

**DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO DE UM SISTEMA DE MONITORAMENTO
DE ENERGIA EM BIORREATORES CW-MFC**

**DEVELOPMENT AND VALIDATION OF AN ENERGY MONITORING SYSTEM IN
CW-MFC BIOREACTORS**

Ana Jackeline Alves Silva¹

Marco Diego Aurélio Mesquita²

Petrúcio Ricardo Tavares de Medeiros³

RESUMO

A busca por fontes de energia renováveis tem incentivado o desenvolvimento de soluções que aliem a produção de energia à preservação ambiental, o que ressalta a necessidade de desenvolvimento de tecnologias sustentáveis e eficientes. Este trabalho propõe o desenvolvimento de um sistema de monitoramento de tensão e corrente elétrica de baixo custo para biorreatores do tipo *Constructed Wetlands-Microbial Fuel Cell* (CW-MFC) para avaliar continuamente seu desempenho e atividade microbiana, utilizando a plataforma Arduino. O sistema é composto por um display LCD, um cartão micro SD e é alimentado por uma bateria recarregável conectada a um painel solar. Foram realizados testes de leitura de tensão e corrente elétrica geradas pelos biorreatores, comparando os dados coletados com multímetro digital. Os resultados demonstraram que o sistema é capaz de registrar dados com precisão, mesmo em ambientes com infraestrutura limitada, além de garantir funcionamento contínuo. Conclui-se que a solução desenvolvida oferece uma alternativa viável e de baixo custo para o monitoramento de sistemas híbridos CW-MFC, ampliando a aplicabilidade dessas tecnologias sustentáveis em regiões remotas ou com restrições de infraestrutura.

Palavras-chave: Monitoramento, bioenergia, biorreatores, microcontrolador, arduino.

¹ Bacharelado em Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia pela Universidade Federal Rural do Semi-árido.

² Mestre em Ciência da Computação pela Universidade Federal do Ceará.

³ Doutor em Engenharia de Computação pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

ABSTRACT

The search for renewable energy sources has encouraged the development of solutions that combine energy production with environmental preservation, highlighting the need for sustainable and efficient technologies. This work proposes the development of a low-cost voltage and current monitoring system for Constructed Wetlands-Microbial Fuel Cell (CW-MFC) bioreactors to continuously assess their performance and microbial activity, using the Arduino platform. The system consists of an LCD display, a microSD card, and is powered by a rechargeable battery connected to a solar panel. Tests were performed to read the voltage and current generated by the bioreactors, comparing the data collected with a digital multimeter. The results demonstrated that the system is capable of recording data accurately, even in environments with limited infrastructure, in addition to ensuring continuous operation. We conclude that the developed solution offers a viable and low-cost alternative for monitoring hybrid CW-MFC systems, expanding the applicability of these sustainable technologies in remote regions or those with infrastructure constraints.

Keywords: Monitoring, bioenergy, bioreactors, microcontroller, arduino.

1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda por energia, aliada ao esgotamento dos recursos não renováveis, tem impulsionado a busca por alternativas mais sustentáveis e acessíveis, incentivado pelo desenvolvimento de tecnologias alternativas que conciliem a geração de energia com a redução de impactos ambientais. Embora fontes renováveis como solar, eólica e hidrelétrica desempenhem papel fundamental nessa transição, seus altos custos de implementação, dependência de condições ambientais e efeitos colaterais sobre o ecossistema impõem limitações à sua adoção em larga escala (R. Silva, 2007).

Diante desse cenário, a diversificação das matrizes energéticas e a implementação de tecnologias limpas tornam-se essenciais para mitigar os impactos ambientais e promover uma transição energética eficiente e segura. Nesse contexto, as *Microbial Fuel Cells* (MFCs) emergem como uma alternativa promissora ao utilizarem microrganismos como catalisadores para converter matéria orgânica em eletricidade e realizar o tratamento de efluentes (A. J. Slate *et al.*, 2019). Esse método quando integrado aos *Constructed Wetlands* (CWs) — sistemas artificiais que replicam os processos naturais de zonas úmidas para o tratamento de águas residuais — resulta-se em um sistema híbrido denominado *Constructed Wetlands-Microbial*

Fuel Cell (CW-MFC), que potencializa tanto a remoção de poluentes quanto a geração de bioeletricidade (B. Retta *et al.*, 2023; Y. Wang *et al.*, 2023).

Contudo, o estudo e a otimização desses sistemas híbridos requerem o acompanhamento de variáveis como temperatura, potencial hidrogeniônico (pH), turbidez, atividade microbiana e radiação solar disponível. Um dos principais desafios em ambientes reais é a ausência de soluções acessíveis e precisas para realizar esse acompanhamento. A dificuldade em medir continuamente os valores como tensão e corrente elétrica gerados pelo biorreator compromete a análise do desempenho e a expansão dessas tecnologias. Assim, o desenvolvimento de ferramentas convenientes que possibilitem medições confiáveis desses parâmetros é crucial para validar a eficácia do sistema e permitir sua expansão em larga escala.

Diante disso, este trabalho propõe o desenvolvimento de um sistema de monitoramento de baixo custo baseado na plataforma Arduino, alimentado por uma bateria recarregável com energia solar, capaz de registrar continuamente os parâmetros elétricos gerados por um sistema CW-MFC possibilitando o registro conveniente e preciso dos parâmetros de tensão e corrente sem necessidade de intervenção periódica. A solução visa promover a viabilidade técnica, econômica e ambiental da aplicação dessa tecnologia em regiões remotas ou com infraestrutura limitada, ampliando seu potencial como alternativa sustentável para o tratamento de efluentes.

Com o objetivo de contextualizar e aprofundar a proposta apresentada, este artigo está estruturado da seguinte maneira. A Seção de Trabalhos Relacionados apresenta trabalhos correlatos sobre biorreatores e sistemas embarcados de monitoramento. A Seção de Metodologia descreve a implementação do sistema proposto, incluindo hardware, alimentação elétrica e programação. A Seção de Resultados e Discussões apresenta e discute os resultados obtidos. Por fim, a Seção de Conclusão destaca as principais contribuições e possíveis aprimoramentos futuros.

2 TRABALHOS RELACIONADOS

Com o avanço das tecnologias embarcadas e a crescente demanda por fontes alternativas de energia, diversos estudos têm aplicado sistemas embarcados no monitoramento de biorreatores. Nesse contexto, a integração de microcontroladores, sensores e plataformas de *Internet of Things* (IoT) tem viabilizado o desenvolvimento de sistemas de monitoramento eficientes, convenientes e precisos. Nesta seção, serão apresentados estudos que exploram essas

tecnologias aplicadas ao monitoramento de biorreatores, com ênfase em suas abordagens metodológicas, componentes empregados e principais limitações observadas.

A Tabela 1 apresenta uma visão geral dos trabalhos mencionados nesta seção, permitindo a comparação com a aplicação proposta em nosso estudo.

Tabela 1- Comparação entre estudos com sistemas embarcados e IoT aplicados a biorreatores.

Autores	Ano	Microcontrolador	Sensores	Tempo de coleta (minutos)	Tipo de Biorreator
Silva <i>et al.</i>	2024	Arduino Uno R3	ADS1115 (tensão)	5	MFC
Klaithin <i>et al.</i>	2024	Arduino e ESP32	Temperatura, pH, O ₂	Não especificado	Não especificado
Baicu <i>et al.</i>	2024	ESP32	DS18B20 (temperatura), TS-300B (turbidez)	Não especificado	Não especificado
Kalamaras <i>et al.</i>	2024	ESP32	Temperatura, pH, REDOX, NH ₄ ⁺ , metano, biogás	Não especificado	Biorreator piloto de biogás anaeróbico
Baicu <i>et al.</i>	2024	ESP8266	DHT11 (temperatura)	15	Não especificado

Fonte: Autoria própria (2025).

Silva *et al.* (2024) investiga o uso de MFCs de dupla câmara com biocátodo desnitrificante para o tratamento de águas residuais do processamento de mandioca, um efluente agroindustrial altamente poluente, rico em matéria orgânica, nutrientes e compostos tóxicos como a linamarina. O estudo foi conduzido em laboratório utilizando dois reatores MFCs diferenciados pelo tipo de membrana iônica: uma com membrana de troca aniônica e outra com membrana de troca catiônica. Diante das limitações dos métodos convencionais, como a digestão anaeróbia, os autores investigaram a viabilidade de utilizar MFCs para simultaneamente tratar o resíduo e gerar energia elétrica. Para monitorar o desempenho eletroquímico dos reatores, foi empregado um sistema de aquisição de dados baseado em Arduino Uno R3, acoplado a um módulo registrador de dados (*Adafruit Data Logger Shield*) e a um conversor analógico-digital ADS1115, que permitiu o registro automatizado da voltagem gerada pelas MFCs a cada cinco minutos. Essa instrumentação possibilitou a análise detalhada da geração de corrente e densidade de potência ao longo do experimento. Os resultados

demonstraram que as MFCs com biocátodo desnitrificante são uma alternativa promissora para o tratamento de águas residuárias do processamento da mandioca, aliando remoção de poluentes à geração de bioeletricidade de forma sustentável e de baixo custo.

Klaithin *et al.* (2024) apresentam o desenvolvimento de um sistema automatizado de controle de biorreator e coleta de amostras com baixo custo, utilizando placas Arduino e ESP32, sensores de temperatura, pH e oxigênio, além de componentes como Peltier para resfriamento das amostras, motores de passo para posicionamento preciso da bandeja coletora e relés para acionamento automático de dispositivos. O sistema foi monitorado e operado via plataforma IoT NETPIE baseada em nuvem desenvolvida pela NECTEC, com integração ao *Google Sheets* e alertas pelo aplicativo *Line*. O estudo utilizou a bactéria *Clostridium cochlearium* na produção de biobutanol via fermentação anaeróbia. A proposta visa solucionar os desafios de controle preciso de parâmetros críticos como temperatura, pH e ausência de oxigênio, além da coleta periódica de amostras, contribuindo para melhorar a eficiência do processo e viabilizar alternativas sustentáveis e acessíveis ao uso de controladores comerciais caros, promovendo a inovação em processos biotecnológicos e a produção de biocombustíveis.

Baicu *et al.* (2024) propõem o desenvolvimento de um sistema embarcado baseado em IoT para controle de temperatura e monitoramento de turbidez em biorreatores, utilizando o microcontrolador ESP32, um sensor de temperatura DS18B20, um sensor de turbidez TS-300B e um módulo Peltier para aquecimento e resfriamento. O sistema foi projetado e testado em laboratório, com os dados sendo coletados e transmitidos para o *Google Sheets* via conexão *WiFi*, permitindo o controle remoto e a análise contínua do bioprocessamento. Essa integração tecnológica visa superar as limitações dos métodos convencionais de controle térmico, que sofrem com inércia térmica e manutenção elevada, além de reduzir custos com o uso de sensores acessíveis. A proposta surge da necessidade de um controle mais preciso, rápido e automatizado das condições internas dos biorreatores, essenciais para garantir o crescimento saudável de microrganismos e a qualidade dos bioprodutos.

Kalamaras *et al.* (2024) apresentam o desenvolvimento de um sistema IoT de baixo custo baseado no microcontrolador ESP32, com o objetivo de monitorar de forma eficiente um biorreator de tanque semi-contínuo com um volume total de 60 L. Foram utilizados substratos orgânicos e sensores integrados ao ESP32 para medir temperatura, pH, potencial de oxirredução (REDOX), concentração de amônio, produção de biogás e teor de metano. As análises laboratoriais seguiram métodos padrão, utilizando espectrofotometria e cromatografia gasosa. Os sensores mostraram alta correlação com os dados de laboratório, especialmente para pH,

temperatura e metano, comprovando a precisão e a estabilidade do sistema. O sistema foi projetado para funcionar com reinicialização automática, sincronização de tempo via internet e armazenamento em banco de dados MySQL, permitindo acesso remoto por interface web. O principal objetivo foi proporcionar uma solução acessível e confiável para locais com acesso limitado a equipamentos analíticos, promovendo a automação, o controle e a coleta de dados úteis para análise e otimização do processo de digestão anaeróbia.

Baicu *et al.* (2024) apresentam o desenvolvimento de um sistema baseado em microcontrolador para controle de temperatura em um biorreator e armazenamento de dados. A solução utiliza uma placa de desenvolvimento ESP8266, que possibilita a conexão via Wi-Fi e integração com sensores e atuadores. Um sensor DHT11 é usado para medir a temperatura, enquanto um relé de estado sólido controla a energia do módulo Peltier, responsável pelo aquecimento e resfriamento do biorreator. Onde os dois últimos permitem uma regulação térmica eficiente enquanto a implementação de um tempo de espera de 15 minutos entre trocas de temperatura protege os componentes de falhas prematuras. O sistema foi implementado em ambiente laboratorial, com hardware e software descritos em detalhes, sugerindo sua aplicação em instituições de ensino, pesquisa e desenvolvimento. Os autores buscam oferecer uma alternativa acessível, compacta e eficiente aos métodos tradicionais de controle térmico, substituindo métodos convencionais por uma solução baseada em IoT, superando limitações estruturais de biorreatores comerciais e permitindo automação, precisão no controle de temperatura e monitoramento remoto via nuvem, com o objetivo de melhorar a produtividade e a qualidade dos processos biotecnológicos.

Embora os trabalhos anteriores apresentem contribuições importantes no desenvolvimento de sistemas embarcados para controle e monitoramento de biorreatores, o sistema proposto neste estudo se destaca por integrar simplicidade de implementação, baixo custo e autonomia energética. Diferentemente das abordagens que dependem de infraestrutura elétrica convencional ou plataformas comerciais de aquisição de dados, o sistema desenvolvido neste trabalho utiliza uma plataforma Arduino Uno alimentado por bateria recarregável mantida por um painel fotovoltaico, o que assegura seu funcionamento contínuo mesmo em locais com acesso restrito à rede elétrica.

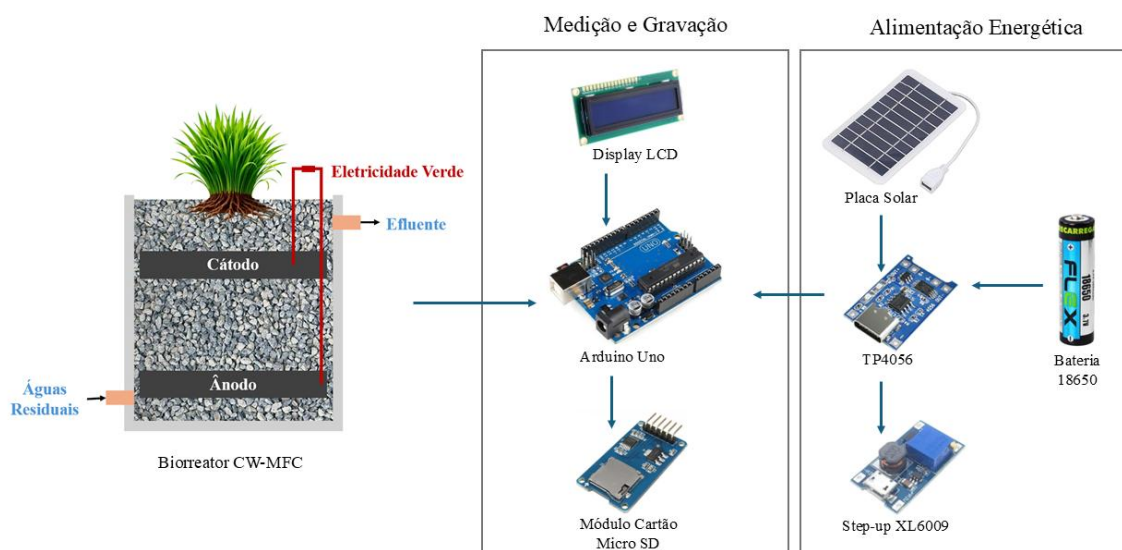
Além disso, o foco deste trabalho está na medição automatizada da tensão e corrente elétrica gerada por um sistema CW-MFC, com coleta e armazenamento de dados em cartão micro SD, dispensando conexão com a internet. Essa característica torna a solução especialmente viável para aplicações em zonas rurais, estações de tratamento descentralizadas

ou regiões de infraestrutura limitada. Ao unir monitoramento eficiente, autonomia energética e viabilidade econômica, o sistema proposto contribui com uma ferramenta prática para expandir o uso de tecnologias sustentáveis de tratamento de efluentes com geração simultânea de bioeletricidade.

3 METODOLOGIA

Nesta seção, explica-se como cada componente é integrado ao sistema de monitoramento resumido graficamente na Figura 1. A Subseção Hardware descreve o circuito simples desenvolvido para o monitoramento; na Subseção Sistema de Alimentação Elétrica, detalha-se a montagem e a escolha da fonte de energia; e na Subseção Programação, apresenta-se a construção do código responsável pelo controle e registro dos dados.

Figura 1 - Resumo gráfico do sistema de monitoramento.



Fonte: Autoria própria (2025).

3.1 Hardware

O processo de montagem do circuito do sistema de monitoramento proposto neste trabalho inicia-se pela conexão dos componentes. Utilizamos uma plataforma Arduino Uno, que possui um Conversor Analógico-Digital (ADC) com resolução de 10 bits, permitindo converter sinais analógicos em valores digitais variando de 0 a 1023, o que garante uma boa precisão nas leituras, sendo suficiente para a aplicação desejada.

Desse modo, o Arduino Uno é conectado a um Display LCD 16×2 com módulo *Inter-Integrated Circuit* (I2C), responsável por exibir informações de tensão e corrente. O uso do

módulo I2C simplifica a comunicação entre microcontrolador e o display LCD, pois reduz o número de conexões físicas necessárias, utilizando apenas dois pinos: SDA (dados) e SCL (*clock*). Essa conexão é realizada por meio dos pinos apresentados na Tabela 2, otimizando o espaço no protoboard e facilitando a organização do circuito.

Tabela 2 - Conexões entre Arduino Uno e Display LCD 16×2 com módulo I2C.

Arduino Uno	Display LCD 16×2 com módulo I2C
5V-OUT	VCC
GND	GND
A5	SLC
A4	SDA

Fonte: Autoria própria (2025).

Um cartão micro SD foi utilizado para armazenar as informações coletadas pelo sistema. A conexão entre o Arduino Uno e o cartão micro SD foi estabelecida por meio dos pinos indicados na Tabela 3. Utilizamos a conexão *Master In Slave Out* (MISO) que envia dados do cartão micro SD para o Arduino, *Master Out Slave In* (MOSI) que envia os dados do Arduino para o cartão micro SD e *Serial Clock* (SCK) responsável pelo sinal de relógio gerado pelo Arduino para sincronizar a comunicação através do protocolo *Serial Peripheral Interface* (SPI).

Tabela 3 - Conexões entre Arduino Uno e Módulo Cartão Micro SD.

Arduino Uno	Módulo Cartão Micro SD
5V-OUT	VCC
GND	GND
GPIO 4	CS
GPIO 13	SCK
GPIO 12	MISO
GPIO 11	MOSI

Fonte: Autoria própria (2025).

3.2 Sistema de Alimentação Elétrica

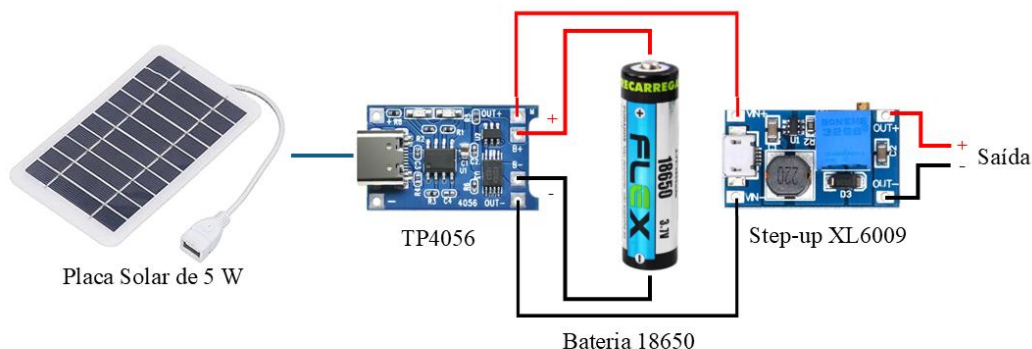
A montagem do sistema de alimentação teve como objetivo garantir o funcionamento do microcontrolador de forma estável e independente de rede elétrica por meio de energia solar. Para isso, foi utilizada uma placa solar cuja saída de energia é conectada a entrada micro USB C do módulo TP4056, responsável pelo gerenciamento do carregamento da bateria de íon-lítio de forma segura e controlada.

O módulo TP4056 incorpora proteção contra sobrecarga, descarga excessiva e curto-circuito, assegurando a durabilidade do sistema energético. A energia captada pela placa solar

foi direcionada à bateria recarregável de 3.7 V, conectada aos terminais BAT+ e BAT- do TP4056. A bateria armazena a energia gerada para posterior fornecimento contínuo ao sistema, mesmo em condições de baixa luminosidade.

Para adequar a tensão da bateria aos requisitos do Arduino Uno, utilizou-se um módulo conversor Step-Up. A saída do TP4056 (OUT+ e OUT-) foi conectada à entrada do conversor (VIN+ e VIN-), que foi ajustado para fornecer uma saída estável de 5 V — valor compatível com a alimentação recomendada para o microcontrolador, assegurando seu desempenho adequado (ver Figura 2).

Figura 2 - Diagrama do sistema de alimentação elétrica.



Fonte: Autoria própria (2025).

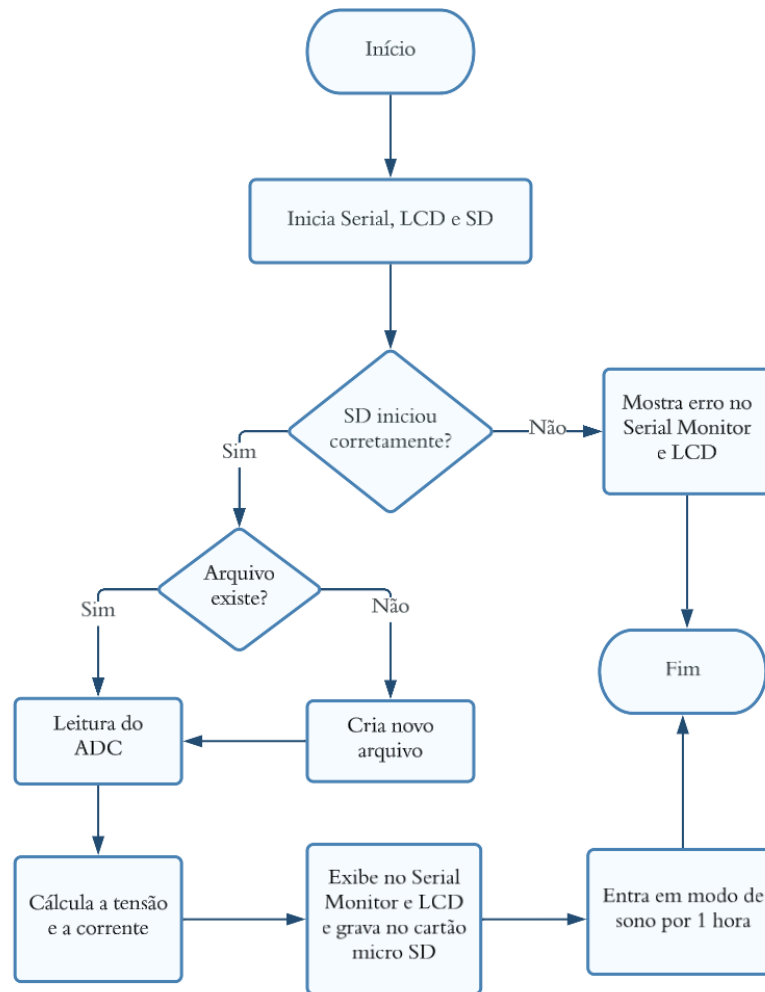
Essa configuração permitiu a operação contínua do sistema embarcado mesmo em ambientes remotos, contribuindo para a viabilidade do monitoramento sem a necessidade de fonte de energia externa.

3.3 Programação

A programação foi desenvolvida na plataforma Arduino IDE, versão 1.8.19, utilizando a linguagem C++. O código⁴ implementado realiza a leitura de sinais analógicos provenientes de três biorreatores, esse sinal é ajustado para uma escala entre 0 V e 1.1 V e, posteriormente são calculadas as correntes com base nas tensões medidas. Os valores são exibidos em um display LCD e armazenados em um cartão micro SD. Além disso, o sistema foi otimizado para consumo energético reduzido por meio da implementação de ciclos de sono profundo. A seguir, explicamos cada parte do código e as equações utilizadas (ver Figura 3).

⁴ O firmware está disponível no link: https://github.com/Ana-Jackeline/energy_monitoring

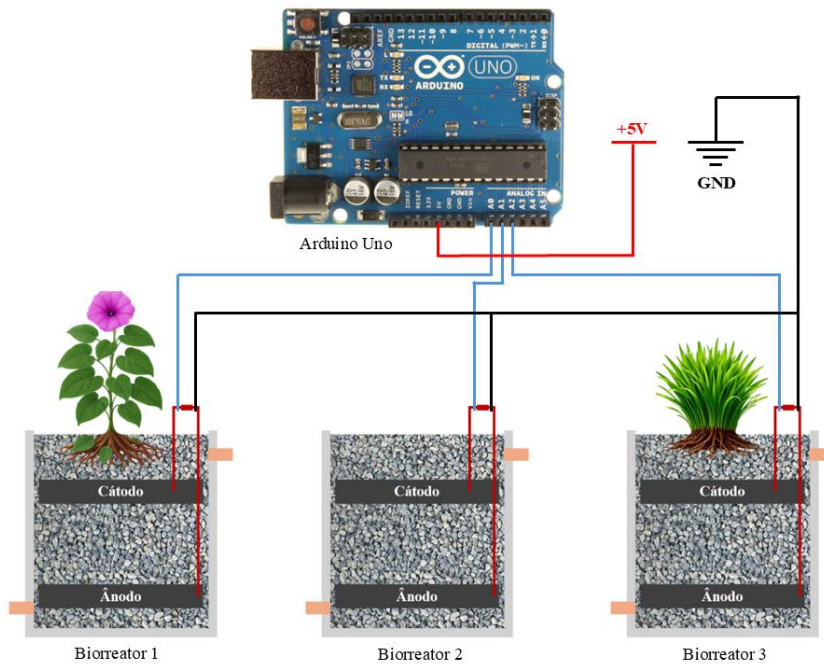
Figura 3 - Fluxograma do código implementado no sistema embarcado, com etapas de leitura, exibição, armazenamento e economia de energia.



Fonte: Autoria própria (2025).

Os pinos analógicos A0, A1 e A2 do Arduino Uno foram conectados aos três biorreatores, respectivamente (ver Figura 4). Cada leitura foi realizada com a função `analogRead()`, que retorna um valor entre 0 e 1023, correspondente à resolução de 10 bits do ADC do Arduino. Entretanto, observamos através de diversas leituras com auxílio de um multímetro que a tensão máxima gerada é 0.5 V. Buscando melhorar a sensibilidade na medição de sinais de baixa amplitude (inferiores a 5 V), foi utilizada a referência interna de 1.1 V, configurada por meio da função `analogReference(INTERNAL)`.

Figura 4 – Entradas analógicas de cada biorreator.



Fonte: Autoria própria (2025)

As leituras analógicas foram convertidas para tensão usando a Equação 1.

$$V = \frac{\text{leitura} \times 1.1}{1023} \quad (1)$$

Essa conversão permite saber a tensão (em volts) aplicada nos terminais de entrada, com base na referência de 1.1 V e na resolução do ADC.

Os biorreatores possuem uma resistência conhecida ligada em série. Desta forma, é possível aplicar a Lei de Ohm (Equação 2) para calcular indiretamente a corrente elétrica.

$$I = \frac{V}{R} \quad (2)$$

Na Equação 2, calcula-se a corrente (I), em ampères, usando a tensão (V) entre os terminais do resistor (R). Nesta pesquisa, utilizamos três biorreatores distintos: um contendo uma (1) planta salsa-brava (*Ipomoea asarifolia*), outro preenchido (2) apenas com brita e o último com (3) capim-urucloa (*Urochloa mosambicensis*). As resistências 965 Ω , 969 Ω e 973 Ω foram adicionadas aos biorreatores, respectivamente.

Para a exibição das informações no display LCD 16×2 com interface I2C, o software realiza a inicialização do barramento e da biblioteca LiquidCrystalI2C.h, especificando o

endereço do módulo, colunas e linhas do visor. Em seguida, empregou-se o módulo cartão micro SD com a biblioteca SD.h, onde as leituras são armazenadas em um arquivo de texto no cartão micro SD, formatados com tempo de aquisição, valores de tensão e corrente.

Para reduzir o consumo elétrico do sistema, foi utilizado o modo de sono profundo (*sleep*) do microcontrolador. Após cada leitura, o sistema aguarda 60 segundos acordado, desliga a luz de *background* do display LCD e, em seguida, o Arduino entra no modo de sono profundo por cerca de uma hora. Para isso, usamos a função `dormirComWatchdog()` que ativa o contador de *watchdog*, responsável por contar 450 ciclos de 8 segundos.

O *watchdog* permite acordar o Arduino sem a necessidade de um *Real Time Clock* (RTC) externo, tornando o sistema mais simples e econômico. A função `setupWatchdog()` configura o temporizador interno (*Watchdog Timer*) para gerar interrupções a cada 8 segundos.

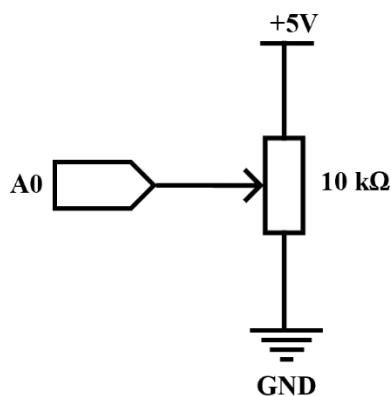
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção discutiremos sobre os resultados coletados nesta pesquisa.

4.1 Teste de Leitura de Tensão e Corrente

Para o desenvolvimento do sistema, foram realizados testes preliminares de leitura de tensão e corrente. Inicialmente, utilizou-se um potenciômetro conectado à entrada analógica do microcontrolador Arduino (ver Figura 5), com o objetivo de validar o funcionamento do ADC e observar a variação de leitura. O potenciômetro permitiu simular diferentes tensões, facilitando o ajuste dos parâmetros de leitura no código embarcado e a verificação da correteude dos valores obtidos.

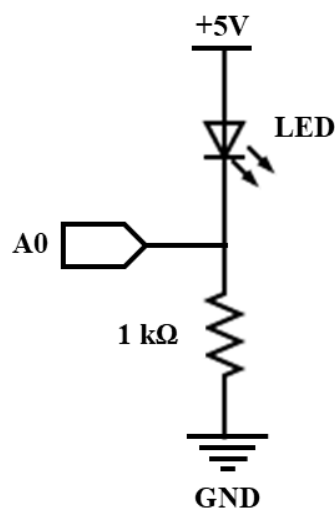
Figura 5 - Potenciômetro ligado ao pino A0 do Arduino Uno.



Fonte: Autoria própria (2025).

Na segunda etapa, visando maior precisão nos dados coletados, foi empregado um resistor de resistência conhecida de $1\text{ K}\Omega$ em série com um *Light Emitting Diode* (LED) (ver Figura 6). Essa configuração permitiu medir a queda de tensão no resistor durante a condução de corrente pelo LED, possibilitando a estimativa da corrente elétrica por meio da aplicação direta da Lei de Ohm. A utilização de um resistor com valor fixo e conhecido proporcionou maior exatidão e previsibilidade nos resultados, servindo como base para calibração do sistema de monitoramento e validação dos dados obtidos pelas leituras analógicas.

Figura 6 - LED com resistor ligado ao pino A0 do Arduino Uno.



Fonte: Autoria própria (2025).

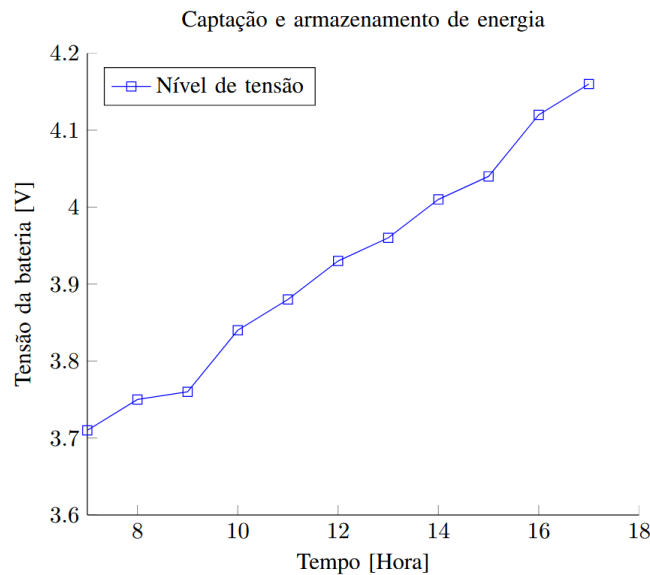
4.2 Eficiência Energética no Carregamento Solar da Bateria

O sistema foi projetado inicialmente para realizar medições de tensão e corrente a cada 5 minutos. Entretanto, a bateria estava descarregando rapidamente. Neste momento, considerou-se investigar a eficiência energética do sistema.

Durante o experimento, foi analisada a eficiência energética do sistema de captação e armazenamento de energia solar, composto por um módulo TP4056 conectado a uma bateria de íon-lítio e alimentado por uma placa solar portátil de 5 W. Para avaliar o comportamento do sistema, realizamos um ensaio de carregamento da bateria ao longo de 11 horas. O processo de carregamento foi iniciado às 7 horas, com a bateria apresentando uma tensão inicial de 3.7 V. Ao longo do dia, a bateria foi exposta à luz solar direta e continua até as 18 horas, momento em que atingiu uma tensão final de 4.16 V.

Esse aumento representa um acréscimo total de 0.46 V ao longo de 11 horas de exposição, resultando em uma média de aproximadamente 0.04 V/hora (ver Gráfico 1). O carregamento ocorreu de forma gradual, indicando uma taxa de carregamento compatível com a capacidade da placa solar e com os limites de segurança do módulo TP4056, que controla o carregamento da bateria de forma eficiente, prevenindo sobretensões e superaquecimento.

Gráfico 1 - Captação e armazenamento de energia ao longo do tempo.



Fonte: Autoria própria (2025).

Esse resultado demonstra que, mesmo com uma fonte de energia simples, o sistema foi capaz de elevar significativamente a tensão da bateria ao longo do dia, aproximando-se do valor máximo de carga da bateria de íon-lítio (4.2 V). Isso comprova a viabilidade do uso de sistemas fotovoltaicos portáteis para recarga sustentável de baterias em projetos de baixo consumo energético, além de evidenciar o bom desempenho do TP4056 na conversão e regulação da energia fornecida.

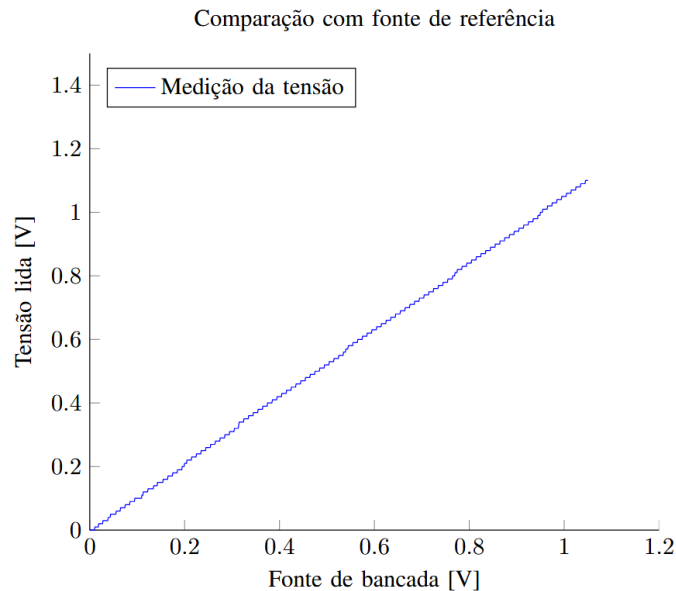
4.3 Comparação com Fonte de Referência

Com o objetivo de avaliar a precisão do sistema de medição baseado em Arduino, foi realizada uma comparação com uma fonte de alimentação digital Keysight E3633A/0EM/903. A tensão fornecida pela fonte foi ajustada em diferentes valores, e as respectivas leituras foram registradas simultaneamente pelo sistema Arduino, que exibia os resultados em um display LCD e os armazenava em cartão micro SD.

Os resultados obtidos foram plotados no Gráfico 2 em um gráfico comparativo, permitindo visualizar a correspondência entre os dois sistemas de medição. Observou-se que as

leituras realizadas pelo Arduino acompanham a tendência da fonte de referência, apresentando pequenas variações que permanecem dentro de uma margem aceitável de erro para sistemas de medição de baixo custo.

Gráfico 2 - Teste de qualidade de medição usando a fonte de tensão como referência.



Fonte: Autoria própria (2025).

Essas variações podem ser atribuídas à resolução do ADC de 10 bits do Arduino, ao ruído elétrico do circuito, e à ausência de calibração precisa no código embarcado. Apesar disso, o comportamento geral do sistema desenvolvido mostra-se consistente, validando sua aplicação em projetos experimentais e contextos em que o monitoramento contínuo e acessível é mais relevante que a precisão absoluta.

4.4 Análise Comparativa entre as Leituras de Tensão do Sistema Arduino e de um Multímetro Convencional

A análise das tensões geradas por três biorreatores de CW-MFC foi conduzida utilizando dois métodos de medição: um sistema de aquisição baseado em Arduino como pode ser observado na Figura 7 e um multímetro digital. As medições foram realizadas no dia 22 de julho de 2025, às 9 horas, 13 horas e 17 horas, buscando avaliar a consistência dos valores e validar sua viabilidade como alternativa de baixo custo para monitoramento contínuo. Os dados coletados podem ser observados na Tabela 4.

Figura 7 - Sistema de monitoramento embarcado realizando medições nos biorreatores.



Fonte: Autoria própria (2025).

Tabela 4 - Comparação entre as medições realizadas pelo sistema proposto e pelo multímetro nos três biorreatores. O biorreator 1 contém uma planta salva-brava; o biorreator 2 não possui vegetação; e o biorreator 3 contém capim-urucloa.

Tempo (horas)	Biorreator 1		Biorreator 2		Biorreator 3	
	Sistema	Multímetro	Sistema	Multímetro	Sistema	Multímetro
9	0,45	0,451	0,24	0,236	0,15	0,154
13	0,36	0,364	0,24	0,237	0,1	0,095
17	0,28	0,292	0,16	0,173	0,06	0,062

Fonte: Autoria própria (2025)

No biorreator com salva-brava (biorreator 1), os valores de tensão elétrica medidos pelo Arduino e pelo multímetro mostraram boa concordância ao longo do tempo. No primeiro intervalo, foram registradas tensões de aproximadamente 0.45 V, com pequenas variações também nos demais tempos. A diferença percentual entre as leituras manteve-se abaixo de 1%, indicando que o sistema oferece uma medição confiável neste cenário.

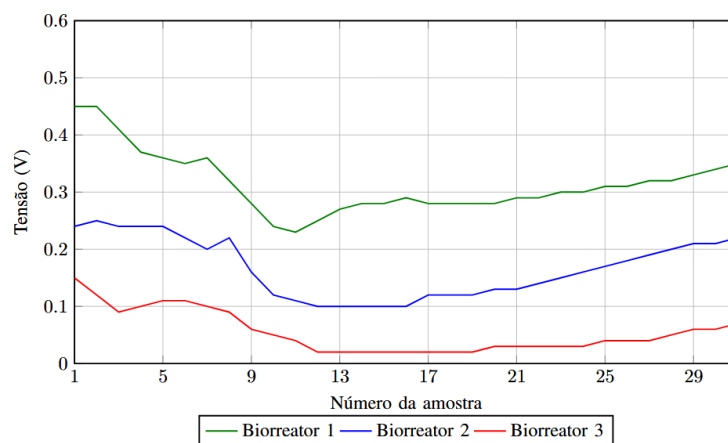
No segundo biorreator, sem nenhuma planta, os valores de tensão foram menores em comparação ao biorreator com salsa-brava, como esperado, dado o papel das plantas na intensificação da atividade microbiana. As variações de leitura seguiram um padrão estável nos dois primeiros tempos, com uma queda mais acentuada no último tempo medido. A boa correspondência entre as medidas indica que o sistema automatizado pode ser eficaz também em condições de menor geração bioelétrica.

No terceiro biorreator, com capim-urucloa, o sistema apresentou os menores valores de tensão entre os três, o que pode estar relacionado às características da planta utilizada ou à fase de adaptação da microbiota. Contudo, a coerência entre os valores registrados pelo multímetro reforça a precisão do sistema, mesmo operando em níveis de tensão mais baixos.

4.5 Funcionamento do Sistema em Regime Estendido

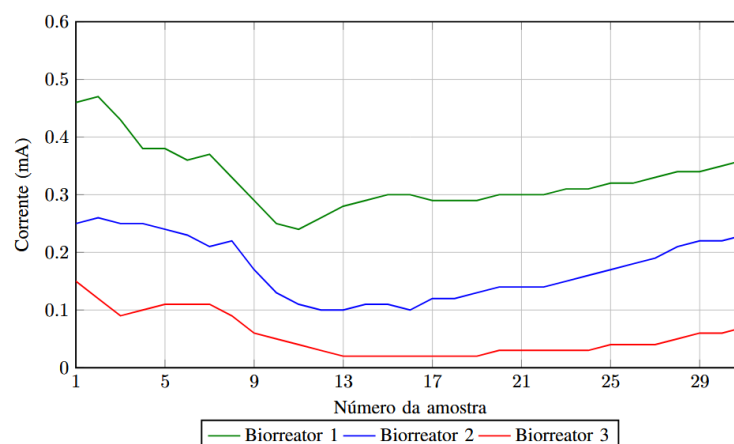
O sistema de medição foi instalado às 9 horas da manhã do dia 22 de julho de 2025 e ele permaneceu em operação contínua por 31 horas, coletando dados de tensão e corrente geradas pelos biorreatores a cada hora, conforme ilustrado nos gráficos 3 e 4. Analisando os gráficos, podemos verificar a semelhança entre o comportamento gráfico da corrente e da tensão nos biorreatores devido a lei de ohm. Além disso, observamos que o biorreator 1, contendo a planta salva-brava, apresenta maior geração de energia em comparação aos biorreatores 2 (sem vegetação) e 3 (capim-urucloa), corroborando os resultados previamente discutidos.

Gráfico 3 - Variação da tensão nas amostras dos biorreatores 1, 2 e 3.



Fonte: Autoria própria (2025).

Gráfico 4 - Variação da corrente nas amostras dos biorreatores 1, 2 e 3.



Fonte: Autoria própria (2025).

Inicialmente, observamos uma queda gradual nos níveis de tensão e corrente ao longo do tempo em todos os biorreatores analisados. Esse comportamento pode estar associado à redução de material orgânico nos biorreatores com o passar do tempo. No entanto, por volta da oitava amostra, há um aumento notável na geração de energia, o que pode estar associado ao reabastecimento com material orgânico ocorrido aproximadamente às 17 horas e 30 minutos. Esse comportamento evidencia a sensibilidade dos biorreatores à quantidade de material orgânico disponível.

Em seguida, observamos uma nova queda na produção de energia, mesmo após o aumento associado ao reabastecimento com material orgânico. Essa redução pode estar relacionada a diversos fatores, incluindo variações de temperatura, pH e outras variáveis ambientais que não foram monitoradas durante o experimento. Na sequência deste comportamento, os biorreatores retornam o aumento na produção de energia. Esses comportamentos mostram que o funcionamento dos biorreatores é complexo e pode mudar com facilidade. Por isso, é importante observar e controlar fatores do ambiente, como temperatura e pH, para que o sistema continue funcionando bem.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho projetou, desenvolveu, testou e validou em uso um sistema de monitoramento da tensão e corrente elétrica gerada por biorreatores do tipo CW-MFC, utilizando a plataforma Arduino, com exibição dos dados em display LCD e armazenamento local em cartão micro SD. A proposta demonstrou ser uma solução de baixo custo para ambientes com infraestrutura limitada, oferecendo uma alternativa acessível para a coleta e registro de dados elétricos em sistemas de tratamento de efluentes.

Embora inicialmente estivesse previsto o uso de um banco de dados remoto para armazenamento das leituras de tensão e corrente, a ausência de sinal de internet na estação de tratamento de esgoto impossibilitou essa abordagem. Foram feitas tentativas para contornar essa limitação com o uso de roteadores, porém o setor de infraestrutura da Ufersa não conseguiu viabilizar sua instalação. Como alternativa, os dados foram registrados em um cartão micro SD, garantindo a continuidade do experimento de forma independente e segura.

Para etapas futuras, pretende-se ampliar o sistema de monitoramento, incorporando sensores para análise de parâmetros adicionais, como turbidez do efluente, concentração de matéria orgânica no biorreator e pH da água. Além disso, planeja-se diminuir o intervalo entre

as medições de tensão e corrente, a fim de captar melhor as variações ao longo do tempo e permitir uma análise mais detalhada do comportamento dos biorreatores.

REFERÊNCIAS

- A. J. Slate, K. A. Whitehead, D. A. Brownson, and C. E. Banks, “Microbial fuel cells: An overview of current technology,” **Renewable and sustainable energy reviews**, vol. 101, pp. 60–81, 2019.
- A. O. d. Silva, S. Perazzoli, H. M. Soares, M. M. R. Azevedo, and C. R. Bressan, “Dual-chamber microbial fuel cell with denitrifying biocathode for the treatment of cassava processing wastewater,” **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, vol. 29, p. e20230116, 2024.
- B. Retta, E. Coppola, C. Ciniglia, and E. Grilli, “Constructed wetlands for the wastewater treatment: a review of Italian case studies,” **Applied Sciences**, vol. 13, no. 10, p. 6211, 2023.
- E. Klaithin, V. Matimapa-Kay, W. Daosud, and Y. Laoonguthai, “Effective an IoT-Based Arduino Design for Automated Bioreactor Control and Sample Collection in Biobutanol Production,” **IEEE Sensors Journal**, 2024.
- L. M. Baicu, M. Andrei, G. A. Ifrim, and L. T. Dimitrievici, “Embedded IoT Design for Bioreactor Sensor Integration,” **Sensors (Basel, Switzerland)**, vol. 24, no. 20, p. 6587, 2024.
- L. M. Baicu, M. Andrei, G. Ifrim, and S. M. Pavel, “IoT solution for controlling and monitoring temperature in bioreactor,” in 2024 28th **International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC)**. IEEE, 2024, pp. 391–396.
- R. Silva, “Energias renováveis,” **Boletim do Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamego**, vol. 1, no. 1, pp. 35–42, 2007.
- S. D. Kalamaras, M.-A. Tsitsimpikou, C. A. Tzenos, A. A. Lithourgidis, D. S. Pitsikoglou, and T. A. Kotsopoulos, “A Low-Cost IoT System Based on the ESP32 Microcontroller for Efficient Monitoring of a Pilot Anaerobic Biogas Reactor,” **Applied Sciences**, vol. 15, no. 1, p. 34, 2024.
- Y. Wang, Y. Zhao, L. Xu, W. Wang, L. Doherty, C. Tang, B. Ren, and J. Zhao, “Constructed wetland integrated microbial fuel cell system: looking back, moving forward,” **Water Science and Technology**, vol. 76, no. 2, pp. 471–477, 2017.