

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ENGENHARIA QUÍMICA
CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA

LÉON SILVA ERHARD

**AUTOMAÇÃO DE UM SISTEMA DE DIRECIONAMENTO DE LUZ NO
PROCESSO DE DEGRADAÇÃO FOTOCATALÍTICA DE EFLUENTES
POR IRRADIAÇÃO SOLAR**

FRANCISCO BELTRÃO
2019

LÉON SILVA ERHARD

**AUTOMAÇÃO DE UM SISTEMA DE DIRECIONAMENTO DE LUZ NO
PROCESSO DE DEGRADAÇÃO FOTOCATALÍTICA DE EFLUENTES
POR IRRADIAÇÃO SOLAR**

Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Química, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Departamento Acadêmico de Engenharia Química da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Dr. Douglas da Costa Ferreira
Coorientadora: Dra. Ana Paula Oliveira

FRANCISCO BELTRÃO
2019

FOLHA DE APROVAÇÃO

LÉON SILVA ERHARD

**AUTOMAÇÃO DE UM SISTEMA DE DIRECIONAMENTO DE LUZ NO PROCESSO
DE DEGRADAÇÃO FOTOCATALÍTICA DE EFLUENTES POR IRRADIAÇÃO SOLAR**

Trabalho de Conclusão de Curso, Engenharia
Química, UTFPR.

Data de aprovação: Segunda-feira 01 de Julho de 2019

Douglas Da Costa Ferreira, Doutor

UTFPR

Ana Paula De Oliveira, Doutora

UTFPR

Guilherme Bertoldo, Doutor

UTFPR

“A folha de aprovação assinada encontra-se na coordenação do curso”

Dedico aos meus pais.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais pelo apoio em todos esses anos, me proporcionando as ferramentas necessárias para tornar a pessoa da qual aqui escreve.

Agradeço aos meus amigos Diones Joel Kniecik, Douglas Gabriel Pertile, Bruce Paiva Duarte e Fábio Soares Fabian pela ajuda em todos esses semestres de faculdade. A amizade de vocês para mim será eterna.

A todos os professores que me permitiram chegar ao conhecimento que aqui tenho.

A professora Dra. Ana Paula de Oliveira pela disponibilidade e ajuda dada nos experimentos deste trabalho.

Não há final real. Há apenas o lugar onde você para a história.

Frank Herbert

RESUMO

Reações fotocatalíticas que utilizam luz solar enfrentam problemas ao longo do dia devido a periodicidade, afetando o rendimento da reação. Solucionou-se o problema criando um protótipo baseado em um modelo criado em software CAD do qual move-se radialmente para onde há maior incidência de luz pela interação de sensores resistores do tipo LDR e microcontrolador Arduino. Realizaram-se três experimentos de fotocatalise. Nos dois primeiros ensaios foi realizado o tratamento de 100 mL e 250 mL, respectivamente, de solução do corante Azul de metileno na concentração de 50 mg L⁻¹ em pH inicial 7,0. No terceiro experimento, foi empregada a solução de corante azul reativo 5G na concentração de 50 mg L⁻¹, com pH inicial 2,0. Nos três casos, foi empregada a dosagem de 1 g L⁻¹ de catalisador, sendo no primeiro ensaio utilizado o dióxido de titânio e nos outros dois ensaios o óxido de zinco. O procedimento experimental consistiu na adição do catalisador ao volume de solução de corante a ser tratada, sendo a mistura mantida em ambiente escuro por 15 minutos, e posteriormente, se adicionava peróxido de hidrogênio numa proporção de 100 µL a cada 100 mL de solução. Após isso o reator era exposto a luz solar sob agitação magnética constante e a variação de concentração era medida através das absorbâncias obtidas em relação ao tempo. Todos os ensaios foram realizados no reator fotocatalítico convencional e no protótipo direcionador de luz solar, para fins de comparação da eficiência da degradação dos corantes nos dois sistemas. Os resultados obtidos indicaram que os processos realizados no protótipo possibilitaram o estabelecimento do equilíbrio de forma antecipada, comparado ao Sistema convencional no qual utiliza-se somente de um agitador magnético fixo. Ademais a eficiência na degradação do corante utilizando-se o protótipo foi ligeiramente superior em todos ensaios. Para o primeiro experimento as eficiências foram muito próximas com 98,57% de degradação para protótipo e 98,55% para o agitador fixo, No experimento 2, verificou-se ligeiro favorecimento da degradação do corante com o experimento conduzido o protótipo (63,84%), quando comparado ao Sistema com agitador fixo (62,63%). Para esses experimentos, as taxas de evaporação e temperatura média de operação foram de 0,035 mm min⁻¹ e 21,45°C no experimento 1 e 0,05 mm min⁻¹ e 18,59°C no experiment 2. Para o terceiro experimento, as eficiências foram de 98,48% para o protótipo e 86,39% para o agitador fixo, verificando-se o favorecimento do processo com o Sistema de direcionamento de luz solar possivelmente pela maior incidência de radiação. A taxa de evaporação e a temperatura média do protótipo no experimento foram de 0,03 mm/min e 21,03° C. De forma geral, pode-se verificar a satisfatoriedade do protótipo construído na melhoria de eficiência do processo de fotocatalise solar pela busca automatizada de luminosidade, bem como a possibilidade de monitoramento de condições operacionais como a taxa de evaporação e a temperatura de forma autônoma.

Palavras-chave: Prototipagem, Arduino, fotocatalise

ABSTRACT

Photocatalytic reactions that use sunlight face problems throughout the day due to periodicity, affecting the yield of the reaction. The problem was solved by creating a prototype based on a model created in CAD software from which it moves radially to where there is a greater incidence of light through the interaction of LDR resistors and Arduino microcontroller sensors. Three photocatalysis experiments were carried out. In the first two trials, the treatment of 100 mL and 250 mL, respectively, of the methylene blue dye solution at a concentration of 50 mg L^{-1} at initial pH 7.0 was performed. In the third experiment, the solution of 50 g L^{-1} reactive blue 5G dye solution with initial pH 2.0 was used. In the three cases, the dosage of 1 g L^{-1} of the catalyst was used, with titanium dioxide being the first test and zinc oxide in the other two tests. The experimental procedure consisted of adding the catalyst to the volume of dye solution to be treated, the mixture being kept in the dark for 15 minutes, and hydrogen peroxide was added at a rate of $100 \mu\text{L}$ per 100 mL of solution. After this the reactor was exposed to sunlight under constant magnetic stirring and the concentration variation was measured by the absorbances obtained with respect to time. All the tests were carried out in the conventional photocatalytic reactor and in the solar light directing prototype, in order to compare the efficiency of the dye degradation in the two systems. The results indicated that the processes performed in the prototype allowed the establishment of equilibrium in advance, compared to the conventional system in which only a fixed magnetic stirrer is used. In addition the efficiency in the degradation of the dye using the prototype was slightly superior in all tests. For the first experiment the efficiencies were very close with 98.57% degradation for prototype and 98.55% for the fixed agitator. In experiment 2, there was slight favoring of the degradation of the dye with the experiment conducted the prototype (63, 84%), when compared to the System with fixed shaking (62.63%). For these experiments, evaporation rates and mean operating temperature were $0.035 \text{ mm min}^{-1}$ and $21.45 \text{ }^\circ\text{C}$ in experiment 1 and 0.05 mm min^{-1} and $18.59 \text{ }^\circ\text{C}$ in experiment 2. For the third experiment, the efficiencies were 98.48% for the prototype and 86.39% for the fixed agitator, and the process favoring the Solar Light Steering System was observed, possibly due to the higher radiation incidence. The evaporation rate and the average temperature of the prototype in the experiment were 0.03 mm.min^{-1} and 21.03°C . In general, it is possible to verify the satisfactory nature of the prototype built in the efficiency improvement of the process of solar photocatalysis by the search automated lighting, as well as the possibility of monitoring operating conditions such as evaporation rate and temperature autonomously.

Keywords: Prototyping, Arduino, photocatalysis

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO | 9 |
| 4 OBJETIVOS | 10 |
| 4.1 OBJETIVO GERAL | 10 |
| 4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 10 |
| 5 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 11 |
| 5.4 PROCESSOS OXIDATIVOS AVANÇADOS (POAs)..... | 11 |
| 5.4.1 Fotocatálise por óxidos metálicos | 12 |
| 5.5 CONTROLE DE PROCESSOS | 14 |
| 5.6 PLATAFORMA ARDUINO..... | 15 |
| 5.7 MOTORES SERVO..... | 15 |
| 5.8 RESISTORES LDR | 16 |
| 5.9 AUTOMAÇÃO | 17 |
| 6 METODOLOGIA | 18 |
| 6.1 ESTRUTURA | 18 |
| 6.2 ELETRÔNICA | 21 |
| 6.3 ALGORÍTMO..... | 24 |
| 7 RESULTADOS E DISCUSSÃO | 27 |
| 7.1 PRIMEIRO EXPERIMENTO..... | 27 |
| 7.2 SEGUNDO EXPERIMENTO | 30 |
| 7.3 TERCEIRO EXPERIMENTO..... | 32 |
| 8. CONCLUSÕES | 36 |
| REFERÊNCIAS | 37 |
| APÊNDICE A – PROGRAMAÇÃO DO PROTÓTIPO | 41 |
| APÊNDICE B – TABELA DE DADOS DO PRIMEIRO EXPERIMENTO | 46 |
| APÊNDICE C – TABELA DE DADOS DO SEGUNDO EXPERIMENTO | 47 |
| APÊNDICE D – TABELA DE DADOS DO TERCEIRO EXPERIMENTO | 48 |

1 INTRODUÇÃO

Processos oxidativos avançados tem grande utilidade no tratamento de efluentes, mais especificamente em relação a compostos resistentes aos tratamentos primários e secundários (CHAN; GAMAL EL-DIN; BOLTON, 2012). Dentre esses processos, encontra-se o de fotocatalise heterogênea, que consiste na irradiação de uma espécie condutora promovendo um elétron da banda de valência para a banda de condução, dessa forma podendo oxidar contaminantes orgânicos (BAYCAN PARILTI; AKTEN, 2011).

O uso de irradiação solar em processos de fotocatalise é promissor onde a radiação solar é abundante e lâmpadas UVs são de maior custo (GERNJAK, W.; MALDONADO, M.I.; MALATO, S.; CÁCERES, J.; KRUTZLER, T.; GLASER, A.; BAUER, 2004), mas enfrenta problemas em relação à incidência de luz solar, que varia ao longo do dia, impactando negativamente na velocidade da reação. Sendo assim, além da periodicidade ao longo do dia, também é um fator impactante a angulação da luz solar, a qual afeta a quantidade de luz e temperatura da reação.

Para contornar esse problema, uma possível solução é o direcionamento da do reator para onde há maior incidência de luz solar, as quais podem promover um aumento de rendimento na reação, favorecendo, assim, o processo de fotocatalise solar.

Com o auxílio de um controlador Arduino, resistores sensíveis à luz (LDRs), motores direcionadores (servo), pode-se além de automatizar, proporcionar o direcionamento do reator para onde há maior intensidade de luz solar, sendo possível aumentar o rendimento da reação e tornar o reator fotocatalítico em irradiação solar mais versátil em relação à periodicidade. Essa automatização visa um reator fotocatalítico para tratamento de efluentes com equipamentos de baixo custo. Como análise específica desse estudo, foi empregado o tratamento de efluentes contendo corantes têxteis.

4 OBJETIVOS

4.1 OBJETIVO GERAL

Projetar e construir um sistema automatizado de um reator fotocatalítico com uso de motores elétricos, sensores de luminosidade, nível, temperatura e controlador Arduino.

4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para complementar e melhor explicar o objetivo geral, são propostos os seguintes objetivos específicos.

- Acompanhar o processo de reação fotocatalítica solar e coletar os dados de: tempo de reação, efetividade (degradação do corante) e temperatura;
- Projetar um sistema automatizado para reações fotocatalíticas solares utilizando motores elétricos do tipo servo e sensores de temperatura e nível para monitoramento de variáveis.
- Comparar os resultados da reação através luz solar, com e sem uso do protótipo.

5 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

5.4 PROCESSOS OXIDATIVOS AVANÇADOS (POAs)

Segundo Deng e Zhao (2015), processos oxidativos avançados foram inicialmente aplicados para o tratamento de água potável em 1980, dos quais foram definidos como processos de oxidação envolvendo a geração de radicais hidroxilas (OH^\cdot) em quantidade suficiente para afetar a purificação de água. Posteriormente, o termo se estendeu para processos oxidativos com sulfatos (SO_4^\cdot). Os POAs são aplicados primariamente para a remoção de contaminantes orgânicos e inorgânicos (OLLER, I.; MALATO, S.; SÁNCHEZ-PÉREZ, 2011), entretanto tem baixa aplicabilidade em desativação de patógenos, pois os radicais têm meia-vida curta, porém, atuam como poderosos agentes oxidantes, podendo remover poluentes e reduzir a toxicidade dos seus produtos.

POAs se baseiam na geração de compostos altamente oxidantes, geralmente radicais hidroxilas (OH^\cdot), através de uma ampla combinação de oxidantes e catalisadores, sendo os mais usuais ozônio (O_3), radiação UV e H_2O_2 , dos quais se demonstram efetivos em oxidação e mineralização de ampla quantidade de resíduos de efluentes (MANSOURI, LOBNA; TIZAQUI, CHEDLY; GEISSEN, SVEN-UWE; BOUSSELMI, 2019).

Além disso, Naddeo, Rizzo e Belgiorno (2011) indicam que os POAs tem ganhado rápida importância internacional desde que têm se demonstrado efetivos na remoção de uma ampla variedade de contaminantes orgânicos em água e solos. Porém, problemas relacionados a formação através da oxidação de intermediários possivelmente mais tóxicos e custos operacionais são os principais obstáculos para uma ampla implementação em larga escala.

Conforme processos oxidativos avançados continuam a entrar no mercado, a eficiência de tratamentos se torna um grande fator, sendo diversas variáveis a serem consideradas, como pH, agente oxidante e concentração de catalisador, das quais são analisadas em combinação com os parâmetros dos processos. Além disso, a combinação de vários POAs também são analisadas com a adição de vários agentes oxidantes como oxigênio, ozônio e peróxido de hidrogênio catalisados com ultravioleta (UV), Fe^{3+} e catalisadores como o TiO_2 , tendo em geral, com exceção da

combinação de sistemas de reagentes Fenton combinados com O_3 , demonstrando um incremento em radicais livres na via de reação (TANG, 2016).

Segundo Poyatos et al (2010) os processos oxidativos avançados podem ser separados de acordo com a tabela 1:

Tabela 1 – Processos Oxidativos Avançados

| Processos Oxidativos Avançados | | | | |
|------------------------------------|-------------|-----------------------------|------------------------|---------------------------|
| Processos Homogêneos | | | | Processos Heterogêneos |
| Com fornecimento de Energia | | Sem fornecimento de Energia | | |
| Radiação Ultravioleta | Ultrassom | Elétrica | O_3 em Meio Alcalino | Ozonização Catalítica |
| O_3/UV | O_3/US | Oxidação Eletroquímica | O_3/H_2O_2 | Ozonização Fotocatalítica |
| H_2O_2/UV | H_2O_2/US | Oxidação Anódica | $H_2O_2/Catalisador$ | Fotocatálise Heterogênea |
| $O_3/H_2O_2/UV$ | — | Eletro-Fenton | — | — |
| Foto-Fenton($Fe^{2+}/H_2O_2/UV$) | — | — | — | — |

Fonte: POYATOS et al (2010).

5.4.1 Fotocatálise por óxidos metálicos

Os processos de oxidação avançados do tipo degradação fotocatalítica, segundo Petrovic; Radjenovic e Barcelo (2011), apresentam diversas reações envolvendo óxidos metálicos como TiO_2 , ZnO , Fe_2O_3 , WO_3 além de outros semicondutores como CdS . Entretanto, pelas características como toxicidade, disponibilidade, fotocorrosão, resistência, eficiência catalítica e custo, TiO_2 se torna a opção preferida (ZOU, YILUN; KANG, SHI-ZHAO; LI, XIANGQING; QIN, LIXIA; MU, 2014). Esse óxido já era aplicado como tratamento adicional de água por sua eficiência na remoção de bactérias, vírus (WANG, WANJUN; HUANG; YU; WONG, 2015), desativação de células cancerígenas (LI, QINGNING; WANG, XUEMEI; LU, XIAOHUA; TIAN, HONGER; JIANG, HUI; LV, GANG; GUO, DADONG; WU, CHUNHUI; CHEN, 2009) e controle de odores (LU, NA; YU, HONG TAO; SU; WU, 2012). Algumas vantagens do uso do óxido são: baixo custo (NI, MENG; LEUNG, MICHAEL K.H.; LEUNG, DENNIS Y.C.; SUMATHY, 2007), estabilidade em ampla faixa de pH, possibilidade de aderir a outros tratamentos (WANG, CUN; XU, BO-QING; WANG, XINMING; ZHAO, 2005).

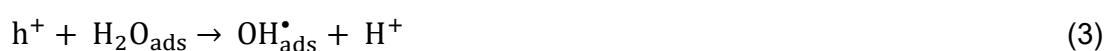
Segundo Gulyas (2014), reatores fotocatalíticos solares abertos, tem como consequência uma taxa de evaporação considerável da água em suspensão, especialmente em altas temperaturas. A elevação da temperatura favorece a taxa de reação, mas a adsorção de compostos orgânicos pela superfície do fotocatalisador diminui conforme o aumento da temperatura.

5.4.1.1 Reação Fotocatalítica

Segundo Cataño; Valencia ; Hincapié; Restrepo e Marín (2012), as reações heterogêneas fotocatalíticas podem ser representadas por uma série de etapas. Uma molécula de óxido metálico(MO_x) gera um elétron (e^-) e uma lacuna de elétrons (h^+) conforme equação(1) :



Segundo Lasa; Benito e Salices(2005) há os seguintes progressos da reação de fotocatalise: Transferência de elétron para o substrato adsorvido(RX_{ad}), água adsorvida(H_2O_{ads}) ou íon(OH_{ad}^-) para a lacuna de elétron conforme as equações (2), (3), (4) :



Na quinta etapa, equação (5), devido à grande concentração de íons OH^- , a água se dissocia:



O oxigênio molecular atua, então, aceitando o elétron, conforme equação (6):



Os íons superóxidos podem então se envolver nas reações das equações (7), (8):



A fotoconversão de peróxido de hidrogênio adiciona mais radicais OH^{\bullet} livres na reação, conforme equação (10):



Finalmente, os radicais OH_{ad}^{\bullet} oxidam os poluentes orgânicos adsorvidos na superfície das partículas de óxido metálico, conforme equação 11 :



5.5 CONTROLE DE PROCESSOS

Um sistema de controle é um sistema que fornece a resposta desejada para controlar uma saída (KHARE, VIKAS; KHARE, CHESHTA; NEMA, SAVITA; BAREDAR, 2019).

O controle de processos tem um importante papel em um processo de uma planta pode ser controlado e, conseqüentemente ações de emergência podem ser executadas. Sem controles confiáveis e adequados, não é possível efetuar o monitoramento, controle e eliminação de alguma ocorrência. O processo de controle pode variar de ações manuais simples à controladores lógicos computadorizados remotos em relação ao lugar da qual uma ação é requerida (NOLAN, 2011).

5.6 PLATAFORMA ARDUINO

Um microcontrolador é um circuito integrado único, do qual executa um programa com o propósito de controlar algum dispositivo. Micro controladores são comumente encontrados em automóveis, teclados, sistemas de segurança e entre outros dispositivos. Alguns dispositivos requerem um poder de processamento que não justificariam o uso de processadores complexos e de maior custo, dos quais requerem uma grande demanda de memória e circuitos complementares (STEINER, 2005).

Ainda segundo Steiner (2005), sistemas baseados em microcontroladores são geralmente menores, de maior confiabilidade e de menor custo comparados à computadores pessoais. São ideais para aplicações onde custos e tamanho devem ser levados em consideração,

Arduino é uma plataforma para fabricação de protótipos eletrônicos, sendo esta plataforma projetada com microcontroladores Atmel Avr, com possibilidade de programação baseada em linguagem C/C++ que permite a comunicação com um computador pessoais através de portas USB via IDE (*Integrated Development Environment* “Ambiente de desenvolvimento integrado) (HUGHES, 2016). Foi desenvolvida por um consórcio de pesquisadores na Itália como um sistema de arquitetura aberta, podendo ser utilizado por entusiastas, engenheiros e programadores. O objetivo de sua criação é o de elaborar um dispositivo de baixo custo, acessível e de fácil programação, possuindo diversos modelos de placas, sendo algumas Mega, Uno, Pro mini e micro (MINNS, 2013).

5.7 MOTORES SERVO

Segundo Flieh et al (2018) motores servo são amplamente utilizados em aplicações industriais que requerem um controle preciso de aceleração, velocidade e posição. São usados em robôs industriais, máquinas de laminação, impressoras, entre outros. Os motores requerem um alto desempenho dinâmico, onde se utilizam diversos tipos para esse propósito, sendo os PMSMs (*Permanent magnet synchronous motors*) os mais comumente utilizados devido a sua alta densidade de potência e alta eficiência.

Herres (2014) indica que o controle de motores servo é possível pela detecção da posição ou velocidade do motor ou carga, sendo essa informação retornada ao controlador. O termo motor servo não denota um tipo particular de motor, mas sim uma gama de combinações de motor, sensor e controlador. As características padrão é a de que um servo é capaz de rotacionar de 120° a 180°. O tipo contínuo é capaz de rotacionar até 360° em qualquer direção.

5.8 RESISTORES LDR

Light Dependent Resistors ou LDRs são resistores que apresentam mudança de resistência elétrica quando submetidos à ação da luz, oferecendo baixa resistência elétrica quando iluminados e o contrário para ausência de luz (ROGERS; WRIGHT; YATES, 2013). Os mais comuns variam de 10 MΩ para 100 Ω expostos a luz solar (DOLAN; PERCIVAL; DUFFY, 1996). É composto por semicondutores como CdS, CdSe, CdTe, PbS e PbSe (KOVAL, V. M.; BOGDAN, O. V.; SPIVAK, V. M.; YAKYMENKO, 2009). Seus usos são variados, desde alarmes, controles de iluminação (RAJPUT, K. Y.; KHATAV, GARGEYEE; PUJARI, MONICA; YADAV, 2013), contagem industrial, controle de portas (SINGH, RANJIT SINGH SARBAN; IBRAHIM, AHAMED FAYEEZ TUANI; SALIM, SANI IRWAN M.D.; CHIEW, 2009) e outros. A produção desses resistores consiste na conexão do material com fotossensibilidade com os terminais, sendo uma parte fina da camada exposta a incidência externa de luz (BHATTACHARYA, 2011). Uma das principais desvantagens de resistores LDR é o demorado tempo de resposta, cerca de 75 milissegundos para detectar a queda de intensidade de luz e maior demora em relação ao aumento de intensidade (BISHOP, 2013), além de possuir resposta não linear (YOUNG, 2001).

5.9 AUTOMAÇÃO

Segundo Brocal; Sebastián; González (2019), automação é o fenômeno de substituição de mão de obra humana por robôs e máquinas. A automação industrial é um campo vasto e diverso, que engloba processos, máquinas, eletrônica, *software* e sistemas da informação trabalhando para um conjunto comum de metas: aumento de produção, melhoria de qualidade, diminuição de custos e flexibilização;

A automação de processos é uma inovação tecnológica que torna os negócios mais modernos e competitivos (BARBOSA; CARVALHO; FILHO, 2014). Dentre as razões para se automatizar processos estão o aumento nos padrões de qualidade e eficiência, a periculosidade das condições de trabalho e o alto custo de mão de obra especializada. O uso de tecnologia para automatizar processos de grande dificuldade ou tarefas repetitivas afetam positivamente os impactos nos problemas de segurança e ergonomia, assim como outros desafios experimentados por várias organizações, como envelhecimento da mão de obra e aumento de lesões de trabalho (BOTTI; MORA; REGATTIERI, 2017).

6 METODOLOGIA

6.1 ESTRUTURA

Para que houvesse uma avaliação inicial da estrutura necessária, efetuou-se a criação de um projeto em software CAD, do qual se simularia os movimentos do protótipo para então, a partir de suas dimensões, iniciar o processo de construção da estrutura.

Após a simulação de movimentos em um aplicativo CAD, a estrutura pronta no programa resultou nas Figuras 1, 2 e 3, onde há os seguintes pontos a serem ressaltados: a matriz de sensores LDR, suporte para contrapeso, suporte para sensor de distância por ultrassom e suporte para termopar.

Na Figura 1, é possível através da vista frontal do projeto observar, em cima do reator de vidro, o sensor de nível por ultrassom e o suporte para o termopar abaixo deste. O nível é medido pelo espaço vazio entre a coluna de líquido até o sensor. O termopar mede a temperatura dentro da coluna de fluido, reportando as leituras para o microcontrolador.

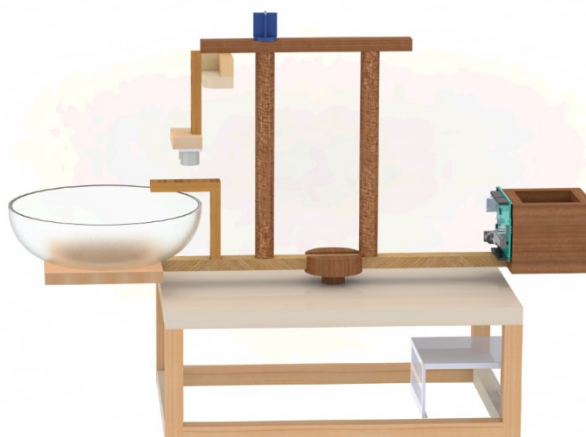
Figura 1 - Vista frontal do projeto de protótipo



Fonte: Autoria própria, 2019.

Na Figura 2 observa-se, através da lista lateral, o suporte para contrapeso na extremidade do suporte em que fica o reator de vidro.

Figura 2 - Vista lateral do projeto de protótipo

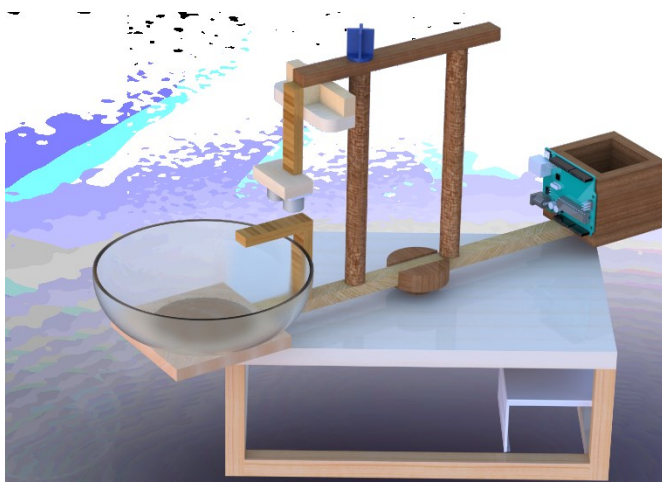


Fonte: Autorial própria, 2019.

O suporte para contrapeso serve para caso a massa de coluna de líquido comece a envergar o suporte onde fica o reator e fazer o motor servo trabalhar irregularmente. Deve-se então efetuar a adição de uma massa na outra extremidade deslocando o centro de massa para onde o motor deverá trabalhar, permitindo seu uso correto.

Na Figura 3, indica-se a movimentação do protótipo. Esta é radial, permitindo deslocar o reator de vidro para onde há a maior incidência de luz. Isso ocorre através matriz de sensores LDR que fica no topo do projeto, em azul escuro.

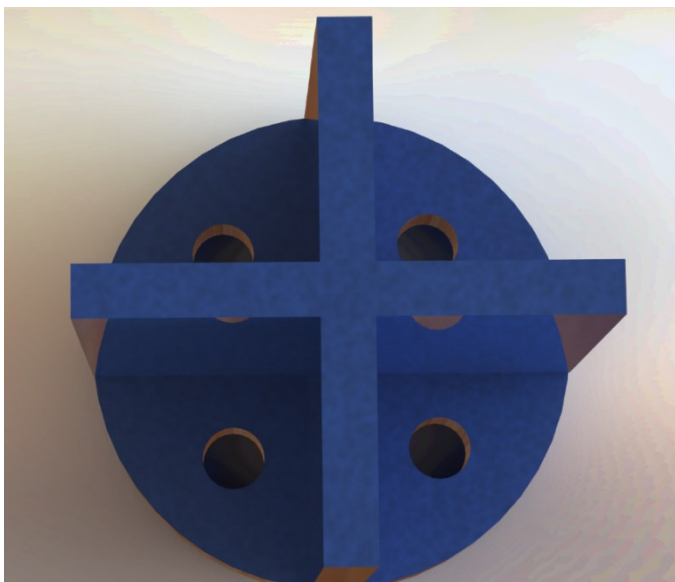
Figura 3 – Projeto de Protótipo



Fonte: Autorial própria, 2019.

A matriz de sensores LDR, Figura 4, contém 4 resistores sensíveis à luz, do qual o retorno de corrente no microcontrolador *Arduino Uno*® é interpretado como um sinal analógico de 0 a 1000, em que 1000 é o valor de maior corrente possível, o que significaria que a resistência dos LDRs é mínima, indicando a maior incidência de luz.

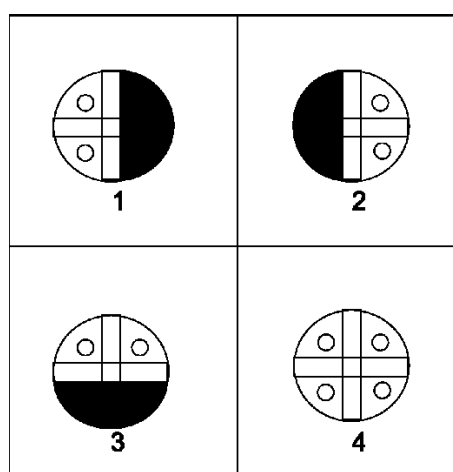
Figura 4 - Matriz LDR



Fonte: Autoria própria, 2019.

As configurações possíveis de iluminação se encontram na Figura 5:

Figura 5 - Possíveis configurações de iluminação



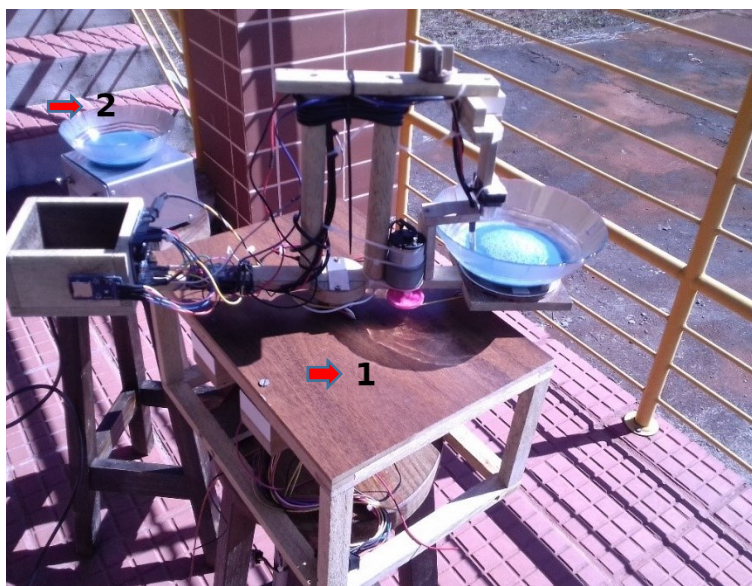
Fonte: Autoria própria, 2019.

Na configuração de tipo 1, a matriz está sendo iluminada lateralmente na esquerda, gerando sombra nos LDRs da direita. Já na configuração de tipo 2 ocorre

o contrário. Na 3 configuração, a iluminação é frontal e na última, todos sensores estão sendo iluminados. Com isso, há diferenças nos valores recebidos pelo Arduino, permitindo efetuar o controle.

O suporte para contrapeso serve para caso a coluna d'água do reator possa danificar o eixo que se movimenta, este deslocaria o centro de massa para que não afete negativamente o desempenho do motor de movimentação, permitindo então, uma distribuição de força mais uniforme. Construiu-se o protótipo de acordo com o projeto. Na Figura 6, o sistema indicado como 1 é o protótipo construído para os experimentos e o sistema com indicação 2 é o sistema convencional utilizado para comparação.

Figura 6 - Protótipo construído e em execução.

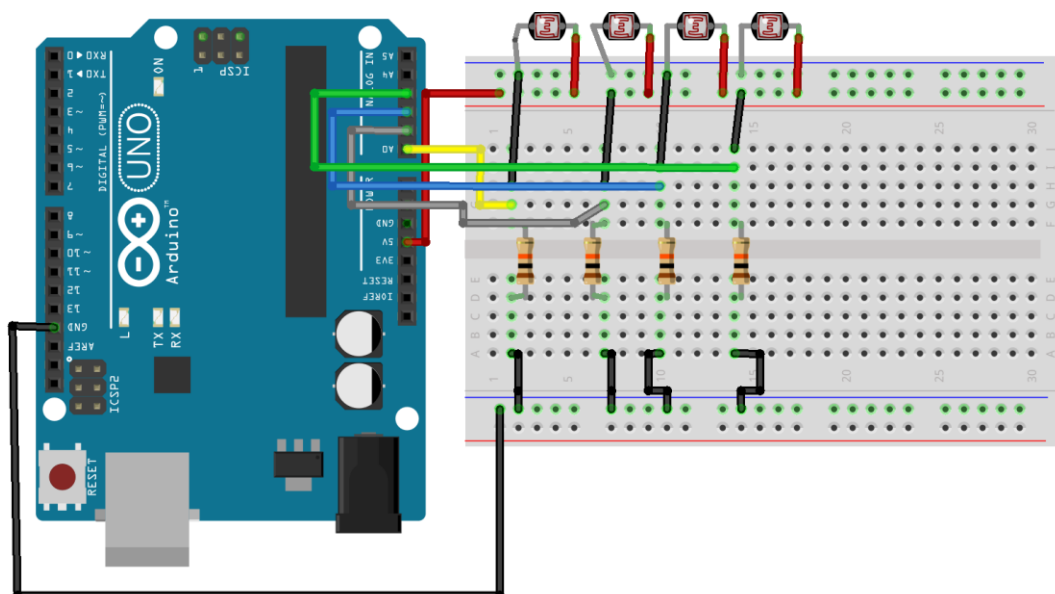


Fonte: A autoria própria, 2019.

6.2 ELETRÔNICA

A esquemática eletrônica está dividida em 5 partes. Na Figura 7, é representada a configuração em como a matriz de sensores LDR se encontra montada. Todos os resistores estão conectados a uma tensão de 5 V e seu sinal passa pelo Arduino antes de resistores de 10 K Ω para a conexão terra. Os sinais de entrada pelas portas A0, A1, A2 e A3 representam as posições inferior esquerda, inferior direita, superior esquerda e superior direita, respectivamente. Isso garante que o Arduino receba o sinal que indique a maior ou menor incidência de luz.

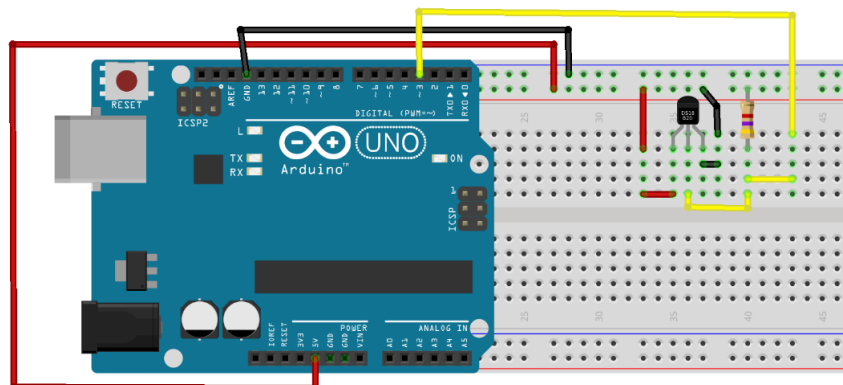
Figura 7 - Esquemática de sensores LDR



Fonte: Autoria própria, 2019.

Para monitoramento de temperatura instalou-se um termopar com a configuração especificada na Figura 8, onde o transistor representa o termopar que está em sistema *pullup* para evitar sobrecargas no controlador. O termopar é alimentado por uma tensão de 5V. O terminal central é a saída da qual permite a comunicação digital com o Arduino. Esta se encontra ligada na porta digital 3, permitindo a interpretação da temperatura por parte do controlador através da entrada.

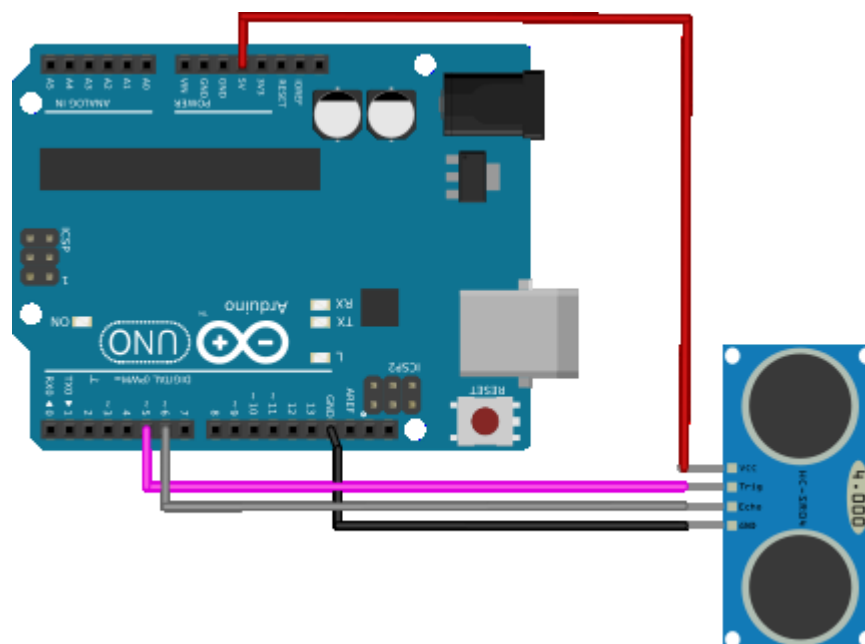
Figura 8 - Esquemática do termopar



Fonte: Autoria própria, 2019.

Na Figura 9, representam-se as conexões para o módulo sensor de ultrassom. Isto permite medir a taxa de evaporação do experimento, através da variação de nível. Para isso, conectou-se os pinos *Trigger* e *Echo* nas entradas digitais 5 e 6 do Arduino, respectivamente.

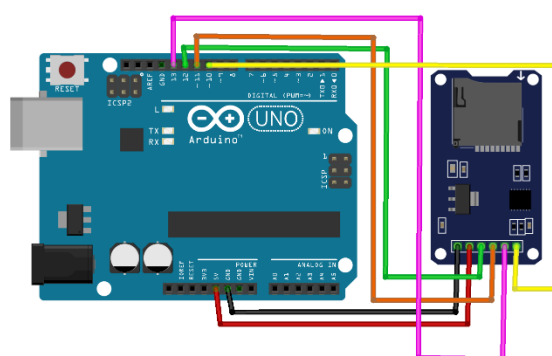
Figura 9 - Esquemática do sensor de nível



Fonte: Autoria própria, 2019.

Para a conveniência do usuário, instalou-se um módulo para cartões MicroSD, permitindo a obtenção dos dados com pouco monitoramento pessoal do equipamento, bastando inserir o cartão e ligar o protótipo. A esquemática se encontra na Figura 10, onde as conexões CS, SCK, MOSI, MISO, VCC e GND estão conectadas nas portas D10, D13, D11, D12, 5V e GND do Arduino, respectivamente.

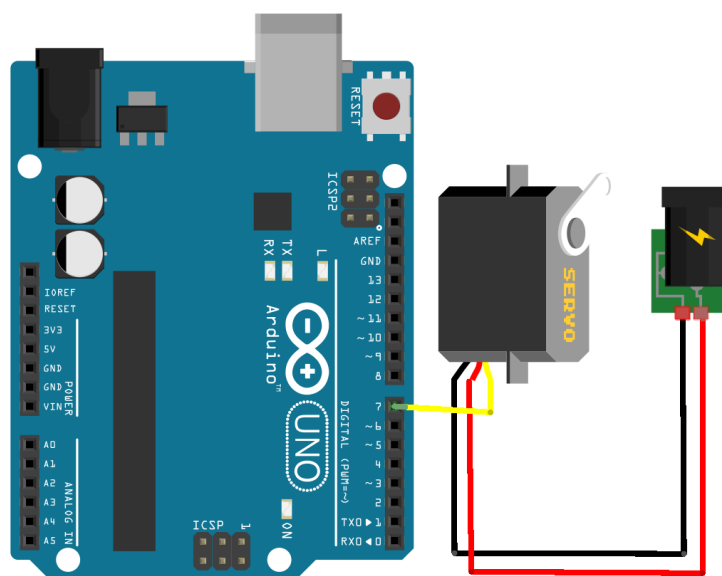
Figura 10 - Esquemática de módulo MicroSD



Fonte: Autoria própria, 2019.

Para o controle da incidência de luz, utilizou-se um motor servo que rotaciona o eixo em que se encontra o reator, permitindo que este seja exposto a maiores incidências de luz. O servo encontra-se, conforme a Figura 11, conectado na entrada digital 7 para que se envie pulsos para direcionar e controlar a intensidade da rotação.

Figura 11 - Esquemática de motor servo



Fonte: Autoria própria, 2019.

Para fornecer a agitação um motor de corrente contínua de 6V foi adicionado junto com uma transmissão de movimento do tipo correia. Para que se possa agitar magneticamente, tem-se ímãs de neodímio nas pontas do agitador. O Motor e o Arduino foram ligados a uma fonte de 250 W.

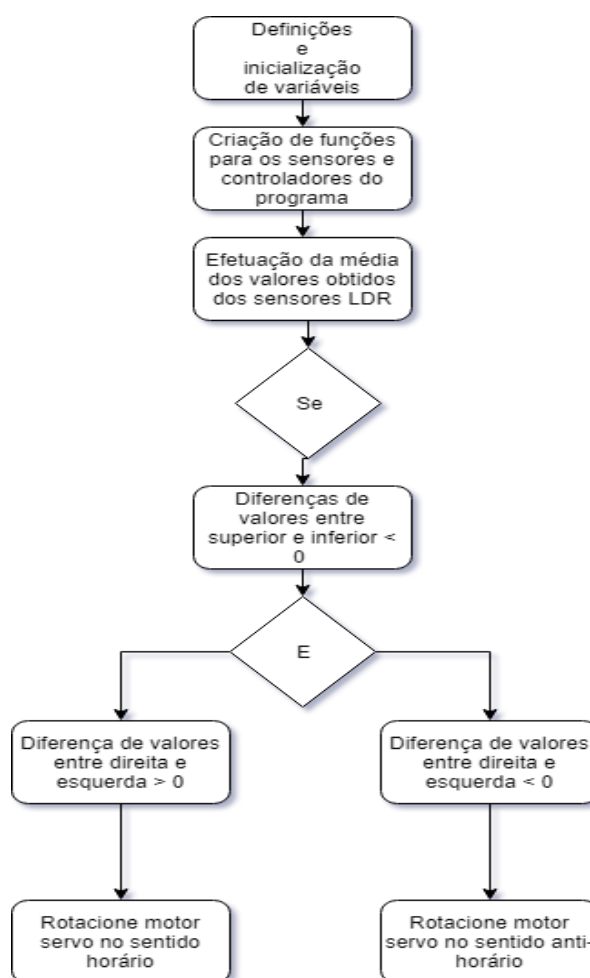
6.3 ALGORÍTMO

O microcontrolador Arduino deve medir e gravar os dados de temperatura e nível a fim de monitorar essas variáveis, para possível determinação de taxas de evaporação e determinação de temperaturas médias. Para isso, utilizou-se bibliotecas que permitem essa funcionalidade. Inicia-se as funções juntamente com a abertura e preparação de escrita de dados no cartão *microSD*. Após a habilitação para escrita, realiza-se o algoritmo e, com a inserção da função para gravação em sua resposta, os dados são então armazenados num arquivo de nome “LDRs” no cartão, sendo que caso já exista, deverá então abri-lo e começar a escrever no final, permitindo o

aproveitamento de dados anteriores. Os dados obtidos e escritos no arquivo são então organizados em 3 colunas para transferência e interpretação em programas que processam dados: temperatura, nível e tempo. Os dados de temperaturas são obtidos de acordo com a interação do termopar com o controlador através de duas bibliotecas, sendo seus valores em °C. O medidor de nível, por medir a distância entre este e a coluna de líquido, mede o espaço “vazio” até a solução. É possível com sua variação determinar a taxa de evaporação. Os dados estão em milímetros.

Para a parte de controle, a lógica se utilizou da programação do Arduino, sendo representado a lógica no pseudo algoritmo da Figura 12:

Figura 12 - Pseudo algoritmo de controle



Fonte: Autoria própria, 2019.

A aplicação do fluxograma encontra-se no código utilizado pelo protótipo disponibilizado no apêndice A. A lógica apresentada na Figura 12 representa o controle do servo para caso a iluminação não seja a maior no reator. Para isso, definiu-se as variáveis necessárias para valores médios de entrada em relação a matriz de

sensores LDR. Quatro variáveis foram necessárias, valores de média dos LDRs de posição superior, inferior, lateral esquerda e lateral direita.

Após receberem os valores dos devidos dados, a principal análise é efetuada. Caso um dos lados esteja melhor iluminado que outro, por exemplo o lado esquerdo está melhor iluminado que o direito, o motor servo recebe um sinal através do *Arduino* ao analisar a diferença entre os dois lados e o valor ser positivo, acima da tolerância, movimentando o eixo no sentido anti-horário. Caso o contrário, o lado esquerdo está melhor iluminado e o valor é então negativo e acima da tolerância, movimentando-se, então, no sentido horário. Há também a análise para caso o lado superior esteja melhor iluminado do que o inferior. Se a diferença estiver acima da tolerância e ser negativa, haverá também a análise novamente dos lados para decidir qual o melhor sentido para se rotacionar. Caso o direito esteja melhor iluminado, a rotação será no sentido horário, senão, anti-horário.

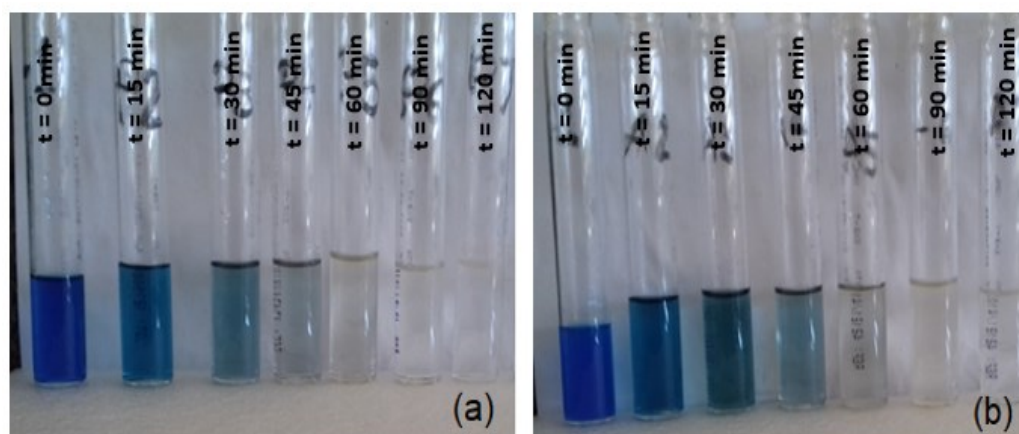
Para a realização dos experimentos de fotocatalise empregando o protótipo, prepararam-se soluções do corante azul de metileno na concentração de 50 mg/L com pH 7,0 e do corante azul reativo 5G (50 mg/L e pH 2,0). Em seguida, fez-se a adição do catalisador (óxido de zinco ou dióxido de titânio), nas dosagens de 1 g/L. Após a mistura, foram aguardados 15 minutos com a homogeneização na ausência de luz e então adicionou-se 100 µL de peróxido para cada 100 ml de solução. O sistema foi mantido sob agitação por determinado intervalo de tempo, sendo o meio exposto da radiação solar. Após isso, foram coletadas as amostras, centrifugadas à 3000 rpm por 10 minutos e a solução analisada no espectrofotômetro UV-Vis (614 nm para o azul reativo 5G; 665 nm para o corante azul de metileno), visando a determinação da concentração de corante residual. Cada amostra foi retirada em um intervalo de 15 minutos até o equilíbrio ser estabelecido. Os experimentos de fotocatalise conduzidos no protótipo foram denominados Experimento 1, 2 e 3. No primeiro caso, foi realizado o tratamento de 100 mL de solução do corante azul de metileno, com o catalisador de dióxido de titânio. Para o experimento 2, novamente utilizou-se o corante azul de metileno, mas com um volume reacional e 250 mL e o catalisador de óxido de zinco. Por fim, no experimento 3, realizou-se ensaios de degradação de 250 mL do corante azul reativo 5G, com o catalisador de óxido de zinco. Para fins de comparação, os mesmos experimentos realizados com o protótipo foram reproduzidos no sistema convencional, utilizando apenas um agitador magnético fixo exposto a luz solar.

7 RESULTADOS E DISCUSSÃO

7.1 PRIMEIRO EXPERIMENTO

Realizou-se o experimento no dia 04/06/2019, sendo a temperatura média do dia 18°C, com máxima de 20°C. O experimento foi realizado das 10h00min às 12h00min, na condição de incidência máxima da radiação solar, visando a degradação do corante azul de metileno (50 mg L⁻¹, pH 7,0) empregando o catalisador de dióxido de titânio. Na Figura 13, representam-se as amostras coletadas ao longo do tempo de reação, evidenciando-se visualmente a degradação do corante, tanto para o ensaio utilizando o protótipo (Figura 13(a)), como para o Sistema convencional (Figura 13(b)). Nota-se que a partir da amostra 4 (tempo de reação = 45min), uma diferença significativa na coloração, aparentando, qualitativamente, que as amostras protótipo atingiram o equilíbrio antecipadamente, quando comparado aos Sistema convencional.

Figura 13 - Amostras obtidas do experimento



Fonte: Autoria própria, 2019.

Os dados de concentração por amostra foram analisados por Espectrofotometria UV-Vis através de uma curva de calibração “ $C = 27,043 \cdot Abs$ ”. Na Tabela 2, apresenta-se a variação de concentração de azul de metileno em relação ao tempo de realização de experimento.

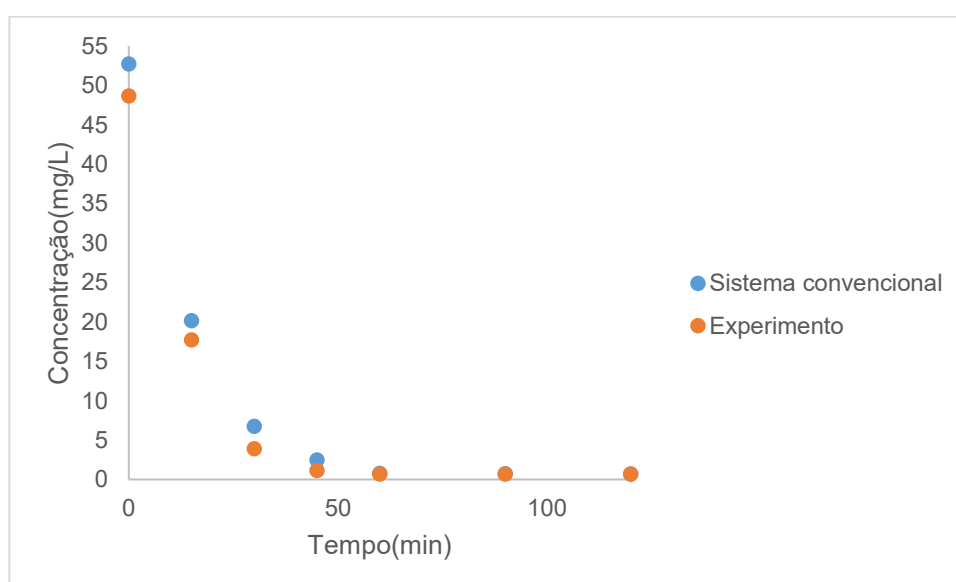
Tabela 2 – Comparação de concentrações por tempo no experimento

| Tempo(min) | Concentração no sistema convencional(mg/L) | Concentração no experimento(mg/L) |
|------------|--|-----------------------------------|
| 0 | 52,72 | 48,68 |
| 15 | 20,14 | 17,74 |
| 30 | 6,76 | 3,89 |
| 45 | 2,51 | 1,17 |
| 60 | 0,784 | 0,715 |
| 90 | 0,761 | 0,692 |
| 120 | 0,692 | 0,692 |

Fonte: Aatoria própria, 2019.

Observa-se que em 30 minutos de reação fotocatalítica, a diferença de concentração é de quase o dobro entre o protótipo e o sistema convencional. Além disso, observa-se que o equilíbrio foi estabelecido mais rapidamente para o ensaio conduzido no protótipo (≈ 90 min), em comparação ao sistema convencional (≈ 120 min). A eficiência aos 90 minutos, quando a solução do protótipo já atingiu o equilíbrio foi de 98,57% contra 98,55% do agitador. Isso pode ser melhor visualizado no gráfico 1, em que se apresenta a variação da concentração do corante azul de metileno.

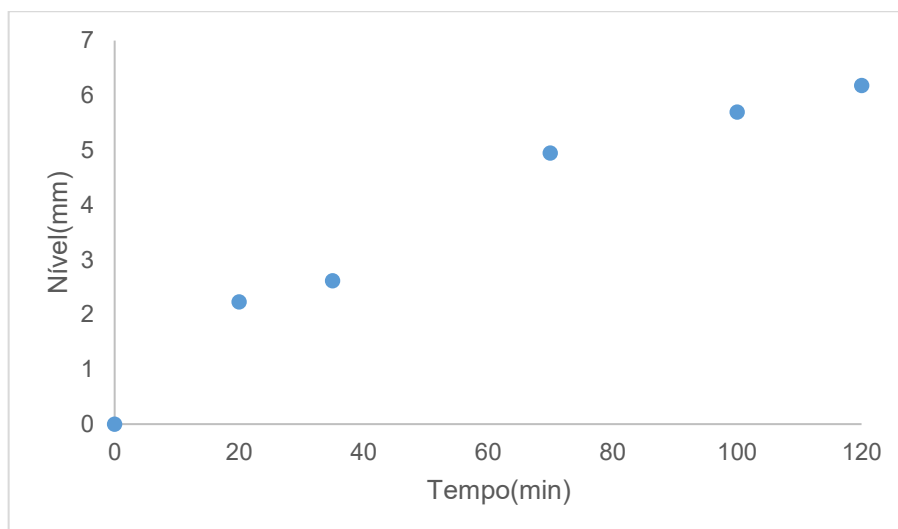
Gráfico 1 - Variação de concentração de azul de metileno por tempo no primeiro experimento.



Fonte: Aatoria própria, 2019.

Os dados obtidos pelo experimento em relação a variação de nível podem ser visualizados no Gráfico 2:

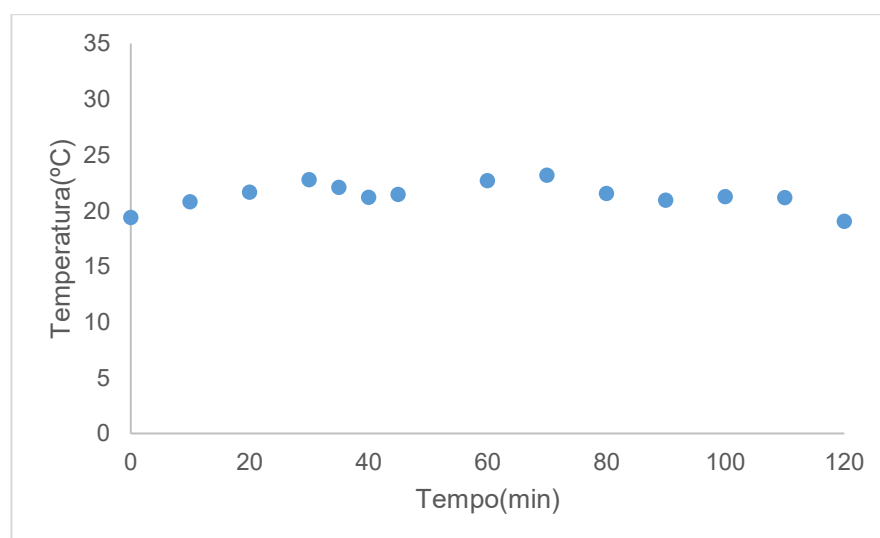
Gráfico 2 - Variação de nível no primeiro experimento



Fonte: Autoria própria, 2019.

A variação de nível observada no Gráfico 2, consiste na distância entre o sensor e a coluna líquido. Conforme retiram-se amostras do reator ou a solução sofre evaporação, este nível tende a diminuir. Sabendo-se o volume de amostras retiradas e quanto seria a variação de nível prevista, é possível, por exemplo, obter a taxa de evaporação do experimento. Como cada amostra tem aproximadamente 4 mL e a variação estimada de nível seria de 2 mm, obteve-se uma taxa de evaporação de $0,035 \text{ mm min}^{-1}$. Outros dados coletados no experimento foram os de temperatura de solução em relação ao tempo, encontrado no Gráfico 3:

Gráfico 3 - Variação de temperatura no primeiro experimento



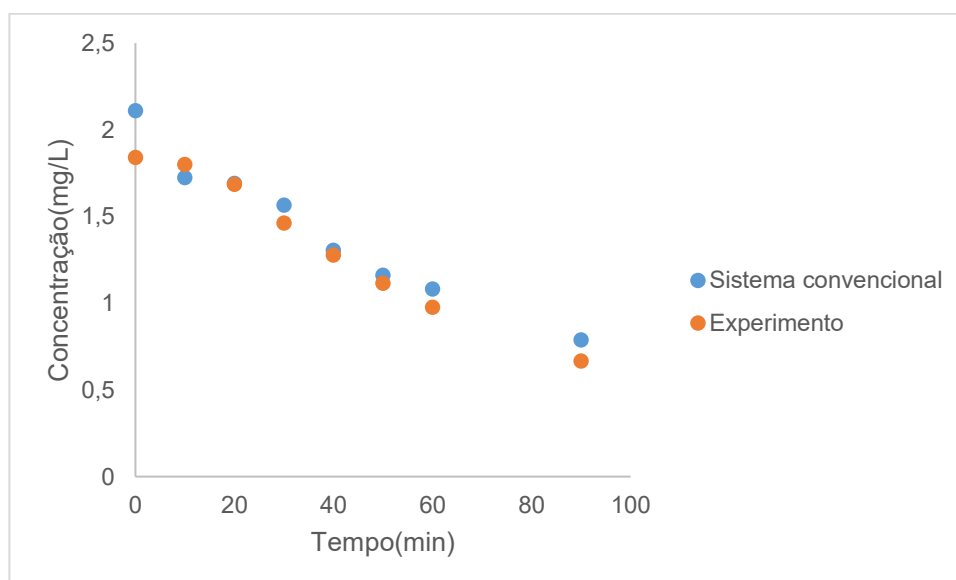
Fonte: Autoria própria, 2019.

Como pode ser observado no Gráfico 3, a temperatura no experimento permaneceu aproximadamente constante, sendo a temperatura média 21,45 °C. Ambos os dados do experimento, temperatura e nível, se encontram no apêndice B.

7.2 SEGUNDO EXPERIMENTO

No segundo experimento, foi empregada a solução do corante azul de metileno (50 mg L⁻¹) e o catalisador de óxido de zinco, conforme as proporções indicadas na metodologia. Realizou-se o experimento no dia 05/06/2019 das 10h 50min às 12h 50min, com o dia tendo uma temperatura média de 18°C e máxima de 21°C. Os resultados de concentração do corante em função do tempo podem ser visualizados por meio do gráfico 4, onde se observa uma eficiência levemente superior do protótipo em relação ao agitador.

Gráfico 4 - Variação de concentração de azul de metileno por tempo no segundo experimento



Fonte: Autoria própria, 2019.

A eficiência do tratamento, utilizando os dados da Tabela 3 foram de 63,84% para o protótipo e 62,63% para o agitador fixo. Os dados de concentração por amostra foram analisados em um espectrofotômetro UV-Vis e a concentração de corante determinada a partir de uma curva de calibração “ $C = 27,043 * Abs$ ”.

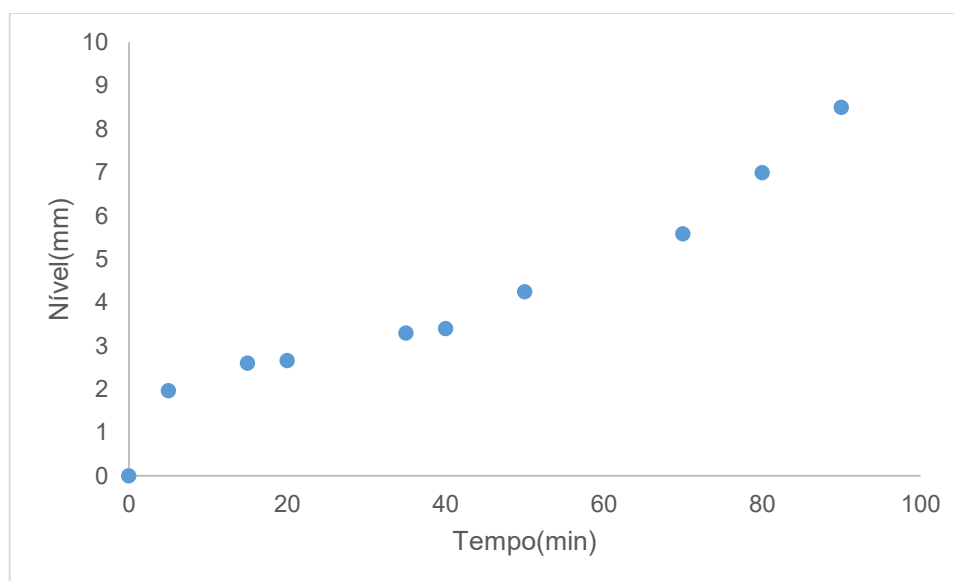
Tabela 3 - Comparação de concentrações por tempo no experimento

| Tempo(min) | Concentração no sistema convencional(mg/L) | Concentração no experimento(mg/L) |
|------------|--|-----------------------------------|
| 0 | 48,66 | 42,43 |
| 10 | 39,77 | 41,50 |
| 20 | 38,99 | 38,85 |
| 30 | 36,10 | 33,73 |
| 40 | 30,11 | 29,44 |
| 50 | 26,78 | 25,70 |
| 60 | 24,94 | 22,49 |
| 90 | 18,18 | 15,34 |

Fonte: Autoria própria, 2019.

Os dados de nível fornecidos pelo experimento indicaram a diminuição de nível, que pela retirada de amostras, sendo o montante de aproximadamente 4 mm, fornecendo então uma taxa de evaporação esperada de aproximadamente $0,05 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$.

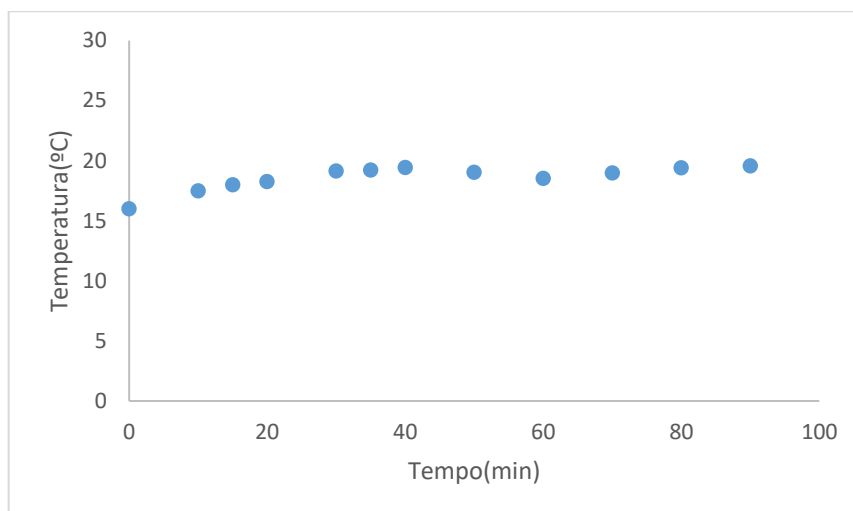
Gráfico 5 - Variação de nível no segundo experimento



Fonte: Autoria própria, 2019.

Pelo gráfico 6, os dados de temperatura aparentam ser aproximadamente constantes, com uma temperatura média de solução de $18,59^{\circ}\text{C}$.

Gráfico 6 - Variação de temperatura no segundo experimento



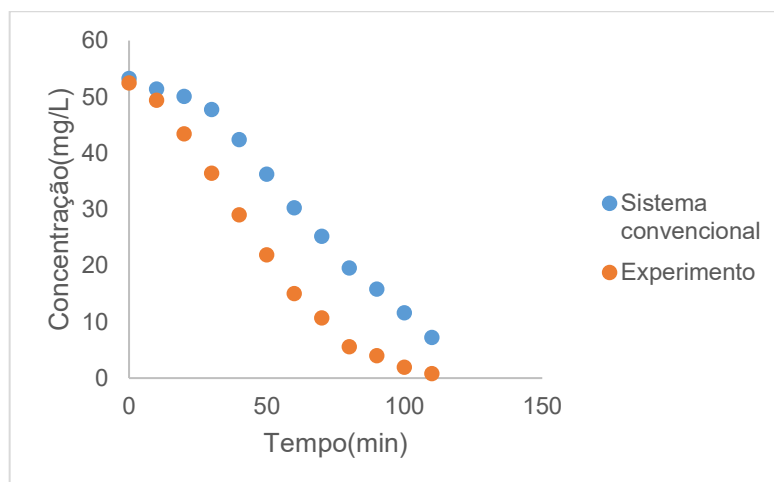
Fonte: Autoria própria, 2019.

Ambos os dados do experimento, temperatura e nível, se encontram no apêndice C.

7.3 TERCEIRO EXPERIMENTO

Realizou-se o terceiro experimento no dia 06/06/2019 de 12h 10min às 14h 10min. A temperatura média ambiente do dia era de 18°C com máxima de 22°C. Utilizou-se neste ensaio do corante azul reativo 5G(50 mg L⁻¹; pH 2,0) e o catalisador óxido de zinco, de acordo com a metodologia descrita anteriormente. Obteve-se o resultado mais expressivo na degradação do corante entre sistema convencional com o agitador fixo e o protótipo automatizado, conforme o Gráfico 7, tendo o experimento atingido a concentração de equilíbrio em aproximadamente 110 minutos.

Gráfico 7 - Variação de concentração de azul reativo por tempo no terceiro experimento



Fonte: Autoria própria, 2019.

A eficiência do tratamento, utilizando os dados da tabela 4 foram de 98,48% para o protótipo e 86,39% para o agitador fixo. Os dados de concentração por amostra foram analisados por espectroscopia UV-Vis e a concentração determinada pela curva de calibração “ $C = 52,026 * Abs$ ”.

Tabela 4 - Comparação de concentrações por tempo no experimento

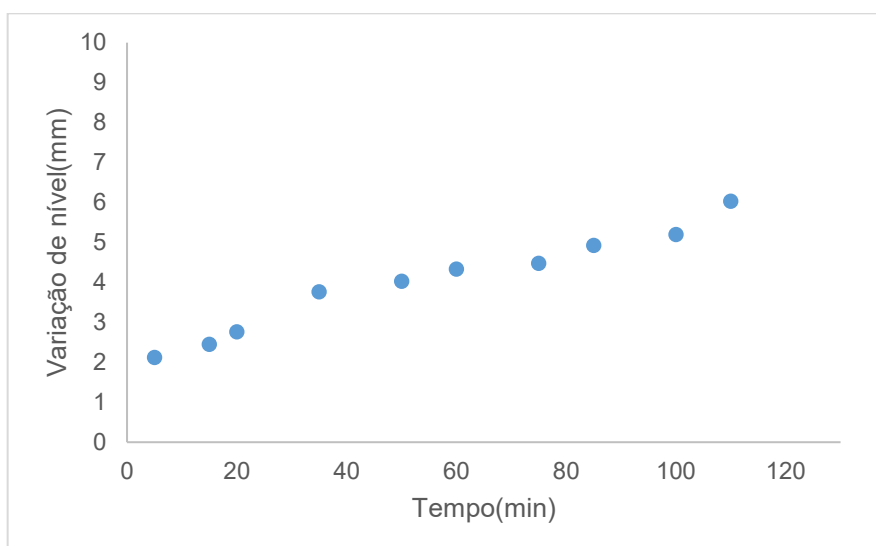
| Tempo(min) | Concentração no sistema convencional(mg/L) | Concentração no experimento(mg/L) |
|------------|--|-----------------------------------|
| 0 | 53,23 | 52,45 |
| 10 | 51,36 | 49,38 |
| 20 | 50,06 | 43,40 |
| 30 | 47,72 | 36,43 |
| 40 | 42,41 | 29,04 |
| 50 | 36,22 | 21,91 |
| 60 | 30,29 | 14,99 |
| 70 | 25,19 | 10,67 |
| 80 | 19,57 | 5,58 |
| 90 | 15,82 | 3,96 |
| 100 | 11,61 | 1,93 |
| 110 | 7,24 | 0,794 |

Fonte: Autoria própria, 2019.

Assim como observado para os demais experimentos, em todos os casos o emprego do processo fotocatalítico no protótipo automatizado construído favoreceu o processo de degradação do corante, possibilitando a obtenção de maiores eficiências e com um menor tempo. No caso específico do experimento 3, a diferença acentuada de degradação do corante entre os dois sistemas fotocatalíticos avaliados foi observada

(Tabela 4) a partir dos primeiros 10 min de reação, sendo o equilíbrio atingido em torno de 110 min para o protótipo. Os dados de nível fornecidos pelo experimento demonstraram a diminuição de nível, que pela retirada de amostras seria de aproximadamente 3 mm, indicando, pelo gráfico 8, que houve evaporação da amostra, sendo esta na taxa de uma taxa de evaporação de $0,03 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$

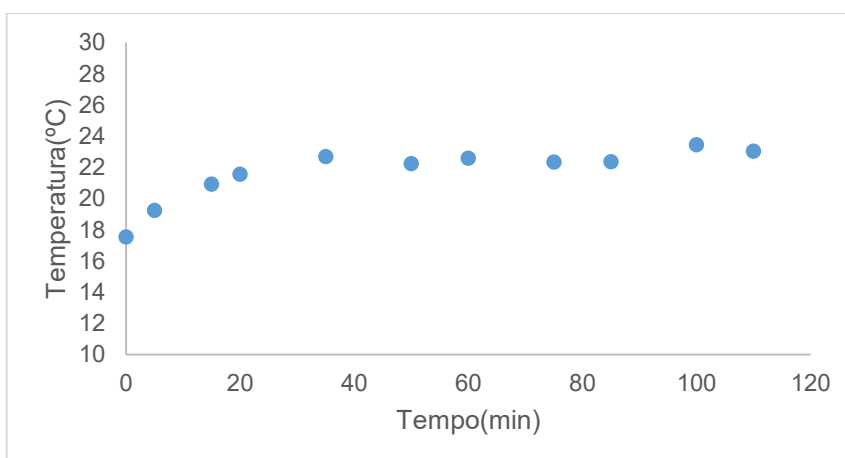
Gráfico 8 - Variação de nível no terceiro experimento



Fonte: Autoria própria, 2019.

Pelo Gráfico 9, os dados de temperatura aparentam, após 30 minutos terem sido aproximadamente constantes, com uma temperatura média de solução de $21,03^{\circ}\text{C}$.

Gráfico 9 - Variação de temperatura no terceiro experimento



Fonte: Autoria própria, 2019.

Ambos os dados do experimento, temperatura e nível, se encontram no apêndice D.

Conforme o referencial, a elevação da temperatura favorece a taxa de reação, mas a adsorção de componentes orgânicos pela superfície do fotocatalisador diminui conforme o aumento da temperatura. Essa variável serve como um indicador para o operador em como proceder de acordo com os objetivos por ele definido. Outro dado obtido pelo monitoramento de variáveis foi a taxa de evaporação. Ao se notar uma maior taxa de evaporação, deve-se adicionar exaustores para evitar a alteração do volume do meio reacional, ou então, caso haja o aumento da temperatura do sistema de forma a prejudicar a adsorção, encamisar-se o reator para diminuir a temperatura. Para efetuar cálculos das equações de projeto para reatores do batelada, o operador deve garantir a premissa de que o volume reacional é constante para não adicionar complexidade ao sistema, conforme definido em Fogler (2018) nas equações (12), (13), (14), (15) podendo-se efetuar cálculos.

$$\frac{dN_j}{dt} = \int^V r_j dV \quad (12)$$

Considerando que não há variações espaciais na velocidade de reação:

$$\frac{dN_j}{dt} = r_j V \quad (13)$$

Considerando a conversão de N_j :

$$N_{j0} \frac{dX}{dt} = r_j V \quad (14)$$

V é o volume reacional, sendo constante:

$$C_{j0} \frac{dX}{dt} = r_j \quad (15)$$

Onde C_{j0} é a concentração inicial de j em mol.L^{-1} , N_{j0} é o número de mols de j inicial, X é a taxa de conversão e r_j é a taxa de reação.

Observou-se então nos experimentos que o equilíbrio é atingido antecipadamente, proporcionando a realização em um menor período de tempo. Obteve-se eficiências superiores em relação ao sistema convencional, fornecendo-se também dados de temperatura e nível (para cálculo de taxa de evaporação) com o intuito de análise por parte do operador da melhor estratégia para realização da reação.

8. CONCLUSÕES

Conforme os objetivos, foi possível acompanhar o processo de reação fotocatalítica solar e coletar os dados de: tempo de reação, efetividade (degradação do corante) e temperatura. Com o uso da plataforma Arduino, projetou-se um sistema automatizado para reações fotocatalíticas solares utilizando motores elétricos do tipo servo e sensores de temperatura e nível para monitoramento de variáveis. Comparou-se os resultados da reação através de luz solar, com e sem uso do protótipo.

Os 3 experimentos comprovam que o protótipo de automação e controle da direção em que a luz é emitida no reator é mais eficiente do que o experimento somente com o agitador fixo. Atinge-se o equilíbrio de forma antecipada, permitindo ao operador a realização dos experimentos de fotocatalise em um menor intervalo de tempo. O resultado mais expressivo se deu com o experimento realizado com o corante azul reativo 5G e o catalisador de óxido de zinco. Os dados de monitoramento de variáveis permitem ao usuário determinar, sabendo-se a altura da coluna de líquido retirado, a taxa de evaporação do experimento, bem como conhecer a temperatura do meio reacional ao longo do tempo. Permitindo, então, a manutenção das variáveis por parte do operador.

REFERÊNCIAS

- BARBOSA, G. F.; CARVALHO, J.; FILHO, E. V. G. A proper framework for design of aircraft production system based on lean manufacturing principles focusing to automated processes. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 72, n. 9, p. 1257–1273, 2014.
- BAYCAN PARILTI, N.; AKTEN, D. Optimization of TiO₂/Fe(III)/solar UV conditions for the removal of organic contaminants in pulp mill effluents. **Desalination**, v. 265, n. 1–3, p. 37–42, 15 jan. 2011.
- BHATTACHARYA, S. K. **Basic electrical engineering**. 1. ed. New Delhi, IN: Pearson, 2011.
- BISHOP, O. **Understand Electronics**. 1. ed. Cambridge: Elsevier Science, 2013.
- BOTTI, L.; MORA, C.; REGATTIERI, A. Integrating ergonomics and lean manufacturing principles in a hybrid assembly line. **Computers & Industrial Engineering**, v. 111, p. 481–491, 2017.
- BROCAL, F.; SEBASTIÁN, M. A.; GONZÁLEZ, C. Chapter 2 - Advanced Manufacturing Processes and Technologies. In: ROIG, B.; WEISS, K.; THIREAU, V. B. T.-M. OF E. P. H. I. AND R. (Eds.). . [s.l.] Academic Press, 2019. p. 31–64.
- CATAÑO, F. A.; VALENCIA, S. H.; HINCAPIÉ, E. A.; RESTREPO, G. M.; MARÍN, J. M. A Comparative study between TiO₂ and ZnO photocatalysis: Photocatalytic degradation of cibacron yellow FN-2R dye. **Latin American Applied Research**, v. 42, n. 1, p. 33–38, 2012.
- CHAN, P. Y.; GAMAL EL-DIN, M.; BOLTON, J. R. A solar-driven UV/Chlorine advanced oxidation process. **Water Research**, v. 46, p. 5672–5682, 2012.
- DENG, Y.; ZHAO, R. Advanced Oxidation Processes (AOPs) in Wastewater Treatment. **Current Pollution Reports**, v. 1, p. 167–176, 2015.
- DOLAN, G.; PERCIVAL, A.; DUFFY, M. **Physics**. 1. ed. London, UK: Pearson Education, 1996.
- FLIEH, HUTHAIFA M.; LORENZ, ROBERT D.; TOTOKI, EIGO; YAMAGUCHI, SHINICHI; NAKAMURA, Y. Investigation of Different Servo Motor Designs for Servo Cycle Operations and Loss Minimizing Control Performance. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 54, n. 6, p. 5791–5801, 2018.
- FOGLER, H. S. **Elementos de engenharia das reações químicas**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018.
- GERNJAK, W.; MALDONADO, M. I.; MALATO, S.; CÁCERES, J.; KRUTZLER, T.; GLASER, A.; BAUER, R. Pilot-plant treatment of olive mill wastewater (OMW) by solar TiO₂ photocatalysis and solar photo-Fenton. **Solar Energy**, v. 77, n. 5, p. 567–572, 1 nov. 2004.

GULYAS, H. Solar Heterogeneous Photocatalytic Oxidation for Water and Wastewater Treatment: Problems and Challenges. **Journal of Advanced Chemical Engineering**, v. 4, n. 2, p. 1–11, 2014.

HERRES, D. Comparing the basic design of stepper and servo motors. **EC and M: Electrical Construction and Maintenance**, v. 113, n. 4, 2014.

HUGHES, J. M. (SYSTEMS ENGINEER). **Arduino : a technical reference : a handbook for technicians, engineers, and makers**. 1. ed. Sebastopol, US: [s.n.].

KHARE, VIKAS;KHARE, CHESHTA;NEMA, SAVITA;BARENDAR, P. **Tidal Energy Systems**. [s.l.] Elsevier, 2019.

KOVAL, V. M.;BOGDAN, O. V.;SPIVAK, V. M.;YAKYMENKO, Y. I. **NANOSCALE THIN-FILM SILICON PHOTORECEIVERS OF VISIBLE AND UV RADIATION**. Kyiv, Ukraine: [s.n.]. Disponível em: <<http://ena.lp.edu.ua>>. Acesso em: 19 out. 2018.

LASA, HUGO DE;SERRANO, BENITO;SALAICES, M. **Photocatalytic Reaction Engineering**. [s.l.: s.n.].

LI, QINGNING;WANG, XUEMEI;LU, XIAOHUA;TIAN, HONGER;JIANG, HUI;LV, GANG;GUO, DADONG;WU, CHUNHUI;CHEN, B. The incorporation of daunorubicin in cancer cells through the use of titanium dioxide whiskers. **Biomaterials**, v. 30, n. 27, p. 4708–4715, 1 set. 2009.

LU, NA;YU, HONG TAO;SU, Y.; WU, Y. Water absorption and photocatalytic activity of TiO₂ in a scrubber system for odor control at varying pH. **Separation and Purification Technology**, v. 90, p. 196–203, 27 abr. 2012.

MANSOURI, LOBNA;TIZAOUI, CHEDLY;GEISSEN, SVEN-UWE;BOUSSELMI, L. A comparative study on ozone, hydrogen peroxide and UV based advanced oxidation processes for efficient removal of diethyl phthalate in water. **Journal of Hazardous Materials**, v. 363, n. September 2018, p. 401–411, 2019.

MINNS, P. D. **C Programming for the Pc the Mac and the Arduino Microcontroller System**. Bloomington, US: AuthorHouse UK, 2013.

NADDEO, V.; RIZZO, L.; BELGIORNO, V. **Water, Wastewater and Soil Treatment by Advanced Oxidation Processes**. 1. ed. Fisciano(SA), ITALIA: ASTER onlus Editore, 2011.

NI, MENG;LEUNG, MICHAEL K.H.;LEUNG, DENNIS Y.C.;SUMATHY, K. **A review and recent developments in photocatalytic water-splitting using TiO₂ for hydrogen production****Renewable and Sustainable Energy Reviews**Pergamon, , 1 abr. 2007. Disponível em: <<https://www-sciencedirect.ez48.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S1364032105000420>>. Acesso em: 24 out. 2018

NOLAN, D. P. **Handbook of Fire and Explosion Protection Engineering**

Principles For Oil, Gas, Chemical and Related Facilities. 2. ed. Oxford: William Andrew Publishing, 2011.

OLLER, I.;MALATO, S.;SÁNCHEZ-PÉREZ, J. A. Combination of Advanced Oxidation Processes and biological treatments for wastewater decontamination—A review. **Science of The Total Environment**, v. 409, n. 20, p. 4141–4166, 15 set. 2011.

PETROVIC, M.; RADJENOVIC, J.; BARCELO, D. ADVANCED OXIDATION PROCESSES (AOPs) APPLIED FOR WASTEWATER AND DRINKING WATER TREATMENT. ELIMINATION OF PHARMACEUTICALS. **The Holistic Approach to Environment**, p. 63–74, 2011.

POYATOS, J. M.;MUÑO, M. M.;ALMECIJA, M. C.;TORRES, J. C.;HONTORIA, E.;OSORIO, F. . Advanced oxidation processes for wastewater treatment: State of the art. **Water, Air, and Soil Pollution**, v. 205, n. 1–4, p. 187–204, 2010.

RAJPUT, K. Y.;KHATAV, GARGEYEE;PUJARI, MONICA;YADAV, P. **Intelligent Street Lighting System Using Gsm****International Journal of Engineering Science Invention**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <[http://www.idc-online.com/technical_references/pdfs/electronic_engineering/Intelligent Street Lighting.pdf](http://www.idc-online.com/technical_references/pdfs/electronic_engineering/Intelligent_Street_Lighting.pdf)>. Acesso em: 19 out. 2018.

ROGERS, G. E.; WRIGHT, M. D.; YATES, B. **Gateway to Engineering**. 2. ed. New York, US: Cengage Learning, 2013.

SINGH, RANJIT SINGH SARBAN;IBRAHIM, AHAMED FAYEEZ TUANI;SALIM, SANI IRWAN M.D.;CHIEW, W. Y. **Door Sensors for Automatic Light Switching System**. 2009 Third UKSim European Symposium on Computer Modeling and Simulation. **Anais...IEEE**, 2009Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/5358701/>>. Acesso em: 19 out. 2018

STEINER, C. **The 8051/8052 Microcontroller: Architecture, Assembly Language, and Hardware Interfacing**. 1. ed. Boca Raton(FL), US: Universal Publishers, 2005.

TANG, W. Z. **Physicochemical Treatment of Hazardous Wastes**. 1. ed. Boca Raton(FL), US: CRC Press, 2016.

WANG, CUN;XU, BO-QING;WANG, XINMING;ZHAO, J. Preparation and photocatalytic activity of ZnO/TiO₂/SnO₂ mixture. **Journal of Solid State Chemistry**, v. 178, n. 11, p. 3500–3506, 1 nov. 2005.

WANG, WANJUN;HUANG, G.; YU, J. C. .; WONG, P. K. Advances in photocatalytic disinfection of bacteria: Development of photocatalysts and mechanisms. **Journal of Environmental Sciences**, v. 34, p. 232–247, 1 ago. 2015.

YOUNG, S. S. **Computerized Data Acquisition and Analysis for the Life Sciences: A Hands-on Guide**. 1. ed. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2001.

ZOU, YILUN;KANG, SHI-ZHAO;LI, XIANGQING;QIN, LIXIA;MU, J. TiO₂ nanosheets

loaded with Cu: A low-cost efficient photocatalytic system for hydrogen evolution from water. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 39, n. 28, p. 15403–15410, 23 set. 2014.

APÊNDICE A – PROGRAMAÇÃO DO PROTÓTIPO

```
#include <DallasTemperature.h>
#include <OneWire.h>
#include <SPI.h>
#include <SdFat.h>
#include <Servo.h>
OneWire pin(3);
DallasTemperature data(&pin);
DeviceAddress sensor;
SdFat SD;
Servo baixo; // servo de baixo
//Ultrasonic ultrasonic(5, 6);
#define TRIGGER_PIN 5
#define ECHO_PIN 6
#define USONIC_DIV 58.0
#define MEASURE_SAMPLE_DELAY 5
#define MEASURE_SAMPLES 25
#define MEASURE_DELAY 250

int ldr_supesq = 1; // ldr superior esquerdo
int ldr_infesq = 3; // ldr inferior esquerdo
int ldr_supdir = 0; // ldr superior direito
int ldr_infdir = 2; // ldr inferior direito
const int chipSelect = 10;
float initial_read = 0;
float dhoriz;
float dvert;
float vme;
float vmd;
float vms;
float vmi;
int lse;
```

```

int lsd;
int lie;
int lid;
float t = 0;
int j = 0;
float temperatura;
File LDRs;
void setup() {
  // put your setup code here, to run once:
  Serial.begin(9600);
  pinMode(TRIGGER_PIN, OUTPUT);
  pinMode(ECHO_PIN, INPUT);
  digitalWrite(TRIGGER_PIN, LOW);
  delayMicroseconds(500);
  data.begin();
  data.getAddress(sensor, 0);
  SD.begin(chipSelect);
  baixo.attach(4); //
}
long singleMeasurement()
{
  long duration = 0;

  // Measure: Put up Trigger...
  digitalWrite(TRIGGER_PIN, HIGH);
  // ... wait for 11 µs ...
  delayMicroseconds(11);
  // ... put the trigger down ...
  digitalWrite(TRIGGER_PIN, LOW);
  // ... and wait for the echo ...
  duration = pulseIn(ECHO_PIN, HIGH);
  return (long) (((float) duration / USONIC_DIV) * 10.0);
}
long measure()

```

```

{
  long measureSum = 0;
  for (int i = 0; i < MEASURE_SAMPLES; i++)
  {
    delay(MEASURE_SAMPLE_DELAY);
    measureSum += singleMeasurement();
  }
  return measureSum / MEASURE_SAMPLES;
}

```

```

void leituras(){
  lse = analogRead(ldr_supesq); // leitura superior esquerda
  lsd = analogRead(ldr_supdir); // leitura superior direita
  lie = analogRead(ldr_infesq); // leitura inferior esquerda
  lid = analogRead(ldr_infdir); // leitura inferior direita
  if( t == 0) { t = millis(); j++;}
  else if(t != 0) {t = millis() - t;}
  LDRs = SD.open("LDRS.txt", FILE_WRITE);
  if(LDRs){
    if (j == 1){
      LDRs.println(" ");
      LDRs.println("Temperatura(°C) | Distância(mm) | Tempo(s) ");
      LDRs.println(" ");
      j++;}
    else{};
  LDRs.close();
  }
}

```

```

void media(){
  vms = (lse + lsd)/2; // valor medio superior
  vmi = (lie + lid)/2; // valor medio inferior
  vme = (lse + lie)/2; // valor medio esquerdo
  vmd = (lid + lsd)/2; // valor medio direito

```

```

}

void diferenca(){

data.requestTemperatures();
temperatura = data.getTempC(sensor);
dvert = vms - vmi; // checar a diferença entre a parte superior e inferior
dhorl = vme - vmd; // checar a diferença entre a parte esquerda e direita
LDRs = SD.open("LDRS.txt",FILE_WRITE);
if(LDRs){
LDRs.print(temperatura);
LDRs.print(" ");
LDRs.close();
}
}

void comparacao(){
delay(200);
if ((( abs(dhorl) < 25 ) || abs(dhorl) >50 )) {
if((0.80*vme) > vmd){
baixo.write(80);
delay(50);
baixo.write(88);
baixo.write(90);
}
if( (0.8*vme)<vmd){baixo.write(105);
delay(50);
baixo.write(95);
baixo.write(90);}

}
}

void ultrassom(){
delay(MEASURE_DELAY);
long distancia = measure();

```

```
LDRs = SD.open("LDRS.txt",FILE_WRITE);
if(LDRs){
LDRs.print(distancia);
LDRs.print(" ");
LDRs.print(t/1000);
LDRs.println(" ");

LDRs.close();
}
}

void loop() {
  leituras();
  media();
  diferenca();
  ultrassom();
  comparacao();
  delay(300);

}
```

APÊNDICE B – TABELA DE DADOS DO PRIMEIRO EXPERIMENTO

Obteve-se 6612 dados de temperatura e nível. Estes foram processados e efetuada as médias nos períodos de interesse. Os resultados se encontram na tabela 1:

Tabela 1 – Dados de temperatura e nível do primeiro experimento

| Temperatura(°C) | Nível(mm) | Tempo(min) |
|-----------------|-----------|------------|
| 19,41 | 0,00 | 0 |
| 20,81 | 2,10 | 10 |
| 21,66 | 2,23 | 20 |
| 22,79 | 2,05 | 30 |
| 22,11 | 2,62 | 35 |
| 23,19 | 4,95 | 70 |
| 21,56 | 5,16 | 80 |
| 20,94 | 5,14 | 90 |
| 21,26 | 5,70 | 100 |
| 21,18 | 6,26 | 110 |
| 19,06 | 6,18 | 120 |

Fonte: Autoria própria, 2019.

APÊNDICE C – TABELA DE DADOS DO SEGUNDO EXPERIMENTO

Obteve-se 7619 dados de temperatura e nível. Estes foram processados e efetuada as médias nos períodos de interesse. Os resultados se encontram na tabela 2:

Tabela 2 – Dados de temperatura e nível do primeiro experimento

| Temperatura(°C) | Nível(mm) | Tempo(min) |
|-----------------|-----------|------------|
| 16,00 | 0,00 | 0 |
| 18,00 | 2,59 | 15 |
| 18,26 | 2,66 | 20 |
| 19,23 | 3,29 | 35 |
| 19,45 | 3,39 | 40 |
| 19,05 | 4,24 | 50 |
| 18,99 | 5,58 | 70 |
| 19,42 | 6,99 | 80 |
| 19,58 | 8,49 | 90 |

Fonte: Autoria própria, 2019.

APÊNDICE D – TABELA DE DADOS DO TERCEIRO EXPERIMENTO

Obteve-se 6709 dados de temperatura e nível. Estes foram processados e efetuada as médias nos períodos de interesse. Os resultados se encontram na tabela 3:

Tabela 3 – Dados de temperatura e nível do primeiro experimento

| Temperatura(°C) | Nível(mm) | Tempo(min) |
|-----------------|-----------|------------|
| 17,53 | 0,00 | 0 |
| 19,24 | 2,12 | 5 |
| 20,92 | 2,46 | 15 |
| 21,55 | 2,76 | 20 |
| 22,68 | 3,76 | 35 |
| 22,24 | 4,03 | 50 |
| 22,57 | 4,34 | 60 |
| 22,33 | 4,48 | 75 |
| 22,34 | 4,92 | 85 |
| 23,44 | 5,20 | 100 |
| 23,04 | 6,03 | 110 |

Fonte: Autoria própria, 2019.