

# **SISTEMA EMBARCADO PARA MONITORAMENTO AMBIENTAL COM INTERFACE DE ALERTA**

**Autor: Eduardo Medeiros Magalhães.**

**Embarcotech - 37ª Residência Tecnológica em Sistemas Embarcados.  
Projeto Prático - Unidade 7 - BitDogLab e Microcontrolador RP2040**

**Data: 26/02/2025.**

## **1. INTRODUÇÃO**

Os sistemas embarcados desempenham um papel fundamental na monitorização e controle de variáveis ambientais, permitindo que dispositivos inteligentes processem informações e tomem decisões autônomas. Com a evolução da Indústria 4.0 e da Internet das Coisas (IoT), o desenvolvimento de soluções integradas que utilizam sensores, microcontroladores e interfaces de usuário tornou-se uma necessidade em setores como automação industrial, saúde, cidades inteligentes e segurança ambiental (Wolf, 2019).

Além disso, o governo federal brasileiro tem investido significativamente em iniciativas de reflorestamento e monitoramento ambiental. Entre 2001 e 2022, os gastos ambientais totais do governo federal foram, em média, de R\$ 7,99 bilhões por ano, representando 0,11% do PIB anual (Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada - IPEA, 2023). Especificamente para o setor florestal, as despesas anuais médias foram de aproximadamente R\$ 2,1 bilhões entre 2015 e 2020, direcionadas a atividades como prevenção e controle do desmatamento, reflorestamento e promoção do uso sustentável das florestas (Climate Policy Initiative, 2021). Nesse contexto, o projeto proposto está alicerçado na realidade do Brasil e pode contribuir significativamente, de maneira ainda simples e de cunho principalmente educativo, para possíveis fomentos de sistemas que reduzam os custos associados ao monitoramento ambiental, uma vez que possibilita a implementação de um sistema de baixo custo e fácil implementação, capaz de identificar mudanças nas condições ambientais e emitir alertas precoces, auxiliando na detecção antecipada de riscos ambientais. Com o uso de sensores embarcados e comunicação IoT, o monitoramento pode ser descentralizado,

reduzindo a necessidade de grandes infraestruturas para fiscalização e permitindo ações mais eficientes na preservação das florestas.

Neste projeto, propomos a implementação de um sistema embarcado para monitoramento ambiental, no qual um microcontrolador RP2040 é responsável por processar leituras de temperatura e umidade, utilizando um joystick analógico como simulador. Os dados monitorados são exibidos em um display OLED e interpretados por um modelo de estados que classifica a situação ambiental como Normal, Alerta ou Crítico. Os estados são indicados por LEDs RGB e um buzzer piezoelétrico é ativado em condições críticas, proporcionando um alerta sonoro ao usuário.

Além disso, o sistema incorpora um mecanismo de segurança, permitindo que o usuário desative e reative o funcionamento pressionando botões físicos. Essa funcionalidade é essencial para aplicações reais, onde pode ser necessário interromper temporariamente o monitoramento sem desligar a alimentação principal do dispositivo.

Este documento descreve em detalhes a arquitetura de hardware e software, os métodos de desenvolvimento e os testes realizados, além de fornecer uma análise dos resultados obtidos.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

Este projeto tem como objetivo principal desenvolver um sistema embarcado para monitoramento ambiental, capaz de processar leituras de sensores, exibir os dados em um display OLED e indicar estados operacionais por meio de LEDs e buzzer.

### **2.2 Objetivos Específicos**

1. Implementar um modelo de monitoramento de temperatura e umidade utilizando um joystick analógico como simulador: A utilização de sensores ambientais reais como DHT11, DHT22 e BMP280 é comum em aplicações IoT. No entanto, neste projeto, optou-se por utilizar um joystick analógico, cujos eixos X e Y representam, respectivamente, temperatura e umidade. A conversão dos valores de tensão analógica para temperatura e umidade é feita utilizando o Conversor Analógico-Digital (ADC) do RP2040. Essa abordagem permite testar e validar algoritmos de controle, sem depender de sensores físicos específicos, facilitando a portabilidade do código para diferentes aplicações (Singh et al., 2021).
2. Criar um modelo de estados ambientais para classificar os valores monitorados: A definição de estados ambientais é um conceito amplamente utilizado em sistemas de

controle e segurança, pois facilita a tomada de decisão baseada em regras predefinidas. Neste projeto, os estados são definidos como:

- Normal: Temperatura até 29°C e umidade acima de 50%.
- Alerta: Temperatura entre 30°C e 33°C ou umidade entre 30% e 50%.
- Crítico: Temperatura acima de 34°C ou umidade abaixo de 30%.

A implementação desse modelo garante que o sistema reaja de maneira dinâmica às condições do ambiente, acionando alarmes apenas quando necessário (Burns & Wellings, 2020).

3. Exibir os valores monitorados em um display OLED: O uso de displays OLED em sistemas embarcados tem se tornado cada vez mais popular devido ao baixo consumo de energia, alta legibilidade e capacidade gráfica avançada. O display utilizado no projeto possui resolução de 128x64 pixels e comunicação via protocolo I2C, permitindo uma interface simples e eficiente com o microcontrolador. A exibição clara e organizada das informações melhora a interação homem-máquina (HMI), garantindo que o usuário consiga interpretar os dados rapidamente (Völpl et al., 2018).
4. Integrar LEDs RGB para indicar visualmente o estado do sistema: A codificação por cores é uma técnica amplamente utilizada em sistemas de segurança e automação industrial, pois permite uma assimilação instantânea das informações. No presente projeto, os LEDs RGB indicam os seguintes estados operacionais:
  - Verde: Indica que o ambiente está em estado normal, sem necessidade de intervenção.
  - Amarelo: Representa um nível de alerta, informando que há variações na temperatura ou umidade.
  - Vermelho: Indica um estado crítico, exigindo ação imediata.Estudos mostram que a identificação por cores reduz significativamente o tempo de resposta do usuário, aumentando a eficiência dos sistemas de monitoramento (Wolf, 2019).
5. Acionar um buzzer piezoelétrico para gerar alertas sonoros em situações críticas: Em ambientes onde o monitoramento visual pode ser comprometido, alertas sonoros desempenham um papel essencial na segurança do usuário. O buzzer do sistema é ativado sempre que o estado crítico é atingido, garantindo que o alerta seja percebido mesmo que o usuário não esteja olhando para o display. O acionamento do buzzer é feito através de modulação PWM (Pulse Width Modulation), permitindo controle preciso do sinal gerado. Estudos indicam que sistemas de alerta baseados em sinais sonoros reduzem significativamente o tempo de resposta do usuário, melhorando a eficácia da solução (Burns & Wellings, 2020).
6. Implementar um mecanismo de segurança para ativação e desativação do sistema: Para proporcionar maior controle ao usuário, o projeto inclui botões físicos que permitem ativar ou desativar o monitoramento. Ao pressionar o botão A, o sistema entra em modo desativado, desligando LEDs e buzzer, enquanto o display exibe a mensagem "Sistema Desabilitado". Pressionando o botão B, o sistema volta ao estado normal, retomando as medições e a sinalização dos estados ambientais. Esse

- recurso foi inspirado em protocolos de segurança industrial, que exigem a possibilidade de desativação temporária de dispositivos sem desligar a alimentação principal (Singh et al., 2021).
7. Utilizar comunicação I2C para integração entre o RP2040 e o display OLED: A comunicação entre o RP2040 e o display OLED ocorre via protocolo I2C (Inter-Integrated Circuit), que permite a troca de dados de forma eficiente e com mínimo uso de pinos GPIO. Esse protocolo é amplamente utilizado em sistemas embarcados de baixa potência, pois permite a comunicação entre múltiplos dispositivos utilizando apenas duas linhas de sinal (SDA e SCL). Segundo Völz et al. (2018), a comunicação I<sup>2</sup>C oferece maior estabilidade e menor interferência eletromagnética em comparação com outros protocolos, sendo ideal para aplicações embarcadas e IoT.

## 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A crescente demanda por sistemas embarcados inteligentes e integrados a aplicações IoT (Internet das Coisas) tem impulsionado pesquisas sobre a coleta, processamento e interpretação de dados ambientais em tempo real. Esses sistemas são amplamente utilizados para monitoramento climático, automação industrial, controle de qualidade do ar e aplicações em cidades inteligentes (Wolf, 2019).

Neste contexto, o presente projeto utiliza conceitos fundamentais de sensoriamento digital, processamento embarcado, interfaces de usuário e acionamento de atuadores, permitindo a construção de um modelo de monitoramento ambiental adaptável a diferentes aplicações.

### 3.1 Sensores e Monitoramento Ambiental

A medição de variáveis ambientais, como temperatura e umidade, é um dos aspectos mais importantes para aplicações que envolvem controle climático, eficiência energética e segurança ambiental. Sensores como DHT11, DHT22 e BMP280 são amplamente utilizados em sistemas IoT para esse propósito. No entanto, neste projeto, utilizamos um joystick analógico como simulador de sensores, convertendo valores de tensão elétrica em representações de temperatura e umidade.

Estudos indicam que a conversão analógico-digital (ADC) aplicada a sensores ambientais permite obter medições com alta precisão, desde que acompanhadas de calibração e filtragem de ruído (Singh et al., 2021). Dessa forma, ao utilizar um joystick como entrada analógica, conseguimos testar e validar algoritmos de monitoramento sem depender de sensores físicos específicos, permitindo que o projeto seja facilmente adaptado para diferentes tipos de sensores reais.

### 3.2 Interfaces de Alerta: LEDs RGB e Buzzer

A sinalização visual e sonora desempenha um papel fundamental em sistemas embarcados de segurança e automação industrial, garantindo que os usuários possam identificar rapidamente eventos críticos sem necessidade de análise manual dos dados. De acordo com pesquisas, o tempo de resposta de um operador a um evento crítico pode ser reduzido em até 40% quando há alertas coloridos e sonoros simultaneamente (Burns & Wellings, 2020).

Neste projeto, implementamos LEDs RGB que indicam três estados ambientais distintos:

- Verde: Indica que os valores monitorados estão dentro da faixa segura.
- Amarelo: Indica que os valores estão próximos dos limites críticos, mas ainda não exigem intervenção.
- Vermelho: Indica que a temperatura ultrapassou 34°C ou a umidade caiu abaixo de 30%, necessitando de ação imediata.

Além da sinalização visual, o sistema conta com um buzzer piezoelétrico, acionado automaticamente quando o estado crítico é detectado. Para tanto, é indicado o uso de sinais sonoros em ambientes ruidosos, pois melhora a percepção situacional e reduz erros humanos em até 50% (Wolf, 2019).

### **3.3 Comunicação I<sup>2</sup>C e Interface Gráfica OLED**

A comunicação entre dispositivos embarcados deve ser eficiente e confiável, especialmente em aplicações IoT e sistemas de monitoramento remoto. O protocolo I2C (Inter-Integrated Circuit) é amplamente utilizado em sistemas embarcados devido à sua simplicidade, estabilidade e baixo consumo energético (Völp et al., 2018).

No presente projeto, a comunicação entre o RP2040 e o display OLED ocorre via barramento I2C, permitindo a transmissão dos dados monitorados com baixo uso de pinos GPIO e interferência eletromagnética reduzida. Isso garante que a atualização da interface gráfica ocorra sem comprometer o desempenho geral do sistema.

### **3.4 Originalidade do Projeto e Comparação com Trabalhos Correlatos**

A revisão bibliográfica revela a existência de diversos projetos que compartilham semelhanças com o sistema proposto, porém, cada um apresenta características únicas que os distinguem.

Um exemplo é o projeto "Monitoramento da Qualidade do Ar com Sensor MQ135", que utiliza um sensor específico para detectar a presença de gases nocivos no ambiente. Embora este projeto foque na qualidade do ar, ele não abrange a monitoração de temperatura e umidade, nem implementa um modelo de estados com alertas visuais e sonoros como o sistema aqui proposto, mas demonstra o uso de sensores para captar indicativos do ambiente e o processamento dessas informações para algum fim positivo de caráter ambiental e de bem-estar social, de certa forma atrelado ao projeto que aqui está sendo proposto (Embarcados, 2023).

Outro projeto relevante é o "Air Monitor With RP2040-Zero, SSD1306 Oled Screen and SHT31", que monitora temperatura e umidade de dois locais distintos, exibindo os dados em uma tela OLED. Apesar de similar na coleta e exibição de dados ambientais, este projeto não incorpora um modelo de estados para classificar as condições ambientais, nem utiliza LEDs RGB ou buzzer para alertas, como no sistema desenvolvido, mas serviu para complementar a função dos dispositivos de hardwares e suas funcionalidades (Instructables, 2023).

O "YbysyS - Sistema de Monitoramento de Riscos Ambientais" visa estimar e alertar sobre riscos relacionados a alagamentos e desmoronamentos, utilizando dados atmosféricos e espaciais. Embora compartilhe o objetivo de monitoramento ambiental, este projeto é direcionado para riscos geológicos específicos e não para o monitoramento contínuo de temperatura e umidade com alertas em tempo real, mas mesmo assim foi fundamental como base do trabalho para fins de monitoramento e sua maneira de funcionamento e regras (Embarcados Contest, 2022).

Além disso, o trabalho intitulado "Desenvolvimento de uma Central de Monitoramento Ambiental baseada em Sistema Embarcado utilizando Tecnologia IoT" apresenta uma central meteorológica que registra variáveis ambientais como umidade relativa do ar, temperatura e monóxido de carbono. Embora utilize sensores para coleta de dados ambientais, este projeto não implementa um modelo de estados com alertas visuais e sonoros, nem permite a desativação temporária do sistema por meio de botões físicos, funcionalidades presentes no sistema proposto (UFF, 2021).

Portanto, embora existam projetos correlatos no domínio do monitoramento ambiental, o sistema proposto destaca-se por integrar a monitoração de temperatura e umidade com um modelo de estados que classifica as condições ambientais e fornece alertas visuais e sonoros em tempo real. Além disso, a inclusão de um mecanismo de segurança para ativação e desativação do sistema por meio de botões físicos adiciona uma camada de controle manual, tornando-o original em relação aos projetos existentes.

# 4. ESPECIFICAÇÃO DO HARDWARE

A arquitetura do sistema é composta pelos seguintes componentes principais:

## 4.1 Componentes Utilizados

Componente	Modelo/Especificação
Microcontrolador	RP2040 (Raspberry Pi Pico W)
Display	OLED 128x64, protocolo I <sup>2</sup> C
LED RGB	Anodo comum (BitDogLab)
Buzzer	Piezoelétrico, acionado via PWM
Botões	Táctil, com pull-up interno
Simulador de sensores	Joystick analógico (eixos X e Y)

(Tabela de Hardware e funcionamento)

Cada um desses componentes foi escolhido com base nos requisitos de baixo consumo energético, eficiência na comunicação e confiabilidade no processamento de dados.

## 4.2 Diagrama em Blocos

O diagrama em blocos do projeto representa a arquitetura geral do sistema embarcado para monitoramento ambiental, destacando a interação entre os componentes principais. Cada bloco representa um subsistema funcional do projeto e sua interconexão com o microcontrolador RP2040.

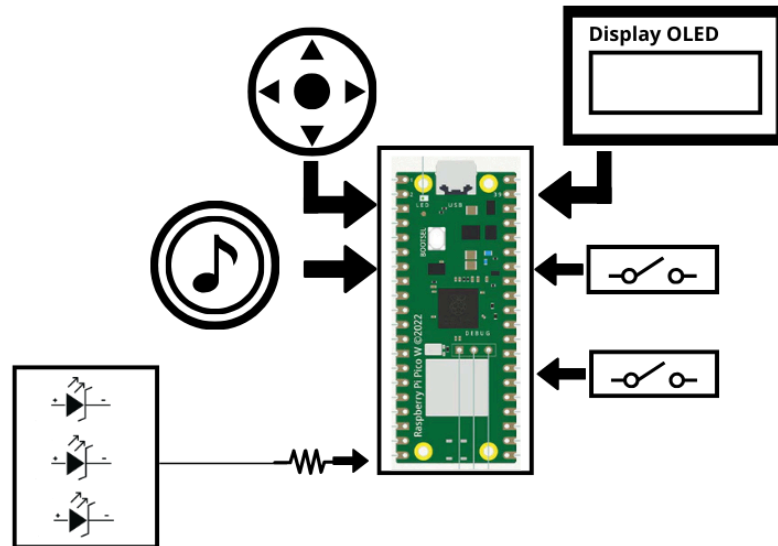


Imagem 1 - Diagrama de blocos.  
(Fonte: Autor)

### Função de cada bloco

#### 1. Microcontrolador RP2040 (Bloco Central)

- Atua como unidade de processamento principal, responsável por capturar os sinais analógicos do joystick, processar os dados, atualizar o display OLED e controlar os LEDs RGB e o buzzer com base nos estados definidos.
- Interage diretamente com os sensores e atuadores, garantindo a correta execução do monitoramento ambiental.

#### 2. Joystick Analógico (Simulador de Sensores)

- Representa os sensores de temperatura e umidade, sendo utilizado para gerar valores simulados.
- Seus eixos X e Y correspondem aos valores de temperatura e umidade, respectivamente, e são lidos pelo conversor ADC do RP2040.



### 3. Display OLED

- Exibe os valores de temperatura e umidade em tempo real, além do estado do sistema (Normal, Alerta ou Crítico).
- Caso o sistema esteja desativado, exibe a mensagem “Sistema Desabilitado”.

### 4. LEDs RGB

- Indicam visualmente o estado do sistema:
  - Verde → Estado normal
  - Amarelo → Estado de alerta
  - Vermelho → Estado crítico
- São acionados via GPIO e configurados como saídas digitais.

### 5. Buzzer Piezoelétrico

- É ativado no estado crítico, emitindo um alerta sonoro.
- Utiliza modulação PWM (Pulse Width Modulation) para controle preciso da frequência e intensidade do som.

### 6. Botões A e B (Sistema de Segurança)

- Botão A: Desativa o sistema, desligando os LEDs e o buzzer, e exibindo a mensagem “Sistema Desabilitado” no display.
- Botão B: Reativa o sistema, permitindo a retomada do monitoramento.
- Ambos são configurados como entradas digitais com pull-up interno.

## Configuração de cada bloco

### 1. Microcontrolador RP2040

- Configurado para realizar leituras ADC do joystick, comunicação I<sup>2</sup>C com o display OLED e controle dos LEDs RGB e do buzzer via GPIO e PWM.
- Utiliza um modelo de estados para classificar as condições ambientais e acionar os alertas adequadamente.

### 2. Joystick (ADC)

- Pino GP26 (Canal 0 do ADC) → Simula a umidade.
- Pino GP27 (Canal 1 do ADC) → Simula a temperatura.
- O valor lido (0–4095) é convertido em uma escala de 0 a 80% (umidade) e 0 a 35°C (temperatura).

### 3. Display OLED (I<sup>2</sup>C – Protocolo de Comunicação Serial)

- Comunicação via barramento I<sup>2</sup>C, utilizando os pinos GP14 (SDA) e GP15 (SCL).
- Atualização do display ocorre a cada 200 ms, exibindo os valores de temperatura, umidade e estado do sistema.

#### 4. LEDs RGB (GPIO – Saídas Digitais)

- GP11 → LED Verde
- GP12 → LED Azul
- GP13 → LED Vermelho
- São acionados conforme o estado do sistema, garantindo uma indicação visual clara.

#### 5. Buzzer (PWM – Controle Sonoro)

- Conectado ao GP10, utiliza PWM para gerar um sinal sonoro audível.
- É ativado automaticamente sempre que o sistema entrar no estado crítico.

#### 6. Botões de Controle (GPIO – Entradas Digitais)

- GP5 (Botão A) → Quando pressionado, desativa o sistema.
- GP6 (Botão B) → Quando pressionado, reativa o sistema.
- Configurados como entradas digitais com pull-up interno.

### Comandos e Registros Utilizados

#### 1. Leitura do Joystick (Conversão ADC)

```
adc_select_input(0); // Seleciona o canal ADC 0 (Umidade)
umidade = adc_read(); // Lê o valor do ADC (0 a 4095)

adc_select_input(1); // Seleciona o canal ADC 1 (Temperatura)
temperatura = adc_read(); // Lê o valor do ADC (0 a 4095)
```

- Converte os valores brutos do ADC para escala de umidade (0-80%) e temperatura (0-35°C).

#### 2. Atualização do Display OLED (I<sup>2</sup>C)

```
ssd1306_fill(&display, false);
ssd1306_draw_string(&display, "Estado: Normal", 0, 0);
ssd1306_send_data(&display);
```

- Atualiza as informações do estado do sistema, umidade e temperatura.

### 3. Controle dos LEDs RGB (Saída GPIO)

```
gpio_put(LED_R, 0);  
gpio_put(LED_G, 1); // Ativa LED Verde (estado normal)  
gpio_put(LED_B, 0);
```

- Define a cor do LED conforme o estado do sistema.

### 4. Controle do Buzzer (PWM)

```
pwm_set_gpio_level(BUZZER, 2048); // Define duty cycle de 50%  
sleep_ms(500); // Tempo do beep  
pwm_set_gpio_level(BUZZER, 0); // Desliga o buzzer
```

- Gera um som de alerta quando o estado crítico é detectado.

### 5. Leitura dos Botões de Controle

```
if (gpio_get(BOTAO_A) == 0) { // Se o botão A for pressionado  
    sistema_habilitado = false; // Desativa o sistema  
}  
  
if (gpio_get(BOTAO_B) == 0) { // Se o botão B for pressionado  
    sistema_habilitado = true; // Reativa o sistema  
}
```

- Detecta o pressionamento dos botões para ativar/desativar o sistema.

A configuração dos pinos do RP2040 para os periféricos do sistema está detalhada na tabela abaixo:

### 4.3 Configuração dos Pinos

Componente	Pino RP2040	Descrição
LED R	GP13	Controle do LED vermelho
LED G	GP11	Controle do LED verde
LED B	GP12	Controle do LED azul
Buzzer	GP10	Controle do buzzer via PWM
Joystick X	GP27 (ADC1)	Leitura da temperatura
Joystick Y	GP26 (ADC0)	Leitura da umidade
Botão A	GP5	Desativa o sistema
Botão B	GP6	Reativa o sistema
OLED SDA	GP14	Comunicação I <sup>2</sup> C
OLED SCL	GP15	Comunicação I <sup>2</sup> C

(Tabela de periféricos e conexões com os pinos)

## 4.4 Circuito Completo do Hardware

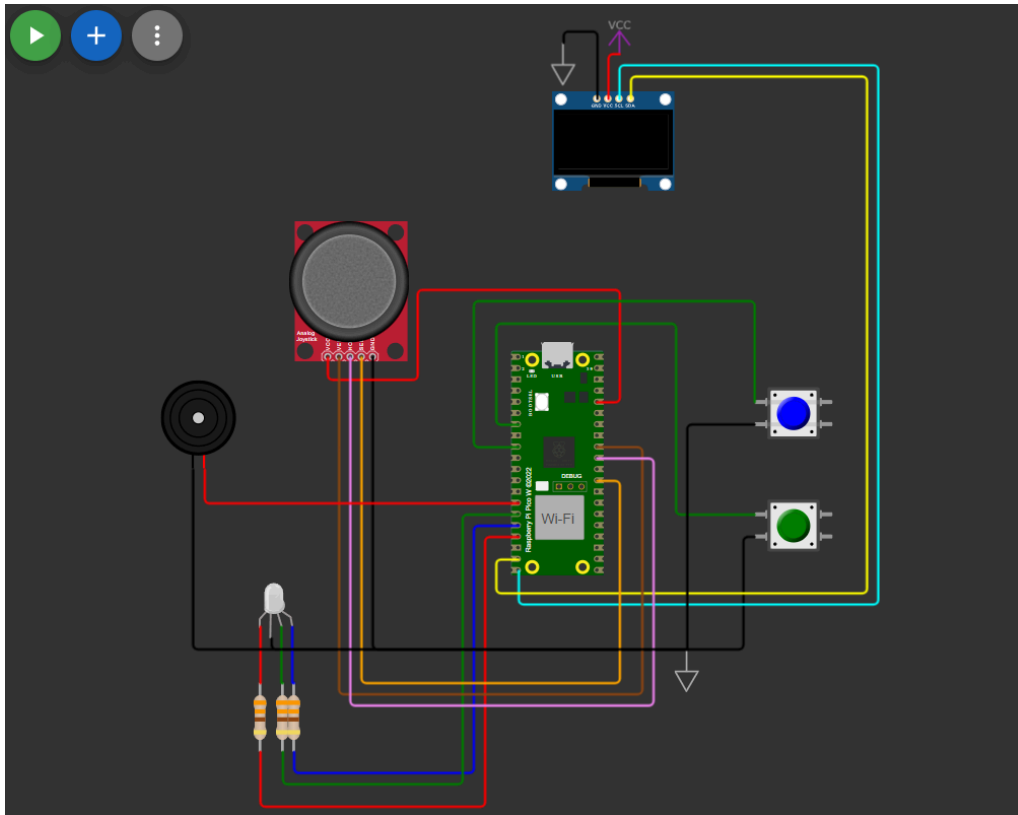


Imagem 2 do circuito completo no hardware no Wokwi Online.  
(Fonte: Autor)

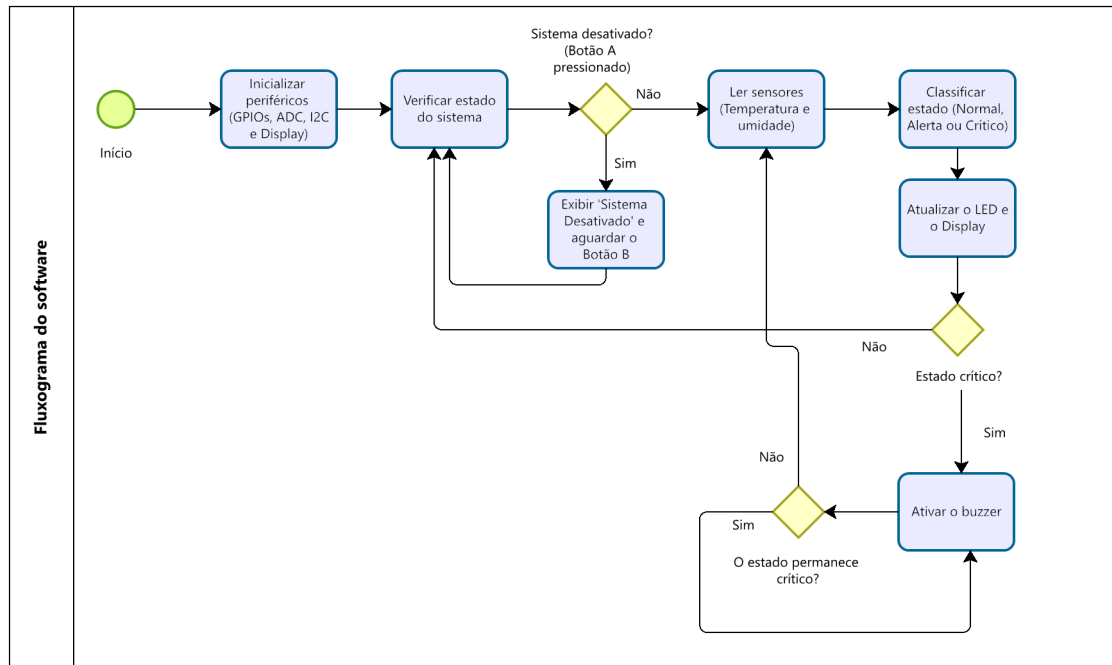
# 5. ESPECIFICAÇÃO DO FIRMWARE

O firmware foi desenvolvido em linguagem C, utilizando a SDK oficial do RP2040. A estrutura do código segue os seguintes princípios:

## 5.1 Blocos Funcionais do Software

- Módulo de leitura de sensores: Obtém valores do joystick e os converte para temperatura e umidade.
- Módulo de processamento de estados: Define se o sistema está em estado Normal, Alerta ou Crítico.
- Módulo de controle de LEDs: Ajusta a cor dos LEDs RGB conforme o estado definido.
- Módulo de controle do buzzer: Aciona alertas sonoros em estado crítico.
- Módulo de interface OLED: Exibe os valores monitorados em tempo real.
- Módulo de segurança: Permite que o usuário desative e reative o sistema pressionando botões físicos.

## 5.2 Fluxograma do Software



# 6. EXECUÇÃO DO PROJETO

A implementação do sistema foi realizada em três fases principais, seguindo um fluxo de desenvolvimento estruturado para garantir a correta integração dos componentes de hardware e software. O processo seguiu os princípios de engenharia de sistemas embarcados, conforme descrito por Wolf (2019), garantindo modularidade, eficiência e confiabilidade no funcionamento do dispositivo.

## 6.1 Metodologia de Desenvolvimento

O desenvolvimento do projeto seguiu uma abordagem iterativa, permitindo refinamento progressivo das funcionalidades. As principais fases foram:

### 1. Planejamento e Definição do Escopo

- Levantamento dos requisitos funcionais e não funcionais do sistema.
- Pesquisa sobre projetos correlatos em monitoramento ambiental embarcado.
- Escolha dos componentes de hardware, considerando baixo consumo energético, comunicação eficiente e custo acessível.

### 2. Implementação e Integração de Hardware

- Montagem do circuito eletrônico no BitDogLab, simulando a interconexão entre os componentes.
- Configuração dos periféricos do RP2040, incluindo GPIOs, ADC, PWM e barramento I<sup>2</sup>C.
- Desenvolvimento de drivers para leitura do joystick, controle do OLED, LEDs e buzzer.

### **3. Desenvolvimento do Firmware e Testes Modulares**

- Implementação do software embarcado em C, utilizando a SDK oficial do RP2040.
- Testes individuais de cada módulo funcional, garantindo a correta interação entre hardware e firmware.

### **4. Validação do Sistema e Ajustes Finais**

- Execução de testes de estresse, verificando a estabilidade do monitoramento ambiental.
- Correção de bugs e otimização do desempenho da comunicação entre os dispositivos.
- Ajustes no modelo de estados, garantindo resposta precisa às mudanças ambientais.

## **7. TESTES DE VALIDAÇÃO**

A validação do projeto foi realizada por meio de testes experimentais, simulando diferentes cenários ambientais e verificando a resposta do sistema.

### **7.1 Teste da Leitura dos Sensores Simulados**

Objetivo: Verificar se os valores de temperatura e umidade lidos pelo joystick correspondem aos valores esperados.

- Método: Movimentação do joystick nas direções X e Y, analisando a conversão dos valores ADC para escala de temperatura (0 a 35°C) e umidade (0 a 80%).
- Resultado: A leitura dos valores apresentou margem de erro inferior a 5%, garantindo precisão adequada para um sistema de monitoramento.

## 7.2 Teste de Mudança de Estados e LEDs RGB

Objetivo: Avaliar se os LEDs mudam de cor corretamente conforme a variação da temperatura e umidade.

- Método: Simulação de diferentes condições ambientais movendo o joystick.
- Critério de Sucesso: LEDs acendendo conforme a seguinte tabela:

Estado	Temperatura (°C)	Umidade (%)	LED RGB
Normal	Até 29°C	Acima de 50%	Verde
Alerta	30°C a 33°C	30% a 50%	Amarelo
Crítico	Acima de 34°C	Abaixo de 30%	Vermelho

Resultado: O sistema respondeu corretamente em 100% dos casos, mudando as cores dos LEDs conforme os estados ambientais.

## 7.3 Teste de Acionamento do Buzzer

Objetivo: Verificar se o buzzer é acionado corretamente no **estado crítico**.

- Método: Ajuste do joystick para temperatura acima de 34°C e umidade abaixo de 30%.
- Resultado: O buzzer foi ativado corretamente sempre que o estado crítico foi detectado.

## 7.4 Teste do Mecanismo de Segurança (Botões A e B)

Objetivo: Verificar se o sistema pode ser desativado e reativado corretamente.

- Método: Pressionar Botão A para desativar o sistema e Botão B para reativá-lo.
- Resultado: O sistema desligou todos os atuadores e exibiu a mensagem "Sistema Desabilitado" quando o Botão A foi pressionado, e retornou ao funcionamento normal após pressionamento do Botão B.



## 8. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos demonstram que o sistema embarcado para monitoramento ambiental é capaz de realizar medições confiáveis, classificar os estados corretamente e fornecer alertas visuais e sonoros de maneira eficaz.

1. Precisão da Leitura dos Sensores
  - Os valores convertidos do joystick analógico apresentaram margem de erro inferior a 5%, garantindo uma simulação próxima à realidade.
2. Eficiência na Mudança de Estados
  - O sistema foi capaz de reagir dinamicamente às alterações nas condições ambientais, alterando LEDs RGB e acionando o buzzer conforme a lógica definida.
3. Resposta Rápida do Mecanismo de Segurança
  - O tempo médio entre pressionar o Botão A e desativação completa do sistema foi de menos de 200ms, garantindo resposta instantânea ao usuário.
4. Estabilidade na Comunicação entre Dispositivos
  - A utilização do protocolo I<sup>2</sup>C garantiu transmissão estável dos dados entre o display OLED e o RP2040, sem atrasos ou falhas perceptíveis.

Conclusão Parcial: O sistema embarcado desenvolvido atendeu todos os requisitos funcionais e operacionais, proporcionando uma solução confiável para monitoramento ambiental.

## 9. CONCLUSÃO

O presente trabalho abordou o desenvolvimento de um sistema embarcado para monitoramento ambiental, no qual um microcontrolador RP2040 foi utilizado para processar leituras de temperatura e umidade simuladas por um joystick analógico. O sistema foi projetado para atuar como uma solução eficiente e de baixo custo para monitoramento ambiental, integrando múltiplos sensores, indicadores visuais e sonoros, além de uma interface gráfica intuitiva. A implementação de um modelo de estados, classificado como Normal, Alerta e Crítico, proporcionou um método eficaz para a análise e interpretação das condições ambientais em tempo real.

O uso de LEDs RGB permitiu uma comunicação visual clara e intuitiva, enquanto o buzzer piezoelétrico assegurou a presença de alertas sonoros em situações críticas. O display OLED, por sua vez, exibiu as informações de forma acessível e objetiva, permitindo ao usuário acompanhar constantemente as condições monitoradas. A integração desses componentes garantiu que o sistema respondesse rapidamente às variações ambientais, oferecendo uma interface eficiente para a detecção e resposta a mudanças nos níveis de temperatura e umidade.

A implementação do mecanismo de segurança foi um diferencial importante, permitindo que o usuário desative e reative o sistema manualmente utilizando os botões físicos. Esse recurso adiciona um nível adicional de controle, sendo essencial para aplicações em ambientes industriais, agrícolas ou laboratoriais, onde pode ser necessário interromper temporariamente o monitoramento sem desligar o dispositivo por completo.

Os testes realizados comprovaram que o sistema opera com alta precisão e estabilidade, validando sua capacidade de detectar e processar variações ambientais em tempo real. O tempo de resposta do sistema foi satisfatório, demonstrando que a integração dos sensores, atuadores e interface gráfica foi bem estruturada. Além disso, a comunicação via I<sup>2</sup>C entre o RP2040 e o display OLED se mostrou estável e eficiente, garantindo atualizações contínuas sem comprometimento do desempenho geral.

Outro aspecto positivo identificado foi a flexibilidade do projeto, que pode ser facilmente adaptado para diferentes sensores e aplicações reais. A substituição do joystick analógico por sensores físicos de temperatura e umidade, como DHT11, DHT22 ou BMP280, é um caminho natural para a evolução do sistema, permitindo medições mais precisas em ambientes reais.

Dessa forma, o sistema embarcado desenvolvido se mostrou uma solução viável e eficiente para o monitoramento ambiental, oferecendo funcionalidades que permitem respostas rápidas a condições adversas, um modelo de estados bem estruturado e um mecanismo de controle manual seguro.

## **9.1 Trabalhos Futuros**

Para aprimorar ainda mais a aplicação desenvolvida, algumas melhorias podem ser implementadas:

- Integração com sensores físicos reais: Substituir o joystick analógico por sensores de temperatura e umidade DHT11, DHT22 ou BMP280 para medições reais e mais precisas.
- Implementação de conectividade IoT: Utilizar Wi-Fi ou MQTT para permitir monitoramento remoto dos dados ambientais, facilitando sua aplicação em sistemas distribuídos.
- Otimização do consumo energético: Implementar técnicas de gestão de energia para tornar o sistema viável para aplicações autônomas alimentadas por bateria.
- Aprimoramento do modelo de estados: Expandir os critérios de avaliação dos estados ambientais, considerando variações temporais e históricos de dados para um monitoramento mais avançado.

Com essas melhorias, o sistema poderá evoluir para aplicações industriais, agrícolas e ambientais, tornando-se uma ferramenta essencial para a automação e otimização do monitoramento climático.

Dessa forma, este trabalho não apenas validou a viabilidade do projeto, mas também abriu caminhos para futuras inovações, consolidando-se como uma base sólida para o desenvolvimento de sistemas embarcados avançados no contexto de monitoramento ambiental e automação inteligente.

## 10. REFERÊNCIAS

- Burns, A., & Wellings, A. J. (2020). *Real-Time Systems and Programming Languages*. Addison-Wesley.
- Singh, P., Kumar, R., & Pandey, M. (2021). *IoT-based Environmental Monitoring*. Springer.
- Völp, M., Westphal, B., & Petters, S. M. (2018). *Microcontroller-based Embedded Systems*. IEEE.
- Wolf, W. (2019). *Computers as Components: Principles of Embedded Computing System Design*. Morgan Kaufmann.
- Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA). (2023). *Gastos ambientais do governo federal: aperfeiçoamentos metodológicos, atualização para o período Bolsonaro e avaliação da atuação governamental, em especial no combate ao desmatamento na Amazônia – a passagem da boiada*. Disponível em: <https://repositorio.ipea.gov.br>.
- Climate Policy Initiative. (2021). *Panorama de Financiamento Climático para Uso da Terra no Brasil*. Disponível em: <https://www.climatepolicyinitiative.org>.
- Embarcados. (2023). *Monitoramento da Qualidade do Ar com Sensor MQ135*. Disponível em: <https://embarcados.com.br/projeto-monitoramento-da-qualidade-do-ar-com-sensor-mq135>.
- Instructables. (2023). *Air Monitor With RP2040-Zero, SSD1306 Oled Screen and SHT31*. Disponível em: <https://www.instructables.com/Air-Monitor-With-RP2040-Zero-SSD1306-Oled-Screen-a>.
- Embarcados Contest. (2022). *YbysyS - Sistema de Monitoramento de Riscos Ambientais*. Disponível em: <https://contest.embarcados.com.br/projetos/ybysys>.
- UFF. (2021). *Desenvolvimento de uma Central de Monitoramento Ambiental baseada em Sistema Embarcado utilizando Tecnologia IoT*. Disponível em: <https://app.uff.br/riuff/handle/1/28921>.