visual e dados de uma infinidade de sensores. Hoje, é possível de se realizar a operação de equipamentos de riscos no conforto de um escritório a quilômetros de distância, sem colocar pessoas em risco (M & T, 2022). Evitando assim possíveis fatalidades ou degradação a saúde causada pela exposição do ser humano à ambientes insalubres.

No ramo do entretenimento, por sua vez, houve um crescimento tanto nas vendas, quanto na implementação de novas tecnologias ciber-físicas, como, por exemplo, em simulações virtuais (RESEARCH, 2023). O mercado de videogames conseguiu proporcionar que, através da implementação de retorno tátil, seja possível do usuário identificar o terreno no qual o seu personagem digital esta se locomovendo, o recuo provocado por armas em simuladores de tiro e até mesmo o esforço do personagem enquanto pula por plataformas. Hoje, também é possível de alguém em casa pilotar carros, no videogame, com o volante idêntico ao usado na IndyCar Series enquanto necessita exercer esforço para guiar o veículo em curvas (BELL, 2023).

Dada a importância do desenvolvimento de novos métodos de interação homem-máquina no avanço da tecnologia, otimização de processos, melhoria de qualidade de vida de trabalhadores e no ramo do entretenimento, é proposto neste trabalho um sistema ciber-físico que permita o usuário realizar o controle remoto de um automóvel em miniatura selecionando o método de operação mais adequado para a situação - entre dois disponíveis. O primeiro método deve proporcionar *feedback* háptico ao operador e controle mais preciso, enquanto que o segundo método realiza o controle básico e recebe retorno visual do equipamento. O trabalho inclui desde a seleção de componentes para a produção de um

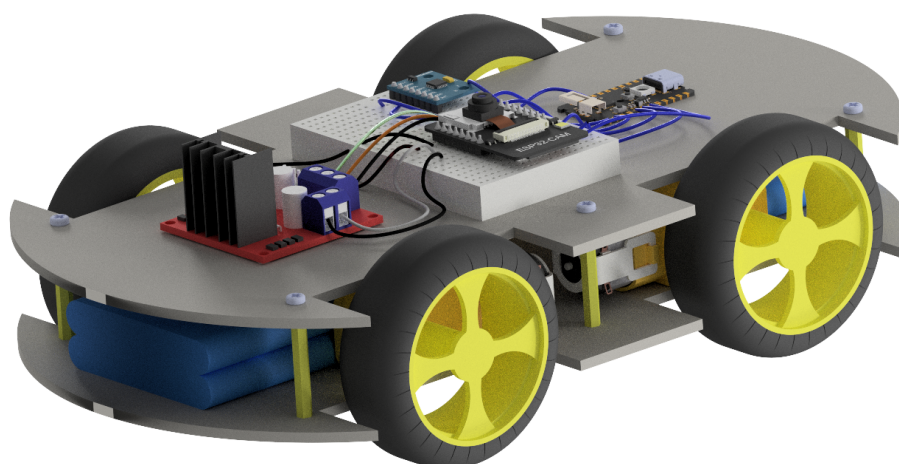
protótipo até o desenvolvimento do sistema operacional, percorrendo todas as etapas relevantes para sua concepção.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é o projeto e construção de um automóvel em miniatura capaz de ser operado remotamente, promover resposta vibrotátil e de imagens ao operador. O protótipo deve possuir apenas componentes comerciais, sem a exigência de retrabalhos, conforme esboço da Figura 1. De modo que, para tanto, são desenvolvidos os seguintes objetivos específicos:

- Definição de componentes, incluindo o controle a ser utilizado;
- Projeto e implementação do circuito de alimentação e de sinais do sistema;
- Desenvolvimento e implementação do sistema operacional, capaz de gerenciar todas as funções promovidas;
- Montagem da estrutura mecânica com motores e componentes eletrônicos;

Figura 1: *Esboço renderizado do automóvel em miniatura.*



Fonte: Autor

2 REVISÃO DE LITERATURA

Apresenta-se nesta seção uma breve descrição das tecnologias utilizadas durante o desenvolvimento do trabalho, seus principais conceitos e suas possíveis aplicações.

2.1 RESPOSTA VIBROTÁTIL

A resposta vibrotátil pode ser definida como a categoria que utiliza vibração e está contida no amplo termo em inglês *haptic feedback*, que refere-se ao estímulo proporcionado no ser humano através de sensações táteis. Ou seja, relaciona-se com sensações de toque como textura, pressão e vibração (BURDEA, 1999). Nos próximos parágrafos são citados trabalhos nos quais se utiliza a resposta vibrotátil como meio de transmitir informações.

No trabalho de Kaul e Rohs (2016), participantes utilizando óculos de realidade virtual são posicionados em uma arena com o objetivo de, digitalmente, selecionarem uma bola entre as demais ao longo de diversas rodadas. Uma bola objetivo é definida aleatoriamente no início de cada rodada e o participante; utilizando dicas sonoras do auditório, dicas visuais ou dicas vibracionais deve escolher a bola correta. Concluiu-se que o tempo para o participante escolher a bola correta utilizando dicas vibracionais foi consideravelmente menor em relação as dicas sonoras.

Utilizando uma bandana com 5 atuadores conectada a um aplicativo de GPS, Conte (2018) desenvolveu uma solução para guiar ciclistas durante o seu percurso com o uso de vibrações. Conforme a próxima etapa da rota se aproximava, os atuadores da bandana indicavam a direção correta sem que o ciclista precisasse desviar o seu olhar do trânsito para consultar o mapa no *smartphone*.

Por fim cita-se também o trabalho desenvolvido por Valério (2016), que projetou um dispositivo que pudesse auxiliar os alunos de um professor de música a aprender padrões rítmicos através de vibração. O dispositivo pode ser configurado de acordo com a música e tornava-se um guia dos próximos movimentos que deveriam ser realizado pelo aluno. Os alunos, em sua maioria, se divertiram durante sua utilização e notaram uma maior facilidade no seu aprendizado com o uso do auxílio.

2.2 BLUETOOTH

O Bluetooth é um protocolo de comunicação sem fio, de curta distância e que permite que dois - em sua versão clássica - ou mais - em sua iteração *Low Energy* - dispositivos diferentes troquem informações. A sua versão *Low Energy*, desenvolvida atualmente, permite topologias ponto a ponto, transmissão e malha; e seu espectro de frequência é dividido em 40 canais de 2,402 Ghz a 2,408 GHz distanciados de 2 MHz entre

si. O seu transporte de dados pode ser realizado de maneira síncrona, assíncrona a isócrona (GROUP, 2023).

A conexão entre os dispositivos da-se pela escolha do canal em que as informações serão trocadas pelo método de *frequency-hopping spread spectrum* (FHSS), em que um canal aleatório é selecionado para troca de informações e, caso não seja possível de ser realizada, os dispositivos trocam aleatoriamente para outro canal. Após o pareamento bem sucedido, os dispositivos se organizam em uma rede chamada piconet, na qual um dispositivo é eleito o mestre e passa a gerenciar a conexão com os demais dispositivos ou demais piconet's. A compatibilidade entre dispositivos com diferentes arquiteturas de *hardware* é promovida pelo emprego da *Host Controller Interface* (HCI), que realiza a tradução da comunicação do protocolo para os demais componentes do sistema (VERMA; SINGH; KAUR, 2015).

Atualmente, o Bluetooth é comumente utilizado para transmissão de áudio, imagens e dados em geral a uma taxa de até 3 Mbit/s. O protocolo possui retrocompatibilidade e o seu diferencial em relação aos demais protocolos de comunicação sem fio é o baixo consumo de energia, tornando-o ideal para ser utilizado em dispositivos alimentados por baterias (GROUP, 2023).

2.3 WI-FI

Wi-Fi é o nome comercial do protocolo de comunicação sem fio IEEE 802.11, utilizado em médias distâncias, de baixo custo relativo e com a maior velocidade de troca de dados entre os protocolos que dispensam cabos (KAVEH PAHLAVAN, 2020). Na sua última versão, 802.11be (Wi-Fi 7), o protocolo suporta frequências de operação de 2,4 GHz, 5 GHz e 6 GHz - com largura de banda ajustável - e velocidades de até 46 Gbit/s (KHOROV; LEVITSKY; AKYILDIZ, 2020).

A comunicação entre dispositivos que utilizam Wi-Fi é comumente realizada com o uso de um ponto de acesso, na qual é responsável por gerenciar e distribuir os pacotes trocados entre os dispositivos que estão em uma mesma rede (SHANG; WANG, 2022). O protocolo também prevê a comunicação ponto a ponto quando há interação entre apenas dois dispositivos e organização da rede em malhas para aplicações que necessitem de redes robustas.

O Wi-Fi é encontrado em bilhões de dispositivos, como celulares, computadores, câmeras de vídeo e até mesmo impressoras. Usualmente é utilizado para transmissão de texto, imagens, vídeos, proporcionar o acesso à internet aos dispositivos ou em casos onde há troca de um grande volume de dados como dito por Guo, Zhang e Xiao (2012). Hoje, o protocolo segue sendo atualizado e com uma participação ainda maior no dia-a-dia das pessoas do que há anos atrás (SA, 2023).

2.4 UART

O *Universal Asynchronous Receiver/Transmitter* (UART) é definido como um protocolo de comunicação assíncrono, o transmissor e o receptor da informação não compartilham um sinal de clock comum. O seu uso consiste na conversão de dados paralelos, comumente provenientes de uma *Central Processing Unit* (CPU), em dados seriais que permitam a transmissão por um meio físico formado por, pelo menos, 2 fios. A troca de dados pode ser realizada por apenas um dispositivo enviando informações ao outro (*simplex*), dois

dispositivos se comunicando de maneira alternada (*half-duplex*) ou dois dispositivos se comunicando concomitantemente (*full-duplex*) (DAWOUD; DAWOUD, 2020).

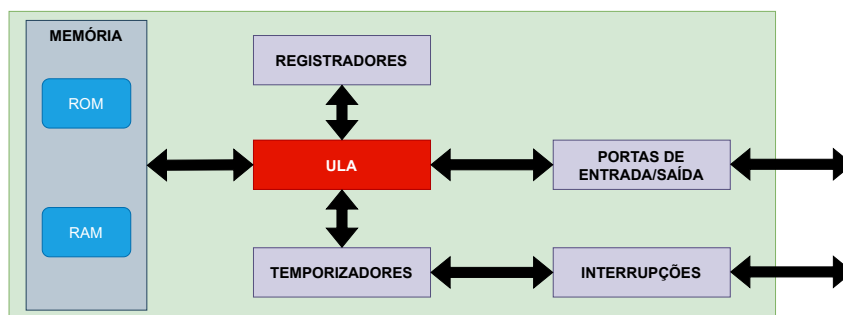
O protocolo permite a operação em diversos *baud rates* (número de bits transmitidos por segundo), 1200, 9600 e 115200 são exemplos de velocidades de operação para o envio de telegramas. O telegrama, por sua vez, é composto de 1 bit de início, bits de dados e um bit de paridade opcional para detecção de possíveis erros. Quanto aos seus níveis de tensão, estes são limitados pela tensão de operação do dispositivo em que o protocolo esta implementado. Dessa forma, pode-se adicionar transceptores ao circuito para ampliar a faixa de tensão de operação a fim de aumentar o alcance de transmissão como também diminuir o efeito de ruídos externos (SHREYAS RAO, 2021).

O UART é rotineiramente utilizado na troca de informações entre componentes internos em computadores de diferentes portes. Seja na aplicação militar, médica, comunicação ou controle industrial, o UART oferece uma forma de comunicação de configuração flexível e de baixo custo para comunicação serial (CAO; CHEN; LI, 2023).

2.5 MICROCONTROLADORES PARA SISTEMAS EMBARCADOS

Os sistemas embarcados, sistemas eletrônicos projetados para funções específicas de controle, monitoramento ou processamento de dados, comumente integrados a dispositivos como impressoras, máquinas de lavar, pequenos dispositivos de comunicação e motores com controle de posição; possui o microcontrolador como parte essencial de seu funcionamento. O microcontrolador, responsável pelo processamento dos dados, é formado por uma Unidade Lógica Aritmética (ULA), memória para programa (ROM) e para dados (RAM), temporizadores, registradores, geradores de sinais, portas de entrada e saída e, frequentemente, interfaces de comunicação. A combinação de componentes apresentada na Figura 2 representa um diagrama de blocos básico de um microcontrolador presente em um único chip, de dimensões reduzidas, com consumo energético inteligente e que proporciona flexibilidade e possibilidade de manutenção (PARAI; DAS; DAS, 2013).

Figura 2: Diagrama de blocos de um microcontrolador.



Fonte: Adaptado de Parai, Das e Das (2013)

Visto que os seus componentes internos podem mudar conforme fabricante e que aplicações diferentes possuem necessidades de processamento diferentes, uma gama de variações de microcontroladores podem ser encontradas no mercado. A sua classificação ocorre de acordo ao tamanho do barramento de dados - de 8 a 32 bits - pelo tipo de instrução recebida e até mesmo pela arquitetura usada para fabricação da memória. De maneira geral, divide-se os microcontroladores em quatro grandes famílias, com patentes geridas por fabricantes diferentes, são elas 8051, PIC, AVR e ARM (ELPROCUS, 2023).

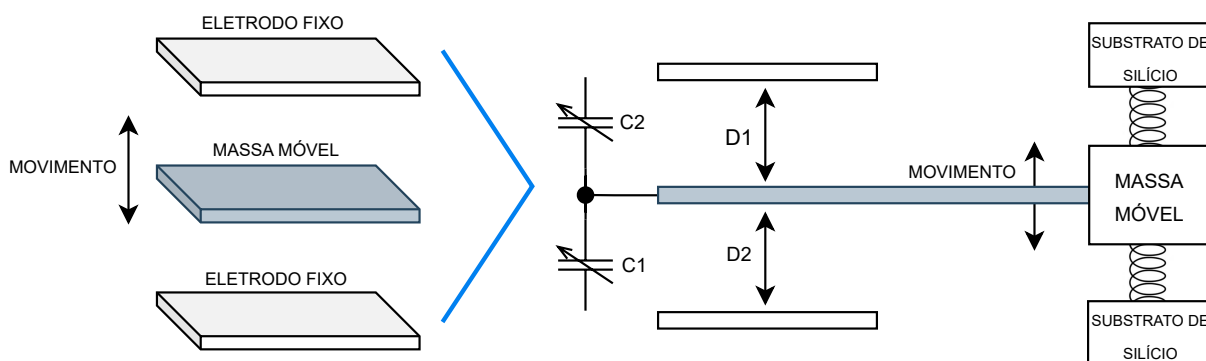
2.6 ACELERÔMETRO CAPACITIVO

O acelerômetro pode ser definido como o dispositivo capaz de medir a variação da velocidade de objetos ao longo do tempo, ou seja, a aceleração. O seu funcionamento baseia-se na Segunda Lei de Newton, na qual define a força (F) como sendo igual a massa de um objeto (m) multiplicado pela sua aceleração (a); assim, utilizando-se de um objeto de massa conhecida, mede-se a sua força resultante para obtenção da aceleração do objeto (WOODFORD, 2023).

$$F (N) = m (kg) \cdot a (m/s^2)$$

Por sua vez, acelerômetros capacitivos são dispositivos capazes de obter o valor da aceleração em que está submetido através da variação da capacitância de um sistema de placas, no qual placas de eletrodos são fixas e uma massa conhecida é movida entre elas caso submetida à força externa (DADAFSHAR, 2014). O seu sistema é exemplificado na Figura 3 de maneira simplificada.

Figura 3: Sistema simplificado de um acelerômetro capacitivo uniaxial.



Fonte: Adaptado de Dadafshar (2014)

A operação do sensor consiste na medição das variações de capacitâncias - associadas as acelerações esperadas - causadas pelo movimento da massa móvel entre os eletrodos. Variações que podem ser relacionadas com a distância percorrida pela massa móvel através da definição de capacitância (C), em que ε_0 é a permissividade no vácuo, ε_r é a permissividade do material entre placas, A é a área sobreposta entre placas e d é a distância entre placas.

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{A}{d}$$

Dessa forma, obtém-se a associação da Tabela 1 que descreve a relações entre capacitâncias esperadas ao ocorrer movimento na massa móvel.

Tabela 1: Relação de capacitâncias associadas à distância entre placas.

Relação entre distâncias	Relação entre capacitâncias
$D1 > D2$	$C1 < C2$
$D1 < D2$	$C1 > C2$
$D1 = D2$	$C1 = C2$

Fonte: Adaptado de Dadafshar (2014)

Para o caso de acelerômetros capacitivos triaxiais, podem ser constituídos da soma de 3 sensores uniaxiais posicionados perpendicularmente entre si ou do arranjo de que, com uma única massa, seja possível mensurar o seu movimento nos 3 eixos.

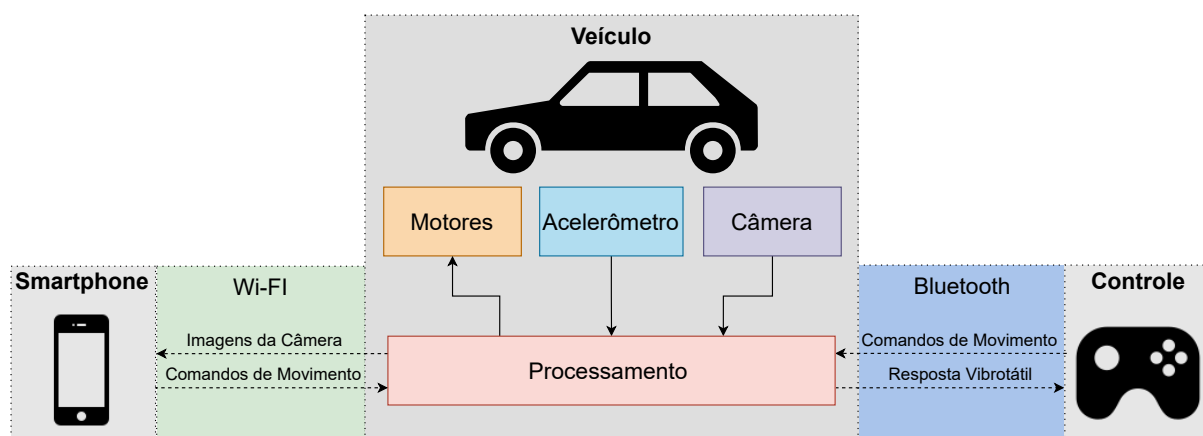
3 MATERIAIS E MÉTODOS

No presente capítulo apresenta-se a visão geral da arquitetura, o embasamento teórico para a escolha dos componentes utilizados, a descrição do uso das tecnologias, o desenvolvimento do sistema operacional e os procedimentos adotados para a realização do trabalho, visando fornecer uma compreensão clara e abrangente do projeto realizado.

3.1 VISÃO GERAL DA ARQUITETURA

A arquitetura desenvolvida neste trabalho é capaz de gerenciar comandos recebidos remotamente por um controle ou por um smartphone, enviar imagens obtidas por uma câmera ao smartphone, acionar os motores do automóvel, realizar a leitura de um acelerômetro e proporcionar resposta vibrotátil ao operador do controle. A Figura 4 demonstra sua estrutura básica e indica o uso de Wi-Fi e Bluetooth para a realização da comunicação sem fio entre os aparelhos, visto que o objeto controlado é móvel e o uso de fios pode limitar o seu uso.

Figura 4: Diagrama geral da arquitetura.



Fonte: Autor

Conforme observado na Figura 4, pode-se dividir a importância do sistema em três blocos com funções distintas:

3.1.1 Veículo

O veículo é o bloco central do sistema pois toda a informação trafega pelo dispositivo de processamento fixado em seu chassi; além de que a câmera e acelerômetro colhem

informações durante o seu uso. O veículo é apto a movimentar-se de maneira autônoma enquanto acolhe os demais componentes necessários em seu chassi. Ou seja, o torque fornecido pelos motores é capaz de retirar o peso do chassi e componentes da inércia e mover o veículo de dimensões reduzidas.

3.1.2 Smartphone

O *smartphone*, por sua vez, conecta-se em uma aplicação e envia comandos para movimentar o automóvel e também recebe as imagens em tempo real captadas pela câmera acoplada ao carrinho. O volume de dados em uma transmissão de imagens em tempo real exige um protocolo de comunicação sem fio que permita uma velocidade suficientemente rápida para que a troca de informações ocorra sem entraves, assim, opta-se pelo uso do Wi-Fi para realização da transferência de dados com o *smartphone*.

Por mais que outros dispositivos além de um *smartphone* sejam capazes de comunicar-se por Wi-Fi e acessar a aplicação - como computadores, *tablets* e até videogames - utiliza-se o celular neste trabalho por ser uma peça de tecnologia bem difundida entre a população mundial (BANKMYCELL, 2023).

3.1.3 Controle

O controle é o meio em que o operador pode enviar comandos precisos para conduzir o carrinho e também é capaz de sentir em suas mãos a resposta vibrotátil enquanto há movimento do acelerômetro fixo à estrutura do automóvel. O controle possui motores desbalanceados capazes de replicar o comportamento da curva de aceleração do carrinho e comunicar-se via Bluetooth - a fim de diminuir o consumo energético e ampliar seu tempo de uso, visto que os dados transmitidos não serão de alta complexidade, comparado à imagens (VERMA; SINGH; KAUR, 2015).

3.2 SISTEMAS EMBARCADOS

Ao considerar-se as características da arquitetura e sabendo-se que é desejável que ela seja de baixo custo e de fácil replicabilidade, sistemas embarcados comerciais tornam-se alternativas para o processamento dos dados. Os sistemas embarcados como Arduino, ESP32 e NodeMCU são encontrados no mercado nacional para venda, possuem documentação disponível na internet e preço acessível em comparação ao custo de desenvolvimento de placas customizadas (DUTRA, 2023).

Dentre as alternativas apresentadas, o sistema a ser escolhido necessita de poder computacional para processamento local, pinos para leitura do acelerômetro, comunicação Bluetooth e Wi-Fi, compatibilidade com - ou possuir - módulo de câmera e ainda manter uma eficiência energética suficiente para que a carga das baterias não seja drenada. Além disto, visto que o automóvel tem dimensões reduzidas, o sistema de processamento também não pode ser maior que o chassi do carrinho. Dessa forma, descarta-se o uso do Arduino por necessitar de módulo externo para comunicação sem fio e câmera - o que geraria aumento de custos no projeto e complexidade na fixação dos componentes - além de possuir o menor poder de processamento entre as três opções apresentadas. O NodeMCU, por sua vez,

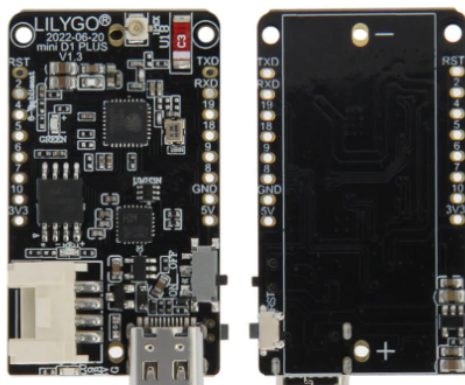
não possui compatibilidade com o protocolo Bluetooth e o seu poder de processamento é inferior ao encontrado no ESP32 (o que pode dificultar o processamento de imagens em tempo real).

Logo, nesse cenário, define-se o módulo de desenvolvimento ESP32 como a alternativa mais completa dentre as apresentadas por possuir em uma única placa comunicação Bluetooth, Wi-Fi, maior poder de processamento e baixo custo relativo. Porém, visto que a complexidade da arquitetura a ser projetada necessita também de uma câmera, a pouca quantidade de pinos da plataforma ESP32 fomenta o uso de duas placas para o prosseguimento do projeto. Cita-se também a impossibilidade do uso da comunicação Bluetooth e Wi-Fi simultaneamente no ESP32, devido ao seu único módulo de rádio frequência disponível (ESPRESSIF, 2023a), como um problema a ser contornado. Escolhe-se então a variante ESP32-C3 para realizar a comunicação com o controle Bluetooth - pela disponibilidade de Bluetooth LE 5.0 - e a iteração ESP32-CAM - por possuir um módulo de câmera embutido - para captação de imagem e efetuar a comunicação Wi-Fi.

3.2.1 ESP32-C3

A variante ESP32-C3 destaca-se pela sua compatibilidade com Bluetooth LE 5.0 e disponibilidade de modelos customizados. Utilizou-se no trabalho o módulo produzido por LILYGO (2023) visto na Figura 5.

Figura 5: Visão geral do ESP32-C3.



Fonte: LILYGO (2023)

Suas demais características são (LILYGO, 2023):

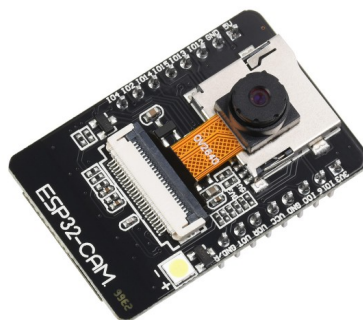
- Processador 32-bit RISC-V com clock de até 160 MHz;
- 4 MB de memória flash e 384 kB de memória ROM;
- 400 kB de memória SRAM;
- Compatibilidade com IEEE 802.11 b/g/n como ponto de acesso, cliente ou ambos;
- 12 canais digitais disponíveis;
- Sensor de temperatura;

- Dois conversões analógico-digital de 12 bits;
- Compatibilidade com UART, SPI, I2C e I2S;
- Presença de Bluetooth 5.0 e Bluetooth Mesh.

3.2.2 ESP32-CAM

Por sua vez, o ESP32-CAM - Figura 6 - evidencia-se pela presença do módulo de câmera acoplado em seu corpo, suporte para cartão SD e pela necessidade de utilização de uma placa conectada aos seus pinos para a realização da programação via cabo USB. Além disso, nota-se que, apesar de possuir uma antena embutida em seu corpo, o ESP32-CAM possibilita a adição de uma antena externa para comunicação sem fio em maiores distâncias. Para o desenvolvimento do projeto, adiciona-se uma antena externa de +3 dBi.

Figura 6: *Visão geral do ESP32-CAM.*



Fonte: WAVESHARE (2023)

Também cita-se como suas características (WAVESHARE, 2023):

- Processador de 32-bit Xtensa LX6 de dois núcleos com clock de até 240 MHz;
- 4 MB de memória flash e 448 kB de memória ROM;
- 520 kB de memória SRAM;
- Suporte para câmera OV2640 e OV7670;
- Compatibilidade com IEEE 802.11 b/g/n como ponto de acesso, cliente ou ambos;
- Presença de Bluetooth 4.2;
- Compatibilidade com UART, SPI, I2C e I2S;
- 12 canais digitais disponíveis.

3.3 CONTROLE BLUETOOTH

Há uma variedade de controles com comunicação Bluetooth disponíveis no mercado (LIVRE, 2023). Porém, para aplicação de resposta vibrotátil, controles comumente utilizados em videogames tornam-se interessantes por exercerem esta mesma função em jogos simuladores de corrida (ARGUELLO, 2020). Dessa forma, verifica-se os atributos de três controles oficiais de consoles disponíveis no mercado, que são: DualSense do PlayStation 5 (PLAYSTATION, 2023), Xbox Series Controller do Xbox Series (MICROSOFT, 2023) e o Pro Controller do Nintendo Switch (NINTENDO, 2023).

Ao comparar as funcionalidades em comum disponíveis nos controles, pode-se perceber a presença de motores de vibração em todos os modelos, além de preços e fatores de forma similares. Quanto as diferenças, o controle DualSense se destaca pela presença de gatilhos adaptáveis que podem fornecer diferentes níveis de tensão conforme demanda da aplicação, alimentação com bateria e presença de uma área sensível ao toque. O controle de Xbox é notável pela presença de motores de vibração nos gatilhos, alimentação realizada por pilhas e por possuir bibliotecas que permitam o uso com a plataforma ESP32. Por fim, o Pro Controller é alimentado por baterias e possui funcionalidade de leitura de RFID.

Desse modo, o controle escolhido para ser utilizado no veículo é o controle sem fio de Xbox - Figura 7 - do modelo 1914 e *firmware* de versão 5.13.3143.0. Sustenta-se a escolha por possuir 4 motores de vibração controlados individualmente - dois posicionados nos gatilhos e dois posicionados nas manoplas - e, especialmente, por possuir bibliotecas que permitam o uso com o ESP32. Além disso, a sua alimentação por pilhas promove uma maior eficiência no uso do automóvel visto que o tempo para substituição de pilhas é menor que o tempo de carregamento de baterias.

Figura 7: Controle sem fio de Xbox modelo 1914.



Fonte: Microsoft (2023)

3.4 MEDIÇÃO DE ACELERAÇÕES

A fim de proporcionar uma resposta vibrotátil fidedigna, ou seja, que o padrão de intensidade de vibração aplicada ao operador seja similar aos movimentos executados pelo automóvel, um acelerômetro com resolução suficiente se faz necessário. Dessa forma, analisa-se três possíveis soluções para utilização no projeto, que são os acelerômetros de modelo: MMA7361L, ADXL335 e MPU-6050. Os três modelos possuem fator de forma similares, preços semelhantes e medição de aceleração triaxial, suas diferenças são notadas nas distintas faixas de operação e funcionalidades extras.

O MMA7361L é capaz de medir valores de aceleração de $\pm 6 g$, possui tensão de alimentação de 2,2 V até 3,6 V, a sua leitura é fornecida via saídas analógicas e a sua faixa linear de frequência é de até 400 Hz para o eixo X e Y e até 300 Hz para o eixo Z (NXP, 2008). O acelerômetro ADXL335 é capaz de realizar leituras de $\pm 3 g$, possui tensão de alimentação de 1,8 V até 3,6 V, a sua leitura também é fornecida por pinos analógicos e a sua faixa linear de frequência é de 1600 Hz para o eixo X e Y e de 550 Hz para o eixo Z (DEVICES, 2023). Por fim, o modelo MPU-6050 mede valores de até $\pm 16 g$, é alimentado de 2,4 V até 5 V, a leitura é fornecida via barramento I2C, pode captar dados a uma taxa de 4 a 1000 Hz com a capacidade de adicionar um filtro passa baixa configurável de 5 a 260 Hz e também possui giroscópio e termômetro embarcados (MICROWAT, 2023).

Nesse caminho, o sensor escolhido é acelerômetro capacitivo MPU-6050 pela sua comunicação poder ser realizada pelo protocolo I2C - compatível com a plataforma ESP32 - a fim de diminuir a suscetibilidade à influência de ruídos nas medições em relação a pinos analógicos. Outro fator importante é a presença de um regulador de tensão interno de 3,3 V, o que possibilita uma faixa de alimentação maior de até 5 V, promovendo maior segurança no seu funcionamento. Por fim, a presença de giroscópio e termômetro permite a adição de melhorias futuras ao projeto sem a necessidade de troca de componente ou incremento no custo de material. A Figura 8 ilustra o componente utilizado.

Figura 8: MPU-6050.



Fonte: Microwat (2023)

3.5 PROJETO DO AUTOMÓVEL

Para o desenvolvimento do automóvel, optou-se pela utilização de itens prontos para uso e disponíveis comercialmente por acelerar a execução do projeto ao diminuir o tempo gasto em fabricação e facilitar o processo de reposição, caso necessário. Desta maneira, as próximas subseções exploram a definição dos componentes presentes no que tange ao automóvel e a sua movimentação.

3.5.1 Chassi e Motores

Para a escolha do chassi, primeiramente defini-se alguns requisitos que devem ser cumpridos. O chassi precisa ser suficientemente leve pois como novos componentes são adicionados não deve-se provocar um esforço excessivo nos motores, devido ao acréscimo de peso. Necessita também conter furações para fixação dos novos itens e facilitar o roteamento de fios. Por fim, é desejável que o chassi já seja disponibilizado com rodas que caibam no espaçamento da carroceria para que possíveis retrabalhos em sua forma sejam evitados.

Obteve-se então o denominado Kit Chassi 4WD por possuir o chassi produzido em madeira, massa total de 470 g, 4 motores DC 3 a 6 V com caixa de redução 48:1, 4 rodas emborrachadas, 4 discos de *encoder*, suporte para 4 pilhas AA e conjunto de parafusos e porcas. A Figura 9 exhibe os itens adquiridos.

Figura 9: *Kit Chassi 4WD.*



Fonte: ML (2023)

Após a definição de chassi e motores, deve-se verificar a massa total suportada pelo conjunto durante a operação, visto que novos componentes são adicionados. Em outras palavras, estima-se - com base no torque fornecido pelos motores - o máximo valor de massa que os motores são capazes de retirar da inércia e manter em movimento. Seguindo a abordagem apresentada por Larminie e Lowry (2012), realiza-se uma aproximação simplificada com base na Segunda Lei de Newton, desconsiderando perdas. Desse modo, a Equação 1 demonstra que o torque dos motores (τ) está relacionada diretamente ao momento de inércia (I_m) e a sua aceleração angular (α).

$$\tau = I_m \alpha \quad (1)$$

Assim, considerando o momento de inércia para um anel que rotaciona em torno de um eixo central e que m é a massa a ser estimada, r é o raio das rodas e γ é a relação do diferencial acoplado aos motores, pode-se estimar, de maneira simplificada, a massa máxima conforme a Equação 2.

$$m = \frac{\tau \gamma}{\alpha r^2} \quad (2)$$

Logo, ao saber de que o raio da roda utilizada vale 34 mm, a relação da caixa de redução é de 48:1, de que o torque de partida é estipulado como a soma dos torques disponíveis de 16,67 gfcM por motor e definindo-se - baseado no alcance da velocidade média obtida por carrinhos de brinquedo rádio controlados de 6 m/s (WELLS, 2024) em aproximadamente 2 segundos - uma aceleração mínima de 3 m/s², tem-se a massa máxima de operação estimada de aproximadamente 3,08 kg.

$$m = 3,08 \text{ kg}$$

Nota-se porém que, devido a estrutura mecânica do chassi, não é possível a realização de curvas com os 4 motores acionados no mesmo sentido. Dessa forma, estipula-se o limite teórico aproximado para a massa máxima embasado no acionamento de apenas dois motores de uma lateral para a realização de curvas, ou seja, limita-se em $m/2$.

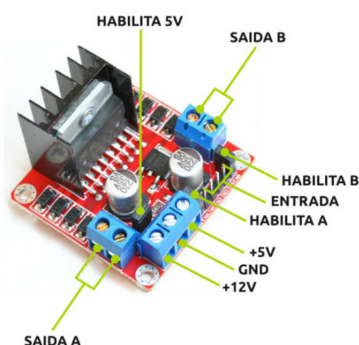
3.5.2 Ponte H

No sentido de possibilitar o movimento do carrinho para frente, para trás, para esquerda e para direita faz-se necessário o uso de um circuito que permita a inversão do sentido de rotação dos motores. Comumente conhecido como ponte H, o circuito do tipo *chopper* - conversor de corrente contínua com nível de tensão fixo para corrente contínua com nível de tensão variável - formado por 4 chaves permite o controle da velocidade de rotação dos motores por modulação de largura de pulso como também a inversão do sentido da corrente que os alimenta (CHEN; LI, 2022). Cita-se como possíveis opções de ponte H para uso no projeto os modelos comerciais de ponte completa L298N, HG7881 e BTS7960.

De modo a verificar as características de cada modelo, cita-se que o L298N possui duas saídas com controle de velocidade (via modulação por largura de pulso) e de sentido de rotação para uso em motores com consumo de corrente de até 2 A por saída, a tensão de operação é de 7 a 30 V e também está presente no componente um regulador de tensão responsável por fornecer uma saída com tensão de 5 V (DIGITAL, 2023a). O modelo HG7881 é equipado com duas saídas DC com possibilidade de ajuste de velocidade para motores, com consumo de corrente de até 800 mA por canal, e tensão de alimentação de 2,5 V até 12 V (DIGITAL, 2023b). Por fim, o modelo BTS7960 é capaz de alimentar uma saída DC para motor com consumo de corrente de até 43 A, sua tensão de alimentação é de 6 a 27,5 V e o controle de velocidade do motor é realizado via modulação de largura de pulso de uma entrada de tensão para controle de 3,3 a 5 V (TECHNOLOGIES, 2004).

Dessa forma, elege-se o módulo de ponte H L298N da Figura 10 para o projeto devido sua capacidade de controle de duas saídas DC e pela presença do regulador de tensão de 5 V. Assim, é possível realizar a alimentação dos demais dispositivos do sistema sem a adição de demais componentes para ajuste de alimentação. Além disso, a sua saída de 2 A por canal é suficiente, com folga, para a alimentação de dois motores DC utilizados.

Figura 10: Ponte H L298N.



Fonte: Digital (2023a)

3.5.3 Alimentação

Na procura por estabelecer uma alimentação adequada para o circuito, inicia-se pela verificação das necessidades de tensão e corrente dos componentes - fornecidos na planilha de dados de cada fabricante. Dessa forma, considera-se a tensão de alimentação

típica de cada componente e o seu consumo máximo de corrente na condição de operação para a obtenção da estimativa de consumo energético da Tabela 2.

Componente	Potência (W)	Tensão (V)
ESP32-C3	1,1	5
ESP32-CAM	1,55	5
Módulo Lógico (L298N)	0,18	5
MPU-6050	2,5 m	5
4 Motores DC	28,8	6
Total	31,63	

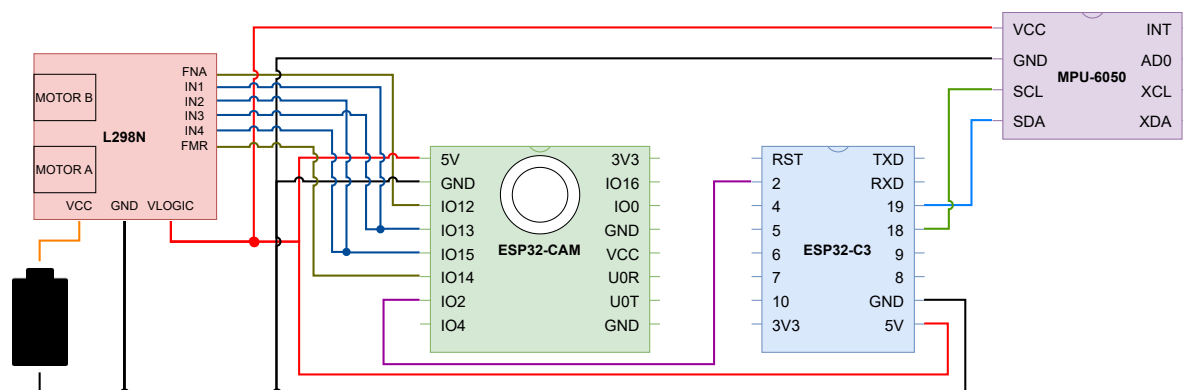
Tabela 2: Consumo energético máximo e tensão de alimentação dos componentes.

Após verificação da estimativa de consumo energético, nota-se que apesar do kit de chassi e motores ser disponibilizado com suporte para pilhas, 4 pilhas AA não são suficientes para a alimentação total do circuito, pois podem fornecer até 4,8 V caso conectadas em série - tensão insatisfatória para o correto funcionamento dos componentes. Desse modo, três baterias de Li-ion com 3,7 V e 3600 mA h cada, conectadas em série, foram propostas como solução de alimentação do circuito. As baterias em série podem fornecer, com folga, a tensão de alimentação dos componentes - visto que atingem, nominalmente, 11,1 V - e armazenam uma energia total de aproximadamente 40 W h. Assim, espera-se obter tensão suficiente para a alimentação de todos os componentes do circuito e de que seja possível energiza-los por, pelo menos, uma hora.

3.5.4 Esquemático

Tratando-se de parte fundamental para compreensão e implementação prática do projeto, o esquemático da Figura 11 mostra, de maneira simplificada, como é dada a conexão de todos os componentes presentes no circuito.

Figura 11: Esquemático de ligação dos componentes.



Fonte: Autor

De maneira geral, o pacote de baterias é responsável pela alimentação completa do circuito, enquanto que o regulador de tensão presente na ponte H se encarrega de adequar a alimentação para o sensor e sistemas embarcados. Todos seguem o mesmo referencial,

denominado GND, e destaca-se que o circuito integrado L298N promove uma queda de tensão de 2 V, da entrada em relação as suas saídas utilizadas na alimentação dos motores, durante a sua operação.

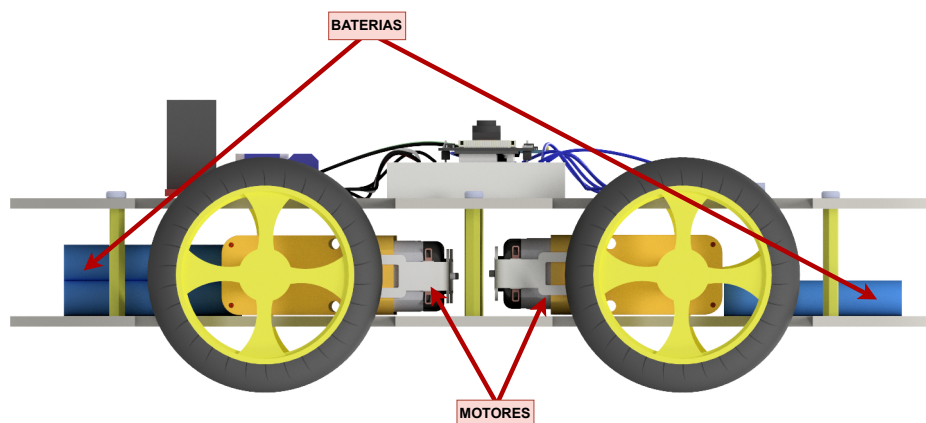
Para o controle de rotação dos motores, o ESP32-CAM utiliza os pinos denominados IO12 e IO14 na habilitação de movimento e controle de velocidade - via modulação por largura de pulso - dos motores; enquanto que os seus pinos IO13 e IO15 definem o sentido de rotação. Além disso, o pino IO2 é conectado ao segundo sistema embarcado do projeto, o ESP32-C3, em seu pino 2 para que haja comunicação entre os microcontroladores.

Por fim, a placa de desenvolvimento ESP32-C3 é conectada aos pinos SCL e SDA do acelerômetro MPU-6050 pelos seus pinos compatíveis com o protocolo I2C (19 e 18) a fim de que a troca de informações entre eles seja realizada.

3.5.5 Fixação de Componentes

Visto que o chassi escolhido já conta com furações para fixação de componentes, opta-se pela utilização de cintas plásticas e fitas adesivas de dupla face no posicionamento dos elementos na estrutura do protótipo. O protótipo necessita de um roteamento de cabos realizados de maneira a se evitar desconexões durante o uso diante de que o seu circuito é interconectado com o uso de placa de prototipagem e os circuitos integrados são presos apenas à lâmina de madeira superior. Baterias e motores são fixados na parte interior do chassi, conforme a vista lateral da Figura 12, de maneira a aproximar o centro de massa do solo e possibilitar pontos de ancoragem dos componentes nas duas chapas.

Figura 12: Posição de baterias e motores.



Fonte: Autor

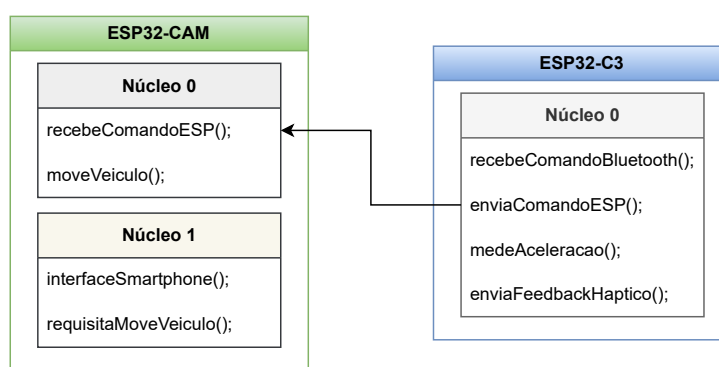
3.6 SISTEMA OPERACIONAL EM TEMPO REAL

Em um contexto onde há a necessidade de resposta com determinismo temporal e tarefas paralelizadas, o desenvolvimento de um sistema operacional em tempo real exerce um papel fundamental nas métricas de desempenho e assertividade das capacidades do projeto. O código completo do sistema operacional desenvolvido está disponível no Apêndice A de forma a permitir aos interessados o uso e contribuição para aperfeiçoamento contínuo do projeto. Esta seção centra-se na análise e exploração do sistema operacional desenvolvido, além de aspectos relacionados a otimização e interação eficaz entre o sistema e os demais componentes.

3.6.1 Divisão de Tarefas Entre Núcleos

O desenvolvimento de um sistema operacional em tempo real permite uma distribuição manual de recursos computacionais na execução de tarefas, além da definição de temporizações. Ou seja, com o uso da biblioteca de sistema operacional em tempo real para embarcados disponível gratuitamente - FreeRTOS - é possível de se fixar funções a serem executadas apenas em um determinado núcleo do microcontrolador (FREERTOS, 2023b). Dessa forma, aloca-se recursos conforme demanda de processamento e poder computacional do ESP32 utilizado, de acordo com o diagrama da Figura 13.

Figura 13: Distribuição de tarefas entre os sistemas embarcados e seus núcleos.



Fonte: Autor

Sabendo-se que processamento de imagens é conhecido pelo consumo considerável de recursos computacionais (KIM; HYUN; MOON, 2020), a execução da tarefa responsável pela comunicação Wi-Fi e envio de imagens é então alocada a um núcleo do ESP32-CAM pela maior performance bruta disponível - dada as frequências de operação mais altas em relação ao microcontrolador do ESP32-C3. Dessa forma, o núcleo é capaz de realizar a comunicação sem fio e, conforme demanda do usuário, requisitar ao outro núcleo presente no ESP32-CAM que movimente o veículo. Visto a presença de dois núcleos no ESP32-CAM, é possível de se compartimentar o processamento de forma que o núcleo 0 seja responsável inteiramente pela comunicação com o ESP32-C3, tratamento de comandos e movimento do veículo.

Por fim, aloca-se os recursos disponíveis no ESP32-C3 para processar o modo de operação utilizando o controle Bluetooth. Dessa forma, as funções responsáveis pela captação de comandos executados pelo controle Bluetooth, medição de acelerações do veículo, envio de feedback háptico ao operador e comunicação com o ESP32-CAM são realizadas em seu único núcleo.

3.6.2 Comunicação Entre Microcontroladores

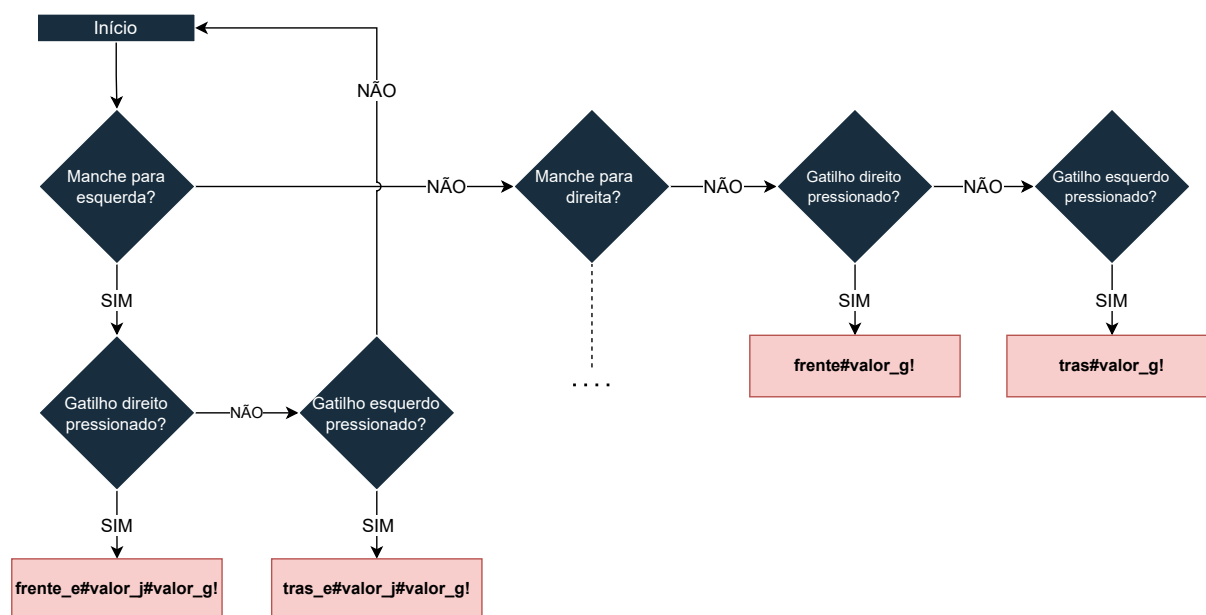
Pela análise da divisão de tarefas apresentadas, nota-se a necessidade de troca de informações entre os microcontroladores para que todas as capacidades do veículo sejam executadas. Em outras palavras, define-se um protocolo de comunicação com fios, visto que as duas placas de desenvolvimento estão com suas antenas já em trabalho, capaz de fornecer uma conexão confiável e rápida o suficiente para que a latência no

envio de informações não seja percebida pelo usuário durante a operação. O protocolo de comunicação UART é definido para a citada atividade pela compatibilidade com os dois dispositivos, possibilidade de uso de apenas um fio para comunicação *simplex* - visto que as duas placas já compartilham o mesmo plano de terra - e implementação prevista para uso na plataforma ESP32 (ESPRESSIF, 2023b). Utiliza-se a sua configuração de *baud rate* em 115200 bps, tamanho do pacote de 8 bits, sem bit de paridade e apenas 1 bit de parada.

Definido o protocolo de comunicação, define-se então a expectativa do que é enviado pelo ESP32-C3 e o que é recebido pelo ESP32-CAM. Conforme mencionado, o ESP32-C3 é encarregado de lidar com as operações que envolvem a comunicação Bluetooth e *feedback* háptico, mas sem realizar, diretamente, o acionamento dos motores. Logo, a mensagem precisa informar ao ESP32-CAM todos os dados necessários para que o correto movimento do carrinho ocorra. Ou seja, que os movimentos sejam representativos ao que está sendo requisitado pelo operador. Dessa forma, enviam-se pacotes de informação do tipo sequência de caracteres que sejam capazes de informar o botão pressionado e o quão pressionado está - para o caso de botões analógicos. Com a presença de um bloco de comando delimitado pelo caractere "#", seguido pelo valor contido para botão analógico terminado pelo caractere "#" e a possibilidade - ou não - de um segundo valor analógico; o comando é então finalizado pelo caractere de marcação "!".

O diagrama da Figura 14 exemplifica a lógica da tomada de decisão realizada para o envio de comandos. Por exemplo, no primeiro caso inicia-se pela verificação de movimento lateral do manche do controle e, caso positivo, armazena o seu sinal analógico na variável de nome "valor_j"; segue com a verificação de pressão nos gatilhos que, caso também positivo, é armazenada na variável de nome "valor_g"; que então é acrescida a *string* de comando "frente_e" para envio em um único pacote conforme descrito nos blocos em vermelho no diagrama. Dessa forma, o ESP32-CAM é capaz de, ao receber o telegrama, identificar os valores de pressão nos botões e inferir a intenção do operador para realizar o correto acionamento dos motores.

Figura 14: Diagrama de decisão do envio de comandos via serial.



Fonte: Autor

3.6.3 Interface do Smartphone

A interface para o controle do automóvel via conexão Wi-Fi - projetada nesse caso para uso em um *smartphone* - é capaz de fornecer imagens captadas pelo veículo, atualizada constantemente, ao operador e permite que o mesmo conduza o automóvel em miniatura com o toque de botões virtuais. A interface é desenvolvida utilizando a linguagem de marcação de textos *web Hyper Text Markup Language* (HTML), a linguagem de estilização de páginas *web Cascading Style Sheets* (CSS) e a linguagem de programação interpretada JavaScript. O corpo do código responsável pela interação é demonstrado na Listagem 1.

Listagem 1: Corpo do código da interface acessada pelo *smartphone*.

```

1 <body>
2 <h1>VIDEO & CONTROLE</h1>
3 <!-- Mostrar imagem captada: -->
4 <div id="video-container">
5     <img src="" id="photo">
6 </div>
7 <!-- Adicionar os botoes para controle do veiculo: -->
8 <div id="controls">
9     <div id="joystick-container">
10        <button class="arrow-button" ontouchstart="toggleCheckbox('esquerda');"
11        ontouchend="toggleCheckbox('parar');">&#8592;</button>
12        <button class="arrow-button" ontouchstart="toggleCheckbox('direita');"
13        ontouchend="toggleCheckbox('parar');">&#8594;</button>
14        <div id="control-buttons">
15            <button class="arrow-button" ontouchstart="toggleCheckbox('acelerar');"
16            ontouchend="toggleCheckbox('parar');">&#8593;</button>
17            <button class="arrow-button" ontouchstart="toggleCheckbox('retroceder');"
18            ontouchend="toggleCheckbox('parar');">&#8595;</button>
19        </div>
20    </div>
21 </div>
22 <script>
23     <!-- Evento do comando pressionado pelo operador: -->
24     function toggleCheckbox(x) {
25         var xhr = new XMLHttpRequest();
26         xhr.open("GET", "/action?go=" + x, true);
27         xhr.send();
28     }
29     <!-- Atualizacao da referencia src com nova imagem capturada: -->
30     window.onload = document.getElementById("photo").src = window.location.href.slice
31     (0, -1) + ":81/stream";
32 </script>
33 </body>

```

Fonte: Autor

O código da interface, após a definição de título, inicia estabelecendo uma divisão chamada "video-container" na página, responsável por exibir a imagem - de identificação "photo" - armazenada. A origem da imagem é atualizada ininterruptamente pelas instruções em JavaScript, que alteram a imagem de referência para a versão mais atual captada pela câmera acoplada ao ESP32-CAM.

Após, tem-se uma segunda divisão - "controls" - que delimita os botões que estarão presentes na interface e as funções no qual são responsáveis. São definidos 4 botões com

identificações correspondentes a seta para esquerda, seta para direita, seta para cima e seta para baixo. Esses botões são capazes de disparar a execução de uma função na rotina JavaScript que informa ao sistema operacional a requisição HTTP realizada, ou seja, qual o botão pressionado. Dessa forma, o código executa a função atribuída ao botão no momento em que é pressionado e, no momento em que for solto, solicita que os motores sejam desativados.

O acesso à interface dá-se pela conexão dos dois aparelhos - ESP32-CAM e *smartphone* - na mesma rede Wi-Fi e, posteriormente, digitação no campo de endereços de um navegador de internet do dispositivo móvel o endereço local atribuído ao microcontrolador na rede em que está conectado. Deste modo, o vídeo é então exibido em tempo real ao operador pela exibição de uma imagem estática que é constantemente atualizada enquanto os botões de ação ficam disponíveis ao usuário.

3.6.4 Processamento de Resposta Vibrotátil

Visto que o perfil de vibração do automóvel em terrenos com diferentes relevos pode ser distinto e sabendo-se que os motores de vibração do controle de Xbox podem ser acionados de 0 a 100% de sua potência. Definem-se funções em que, ao indicar o valor da aceleração obtida, retorna-se um valor equivalente para a potência a ser aplicada, considerando que o maior valor de aceleração obtido promova a vibração máxima permitida pelo controle. Optou-se por utilizar funções exponenciais para facilitar a diferenciação de maiores oscilações entre a média. Desse modo, a Equação 3 calcula a potência aplicada para descrever a aceleração no eixo X (P_x), onde A_x é a aceleração em X, g_{ex} é um ganho exponencial para o eixo X e g_{lx} é um ganho linear para o eixo X; e a Equação 4 determina a potência para descrever a aceleração no eixo Z (P_z), onde g_{ez} é um ganho exponencial para o eixo Z, g_{lz} é um ganho linear para o eixo Z e A_z é a aceleração obtida em Z, que deve ser descontada da aceleração da gravidade. Nota-se que os valores para os ganhos devem ser ajustados conforme a aplicação do carrinho, ou seja, os terrenos que são percorridos.

$$P_x = g_{lx}|(A_x)^{g_{ex}}| \quad (3)$$

$$P_z = g_{lz}|(A_z - 9,81)^{g_{ez}}| \quad (4)$$

De maneira a promover ao operador a capacidade de diferenciação de movimentos provenientes da aceleração dos motores dentre as acelerações de consequência do relevo de terrenos, definiu-se que os motores presentes nos gatilhos do controle Bluetooth estão relacionados com a aceleração no eixo X, enquanto que os motores das manoplas relacionam-se ao eixo Z. Dessa forma, toma-se o cuidado no posicionamento do acelerômetro, em que os eixos são alinhados ao veículo conforme a Figura 15 para que facilite a obtenção de suas acelerações individualmente.

Figura 15: Posição dos eixos X e Z do acelerômetro em relação ao veículo.



Fonte: Autor

Dessa forma, a rotina realizada pelo ESP32-C3 vista na Listagem 2, recebe o lado do gatilho a ser ativo, identifica os motores vibracionais que devem ser acionados, comunica com o MPU-6050 para obtenção dos valores atuais das acelerações, substitui nas equações de potência e, por fim, aplica à alimentação dos motores desbalanceados do controle a potencia proporcional a aceleração sofrida pelo automóvel.

Listagem 2: Trecho de código C para envio de retorno vibrotátil ao controle de Xbox.

```

1 void retornoVibrotatil(bool lado){
2     // lado: direito = true / esquerdo = false
3     vibracao_manopla = true;
4     vibracao_manopla_sacudir = true;
5     tempo_vibracao_ms = 10;
6     vibracao_manopla_potencia = round(abs(pow((aceleracao_z()-9.81),Gez)*Glz));
7     vibracao_manopla_sacudir_potencia = vibracao_manopla_potencia;
8
9     if(lado){
10        vibracao_gatilho_esquedo = false;
11        vibracao_gatilho_direito = true;
12        vibracao_gatilho_direito_potencia = round(pow(abs(aceleracao_x()),Gex)*Glx);
13    } else {
14        vibracao_gatilho_esquerdo = true;
15        vibracao_gatilho_direito = false;
16        vibracao_gatilho_esquerdo_potencia = round(pow(abs(aceleracao_x()),Gex)*Glx);
17    }
18    enviaVibracaoControle();
19 }

```

Fonte: Autor

3.6.5 Rotinas de Processamento

Em um estado de projeto em que tem-se definido o comportamento e método de execução de cada função do sistema, individualmente, trabalha-se para garantir a harmonia na execução das tarefas realizadas concomitantemente. O sistema operacional em tempo real é capaz de auxiliar na execução dessa atividade com a definição de sequências de instruções independentes que podem, ou não, se relacionar entre si para o atingimento de um objetivo maior - as chamadas filas (FREERTOS, 2023a). O uso de filas no sistema desenvolvido permite a redução de latência, ao garantir que as tarefas críticas sejam tratadas prontamente - sem a necessidade de esperar por outras não relacionadas - e o compartilhamento eficiente de recursos entre tarefas, utilizando de maneira inteligente os núcleos de processamento disponíveis. Dessa forma, opta-se compartimentar em filas o trabalho realizado pelos microcontroladores do projeto. Assim, aproveita-se a vantagem de implementação e teste de filas de maneira individual, além de que torna-se possível a definição de prioridades entre as tarefas realizadas.

Para o ESP32-C3, uma única fila é capaz de gerenciar todas suas funções visto que possuem um comportamento sistemático e definidos em etapas subsequentes. A comunicação com o controle de Xbox inicia-se pelo pareamento Bluetooth - em que o ESP32-C3 é configurado para sua maior potência de emissão de rádio frequência (+9 dBm) - que inicia a varredura a procura de dispositivos com endereço físico similar ao característico de controles de Xbox que estejam abertos à conexão. Após o pareamento, o ESP32-C3 da

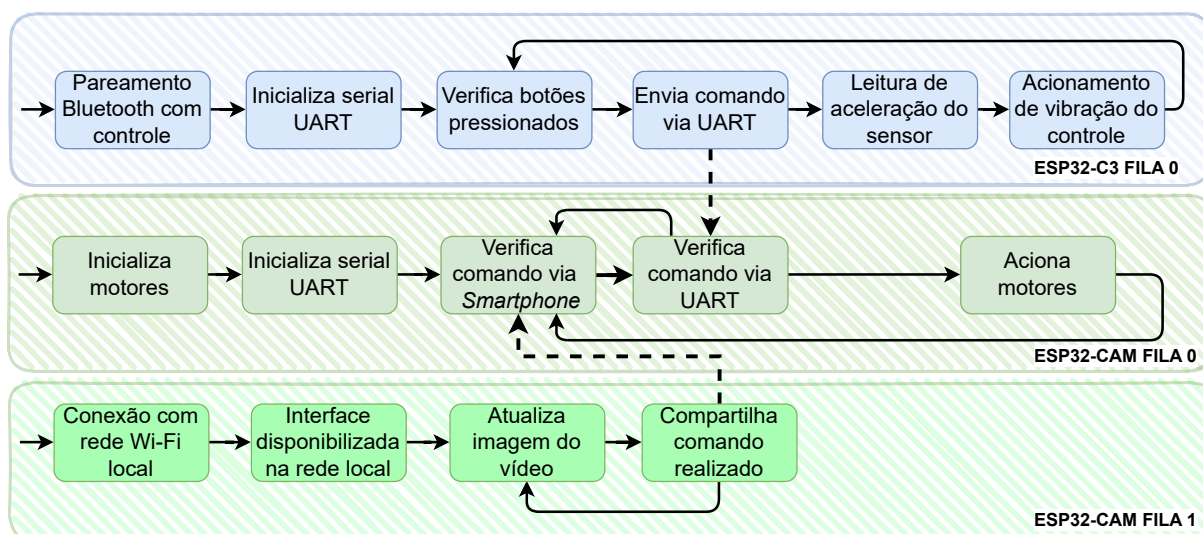
imediatamente continuidade a sua tarefa de alta prioridade no sistema, responsável pela leitura dos comandos enviados pelo controle e transmissão dos dados via UART. A tarefa realiza um laço onde ocorre a varredura dos sinais esperados para os botões do controle e, caso um dos botões previstos sejam pressionados, sua respectiva função é transmitida como instrução ao ESP32-CAM.

Considerando o segundo núcleo do ESP32-CAM, o núcleo 1, consta a fila de média prioridade com a habilidade de, após estabelecer a conexão com a rede local via Wi-Fi, promover a interface ao *smartphone* com todas as capacidades anteriormente citadas. A sequência de tarefas passa por manter a comunicação Wi-Fi, atualizar a imagem demonstrada ao operador na interface enquanto informa à *thread* do núcleo 0 se algum comando foi realizado pelo usuário, para que ações sejam tomadas.

Enfim, para o núcleo 0 presente no ESP32-CAM, é definida uma fila de alta prioridade responsável pela verificação e tratamento (de maneira ininterrupta) de comandos enviados pelas demais filas do sistema. A rotina implementada parte de um laço capaz de verificar se há um comando pendente em uma das possíveis origens - interface do *smartphone* via compartilhamento de informação ou controle Bluetooth via comunicação serial - para, em seguida, verificar o formato do comando em si e então, finalmente, realizar a ação desejada pelo operador. Assim, pretende-se poupar o tempo de processamento causado pela verificação de comandos, em momentos onde não há necessidade, a fim de diminuir o tempo de resposta quando um comando é enviado subitamente. Além disso, de maneira a evitar intertravamentos ou possíveis problemas causados pela possibilidade de comandos serem realizados pelo *smartphone* e controle Bluetooth simultaneamente, elege-se as interações efetuadas via *smartphone* como prioritárias no controle do sistema - devido a maior disponibilidade de informações do ambiente ao operador para embasar a tomada de decisões.

A Figura 16 é capaz de demonstrar a ordem em que informações são processadas por cada fila presente no sistema, desde o seu início até o momento em que o laço de repetição passa a ser realizado. As flechas com linha tracejada indicam os momentos de troca de informações entre as filas.

Figura 16: Rotinas de processamento realizadas.



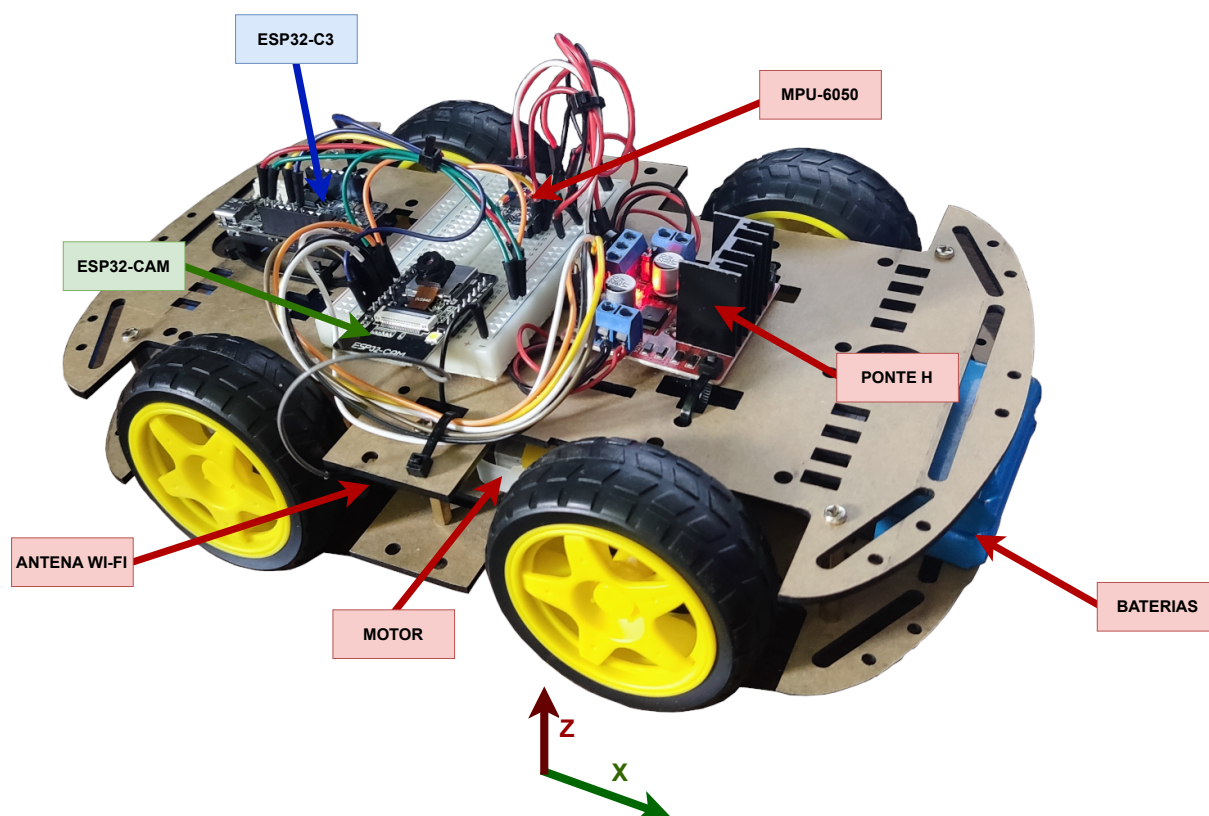
Fonte: Autor

4 RESULTADOS E AVALIAÇÕES

Este capítulo narra as experiências que abrangem a avaliação dos métodos de interação propostos e o sistema operacional em tempo real desenvolvido, em que experimentos fundamentais para verificar a funcionalidade, eficiência e responsividade do sistema são realizados.

A construção do protótipo deu-se pela montagem de todos os componentes planejados e a realização da fixação no chassi conforme a Figura 17.

Figura 17: Protótipo com componentes montados.



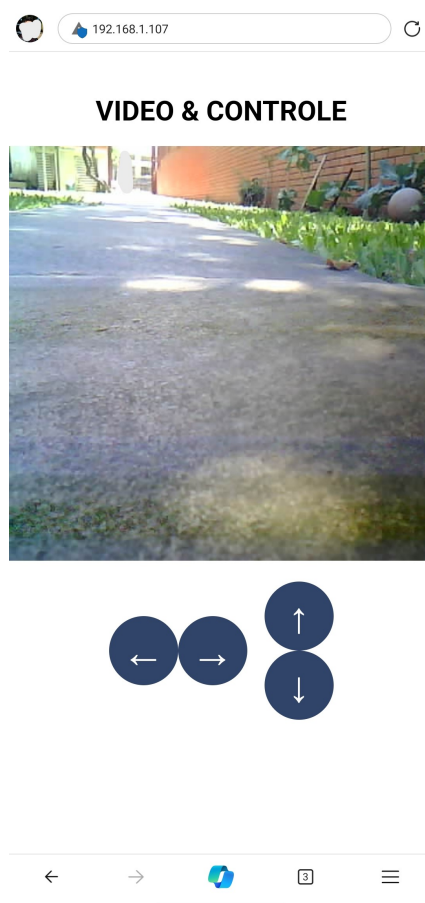
Fonte: Autor

A sua massa final é de aproximadamente 750 g e é capaz de atingir acelerações (promovidas pelos motores), em terreno plano, de até 4 m/s^2 . Quanto ao seu custo, o valor total gasto com material para a fabricação do protótipo foi de aproximadamente R\$ 282,00. No Apêndice B é possível encontrar o conjunto de vídeos demonstrativos que proporcionam uma visualização em campo das funcionalidades do automóvel em miniatura.

4.1 INTERAÇÃO PELO *SMARTPHONE*

No intuito de avaliar o método de interação pelo *smartphone* proposto, o autor se conectou ao endereço local fornecido ao ESP32-CAM - 192.168.1.107, para este caso - utilizando o seu celular e pode verificar a interface planejada, como visto na Figura 18. A interface ajustou-se corretamente ao tamanho de tela e resolução do *smartphone* e exibiu, em tempo real, o vídeo captado pela câmera do carrinho, como também os botões virtuais para controle de operação do automóvel.

Figura 18: Visão do *smartphone* do operador ao acessar a interface via *Wi-Fi*.



Fonte: Autor

Quanto a movimentação do automóvel, o operador foi capaz de comandar os seus movimentos sem atrasos perceptíveis de comunicação e com resposta visual à ativação do botão na interface (com a mudança de suas cores). Além disso, o carrinho mantém as suas habilidades em percorrer todas as direções do plano paralelo ao solo visto que os botões laterais promovem o movimento giratório em 360 graus.

As especificações técnicas do *smartphone* utilizado para o teste da interface incluem processador de oito núcleos de 2,96 *Ghz*, 6 GB de memória RAM, tela de 6,67 polegadas de resolução 1080 x 2400 pixels e sistema operacional Android 12.

4.2 INTERAÇÃO PELO CONTROLE BLUETOOTH

A fim de que a comunicação serial entre os microcontroladores e o algoritmo de movimentação desenvolvido seja validado, efetua-se o teste de operação do automóvel utilizando o controle de Xbox como método de entrada. Dessa forma, realiza-se o pareamento dos dispositivos Bluetooth e verifica-se a operabilidade ao enviar comandos para que o automóvel movimente-se em diversas direções, velocidades e sentidos. Constata-se que os comandos são enviados e tratados corretamente, ou seja, o operador possui pleno controle de todo o deslocamento do automóvel. Acrescenta-se a ausência de atraso perceptível ao operador entre o envio de comandos e a sua execução enquanto o veículo e o controle estiverem a uma distância de até 10 metros entre si - em ambiente aberto - e a fila responsável pelo processamento dos comandos possuir alta prioridade no sistema.

4.2.1 Aplicação de Resposta Vibrotátil

A fim de aplicar-se uma resposta vibrotátil autêntica ao operador, procura-se entender o perfil de vibração sofrido pelo automóvel durante a sua operação para efetuar a definição dos ganhos lineares e exponenciais dos eixos X e Z da Equação 3 e Equação 4, respectivamente. Para isso, utiliza-se o automóvel em dois terrenos com relevos diferentes enquanto realiza-se o armazenamento das acelerações obtidas pelo sensor de aceleração.

O Terreno I - Figura 19 - trata-se de uma superfície plana, levemente inclinada, com poucos acidentes ou buracos.

Figura 19: *Terreno I.*



Fonte: Autor

Em contrapartida, o Terreno II - Figura 20 - é formado por pedras basálticas desalinhadas, capim, tampa de bueiro e demais imperfeições.

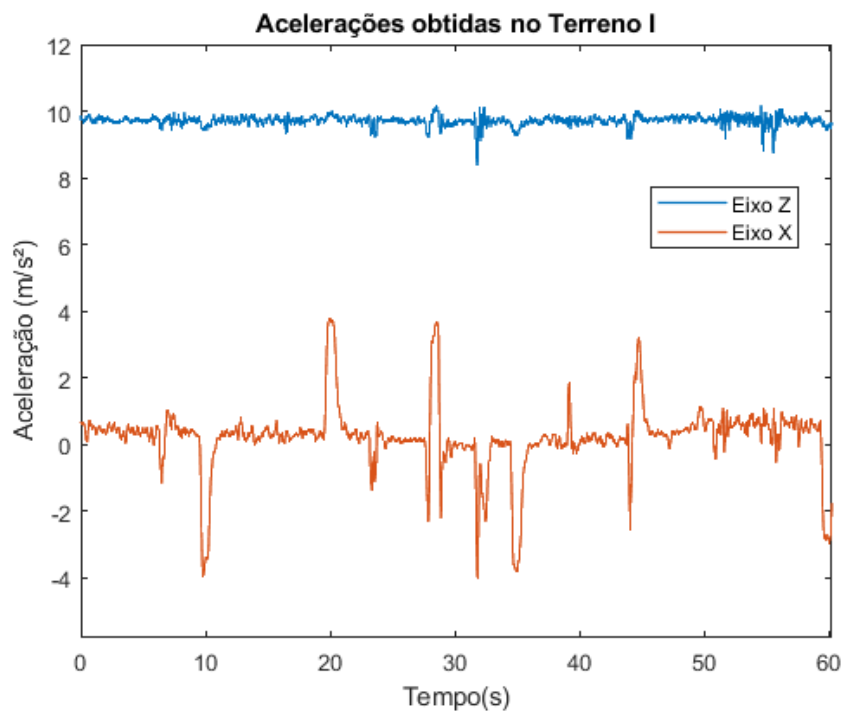
Figura 20: *Terreno II.*

Fonte: Autor

Percorre-se então o Terreno I e Terreno II, com padrão de movimentação aleatório por aproximadamente 60 segundos, enquanto efetua-se a aquisição de dados do acelerômetro com frequência de amostragem configurada para 100 Hz . Após, aplica-se um filtro de média móvel com janela de 15 amostras para remoção possíveis ruídos de medição e plota-se os gráficos das acelerações obtidas no tempo para análise. Lembrando que o eixo Z, por estar posicionado perpendicularmente ao solo - conforme a Figura 15 -, deve medir o valor igual a aceleração da gravidade, quando em repouso, de aproximadamente 9.81 m/s^2 .

As acelerações obtidas no Terreno I - Figura 21 - demonstram uma variação máxima de aproximadamente $\pm 1\text{ m/s}^2$ no eixo Z em relação a gravidade, o que pode ser considerado ruído de medição devido a sua magnitude. Ao comparar as acelerações obtidas no eixo Z com as obtidas no eixo X, é possível relacionar que as maiores oscilações ocorrem em momentos em que o automóvel troca o sentido de movimento. Ou seja, no momento em que o carrinho estava indo à frente e, bruscamente, começou a retroceder. O movimento é capaz de provocar acelerações de até $\pm 4\text{ m/s}^2$ no eixo X.

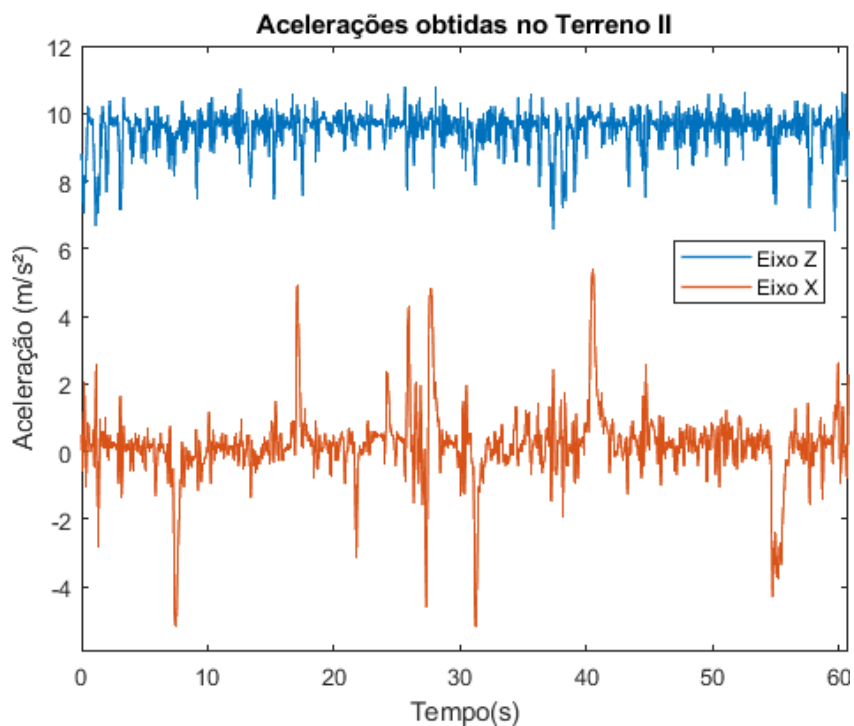
Figura 21: Acelerações obtidas no Terreno I.



Fonte: Autor

No entanto, as acelerações do automóvel ao percorrer o Terreno II - Figura 22 - demonstra um diferente padrão, com variações mais significativas e mais presentes. No eixo Z, nota-se variações de $\pm 3 \text{ m/s}^2$ em relação a gravidade; além, o eixo X sofreu variações de aproximadamente $\pm 5 \text{ m/s}^2$ nos momentos de troca brusca de sentido de movimento.

Figura 22: Acelerações obtidas no Terreno II.



Fonte: Autor

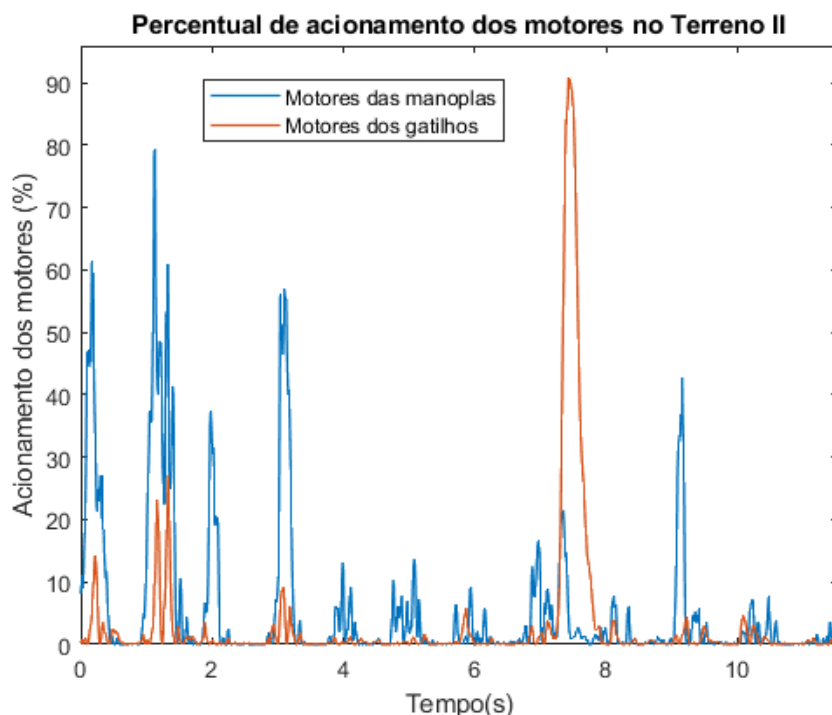
Logo, com base nas vibrações obtidas nos terrenos apresentados, pode-se definir os ganhos das equações de cálculo de potências à serem aplicadas nos motores do controle Bluetooth. Verifica-se os picos de aceleração e, utilizando eles, ajusta-se os os ganhos de forma a não se obter uma saturação no acionamento dos motores antes do maior valor de aceleração obtido e nem uma sub utilização dos motores. Assim, para que a faixa de potência abranja todos os valores de aceleração obtidos experimentalmente, define-se os ganhos conforme a Equação 5 para a potência do eixo X e a Equação 6 para a potência do eixo Z.

$$P_x = 3,4|A_x^2| \quad (5)$$

$$P_z = 7,9|(A_z - 9,81)^2| \quad (6)$$

Ao efetuar a aplicação das equações de ganho calculadas aos valores de aceleração medidos para o caso mais significativo, ou seja, para o Terreno II, as curvas de acionamento dos motores da Figura 23 são obtidas. Nota-se que, para melhor compreensão, limita-se a exibição do ganho para os valores de aceleração obtidos nos primeiros 10 segundos do percurso.

Figura 23: Percentual de acionamento dos motores no Terreno II.



Fonte: Autor

Após a definição e implementação das equações, o operador é capaz de perceber as discontinuidades do terreno basáltico através da vibração exercida pelo controle durante testes. Ademais, o contraste entre o perfil de vibração dos terrenos e a aceleração exercida pelo carrinho ao iniciar ou parar bruscamente um movimento também é perceptível devido ao comportamento dos motores de vibração.

5 CONCLUSÕES

Foi proposto neste trabalho o desenvolvimento de um sistema ciber-físico, provido de um sistema operacional em tempo real, capaz de proporcionar dois métodos de interação intercambiáveis à um automóvel em miniatura controlado remotamente. O projeto atingiu sucesso por permitir que o usuário possa pilotar o automóvel utilizando um controle Bluetooth, apto a proporcionar *feedback* háptico ao operador, ou um *smartphone* com a habilidade de receber imagens transmitidas pelo automóvel enquanto é capaz de também conduzir o veículo.

A interação realizada via Bluetooth proporcionou um controle responsivo na condução do automóvel ao não apresentar atrasos perceptíveis - ao operador - de comunicação, durante a operação, a uma distância entre automóvel e operador de até 10 metros. O método de operação tornou possível a representação de acidentes geográficos e demais imperfeições dos terrenos percorridos através do padrão de vibração executado pelos motores do controle, além de permitir a identificação de acelerações e inclinações do mini automóvel.

O *smartphone* utilizado, por sua vez, foi capaz de realizar a condução do veículo - sem travamentos - enquanto recebe a imagem transmitida pela câmera acoplada ao automóvel. Atingiu-se a versatilidade de que um celular com navegador internet conectado a rede local possa acessar a aplicação que realiza o controle e promove a visualização da imagem captada pelo sistema embarcado.

A integração de tecnologias de diferentes propósitos, como Wi-Fi, Bluetooth e comunicação serial - aliadas ao sistema operacional desenvolvido - proporcionaram um sistema ciber-físico capaz de lidar com paralelismo de requisições e processamento de dados sem que haja problemas de comunicação ou deturpação de prioridades. Porém, apesar do sucesso do projeto proposto, possíveis extensões deste trabalho podem ser desenvolvidas. Mesmo que circuito projetado possua eficiência, pode-se eliminar a placa de prototipagem e diminuir o uso de fios com o projeto de uma única placa de circuito impresso com todos os componentes eletrônicos necessários. Além disso, cita-se como uma segunda opção, a exploração da possibilidade de conexão do sistema à internet a fim de possibilitar controle a maiores distâncias e conexão a redes de internet das coisas.

REFERÊNCIAS

- ARGUELLO, T. *Gran Turismo 7 PS5 Experience Will Be Closer To Driving A Real Car Than Ever*. [S.l.], 2020. Disponível em: <<https://screenrant.com/gran-turismo-7-ps5-haptic-feedback-graphics/>>. Acesso em: 12 fev. 2024.
- BANKMYCELL. *July 2023 Mobile User Statistics: Discover the Number of Phones in The World & Smartphone Penetration by Country or Region*. [S.l.], 2023. Disponível em: <<https://www.bankmycell.com/blog/how-many-phones-are-in-the-world>>. Acesso em: 31 jul. 2023.
- BELL, S. *Sim Racers Will Now Be Able To Race With The Same Steering Wheel As IndyCar Drivers*. [S.l.], 2023. Disponível em: <<https://www.carscoops.com/2023/01/sim-racers-will-now-be-able-to-race-with-the-same-steering-wheel-as-indycar-drivers/>>. Acesso em: 31 jul. 2023.
- BURDEA, G. Haptic Feedback for Virtual Reality. v. 2, jul. 1999.
- CAO, L.; CHEN, J.; LI, J. Working principle and application analysis of UART. In: 2023 IEEE 2nd International Conference on Electrical Engineering, Big Data and Algorithms (EEBDA). [S.l.: s.n.], 2023. P. 255–259. DOI: 10.1109/EEBDA56825.2023.10090571.
- CHEN, X.; LI, L. Study of DC chopper circuit based on MATLAB software. In: 2022 2nd International Conference on Electronic Information Engineering and Computer Technology (EIECT). [S.l.: s.n.], 2022. P. 83–86. DOI: 10.1109/EIECT58010.2022.00022.
- CONTE, G. F. Interface vibrotátil vestível para GPS, 2018.
- DADAFSHAR, M. Accelerometer and gyroscopes sensors: operation, sensing, and applications. *Maxim Integrated [online]*, 2014.
- DAWOUD, D.; DAWOUD, P. *Serial Communication Protocols and Standards*. [S.l.]: River Publishers, 2020. (River Publishers Series in Communications Series). ISBN 9788770221542. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=nj50zQEACAAJ>>.
- DEVICES, A. *Small, Low Power, 3-Axis 3g Accelerometer*. [S.l.], 2023. Disponível em: <<https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADX1335.pdf>>. Acesso em: 12 fev. 2024.
- DIGITAL, I. *Driver Motor Ponte H L298N para Arduino*. [S.l.], 2023a. Disponível em: <<https://www.institutodigital.com.br/produto/driver-motor-ponte-h-l298n/>>. Acesso em: 19 jul. 2023.
- DIGITAL, I. *Driver Ponte H Duplo HG7881*. [S.l.], 2023b. Disponível em: <<https://www.institutodigital.com.br/produto/driver-ponte-h-duplo-hg7881/>>. Acesso em: 12 fev. 2024.

- DOS REIS, I.; SANDMANN, H. *Interface Cérebro Computador: Uma nova fronteira para a Interação Homem-Máquina*, 2018.
- DUTRA. *Arduino Uno, ESP32 e Raspberry – Automação*. [S.l.], 2023. Disponível em: <<https://oficinadarobotica.com.br/arduino-uno-esp32-e-raspberry-automacao/>>. Acesso em: 5 set. 2023.
- ELPROCUS. *Microcontrollers Types & Their Applications*. [S.l.], 2023. Disponível em: <<https://www.elprocus.com/microcontrollers-types-and-applications/>>. Acesso em: 7 ago. 2023.
- ESPRESSIF. *RF Coexistence*. [S.l.], 2023a. Disponível em: <<https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32/api-guides/coexist.html#:~:text=%5B%E4%B8%AD%E6%96%87%5D-,Overview,to%20receive%20and%20transmit%20packets>>. Acesso em: 17 jul. 2023.
- ESPRESSIF. *Universal Asynchronous Receiver/Transmitter (UART)*. [S.l.], 2023b. Disponível em: <<https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32/api-reference/peripherals/uart.html?highlight=uart>>. Acesso em: 5 dez. 2023.
- FREERTOS. *Mastering the FreeRTOS Real Time Kernel*, 2023a.
- FREERTOS. *Real-time operating system for microcontrollers*. [S.l.], 2023b. Disponível em: <<https://www.freertos.org>>. Acesso em: 8 ago. 2023.
- GROUP, B. S. I. *Bluetooth Technology Overview*. [S.l.], 2023. Disponível em: <<https://www.bluetooth.com/learn-about-bluetooth/tech-overview/>>. Acesso em: 8 jul. 2023.
- GUO, Y.; ZHANG, S.; XIAO, D. Overview of Wi-Fi Technology, ago. 2012. DOI: 10.2991/iccas.2012.330.
- KAUL, O. B.; ROHS, M. HapticHead: 3D Guidance and Target Acquisition through a Vibrotactile Grid. *Proceedings of the 2016 CHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, 2016.
- KAVEH PAHLAVAN, P. K. Evolution and Impact of Wi-Fi Technology and Applications: A Historical Perspective, nov. 2020. DOI: 10.1007/s10776-020-00501-8.
- KHOROV, E.; LEVITSKY, I.; AKYILDIZ, I. F. Current Status and Directions of IEEE 802.11be, the Future Wi-Fi 7. *IEEE Access*, v. 8, p. 88664–88688, 2020. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2993448.
- KIM, J.; HYUN, J.; MOON, B. Low-cost Hardware Architecture for Integral Image Generation using Word Length Reduction. In: 2020 International SoC Design Conference (ISOC). [S.l.: s.n.], 2020. P. 119–120. DOI: 10.1109/ISOC50952.2020.9332974.
- LARMINIE, J.; LOWRY, J. *Electric Vehicle Technology Explained*. 2. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2012.
- LILYGO. *T-OI Plus*. [S.l.], 2023. Disponível em: <<https://www.lilygo.cc/products/t-oi-plus>>. Acesso em: 17 jul. 2023.
- LIVRE, P. V. *Os 10 melhores controles para celular de 2023: Ípega, GameSir e muito mais!* [S.l.], 2023. Disponível em: <<https://portalvidalivre.com/articles/2039>>. Acesso em: 27 nov. 2023.

- M&T, R. *Operação virtual de máquinas já é realidade*. [S.l.], 2022. Disponível em: <<https://revistamt.com.br/Materias/Exibir/operacao-virtual-de-maquinas-ja-e-realidade>>. Acesso em: 31 jul. 2023.
- MICROSOFT. *Controle sem Fio Xbox*. [S.l.], 2023. Disponível em: <<https://www.xbox.com/pt-BR/accessories/controllers/xbox-wireless-controller>>. Acesso em: 23 jul. 2023.
- MICROWAT. *Acelerometro E Giroscopio 3 Eixos Mpu-6050 Mpu6050*. [S.l.], 2023. Disponível em: <<https://www.microwat.com.br/arduino-prototipagem/modulos-e-componentes/acelerometro-e-giroscopio-3-eixos-mpu-6050-mpu6050>>. Acesso em: 24 jul. 2023.
- ML, C. *Kit Chassi 4wd Carro 4 Rodas Arduino*. [S.l.], 2023. Disponível em: <<http://surl.li/jggvv>>. Acesso em: 19 jul. 2023.
- NARDELLI, P. H. J. Applications. In: CYBER-PHYSICAL Systems: Theory, Methodology, and Applications. [S.l.: s.n.], 2022. P. 207–231. DOI: 10.1002/9781119785194.ch10.
- NINTENDO. *Controle Pro Nintendo Switch*. [S.l.], 2023. Disponível em: <<https://www.nintendo.com/pt-br/store/products/pro-controller/>>. Acesso em: 12 fev. 2024.
- NXP. *1.5g, 6g Three Axis Low-g Micromachined Accelerometer*. [S.l.], 2008. Disponível em: <<https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/MMA7361L.pdf>>. Acesso em: 12 fev. 2024.
- PARAI, M. K.; DAS, B.; DAS, G. An overview of microcontroller unit: From proper selection to specific application. *International Journal of Soft Computing and Engineering (IJSCE)*, Citeseer, v. 2, n. 6, p. 228–231, 2013.
- PLAYSTATION. *Controle sem fio DualSense*. [S.l.], 2023. Disponível em: <<https://www.playstation.com/pt-br/accessories/dualsense-wireless-controller/>>. Acesso em: 12 fev. 2024.
- RESEARCH, G. V. *Virtual Reality Headset Market Size, Share & Trends Analysis Report By End-device (Low-end, Mid-range, High-end), By Product Type (Standalone, Smartphone-enabled), By Application, By Region, And Segments Forecasts, 2023 - 2030*. [S.l.], 2023. Disponível em: <<https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/virtual-reality-vr-headset-market>>. Acesso em: 31 jul. 2023.
- SA, I. *The Evolution of Wi-Fi Technology and Standards*. [S.l.], 2023. Disponível em: <<https://standards.ieee.org/beyond-standards/the-evolution-of-wi-fi-technology-and-standards/>>. Acesso em: 5 set. 2023.
- SHANG, S.; WANG, L. Overview of WiFi fingerprinting-based indoor positioning. *IET Communications*, v. 16, n. 7, p. 725–733, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1049/cmu2.12386>. eprint: <https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1049/cmu2.12386>. Disponível em: <<https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1049/cmu2.12386>>.
- SHREYAS RAO, A. F. *Low Voltage Translation For SPI, UART, RGMII, JTAG Interfaces*, 2021.

- TECHNOLOGIES, I. *BTS 7960 High Current PN Half Bridge*. [S.l.], 2004. Disponível em: <https://www.infineon.com/dgdl/BTS7960_Datasheet.pdf?folderId=db3a304412b407950112b408e8c90004&fileId=db3a304412b407950112b43945006d5d>. Acesso em: 12 fev. 2024.
- TEMELKOVA, M. Similarities and Differences Between the Technological Paradigms "Production System", "Cyber-physical System" and "Cyber-physical Production System". In: 2022 International Conference on Communications, Information, Electronic and Energy Systems (CIEES). [S.l.: s.n.], 2022. P. 1–7. DOI: 10.1109/CIEES55704.2022.9990698.
- VALÉRIO, V. D. Desenvolvimento e Avaliação de Uma Interface Vibrotátil para Aprendizagem de Movimentos de Articulação das Mãos para a Execução de Padrões Rítmicos, 2016.
- VERMA, M.; SINGH, S.; KAUR, B. An Overview of Bluetooth Technology and its Communication Applications. *International Journal of Current Engineering and Technology*, v. 5, p. 1588–1592, mai. 2015.
- WAVESHARE. *ESP32-CAM, Camera Module Based On ESP32, OV2640 Camera and ESP32-CAM-MB adapter Included*. [S.l.], 2023. Disponível em: <<https://www.waveshare.com/esp32-cam.htm>>. Acesso em: 17 jul. 2023.
- WELLS, T. *Faster Than You Think: The Surprising Top Speeds of RC Cars*. [S.l.], 2024. Disponível em: <<https://clutchrc.com/how-fast-do-rc-cars-go/>>. Acesso em: 10 jan. 2024.
- WOODFORD, C. *Accelerometers*. [S.l.], 2023. Disponível em: <<https://www.explainthetastuff.com/accelerometers.html>>. Acesso em: 5 set. 2023.

Apêndices

Apêndice A - CÓDIGO DESENVOLVIDO

O código fonte desenvolvido para o sistema operacional da arquitetura do automóvel em miniatura foi disponibilizado no GitHub. Este repositório oferece acesso aberto ao código, permitindo que membros da comunidade científica e interessados possam explorar, compreender e, se desejado, contribuir para o desenvolvimento contínuo. Esta iniciativa visa estimular a colaboração e disseminação do conhecimento, fortalecendo a base de pesquisa na área de sistemas ciber-físicos. O link para o GitHub, contendo o código fonte completo, pode ser acessado pelo seguinte link:

https://github.com/thallesagm/TCC_RadioVideoCar.git

Apêndice B - VÍDEO DE DEMONSTRAÇÃO

Para uma compreensão mais abrangente das funcionalidades do automóvel em miniatura desenvolvido neste trabalho, foram gravados vídeos demonstrativos. Esses vídeos visam proporcionar uma visualização detalhada das operações do veículo, destacando a capacidade de controle remoto, as respostas às instruções dos dispositivos, a integração do sistema de *feedback* tátil e a visualização das imagens captadas. O compilado de vídeos foi disponibilizados no YouTube por meio do seguinte link:

<https://youtu.be/i-NGJdDsZkA>