
Sistema de controle de reator aeróbio contínuo usando Arduino

Control system for continuous aerobic reactor using Arduino

Júlia Lelis Soares

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0651-7214>
Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Brasil
E-mail: julia.lelis@ufms.br

Raymundo Cordero Garcia

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1977-4589>
Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Brasil
E-mail: raymundo.garcia@ufms.br

Rebeca Yndira Cabrera Padilla

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2013-9902>
Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Brasil
E-mail: rebeca.padilla@ufms.br

RESUMO

O tratamento de efluentes é um processo essencial para minimizar o impacto ambiental de efluentes gerados em atividades humanas. Entre os métodos utilizados destaca-se o tratamento biológico aeróbio em um reator contínuo, que utiliza microorganismos para decompor a matéria orgânica presente nos efluentes. Este trabalho apresenta um sistema de monitoramento e controle de um reator aeróbio contínuo com recirculação Customizado usando Arduino. O sistema de aeração é controlado através de sensores que monitoram o nível de oxigênio dissolvido no reator, permitindo que o sistema ajuste a quantidade de ar injetado para manter as condições ótimas de oxigênio. O sistema desenvolvido também permite monitorar outros parâmetros, como a temperatura e pH, para garantir um tratamento mais eficiente do efluente. O funcionamento do sistema foi testado, usando um efluente simulado de laticínio com DQO inicial de 2032 mg/L e lodo aeróbio, para a degradação da matéria orgânica, previamente aclimatado. Os parâmetros de pH, oxigênio dissolvido e temperatura foram controlados de forma eficiente, obtendo na saída do reator um efluente com 82,6% de eficiência.

Palavras-chave: Automação; Arduino; Controle; Monitoramento; Reator Aeróbio Contínuo.

ABSTRACT

Effluent treatment is an essential process to minimize the environmental impact of effluents generated by human activities. Among the methods used, the aerobic biological treatment in a continuous reactor stands out, which uses microorganisms to break down the organic matter present in the effluents. This work presents a monitoring and control system of a continuous aerobic reactor with recirculation customized using Arduino. The aeration system is controlled through sensors that monitor the dissolved oxygen level in the reactor, allowing the system to adjust the amount of injected air to maintain optimal oxygen conditions. The developed system also allows monitoring other parameters, such as temperature and pH, to guarantee a more efficient effluent treatment. The operation of the system was tested, using a simulated lacticin effluent with an initial COD of 2032 mg/L and aerobic sludge, for the degradation of organic matter, previously acclimatized. The parameters of pH, dissolved oxygen and temperature are efficiently controlled, obtaining an effluent output from the reactor with 82.6% efficiency.

Keywords: Automation; Arduino; Control; Monitoring; Continuous Aerobic Reactor.

INTRODUÇÃO

O aumento contínuo da quantidade de resíduos despejados no meio ambiente é uma consequência direta do desenvolvimento industrial e do crescimento populacional. Essa problemática tem sido objeto de estudos e alertas por parte das agências governamentais e científicas, que destacam os impactos da atividade humana na mudança climática global (Agência Nacional De Águas, 2019; Costa e Ferreira Dias, 2020).

Diante dessa preocupação crescente, torna-se cada vez mais importante adotar medidas que visem minimizar e remediar os efeitos negativos do comportamento humano sobre o meio ambiente. Nesse sentido, o desenvolvimento de tecnologias e processos eficientes para o tratamento de resíduos tem se mostrado fundamental (Khanh Nguyen *et al.*, 2021; Hasan *et al.*, 2021).

Assim, otimizar os meios de compensar a deterioração do meio ambiente é um desafio atual, que requer ações concretas para a redução dos impactos ambientais e a promoção da sustentabilidade (Rebehy *et al.*, 2023). O tratamento de resíduos é um desses meios, e deve ser realizado de forma eficiente e adequada para garantir a proteção do meio ambiente e a qualidade de vida das populações (Tabelini *et al.*, 2023). Nesse contexto, o uso de reatores contínuos aeróbios automatizados têm sido apontados como uma solução eficiente e econômica para o tratamento de efluentes.

De acordo com Branco (1976), a digestão aeróbia é um processo bioquímico de oxidação em que microrganismos utilizam o oxigênio como produto na reação para degradar a matéria orgânica e obter energia. Quando aplicado ao tratamento de efluentes, é necessário monitorar e controlar continuamente os parâmetros que afetam diretamente o processo, como pH, oxigênio dissolvido e temperatura, a fim de garantir a eficiência da degradação (Von Sperling e Chernicharo, 2005).

No entanto, o monitoramento contínuo e a correção desses parâmetros em processos aeróbios podem ser exaustivos e exigir mão de obra qualificada, resultando em custos mais elevados. Portanto, o uso de reatores contínuos aeróbios automatizados podem trazer benefícios como a redução do tempo de tratamento, a redução de custos operacionais e o aumento da eficiência do processo de tratamento. Além disso, a automação do processo de tratamento pode trazer maior precisão no controle das variáveis críticas, como pH, temperatura e fluxo de ar, garantindo a qualidade do tratamento.

O Arduino tem sido amplamente utilizado como uma plataforma eletrônica de código aberto para desenvolvimento de sistemas automatizados de baixo custo. Um estudo realizado por Cruz e colaboradores (2019) utilizou o Arduino para monitoramento da pressão, volume de biogás, pH e temperatura em um reator anaeróbio. O estudo mostrou que o sistema automatizado apresentou resultados precisos e confiáveis, possibilitando o controle eficiente do processo.

Outro estudo realizado por Fonseca e colaboradores (2019) desenvolveu um sistema de controle de pH para um reator contínuo aeróbio utilizando o Arduino. O sistema consistiu em um sensor de pH conectado ao Arduino, que controla automaticamente a adição de solução tampão para manter o pH em valores ideais para o processo aeróbio. O estudo mostrou que o sistema automatizado foi capaz de manter o pH em valores estáveis, aumentando a eficiência do processo aeróbio. Além disso, o uso do Arduino também permite o armazenamento e análise de dados, possibilitando a identificação de falhas e aprimoramento contínuo do sistema.

Em resumo, o uso do Arduino para o controle automatizado de reatores contínuos aeróbios tem se mostrado uma solução eficiente e econômica para o monitoramento e controle de parâmetros importantes para o processo aeróbio. Nesse contexto, o presente trabalho visa o desenvolvimento de um sistema de baixo custo que integre os parâmetros de monitoramento e controle (temperatura, pH e oxigênio dissolvido) de um reator contínuo mediante a utilização de Arduino Uno e outras ferramentas computacionais. Tendo sua eficiência verificada mediante a degradação de um efluente simulado.

METODOLOGIA

O Arduino Uno foi selecionado para implementar a lógica de controle das bombas e os programas de leitura dos sensores de temperatura, pH e oxigênio dissolvido, por ser um microcontrolador de baixo custo e com bibliotecas adequadas para a operação de sensores e bombas.

Sensores e bombas

Os seguintes sensores foram utilizados:

- Sensor de medição de Temperatura: Utilizou-se o sensor módulo DS18B20. Este sensor possui 3 fios: alimentação (5V), GND (0V) e saída digital. É

necessário conectar um resistor de 4,7 K Ω entre os fios de alimentação e saída. A Figura 1 mostra o sensor de temperatura utilizado.

- Sensor de medição de pH: utilizou-se o kit pH-4502, composto por uma sonda com conexão BNC (que permite leituras de pH entre 0 a 14), e um circuito de processamento do sinal da sonda, tal como mostrado na Figura 2. O circuito de processamento alimenta-se com 5V, e envia um sinal analógico (0 a 5V) proporcional ao valor de pH medido pela sonda. A saída analógica do sensor foi conectada à entrada analógica A4 do Arduino. Para reduzir os problemas de ruído, utilizam-se 10 amostras do sensor para efetuar uma estimativa do pH. A calibração do sensor foi efetuada utilizando amostras com pH de 4; 7 e 10. Assim foi definida a seguinte fórmula para o pH:

$$pH = (-0,0029613 \times S) + 22,565 \quad (1)$$

sendo a variável S a soma de 10 leituras digitais da porta analógica do Arduino (de 0 até 1023) conectada ao sensor.

Figura 1 – Sensor de Temperatura.



Fonte: Autor.

Figura 2 – Sensor de pH. A – Sonda; B - Placa de condicionamento.



(A)



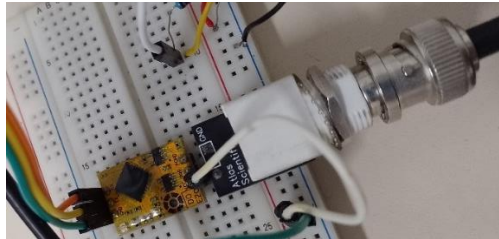
(B)

Fonte: Autor.

- Sensor de medição de oxigênio dissolvido: utilizou-se o kit Dissolved Oxygen da Atlas Scientific, composto por um eletrodo com saída BNC para a coleta de dados, e uma placa EZO-DO eletricamente isolada que processa os sinais do

eletrodo. A placa EZ-DO envia o valor de oxigênio dissolvido usando 2 saídas de transmissão (TX) e recepção (RX) serial (ATLAS SCIENTIFIC, 2019), tal como mostrado na Figura 3.

Figura 3 – Sensor de oxigênio dissolvido.



Fonte: Autor.

Adicionalmente, o reator possui 5 bombas:

- Bomba de aplicação de ácido;
- Bomba de aplicação de base;
- Bomba de ar;
- Bomba de recirculação do reator;
- Bomba de entrada de efluente.

A bomba de ar permite aumentar o nível de oxigênio no reator. Esta bomba foi implementada usando o compressor de ar para aquário RS-2800 da Risheng, com alimentação de 110V corrente alternada. As outras bombas foram implementadas usando bombas peristálticas com alimentação de 12 V e com uma vazão máxima de 100 mL por minuto. A Figura 4 mostra as bombas utilizadas no projeto.

Figura 4 – Bombas. A – Bomba peristáltica; B – Bomba de ar.



(A)



(B)

Fonte: Autor.

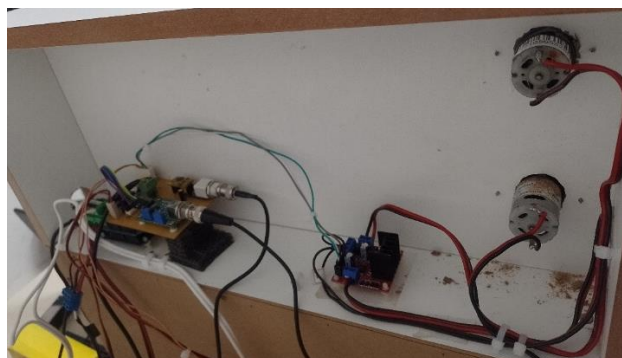
Sistema de controle baseado em Arduino

Para o controle das bombas e aquisição de dados dos sensores de temperatura, pH e oxigênio dissolvido, foram utilizados dois Shields (placa de circuito impresso que podem ser instaladas diretamente em um Arduino ou entre sim) e um circuito driver L298:

- Shield de 4 relés: Os relés são ativados através de sinais digitais enviadas pelo Arduino. Tais relés foram utilizados para controlar as bombas de ar, de recirculação do reator e de entrada de efluente, respectivamente.
- Shield de sensores-driver. Este Shield foi desenvolvido integralmente durante o projeto de pesquisa. O sensor permite a instalação, alimentação e leitura do sensor de temperatura e as placas dos sensores de pH e oxigênio dissolvido, assim como permite acesso a pinos de alimentação 5V, 0V e pinos digitais para instalação de outros sensores, como sensor de ultrassom.
- O circuito driver L298 foi utilizado para controlar as bombas de aplicação de ácido e base. A técnica de modulação por largura de pulso (PWM) foi usada no driver para controlar a vazão e tempo de aplicação do ácido e base. O L298 requer de 4 sinais de controle (2 por bomba). Porém, considerando que as bombas só funcionarão em um sentido de rotação, só um sinal de controle por motor é necessário, sendo que a outra entrada permanece em 0V.

Comunicação serial permite a comunicação entre o Arduino e uma laptop para armazenar e analisar os dados do reator. A Tabela 1 mostra as conexões entres os sensores, atuadores, shields e o Arduino Uno. A Figura 5 mostra o sistema de controle e aquisição de dados usando os Shield e o Arduino Uno, com a conexão do driver L298 e as bombas de ácido e base. As bombas de recirculação e entrada estão sempre ligadas.

Figura 5 – Sistema de controle e monitoramento do reator usando Arduino Uno.



Fonte: Autor.

Tabela 1. Integração dos sensores e atuadores com o Arduino

Shield	Pinos do Arduino	Função
Shield de relés	Digital 6	Controle de bomba de oxigênio (relé J6)
	Digital 5	Controle de bomba de recirculação (relé J5)
	Digital 4	Controle de bomba de entrada (relé J4)
Shields de sensores e driver	Digitais 0 e 1	Comunicação serial com a laptop
	Digital 2	Recepção (RX) com o sensor de oxigênio dissolvido
	Digital 3	Transmissão (TX) com o sensor de oxigênio dissolvido
	Digital 8	Sensor de temperatura
	Digital 9	Controle de bomba de ácido (L298)
	Digital 10	Controle de bomba de base (L298)
	Digitais 11 a 13	Disponíveis

Preparação do Efluente Simulado

Para preparação do efluente simulado, utilizou-se um balão volumétrico de 1L contendo: leite em pó desnatado (2,0 g/L), ácido nítrico (19 µL/L), ácido fosfórico (5,9 µL/L), hipoclorito de sódio (0,3 mL/L), lauril alquil sulfato (0,15 mL/L) e completado com água destilada.

Aclimação do Lodo

O lodo aeróbio foi coletado e colocado no reator para aclimação em recirculação contínua por um período de 15 dias com troca diária de uma parte de efluente pelo efluente simulado.

Determinação da demanda química de oxigênio (DQO) por titulometria

Para preparar os reagentes necessários para o teste de DQO, dissolveu-se sulfato de prata em ácido sulfúrico concentrado para produzir uma solução de $H_2SO_4 + Ag_2SO_4$. Uma solução de dicromato de potássio ($K_2Cr_2O_7$) 0,1N é feita secando o sal a 103°C, pesando e dissolvendo em água deionizada, adicionando ácido sulfúrico e sulfato de mercúrio, e aguardando a temperatura baixar. Essa solução é então diluída em água deionizada para produzir uma solução de $K_2Cr_2O_7$ 0,025N. Para a solução estoque de sulfato ferroso amoniacal, pesa-se e dissolve-se sulfato ferroso amoniacal em água deionizada e adiciona-se ácido sulfúrico concentrado. Essa solução é aferida em um balão volumétrico de 1000ml. Finalmente, para a solução de trabalho de sulfato ferroso amoniacal, dilui-se

a solução estoque em um balão volumétrico de 1000ml. Após isso, pode-se realizar o DQO por titulometria.

Para preparar os tubos de ensaio, pipetou-se 1,5mL de dicromato de potássio 0,1N em cada um. Para os tubos de branco, adicionou-se 2,5mL de água deionizada. Para os tubos de amostra, adicionou-se 2,5mL de amostra. Em seguida, adiciona-se 3,5mL de H₂SO₄ + Ag⁺ em todos os tubos e homogeneiza-se antes de colocá-los no biodigestor a 150°C. Depois de 2 horas, aguardou-se até que os tubos atinjam a temperatura ambiente. O volume de cada tubo é transferido para um Erlenmeyer de 125ml, que é lavado com água deionizada e completado com água até o volume de 50ml. Uma gota de indicador Ferroin é adicionada a cada tubo e, em seguida, é titulado com sulfato ferroso amoniacal 0,02N.

O cálculo da DQO foi realizado utilizando o volume consumido de sulfato ferroso amoniacal na titulação como referência.

$$DQO (mg/L) = \frac{(B - A) NSFA \times 8000 \times f}{V_{AMOSTRA}} \quad (2)$$

Onde:

- *B* : volume gasto de sulfato ferroso amoniacal na titulação do branco.
- *A* : volume gasto de sulfato ferroso amoniacal na titulação de cada diluição da amostra.
- *NSFA* : Normalidade do sulfato ferroso amoniacal, obtida mediante padronização com dicromato de potássio.
- *V_{AMOSTRA}* : volume da amostra utilizada na preparação.
- *f* : fator de diluição.

Cálculo da eficiência

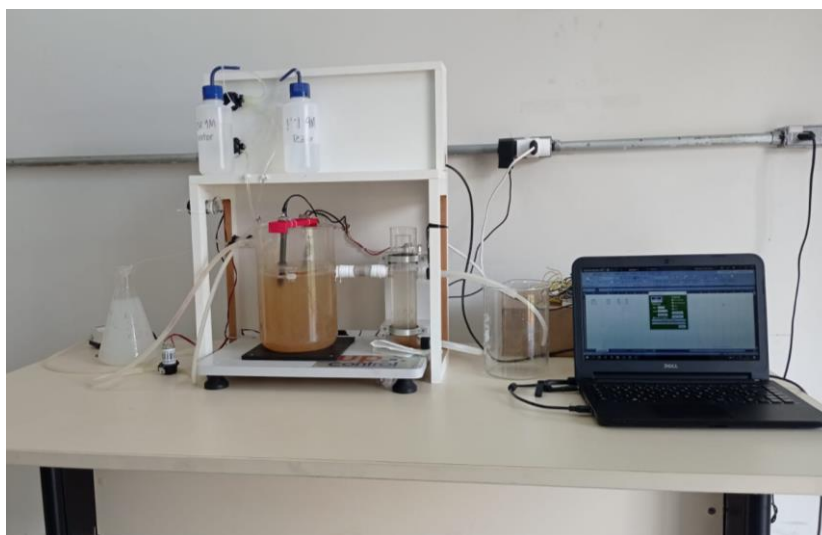
Para calcular a eficiência do processo de digestão aeróbia em um reator contínuo, utilizou-se a seguinte equação:

$$Eficiência = \frac{(DQO_{INICIAL} - DQO_{FINAL})}{DQO_{INICIAL}} \times 100\% \quad (3)$$

RESULTADOS

Após a integração dos parâmetros de controle, a operação contínua e automatizada do reator aeróbio foi iniciada. Durante um período de 1 hora, o efluente simulado foi introduzido no reator de forma contínua através de uma bomba peristáltica. Essa adição foi realizada de modo a manter o nível desejado no reator, de forma que o efluente já degradado foi coletado na saída do reator e o lodo sedimentado retornou ao reator para manter a biomassa no reator. A Figura 6 mostra o momento em que foi realizada a digestão aeróbia.

Figura 6 - Reator aeróbio contínuo com reciclo e automatizado

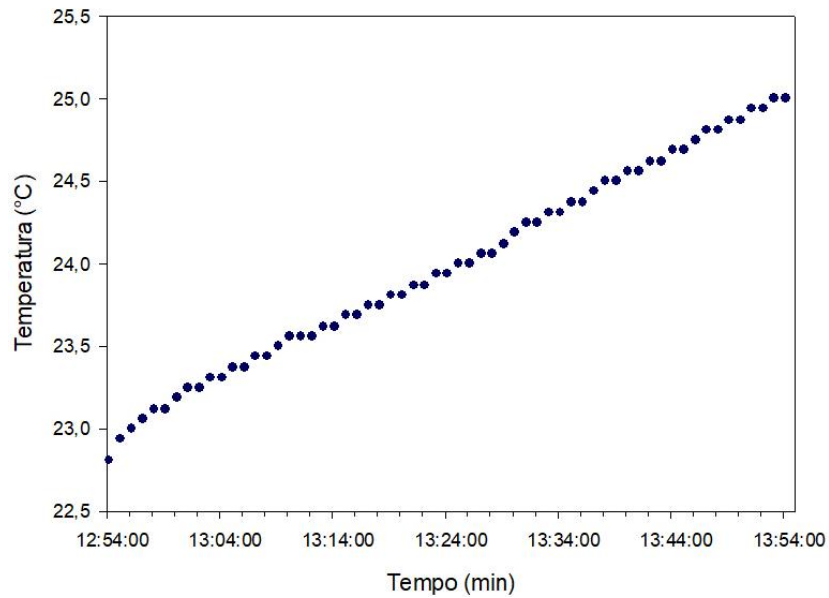


Durante o processo, a temperatura do efluente foi monitorada usando o sensor DS18B20. Como observado na Figura 7 a temperatura se manteve sem muita variação.

O algoritmo de controle de pH implementado no Arduino envia sinais ao driver L298, através das saídas digitais 9 e 10 (ver tabela 1), para controlar às bombas de aplicação de ácido e base, para manter o pH na faixa ideal de 6,5 a 7,5. Para realizar o controle, uma bomba foi programada para controlar o ácido, utilizando uma solução de HCl 4M, e outra para a base, utilizando uma solução de NaOH 1M em 1 L. O algoritmo de controle de oxigênio dissolvido (DO) está baseado no controle de histerese, para manter entre 5 mg/L e 6 mg/L. Os resultados deste teste são apresentados nas Figuras 8 e 9. Observamos uma perturbação nos testes devido à ruído e velocidade de resposta dos

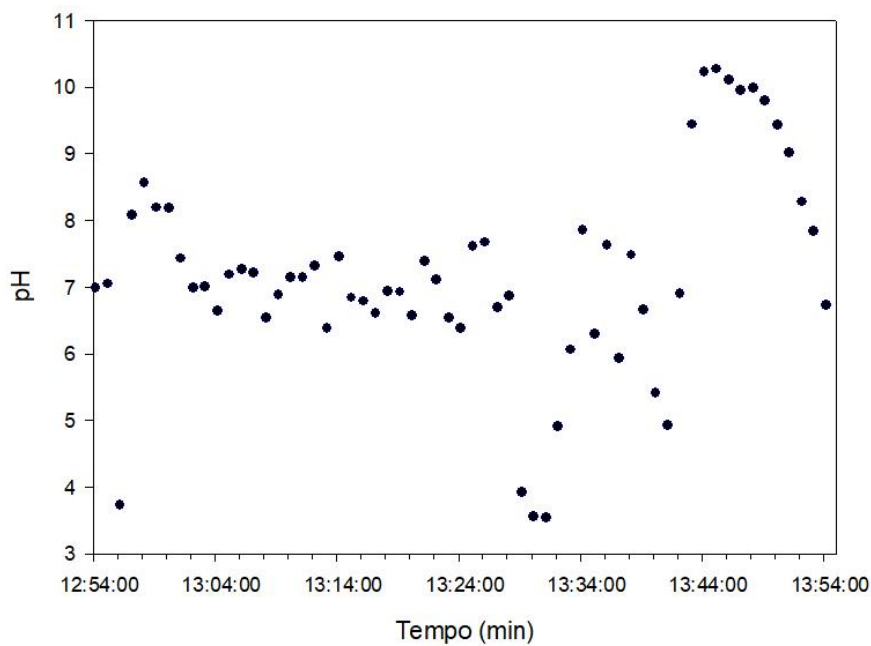
sensores, mas o algoritmo de controle tende a corrigir os valores de pH e oxigênio dissolvido.

Figura 7 - Variação da temperatura do efluente durante o período de 1 hora de digestão aeróbia contínua.



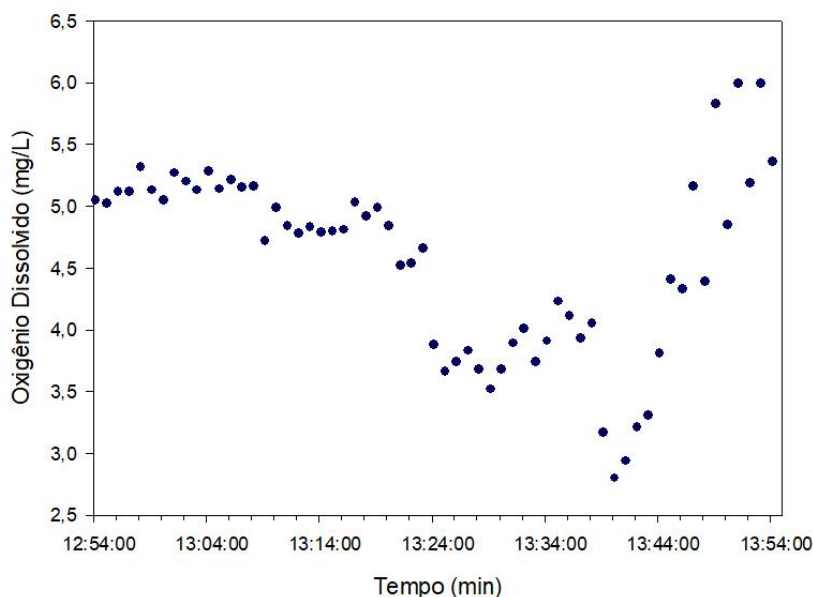
Fonte: Autor.

Figura 8 – Variação do pH do Efluente durante o período de 1 hora de digestão aeróbia contínua.



Fonte: Autor.

Figura 9 – Variação do OD do Efluente durante o período de 1 hora de digestão aeróbia contínua.



Fonte: Autor.

Para fins de avaliação do crescimento dos microrganismos durante a aclimação do lodo foram coletadas amostras do efluente no reator duas vezes por semana para verificar a degradação da matéria orgânica. Após aclimação da biomassa no reator operado em modo batelada com recirculação do lodo, que foi conseguida em 15 dias. Foi iniciado o processo de operação contínua, para tal, foram tomadas amostras do efluente simulado alimentado e na saída do reator após um período de 1h para a determinação por triplicata da demanda química de oxigênio (DQO).

No início do processo da digestão aeróbia o efluente alimentado no reator apresentou uma concentração média de DQO de 2032 mg/L e no final do processo uma concentração média de DQO de 354,56 mg/L. Atingindo-se uma eficiência do processo de digestão aeróbia no reator contínuo com reciclo automatizado de 82,6%.

CONCLUSÕES

A resolução do problema relacionado aos resíduos (industriais e domésticos) e à geração de energias renováveis pode ser alcançada através do desenvolvimento de novas tecnologias. Nesse sentido, foi criado um reator aeróbico contínuo de baixo custo e

automatizado com sucesso. Esse sistema foi capaz de degradar a matéria orgânica e monitorar, em tempo real, parâmetros cruciais do processo, como pH, temperatura e oxigênio dissolvido, utilizando o Arduino Uno. Com base na eficiência do processo de digestão aeróbica contínua de 82,6% medida através da determinação da demanda química de oxigênio (DQO), podemos concluir que o projeto do reator contínuo aeróbio automatizado com Arduino é bem-sucedido em termos de sua capacidade de converter matéria orgânica em produtos desejados. Essa alta eficiência sugere que o sistema é capaz de remover uma quantidade significativa de carga orgânica do efluente, o que é importante para a redução da poluição e a proteção do meio ambiente. Além disso, a automação com Arduino ajuda a garantir um controle preciso do processo e a minimizar erros humanos. A eficiência do reator contínuo será melhorada após uma seleção de sensores.

REFERÊNCIAS

Agência nacional de águas. Resolução ANA nº 91, de 19 de dezembro de 2019. Estabelece critérios para enquadramento de corpos d' água superficiais e subterrâneos e dá outras providências. Brasília, DF, 2019.

Branco, S. M. C. Tratamento biológico de águas residuais. Lisboa: **Fundação Calouste Gulbenkian**, 1976.

Costa, I.M.; Ferreira Dias, M. Evolution on the solid urban waste management in Brazil: A portrait of the Northeast Region. **Energy Reports**, v. 6, p. 878-884, 2020. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484719312429>

Cruz, J. A. *et al.* A new approach using an open-source low cost system for monitoring and controlling biogas production from dairy wastewater. **Journal of Cleaner Production**, v. 241, p. 118284, 2019. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652619331543>

Fonseca, A. A. *et al.* Removal of organic matter from pre-treated domestic sewage in anaerobic biological reactor by a combined system of electrolytic and biological aerobic

treatment. **Revista Ambiente & Água**, v. 14, n. 4, p. 1-15, 2019.
<https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2349>

Hasan, M. N. *et al.* Recent technologies for nutrient removal and recovery from wastewaters: A review. **Chemosphere**, v. 277, p. 130328, 2021.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653521007980>

Rebehly , P. C. P. W. *et al.* Municipal solid waste management (MSWM) in Brazil: Drivers and best practices towards to circular economy based on European Union and BSI. **Journal of Cleaner Production**, v. 401, p. 136591, 2023.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652623007497>

Tabelini, D. B. *et al.* A review on the characteristics and methods of dairy industry wastewater treatment in the state of Minas Gerais, Brazil. **Journal of Water Process Engineering**, v. 53, p. 103779, 2023.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214714423002982>

Von Sperling, M.; Chernicharo, C. A. L. Biological wastewater treatment in warm climate regions, vol 1. Iwa Publishing, 2005.

Khanh Nguyen, V. *et al.* Review on pretreatment techniques to improve anaerobic digestion of sewage sludge. **Fuel**, v. 285, p. 119105, 2021.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236120321013>