

SISTEMA DE MONITORAMENTO INTELIGENTE PARA MINIESTUFAS RESIDENCIAIS

Jesiniel Martins P. Junior
Residência Embarcatech
Instituto Federal do Maranhão
jesinielmartinsp@gmail.com

Danúbia Soares Pires
Residência Embarcatech
Instituto Federal do Maranhão
danubiapires@ifma.edu.br

Claúdio Leão Torres
Residência Embarcatech
Instituto Federal do Maranhão
claudioleao@ifma.edu.br

Mayron Martins da Silva
Residência Embarcatech
Instituto Federal do Maranhão
mayronmartins@acad.ifma.edu.br

Orlando Donato Rocha Filho
Residência Embarcatech
Instituto Federal do Maranhão
orlando.rocha@ifma.edu.br

Jorge Renato dos Santos Silva
Residência Embarcatech
Instituto Federal do Maranhão
jorger@ifma.edu.br

Davi Santos Rodrigues
Residência Embarcatech
Instituto Federal do Maranhão
d.rodrigues@acad.ifma.edu.br

Washington Luis Santos Silva
Residência Embarcatech
Instituto Federal do Maranhão
prof.washington.silva@acad.ifma.edu.br

Abstract— This paper presents the development of an intelligent monitoring system for residential mini-greenhouses, aiming to promote urban agriculture in limited spaces. Based on a multidisciplinary review encompassing urban sociology, embedded systems, and agriculture, the project seeks to offer a technological solution for reconnecting people with nature as an alternative to consumerism. The prototype consists of a smart home greenhouse for cultivating herbs, leafy greens, and vegetables, utilizing the BitDogLab development board with the Raspberry Pi Pico W microcontroller. The system monitors environmental variables crucial for plant growth through multiple sensors.

Programmed in C language, it also adopts a multicore approach on the RP2040. The first core is dedicated to sensor readings, using Direct Memory Access (DMA) for critical and constant measurements, such as CO₂ levels. The other core manages Wi-Fi and Bluetooth connectivity, as well as communication with a cloud server via the MQTT protocol. The project details both the physical structure of the mini-greenhouse and the software implementation, representing an accessible and nationally developed technological solution for urban agriculture.

Keywords— *Microcontroller, DMA, Urban Agriculture, BitDogLab, multicore*

I. INTRODUÇÃO

A relação entre sociedade e agricultura é um pilar tão antigo quanto a própria noção de civilização. No cerne das discussões sobre produção e consumo de alimentos, a prática do cultivo em ambientes residenciais emerge como um fenômeno histórico recorrente. No Egito Antigo, por exemplo, os jardins das casas mais abastadas eram tanto símbolos de status social quanto espaços produtivos, onde o comestível se mesclava ao ornamental, remetendo a práticas de abundância [1]. Já na Grécia Antiga, viasse de forma mais utilitária, pois a maioria da população mantinha hortas buscando sustento. O *oikos*, a unidade familiar autossuficiente,

priorizava o cultivo para subsistência do lar. Sendo a estética algo secundário, era a força coletiva desses lares que sustentava a pólis [2].

Essa herança milenar de cultivo doméstico ganha nova relevância nos debates contemporâneos sobre mudanças no estilo de vida. Seja pelo viés do desenvolvimento sustentável e da segurança alimentar, ou pela necessidade de requalificação e uso consciente do meio urbano, a reconexão com a produção local de alimentos se apresenta como uma resposta aos desafios do presente, ecoando práticas e saberes de nossos ancestrais.

Nesse contexto, com a popularização de aplicações que integram IoT e sustentabilidade, contempla-se uma expansão de projetos para plantio adaptado a residências e áreas pequenas. Não se trata exclusivamente de jardins decorativos, que preenchem os limites com flores e plantas visualmente belas, mas também plantas voltadas ao bem-estar e saúde humana. Busca-se um conceito antigo e pouco adotado no espaço urbano: os jardins comestíveis.

Nesse sentido, o presente artigo visa o desenvolvimento de uma solução IoT, consoante à ideia de jardins comestíveis, mediante sistemas embarcados e mais precisamente: usando a tecnologia presente no *Raspberry Pi Pico W* e seu ecossistema empregado na placa de desenvolvimento *BitDogLab*. O projeto consiste em uma estufa doméstica inteligente para controle e monitoramento de plantas, como: ervas, hortaliças e verduras.

O conteúdo empregado neste trabalho é fruto de uma revisão bibliográfica sobre sociologia urbana, sistemas embarcados e agricultura urbana, com objetivo de apresentar um espectro da compreensão sobre a ressignificação do espaço urbano. Além disso, expor o resultado dessas noções de sociologia urbana e agricultura urbana para a criação de sistemas amigáveis em acessibilidade, baseadas em tecno-

logia nacional como a arquitetura da placa BitDogLab culminaram na proposta de um sistema embarcado para uma miniestufa Inteligente.

II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A. Cosmologias sobre Agricultura e Sociedade Urbana

A Agricultura Urbana e Periurbana (AUP) transcende a mera produção de alimentos, consolidando-se como um conceito essencial para o desenvolvimento de cidades mais sustentáveis, saudáveis e resilientes [3]. Seu impacto mais profundo emana na capacidade de responder a crises de subjetividade e produtividade na sociedade contemporânea.

Conforme analisado por pensadores como Simmel e Adorno, a metrópole moderna pode levar à alienação e à passividade diante de um "mundo administrado" [5], [6]. A agroindústria, exemplifica esse afastamento do sujeito urbano no processo de cultivo e retrata essa dinâmica passiva. Nesse contexto, a AUP surge como uma prática de contato com a natureza, oferecendo um contraponto ao consumo agro-industrial.

Para viabilizar essa reconexão em um cotidiano urbano acelerado, a AUP aplicada em conjunto com sistemas embarcados desempenha um papel importante, onde há facilitação no processo de lida com a cultura do plantio. O desenvolvimento de soluções de automação, utilizando microcontroladores como o RP2040, permite a concepção de hardware customizado aplicável nessa finalidade, tornando a tecnologia uma ponte para a prática agrícola em pequena escala residencial [7].

Os benefícios dessa prática se desdobram na dimensão econômica [3]. Onde a automação de "tratos culturais" específicos [8], com o manejo preciso de temperatura e luminosidade para produção de mudas [4], otimizando a produção de pequeno porte e fortalecendo economias locais, impacta novos mercados para soluções inteligentes de baixo custo voltados à agricultura urbana.

Em suma, a agricultura urbana, potencializada pela tecnologia de sistemas embarcados e IoT, oferecem benefícios como a reintegração da sociedade urbana com a natureza e de sustentabilidade. Nesta perspectiva, alinham-se a diversos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) propostos pela Organização das Nações Unidas [9]. Pois, contribuem para a segurança alimentar (ODS 2) e tornam as cidades mais inclusivas e sustentáveis (ODS 11). Portanto, seu estímulo via políticas públicas é fundamental para a construção de um futuro urbano mais justo, tecnológico e equilibrado.

B. Característica do Sistema Embarcado

O *Raspberry Pi Pico W*, baseado no microcontrolador RP2040[13], herda um potente sistema DMA (Direct Memory Access) capaz de realizar transferências de leitura e escrita de até 32 bits por ciclo de clock do sistema, operando a até 133 MHz. Essa capacidade de acesso direto à memória em alta velocidade otimiza significativamente a movimentação de dados entre os periféricos integrados e a memória SRAM de 264KB, liberando os dois núcleos ARM Cortex-M0+ para outras tarefas computacionais e aprimorando o desempenho geral do sistema.

O controlador *DMA* integrado ao microcontrolador *RP2040* suporta operações de leitura e escrita, com uma capacidade de transferência de até 32 bits por ciclo de clock para cada canal. O *RP2040* dispõe de 12 canais de *DMA* independentes, cada um responsável pela execução de uma sequência específica de transferência de dados. Cada canal possui seu próprio conjunto de registradores de controle e status, permitindo que o software configure os parâmetros da transferência e monitore seu progresso. Em cenários com múltiplos canais ativos simultaneamente, o *DMA* implementa um mecanismo de compartilhamento equitativo da largura de banda disponível entre os canais. O tamanho da unidade de transferência, configurável em 32, 16 ou 8 bits, é definido individualmente para cada canal.

O RP2040 possui dois núcleos ARM Cortex-M0+ rodando a até 133 MHz, 264 KB de SRAM interna e suporte a até 16 MB de memória flash externa via interface QSPI. Essa arquitetura proporciona uma combinação eficiente de desempenho, baixo consumo de energia e flexibilidade, adequada para aplicações embarcadas de diferentes escalas. A principal distinção entre as duas versões reside na presença do chip CYW43439, da Infineon, no Pico W. Esse componente é responsável por fornecer conectividade Wi-Fi 4 (IEEE 802.11n) na banda de 2,4 GHz, além de Bluetooth 5.2, incluindo suporte a modos Bluetooth Classic e Bluetooth Low Energy (LE), tanto em papéis centrais quanto periféricos. A conectividade Wi-Fi do Pico W também é compatível com WPA3, garantindo maior segurança nas conexões sem fio, e suporta o modo SoftAP, permitindo que o dispositivo atue como um ponto de acesso, conectando até quatro clientes simultaneamente. Essas funcionalidades tornam o Raspberry Pi Pico W uma plataforma particularmente adequada para o desenvolvimento de protótipos e produtos finais que envolvem comunicação sem fio, tais como sensores remotos, sistemas de automação residencial, monitoramento ambiental, controle de dispositivos e integração com serviços em nuvem.

III. METODOLOGIA

A construção do presente trabalho utilizou-se de uma base teórica diversa buscando agregar os conceitos sociológicos de sustentabilidade e fundamentos de sistemas embarcados na projeção IoT. Para tal, objetivou-se descrever os dados obtidos durante a elaboração do protótipo, utilizados no período de experimento e a técnica de plantio adotada na cultura selecionada.

A. Da cultura de plantio da Cebolinha

O cultivo da cebolinha (*allium fistulosum*) pode ser realizado de forma direta, plantando partes vegetativas no canteiro, ou indireta, por meio da semeadura em bandejas, com posterior transplante das mudas após 30 a 40 dias e poda para adaptação[8]. Para garantir o crescimento saudável, é fundamental manter a temperatura entre 8°C e 22°C, controlar o fotoperíodo, e evitar excesso de chuva e umidade, que podem provocar doenças foliares e radiculares.

O solo deve ser bem preparado, com textura e drenagem adequadas, evitando camadas compactadas e garantindo a correção da acidez por meio da calagem[8][10]. A adubação deve considerar a sustentabilidade e conservação do solo, com base na análise atual e correta dos nutrientes, especialmente Nitrogênio, Fósforo e Potássio. As deficiências desses nutrientes resultam em sintomas específicos, como folhas amareladas, necroses e crescimento limitado.

A irrigação é essencial, sendo recomendada a rega diária com água de qualidade, preferencialmente por aspersão ou gotejamento, conforme o espaçamento entre fileiras (15–20 cm) e entre plantas (10, 15 ou 30 cm) facilita o manejo, reduz pragas e doenças e contribui para uma colheita produtiva e saudável [5].

Os materiais verificados durante o planejamento da solução foram baseados em módulos e sensores compatíveis com a arquitetura do microcontrolador RP2040, presente na placa Raspberry Pi Pico W, integrante do kit de desenvolvimento BitDogLab (com componentes destacados na Tabela 1). Dentre estes, ressalta-se o uso dos sensores presentes na Tabela 2.

COMPONENTES NATIVOS E INTEGRADOS		
Componentes	Descrição	Função
Infinion CYW43439	Chip presente na placa Raspberry Pi Pico W, que compõe o kit de desenvolvimento BitDogLab.	Responsável pela conectividade wi-fi e bluetooth do sistema.
Display OLED 0.96" (SSD1306)	Display OLED de 128x64 pixels	Representa visualmente as médias obtidas de cada parâmetro observado pelo projeto.
Botão de pressão (2)	Botões A e B, configurados para pull-down	Alteram as páginas de exibição no display OLED
Módulo ADS1115	Conversor AD externo	Permite a conexão dos sensores que possuem entrada analógica. Além de servir como expansão, o uso desse módulo possibilita maior precisão na leitura dos sensores. Também é compatível com I2C, diferente de semelhantes como o LTC 2400

Tabela 1: Componentes nativos e integrados à BitDogLab.

SENSORES IMPLEMENTADOS			
Sensores	Descrição	localização	Calibragem
Sensor Capacitivo de Umidade do Solo v1.2	Permite verificar se a planta precisa ou não de água. Tem maior durabilidade à corrosão dos terminais metálicos. Alternativa: HL-69.	Inserido no solo a uma profundidade de 5-15 cm, preferencialmente no centro da área de cultivo para uma leitura média.	Em dois momentos, sensor seco e sensor submerso em água. Mapeado no código como 0% à 100% de umidade
DHT22	Sensor de umidade e temperatura do ar. Possui melhor performance em ambientes internos ou em câmaras com clima controlado em comparação com	Suspensão na altura média das plantas, protegido da luz solar direta e de respingos de água para evitar leituras falsas.	Já vem calibrado de fábrica. Para alta precisão, utilizar equipamento de referência offset. Mapeado no código de 0% à 100%

	outros sensores similares. Alternativa: LM-35.		
MQ135	sensor de detecção de gases. Pode medir uma grande variedade de gases tóxicos, além de ser capaz de identificar fumaça no ambiente. Amplamente utilizado na medição de qualidade do ar. Alternativa: MQ-2.	Próximo ao sensor DHT22, na altura média das plantas, onde haja boa circulação de ar.	Requer um "burn-in" (aquecimento) de 24-48h. A calibragem é feita ao se obter a leitura do sensor em ar limpo para definir um valor de resistência base (R ₀). As concentrações de gases são então calculadas com base na razão entre a resistência atual (R _s) e a R ₀ .
GUVAS12SD	Sensor de raios UV. É amplamente utilizado em sistemas de baixo custo, e com precisão consideravelmente boa. Alternativa: ML8511.	Na parte externa ou no topo da cobertura transparente, apontado para o céu para medir a incidência de luz solar direta.	O sensor fornece uma voltagem proporcional ao índice UV. A calibragem pode ser feita comparando a leitura de voltagem com um medidor de UV profissional sob a mesma luz e ajustando a fórmula de conversão no código.
BH1750FVI	Sensor de luminosidade ambiente. Possui um preço acessível, tem uma saída digital direta, tensão de alimentação de 3 a 5 V, interface de conexão I2C. Alternativa: TSL2561.	Na altura da copa das plantas, mas posicionado de forma a medir a luz ambiente que chega a elas, sem sofrer com a luz solar direta ou sombras excessivas.	É um sensor digital que já fornece o valor em lux. Geralmente não necessita de calibragem para a maioria das aplicações.

Tabela 2: Sensores implementados no sistema da estufa inteligente.

Com estes componentes, visa-se o monitoramento dos atributos responsáveis pelo crescimento ou destruição de uma planta, em específico o solo, a água, o ar e a iluminação solar.

Em acréscimo, reaproveitando os módulos integrados no kit de desenvolvimento BitDogLab, manifesta-se a utilização do display OLED 0.96" (SSD1306) e de dois botões de pressão, bem como o microcontrolador.

O teor de umidade ideal para o substrato de hortaliças é entre 60% e 70%[7], tendo uma aceitação mínima de 50% para que a cultura possa se desenvolver de maneira saudável e esperada. Além disso, fatores como a temperatura também devem ser constantemente monitorados. Esta deve ser mantida entre 18°C a 24°C, levando a concluir que em áreas como o norte e nordeste, onde a temperatura média é mais elevada, o cultivo da cebolinha deve ser feito preferencialmente nos meses de abril e outubro.

Congruentemente, a luminosidade precisa ser controlada para otimizar a produção. Isso pode ser alcançado com a profundidade da plantação da semente, assim como o uso de sensores para medir a intensidade de luz em dias nublados.

IV. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este artigo apresenta um proposta de estufa automatizada e de fácil manuseio. O estudo elaborou a estrutura física, os componentes essenciais para monitoramento do cultivo e o software embarcado na Placa BitDogLab.

A. Estruturação da mini estufa elevada compacta

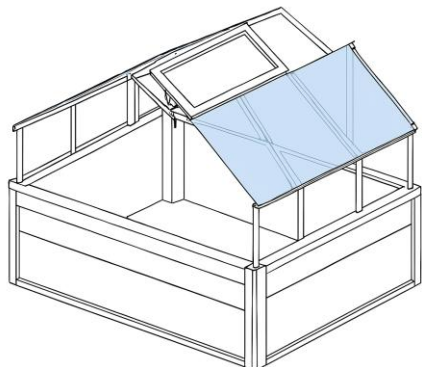


Figura 1: Projeto de mini estufa compacta
Fonte: elaborado pelo autor.

A pesquisa busca apresentar um modelo de estufa e mais acessível (conforme Figura 1), destinado ao cultivo protegido de pequenas hortaliças, ervas ou mudas. As especificações dos itens que compõe a miniestufa são apresentados na Tabela 3.

Tabela de estrutura da miniestufa				
LISTA DE ITENS E MEDIDAS DE MONTAGEM APLICADA				
Componente da miniestufa	Item ou Peças	Medidas (em cm)	Quantidade	Especificação (em cm)
Estrutura da base(caixote)	a) Tábuas de Comprimento	a) 100 x 30	a) 2	a)Madeira tratada (2cm de espessura)
	b) Tábuas de Largura	b) 50 x 30	b) 2	b) Madeira tratada (2cm de espessura)
	c) Fundo	c)100 x 30	c) 1	c)Compensado naval (1cm de espessura)
	d) Parafusos de montage	d) 0.4 x 4	d) 24	d) inox, cabeça chata
	e) Cantoneiras de reforço	e)5 x 5	e) 4	e) metálicas de inox
Estrutura dos pés	a) Pés	a) 50'	a) 4	a)madeira tratada (5x5)
	b) Parafusos de fixação	b) 5 x 60	b) 16	b) inox, cabeça chata.
	a) Sarrafos	a) tamanho variado	a) 8	a) madeira leve
	b) painéis de cobertura		b) 2	b)Peças retangulares do telhado

Estrutura da cobertura	c) Fechamentos Laterais d) fixadores do Revestimento	b) 100 x 30 c) 30 x 30 d) 0.3 x 2	c) 2 d) 30	c)Peças triangulares para front e back d) inox
Montagem eletrônica	a) Placa de Dev b) Microcontrol c)Caixa protetora	- - -	a) 1 b) 1 c) 1	a) BitDogLab b) RP Pi Pico W c)Caixa de junção IP65 à prova d'água.
Cabeamento dos sensores	a) fiação b) prensa-cabos c) cabo de alimentação	- - -	a) 1 rolo b) 2 c) 1	a) Fios sólidos b) Vedação de entrada dos fios c) USB

Tabela 3: Especificações dos itens que compõe a miniestufa inteligente.

Para a estrutura e funcionamento deste sistema de monitoramento, o devido uso e posicionamento dos sensores é essencial para veracidade dos dados coletados. A placa BitDogLab, deve ser protegida da umidade e demais intempéries. Idealmente, alocada em uma caixa protetora na parte externa da estrutura, resguardando-a de alta umidade e facilitando o acesso para programação. Os cabos dos sensores podem ser passados por um pequeno furo vedado na parede.

O posicionamento dos sensores é pensado para capturar dados representativos do ambiente de crescimento das plantas. O sensor de umidade do solo, por exemplo, é inserido diretamente no substrato, na zona onde as raízes se desenvolvem. É importante que o corpo do sensor esteja em contato com a terra, mas suas conexões e circuitos eletrônicos associados devem ser protegidos da umidade para garantir seu funcionamento.

Já o sensor de temperatura e umidade do ar deve ser posicionado suspenso dentro da estufa, na altura média das plantas. Essa localização central, afastada das paredes e protegida da luz solar direta por um pequeno abrigo, evita leituras alteradas pelo calor da superfície ou pela radiação. O objetivo é medir as condições do ar que efetivamente circunda as plantas.

Similarmente, o sensor de gases (CO₂) é instalado próximo ao de temperatura e umidade, também na altura da copa das plantas, cuja principal função é monitorar o dióxido de carbono, essencial para a fotossíntese, além de fornecer dados para acionar a ventilação quando necessário. A proteção contra luz solar direta e respingos é igualmente importante para que o sensor reflita com precisão o ar que as plantas absorvem, permitindo que o sistema de ventilação atue de forma eficaz.

B. Implementação de Software e Firmware

Baseando-se na arquitetura do RP2040 (utilizando a linguagem de programação C), com implementação das bibliotecas do PICO SDK, contemplou-se os seguintes aspectos: medição de sensores, representação visual, servidor de dados e comunicação com dispositivo de borda. Em acréscimo, utilizou-se uma aplicação mobile, em Flutter, para realizar a sincronização com o protótipo e receber as notificações sobre a saúde das plantas em tempo real.

O projeto será pautado em duas abordagens de sistemas embarcados: programação multicore e foreground/background [12]. A primeira refere-se à utilização dos dois núcleos do microcontrolador para execução de tarefas em

simultâneo, enquanto à segunda remete à prioridade e definição dos processos. Nesse sentido, a leitura dos sensores, por ser um processo prioritário e com interrupções constantes, é executado no core 1, normalmente utilizado para foreground. No core 0, núcleo inicial, executam-se os processos relativos à Bluetooth, WI-FI e MQTT, integrantes do servidor para envio dos dados, que possuem chamadas constantes, mas apresentam tempo de repouso até uma nova chamada ou ciclo, estando dentro do conceito de background [8].

C. Medição dos sensores e fluxograma de medições

Em virtude do kit de desenvolvimento BitDogLab possuir componentes soldados ao microcontrolador e, por conseguinte, utilizar boa parte dos pinos disponíveis, faz-se uso de uma expansão para emprego de módulos que transmitam via canais analógicos. Nesse sentido, a conversão fica a cargo do *ADS1115*, um expansor para leitura desse tipo de sinal, cuja comunicação com o Raspberry é dada pelo protocolo I2C (Inter-Integrated Circuit). Com esse incremento adquirem-se quatro novas entradas de canais analógicos, que serão utilizados para medição dos sensores de umidade do solo (capacitivo v1.2), de detecção de gases nocivos e fumaça (MQ135) e de raios ultravioleta (GUVA-S12SD).

Devido à conversão interna no sensor DHT22, para detecção de temperatura e umidade do ar, sua ligação ocorre diretamente a um pino digital, integrando diretamente à placa extensão da BitDogLab. De forma semelhante, para monitoramento da luz ambiente, via BH1750FVI, utiliza-se comunicação I2C, não sendo requerido módulos adicionais, bastando os pinos que apresentem esse tipo de protocolo.

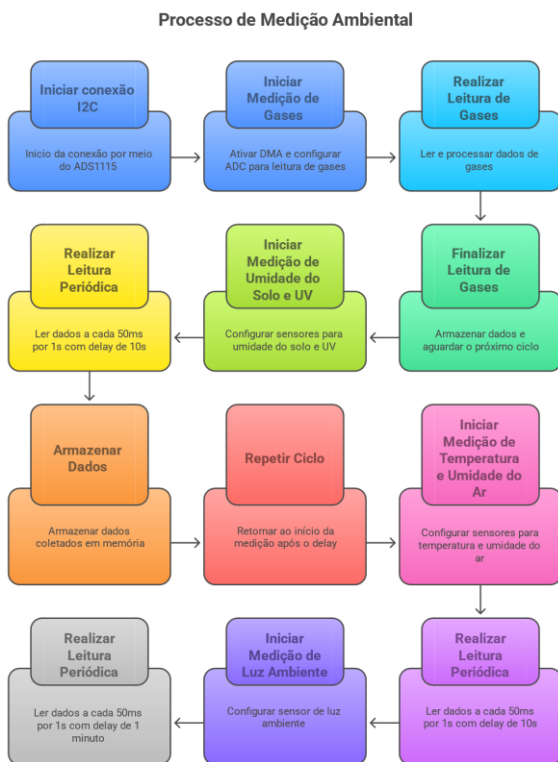


Figura 2: fluxograma do processo de medição ambiental. Fonte: elaborado pelo autor.

Apresentando-se no core 1, o fluxo dos sensores passa por quatro etapas: I - inicialização; II - rotina de medição;

III - tratamento de dados; e IV - envio de média. No momento inicial, configura-se a comunicação *I2C-0* do módulo *ADS1115* garantindo conformidade quanto ao seu endereço, registros e bits dos três canais *ADC* a serem utilizados.

Uma possível combustão, considerada um evento de alta criticidade pelo potencial destrutivo a plantações, deve ser remediada com o monitoramento em tempo real das emissões de gases característicos, como *CO₂*. Nesse sentido, mediante a expansão, conversões analógicas constantes são realizadas para o bit do canal em que o sensor MQ135 está empregado, permitindo a leitura com a constância exigida.

Como a medição de umidade do solo e raios UV não demandam resultados instantâneos, são configurados para medição recorrente, mas sem constância de curto período. O mesmo é aplicado para temperatura e umidade do ar, *DHT22*, mas seu princípio é ligeiramente diferente por possuir um conversor interno para saída digital e conectar diretamente aos pinos GPIO. Como característica, renuncia-se a tratamentos adicionais dos dados obtidos, mas constata-se um atraso entre as operações, sendo necessário um tempo de espera para resultados precisos.

A comunicação *I2C-1* é utilizada para integrar o sensor de luminosidade ambiente, cuja criticidade é baixa e por isso suas execuções são menos constantes. O processo de endereçamento e de registros segue o mesmo padrão empregado em outros módulos.

Quanto à rotina de medições, seguem duas abordagens de interrupções referentes à constância dos processos: *DMA* em cenários críticos e temporizadores em menor prioridade. Para o caso da emissão de gases, utiliza-se o primeiro método, ao que as amostras são transferidas diretamente do sensor para a memória, num quantitativo de 1000 leituras no decorrer de 1 segundo. Cada valor é convertido para um número reconhecível na escala e, posteriormente, realizada a média.

Aos demais, configura-se para 20 medições no intervalo de 1 segundo cuja média é obtida na sequência e aplicado um tempo de espera de 10 segundos até o próximo ciclo. Somente para a medição da luminosidade é aplicado um atraso maior entre as repetições, com estas ocorrendo após o decorrer de 1 minuto da obtenção do valor médio. Esse esquema busca otimizar o processamento do microcontrolador e disponibilizar recursos para outras operações na firmware.

O envio das médias ocorre pela fila FIFO (*First in First Out*) *multicore* no método *push*, uma vez que os dados serão repassados pelo *MQTT* ao servidor externo. A Figura 2 resume o fluxo detalhado previamente, abordando os passos descritos.

D. Constituição do Servidor Interno e Inicialização do Sistema

Os módulos que contemplam a implementação do *background* visam integrar o *Raspberry Pi Pico W* ao mundo externo, isto é, disponibilizar um sistema interno para conexão com internet e dispositivos de borda. Nesse sentido, implementou-se um modelo de servidor para esse núcleo que se baseia em três tecnologias: *Bluetooth*, *WI-FI* e *MQTT*.

O módulo Bluetooth é configurado para pareamento com dispositivos externos assim que a BitDogLab é ligada.

Ao mesmo tempo, verifica-se se há dados relativos à conexão *WI-FI* armazenados na memória Flash. Caso não haja informações locais, o sistema embarcado aguarda até que ocorra a confirmação de conexão Bluetooth com um Smartphone e troca de dados com a aplicação mobile presente nele, enquanto mantém o processamento reduzido e pausa o avanço para outras etapas. Esse fluxo é necessário para autenticação e atribuição do gestor da estufa, de modo a anexá-lo a uma conta previamente cadastrada no aplicativo.

Se existirem dados de conectividade com o roteador, então o pareamento torna-se facultativo, com a finalização de chamadas após 10 segundos. O modo Bluetooth somente é retomado ao pressionar o botão B por 3 segundos. Caso o usuário não deseje uma conexão com aplicativo ou internet, pode avançar para medições locais, pressionando o botão A por 3 segundos, em simultâneo ao reinício da placa.

E. Conexão com Internet e Configuração Multicore

Assim que o gestor é devidamente registrado, instancia-se a conexão com uma rede local *WI-FI* [13], selecionada a partir do aplicativo. Ao confirmar a escolha, os dados de SSID, senha e criptografia são enviados para o microcontrolador e armazenados na memória Flash.

Inicia-se, então, o *WI-FI* do Raspberry em modo de estação para inserção desses atributos, visando a conexão com o roteador da residência. Obtendo sucesso nesse procedimento, envia-se uma mensagem de confirmação à aplicação e avança-se para a configuração do segundo núcleo.

Na sequência das configurações, inicializa-se o segundo núcleo, ao que se utiliza uma variável booleana volátil para determinação de seu estado. Sendo assim, no momento que adentrar a função principal do *core 1*, o estado da variável é alterado para verdadeiro. O *core 0* mantém-se em repouso até seja confirmada essa modificação, avançando para as definições do protocolo MQTT e comunicação externa/cloud.

Em acréscimo, instancia-se uma interrupção para a fila *multicore*, a fim de enviar as novas médias inseridas na FIFO para o servidor MQTT, evitando requisições de *polling*, isto é, verificações manuais que consomem mais processamento.

F. Definições de Servidor MQTT

As configurações do servidor MQTT [13] ocorrem em duas etapas. A primeira trata de dados fixos, como tópicos (endereços semelhantes a uma URL) e respostas às respectivas requisições. Cada sensor possui uma rota atribuída a ele, configurada exclusivamente para envio do dado armazenado localmente. Por exemplo, para obter a média da temperatura utiliza-se o tópico “/module/temperature”, com o dado enviado mediante API.

A segunda etapa é direcionada à modificação das variáveis para requisição, como IP interno e do *broker*, encarregado da intermediação entre as mensagens, cujo papel é realizado pelo serviço na nuvem (*HiveMQ Cloud*). O endereço virtual interno é definido conectando-se ao roteador da residência e este dado é armazenado localmente, na aplicação e na nuvem.

Caso a comunicação com a nuvem falhe, as atualizações de médias ocorrem pelo Bluetooth, se este estiver ativo. Caso contrário, são mostrados exclusivamente no display *OLED* da placa. As interrupções da FIFO *multicore*

são responsáveis pelo acionamento dessa transmissão e visualização local de dados.

G. Comunicação Externa/Cloud

A partir do momento em que os dados do servidor MQTT são atualizados, uma requisição de envio e recebimento de mensagens é realizada para confirmar a conexão entre o sistema embarcado e a nuvem, a qual armazena os dados. O acionamento ocorre pelo aplicativo e a resposta ao procedimento é verificada na sequência. Se o resultado for positivo, o fluxo de execução é retomado na firmware para transmissão à API, poupando a utilização do Bluetooth e o desativando provisoriamente.

Assim que uma interrupção da FIFO *multicore* ocorre, uma mensagem é enviada à API para informar uma nova medição. O serviço na nuvem interpreta a mensagem e faz a requisição aos respectivos tópicos dos sensores, para transmissão dos dados de médias. A API envia os valores ao aplicativo, que atualiza as informações do Dashboard, apresentando sugestões para cada caso. Em situações extremas, como detecção de fumaça ou umidade extremamente baixa, notifica-se o usuário, mesmo com a aplicação em segundo plano.

H. Representação Visual

Em virtude dos cenários apresentados, onde há possibilidade de ausência de comunicação externa, a representação dos dados é disponibilizada em dois formatos: projeção interna com display *OLED* e representação gráfica e descritiva com a aplicação.

I. Projeção no Display OLED

Aplicando uma biblioteca customizada baseada na *SSD1306.h*, padrão para esse tipo de display, busca-se incrementar os itens a serem exibidos em tela. A princípio, o tamanho das letras é aumentado em função de uma paginação personalizada (conjunto de linhas por colunas de pixels), permitindo uma exibição melhor dos caracteres. Tratando-se destes, criam-se valores especiais com seus respectivos conjuntos de hexadecimais para desenho em tela, isto é, para exibir o símbolo de graus Celsius (°C) define-se um valor personalizado e o integra à matriz de termos.

Cada média é exibida em uma tela separada, cuja atualização ocorre sequencialmente de modo a mostrar cada valor, sua descrição e uma recomendação, repetindo o processo posteriormente (ou seja, inicia-se com o sensor de emissão de gás, exibindo sua média correspondente, a descrição do que é e qual o efeito real para a planta do que foi medido).

As mensagens de atualização para conexão Bluetooth, *WI-FI* e MQTT realizam uma interrupção da exibição atual e projetam os termos específicos de cada um. De modo semelhante, em caso de erros, notifica-se na tela o tipo e qual módulo está sendo afetado.

J. Dashboard da Aplicação Mobile

Com a implementação em *flutter*, os recursos do Dashboard da aplicação mobile apresentam mais interatividade com o usuário que a projeção no Display *OLED*, permitindo uma análise mais profunda sobre a situação da estufa, mesmo longe de casa. Nesse sentido, a composição de tela

constitui-se de três grupos de componentes: I - saúde da planta; II - métricas da estufa; e III - recomendações.

O primeiro grupo corresponde a um resumo gráfico das variáveis mais importantes para a planta, como umidade do solo, temperatura e quantidade de luz UV. O segundo corresponde a todas as métricas disponibilizadas pelos sensores, apontando quais os valores adequados para cada cenário. Enquanto o último destaca quais são as medidas urgentes a serem tomadas para que a planta se mantenha saudável e dentro do crescimento esperado.

Além da tela de Dashboard há três outras telas, sendo elas: histórico, notificações e perfil. Esta última trata das informações da conta e sincronização com o gestor da estufa. Enquanto a segunda remete aos alertas emergentes da estufa e do controlador, como desconexão, aumento de temperatura e detecção de fumaça.

A seção de histórico apresenta um gráfico de linhas para cada um dos sensores, demonstrando a alteração de estado das variáveis a cada minuto ou hora. Em acréscimo, conta com um relatório de crescimento esperado, expondo as fases da planta conforme os dias.

Vale ressaltar que a aplicação é responsável pelas notificações emitidas em segundo plano, a fim de alertar o usuário de cenários críticos, como uma combustão ou seca inesperada.

V. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo deste sistema de monitoramento para miniestufas tem como objetivo congruir sociologia urbana, agricultura e sistemas embarcados na apresentação de uma solução prática. O projeto materializa a agricultura urbana como uma forma de reconexão com a natureza e de retomada do conhecimento sobre a produção de alimentos.

O protótipo demonstrou potencial sucesso e viabilidade, assim como uma aplicação real da placa de desenvolvimento nacional BitDogLab, equipada com o microcontrolador *Raspberry Pi Pico W*. A arquitetura de software adotada evidencia uma abordagem sofisticada, com a eficiente utilização da programação *multicore* do RP2040. A delegação da leitura de sensores ao core 1 e da gestão de conectividade (Wi-Fi, Bluetooth e MQTT) ao core 0 permitiu uma separação clara entre tarefas de *foreground* e *background*. Importante citar o emprego de Acesso Direto à Memória (DMA) para o monitoramento contínuo de variáveis críticas, como as emissões de CO₂, otimizando desta forma o desempenho e garantindo a resposta em tempo real sem sobrecarregar a CPU.

O sistema se completa com um ecossistema de comunicação eficiente, onde os dados coletados são transferidos entre os núcleos via fila FIFO e enviados a um servidor na nuvem pelo protocolo *MQTT*, possibilitando o monitoramento remoto. A interface com o usuário foi contemplada de forma abrangente, oferecendo tanto uma visualização local por meio de um display *OLED* (ssd1306) quanto uma análise interativa e detalhada através de um aplicativo mobile, que inclui históricos e notificações de alerta para eventos críticos.

Este trabalho não apenas apresenta um projeto funcional de estufa inteligente, mas também reforça o papel dos sistemas embarcados como ferramentas facilitadoras para um estilo de vida mais sustentável e consciente. O projeto cumpre seu objetivo de fomentar a pesquisa acadêmica em Sistemas Embarcados, assim como uma reflexão do papel da cultura do verde em espaços reduzidos, um viés concreto

na aplicação de tecnologia avançada para a melhoria da qualidade de vida em ambientes urbanos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Softex, através da Residência Embarcatech, e ao IFMA pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

- [1] A. Wilkinson, *The Gardens in ancient Egypt*, London: The British Museum Press, 1998.
- [2] G.E.M. de Ste. Croix, *The class struggle in the Ancient Greek World: From the Archaic age to the Arab Conquests*. Ithaca, NY: Cornell University Press, 1981.
- [3] R. M. Curan and P. E. M. Marques, "Agricultura urbana e o seu entorno: o caso do Ceagesp e de Parelheiros na metrópole de São Paulo," *Rev. Bras. Gest. Urbana*, vol. 11, p. e20170153, 2019. doi: 10.1590/2175-3369.011.e20170153.
- [4] D. I. Leslkovar and S. P. Sharma, "Manejo de irrigação para produção de mudas em estufa," in *Produção de mudas de hortaliças*, W. M. Nascimento and R. B. Pereira, Eds. Brasília, DF, Brazil: Embrapa, 2016, ch. 5, pp. 107-126.
- [5] G. Simmel, "As Grandes Cidades e a Vida do Espírito," *Mana*, vol. 11, no. 2, pp. 577-591, 2005.
- [6] F. Fianco, "Adorno: Ideologia, cultura de massa e crise da subjetividade," *Rev. Estud. Filosóficos*, no. 4, pp. 128-142, 2010.
- [7] Raspberry Pi Foundation, "Hardware design with RP2040: Using RP2040 microcontrollers to build boards and products," Cambridge, U.K., 2021. [Online]. Available: <https://datasheets.raspberrypi.com/rp2040/hardware-design-with-rp2040.pdf>
- [8] D. P. Tejo, C. H. do S. Fernandes, M. E. Simionato, G. de L. Camargo, D. M. Lopes, B. M. Kutlak, et al., "Tratos Culturais na Cultura da Cebolinha," 2023.
- [9] United Nations, "Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development," New York, NY, USA, 2015. [Online]. Available: <https://sdgs.un.org/2030agenda>
- [10] D. S. Pires, M. S. Pestana, and O. D. R. Filho, *Foreground/Background*, Embarca Tech, Unidade 1, Capítulo 10, [s.d.].
- [11] A. M. Carlos, D. D. Sampaio, and E. de L. Chagas, *Periféricos Avançados: Ethernet Wifi*, Embarca Tech, Unidade 1, Capítulo 8, [s.d.].
- [12] D. Quadros, *Knowing the RP2040: A Guide for Programmers*. LearnPub, 2022.
- [13] Raspberry Pi Foundation, "Raspberry Pi Pico C/C++ SDK," Cambridge, U.K., 2024. [Online]. Available: <https://datasheets.raspberrypi.com/pico/raspberry-pi-pico-c-sdk.pdf>