



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE
TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA E
TERRITÓRIO (ILATIT)**

ENGENHARIA QUÍMICA

**PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM REATOR QUÍMICO BATELADA PARA
UTILIZAÇÃO COMO FERRAMENTA DIDÁTICA**

**JULIO CESAR DE MELO
RENATO DUTRA**

Foz do Iguaçu
2021

**PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM REATOR QUÍMICO BATELADA PARA
UTILIZAÇÃO COMO FERRAMENTA DIDÁTICA**

**JULIO CESAR DE MELO
RENATO DUTRA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.

Orientadora: Profa. Dra. Andreia Cristina Furtado.

Coorientador: Prof. Dr. Oswaldo Hideo Ando Junior.

JULIO CESAR DE MELO E RENATO DUTRA.

**PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM REATOR BATELADA PARA UTILIZAÇÃO COMO
FERRAMENTA DIDÁTICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.

BANCA EXAMINADORA

Orientador: Profa. Dra. Andreia Cristina Furtado
UNILA

Prof. Dr. Marco Roberto Cavallari
UFABC

Prof. Dr. Rodrigo Monteiro Elliott
UNILA

Prof. Dr. Oswaldo Hideo Ando Junior
UNILA

Foz do Iguaçu, _____ de _____ de _____.

TERMO DE SUBMISSÃO DE TRABALHOS ACADÊMICOS

Nome completo do autor(a): JULIO CESAR DE MELO, RENATO DUTRA

Curso: ENGENHARIA QUÍMICA

Tipo de Documento	
(..X.) graduação	(X) artigo
(.....) especialização	(.....) trabalho de conclusão de curso
(.....) mestrado	(.....) monografia
(.....) doutorado	(.....) dissertação
	(.....) tese
	(.....) CD/DVD – obras audiovisuais
	(.....) _____

Título do trabalho acadêmico: PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM REATOR BATELADA COMO FERRAMENTA DIDÁTICA

Nome do orientador(a): ANDREIA CRISTINA FURTADO

Nome do Coorientador(a): OSWALDO HIDEO ANDO JUNIOR

Data da Defesa: ____/____/____

Licença não-exclusiva de Distribuição

O referido autor(a):

a) Declara que o documento entregue é seu trabalho original, e que o detém o direito de conceder os direitos contidos nesta licença. Declara também que a entrega do documento não infringe, tanto quanto lhe é possível saber, os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade.

b) Se o documento entregue contém material do qual não detém os direitos de autor, declara que obteve autorização do detentor dos direitos de autor para conceder à UNILA – Universidade Federal da Integração Latino-Americana os direitos requeridos por esta licença, e que esse material cujos direitos são de terceiros está claramente identificado e reconhecido no texto ou conteúdo do documento entregue.

Se o documento entregue é baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não a Universidade Federal da Integração Latino-Americana, declara que cumpriu quaisquer obrigações exigidas pelo respectivo contrato ou acordo.

Na qualidade de titular dos direitos do conteúdo supracitado, o autor autoriza a Biblioteca Latino-Americana – BIUNILA a disponibilizar a obra, gratuitamente e de acordo com a licença pública *Creative Commons Licença 3.0 Unported*.

Foz do Iguaçu, ____ de _____ de _____.

Assinatura do Responsável

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM REATOR QUÍMICO BATELADA PARA UTILIZAÇÃO COMO FERRAMENTA DIDÁTICA

DE MELO, Julio C.¹
DUTRA, Renato²
JUNIOR, Oswaldo Hideo Ando³
FURTADO, Andreia Cristina⁴

RESUMO

A utilização de ferramentas didáticas possui um papel fundamental para o desenvolvimento das capacidades de ensino e aprendizagem. Porém, nos laboratórios de engenharia das universidades, nem sempre estas ferramentas estão disponíveis devido ao alto custo de equipamentos, tais como, bancadas didáticas de reatores, colunas de destilação, e demais equipamentos. Deste modo, neste trabalho foi projetada e construída uma bancada didática automatizada e de baixo custo para a produção de biodiesel por transesterificação como ferramenta para uso em disciplinas como engenharia das reações químicas, operações unitárias e controle de processos químicos, trazendo e explorando as possibilidades da cultura *maker* para o ensino de engenharia química.

Palavras-chaves: Reator. Biodiesel. Bancada. Transesterificação. Controle. Arduino.

1 INTRODUÇÃO

As ferramentas didáticas, como o ensino prático por meio da experimentação, têm a capacidade de fortalecer o conhecimento adquirido por meio da teoria, uma vez que tais atividades promovem a comprovação prática, permitindo a visualização e aplicação em um ambiente real que aproxima e sedimenta o conhecimento teórico através da vivência, sendo, portanto, de vital importância para a consolidação de um ensino de qualidade.

Porém, em se tratando, mas não se limitando, ao ensino de engenharia, para a realização prática de muitos experimentos, são necessárias bancadas didáticas fornecidas por fabricantes especializados que por vezes são de alto custo de aquisição podendo inviabilizar a execução de determinados experimentos que necessitem de tais equipamentos, por falta de recurso.

¹Discente do Curso de Engenharia Química, - ILATIT – UNILA - E-mail: jcd.melo.2016@aluno.unila.edu.br;

²Discente do Curso de Engenharia Química – ILATIT - UNILA. E-mail: r.dutra.2016@aluno.unila.edu.br;

³Coorientador – Docente Engenharia de Energias – ILATIT UNILA.E-mail: oswaldo.junior@unila.edu.br.

⁴Orientadora – Docente Engenharia Química - ILATIT – UNILA. E-mail: andreia.furtado@unila.edu.br.

Deste modo, a cultura *maker*, um movimento que de acordo com Marini (2019), se baseia na ideia de que as pessoas podem ser capazes de fabricar, construir, reparar e alterar objetos, baseando-se em um ambiente de colaboração e transmissão de informação entre grupos e pessoas, pode ser uma alternativa para, não somente vencer a inacessibilidade por falta de recurso, mas conduzir à inovação.

A inclusão da cultura *maker* no âmbito acadêmico também poderia trazer vantagens, como benefícios financeiros, tais como a redução de custo na construção dos próprios equipamentos, quanto do ponto de vista da aprendizagem, pois para construir algo voltado ao meio científico, diversos conhecimentos devem ser estimulados, podendo propiciar novos *insights* sobre o assunto investigado, proporcionando reforço ainda maior da base teórica.

O advento de tecnologias como, impressão 3D, plataformas de hardware e software *open source* como Arduino®, fab labs, entre outras ferramentas e espaços, tem tornado cada vez mais possível a aproximação da cultura *maker* do meio acadêmico. Em se tratando do uso do Arduino®, este é uma plataforma acessível, de baixo custo, e que permite facilmente desenvolver diversos dispositivos. Exemplos de trabalhos que fizeram uso dessa ferramenta no meio acadêmico, tem-se o trabalho de De Castro e Santos (2020), que trouxeram em seu trabalho a utilização do Arduino® como recurso educacional para a criação de atividades transdisciplinares e de baixo custo para escolas, onde eles desenvolveram uma estação de monitoramento meteorológico; a dissertação de Machado Junior (2019), com o desenvolvimento de um titulador automático como ferramenta investigativa no ensino de química; Reis et al (2019), com a realização da instrumentação de uma célula eletrolítica que possibilitava o monitoramento de temperatura, tensão, corrente e volume de gás produzido; Pontes (2014), desenvolveu um fotômetro LED-Vis portátil que permitia a determinação do corante amarelo crepúsculo em amostra de bebidas e permanganato em medicamentos. Estas são algumas possibilidades de aplicação desta ferramenta no meio acadêmico que tinham por conceito desenvolver algo de baixo custo comparado aos disponíveis no mercado, ou mesmo pensando em sua aplicação em atividades de ensino.

Portanto, com o objetivo de desentenebrecer o uso da ferramenta Arduino® como tecnologia carreadora da cultura *maker* para o curso de engenharia química da UNILA (que atualmente sofre com o déficit de equipamentos como reatores de

bancada, colunas de destilação, e demais equipamentos), foi desenvolvido um reator batelada de bancada, com operação automática para a produção de biodiesel, tendo seu projeto suportado pelas bases teóricas relativas às disciplinas de engenharia das reações, controle de processo, operações unitárias e eletrotécnica.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para o desenvolvimento do equipamento de bancada a ser projetado e construído, alguns conceitos principais estão envolvidos na etapa de projeto do reator e do sistema de controle a ser utilizado, tais conceitos são abordados a seguir.

2.1 Reação de produção de biodiesel em reator batelada de mistura

A transesterificação é o método mais utilizado na obtenção de biodiesel. Através desta reação, os triglicerídeos presentes nos óleos vegetais e nas gorduras animais reagem com álcool, geralmente metanol ou etanol, na presença de um catalisador ácido ou alcalino gerando dois produtos: éster e glicerina. Apenas o éster que é permitido ser comercializado como biodiesel após sofrer a purificação (VIERA, 2018).

Na produção de biodiesel por transesterificação alcalina, o catalisador é uma base forte de Brønsted (receptor de prótons). Nesta rota reacional, inicialmente ocorre a reação entre o álcool e a base resultando no alcóxido ($R-O^-$) correspondente e água. Em seguida o alcóxido reage com o carbono da carbonila do acilglicerídeo por intermédio de uma substituição nucleofílica, formando um intermediário tetraédrico que se rearranja para formar um monoéster e um novo acilglicerídeo.

Para uma transesterificação estequiometricamente completa, uma proporção molar 3:1 de álcool por triglicerídeo é necessária. Entretanto, devido ao caráter reversível da reação, o agente transesterificante (álcool), geralmente é adicionado em excesso contribuindo para aumentar o rendimento do éster, bem como permitir a sua separação do glicerol formado (GERIS et al. 2007).

Neste trabalho, a reação de produção de biodiesel será conduzida em um reator do tipo batelada de mistura, onde a escolha deste tipo deve-se ao princípio de escala, no qual o sistema em batelada é conveniente para pequena escala, além de

ser bastante usual para o desenvolvimento de possíveis experimentos para a obtenção de parâmetros cinéticos.

A modelagem de um reator em batelada pode ser feita aplicando-se o balanço molar ao sistema, e colocando em termos de conversão, resultando na equação de design na forma diferencial para o reator batelada (Equação 1).

$$t = N_{A0} \int_0^X \frac{dX}{-r_A V} \quad \text{Equação. 1}$$

Na Equação 1, N_{A0} é o número de mols inicialmente carregados do componente A; X é o grau de conversão do reagente, $-r_A$ é a taxa de consumo de A, e V é o volume do reator.

Para a utilização da equação de projeto do reator em batelada, faz-se necessário o conhecimento da taxa de reação (r), dada por sua lei de velocidade.

Os parâmetros cinéticos para a reação de transesterificação do óleo de soja com NaOH foram obtidos por Garnica (2009), bem como as condições experimentais otimizadas em relação à conversão.

Na tabela 1 estão presentes os valores experimentais obtidos por Garnica (2009), considerando que a lei de velocidade para a reação de produção de biodiesel é de segunda ordem com uma modelagem baseada em não ésteres etílicos (NEE), formando ésteres etílicos e glicerol. Estes valores foram utilizados como base para a determinação do tempo de reação do reator projetado e das proporções de alimentação do reator.

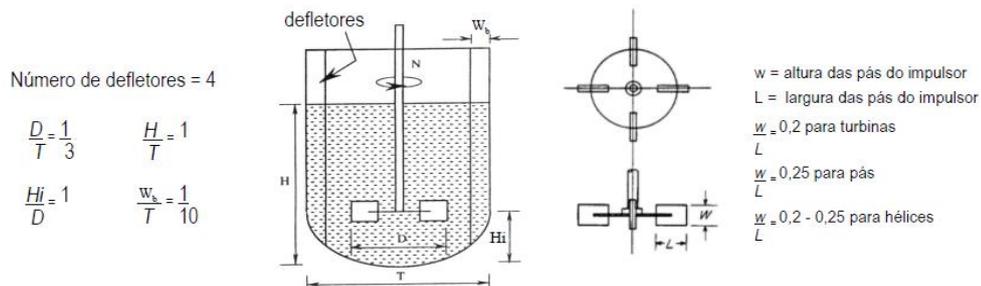
Tabela 1 – resultados obtidos por Garnica (2009) para a otimização da produção de biodiesel etílico com NaOH.

Lei de velocidade	$-r_{NEE} = k * [NEE]^2$
NEE	Não Éster Etílico
%w/w de catalisador	1,31
Relação etanol/óleo (molar)	9,36:1
Temperatura	50°C
Constante de velocidade (k)	2,56 [min * %w/w] ⁻¹
Energia de ativação (Ea)	5431,75 cal/mol

Fonte: GARNICA 2009.

Além do tempo de reação, que é uma das variáveis a serem consideradas no projeto do reator batelada, como o reator a ser projetado é reator batelada de mistura, as premissas para o projeto de tanques agitados devem ser consideradas. Neste sentido, as dimensões padrões utilizadas no design de tanques agitadores segundo Cremasco (2014), podem ser calculadas pelas relações abaixo.

Figura 1 – dimensões padrão para o projeto de tanques agitados.



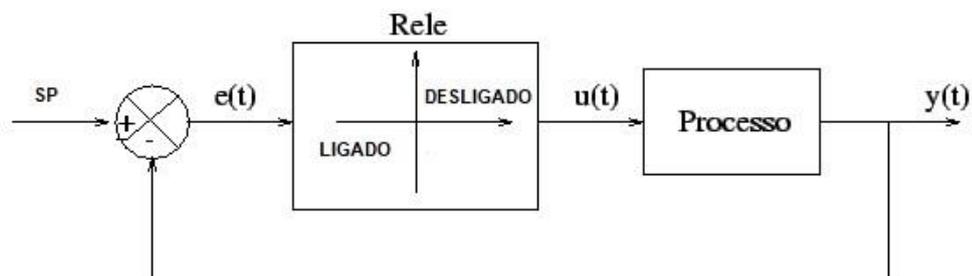
Fonte: adaptado de CREMASCO (2014).

Para o projeto de tanques agitados, além das dimensões padrões, o cálculo da potência do agitador em função das características do fluido a ser agitado também é geralmente abordado para fins de dimensionamento. Porém, como a potência do motor não é um fator restritivo para este projeto, dado que é um reator de baixa capacidade volumétrica, esse tópico não será abordado no projeto.

2.2 Controle por ação Liga-desliga (on/off)

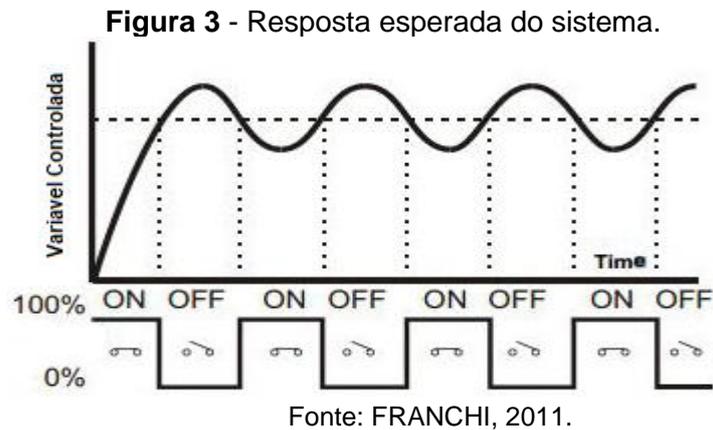
Dentre os controladores utilizados em sistemas de malha fechada, tem-se o controle liga-desliga, que consiste em transmitir apenas dois sinais ao atuador do processo, sendo estes, sinal de ligado ou desligado, se tornando um controle com alta simplicidade de construção. Um exemplo de malha fechada utilizando como controle ligado desligado pode ser visto na figura 2. A partir do valor *set point* e variável medida $y(t)$ recebido, é calculado um valor de erro $e(t)$, e a partir deste valor, o controlador retorna ao processo a ação do atuador como ligado ou desligado (FRANCHI, 2011).

Figura 2 - Malha fechada com controle ligado desligado.



Fonte: FRANCHI, 2011.

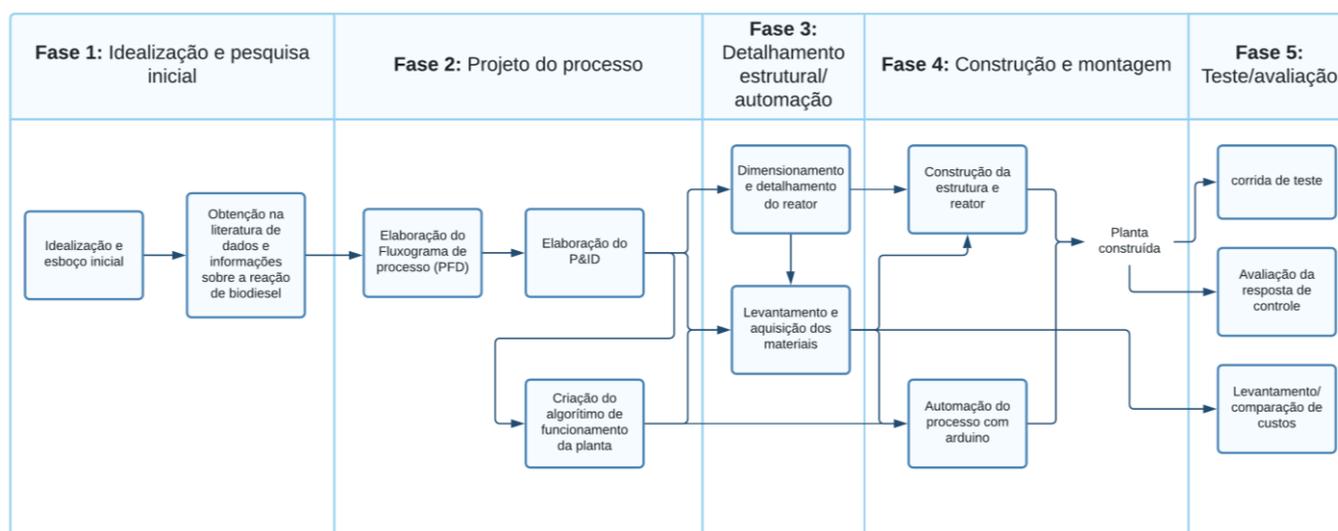
Com isso, espera-se como resposta do sistema, algo semelhante a Figura 3. Onde o valor da variável controlada ultrapassa o valor desejado em um dado momento, sendo então desligado, e ligado novamente somente após adquirir valor abaixo do setpoint, ou seja, de uma forma geral o sistema tende a permanecer de uma forma não linear.



3 METODOLOGIA

Para o projeto e construção da planta de bancada para produção de biodiesel, uma metodologia baseada nos projetos de engenharia que ocorre em escala industrial, foi aqui desenvolvida. Estas etapas semelhantes às que ocorre nos projetos de processos de engenharia química foram seguidas com o objetivo de aplicar os conhecimentos sobre engenharia de processos, portanto contribuindo com o cumprimento do objetivo didático do projeto desde sua concepção. A sequência de trabalho é mostrada no diagrama da figura 4.

Figura 4 – *workflow* seguido para o desenvolvimento do projeto.



Fonte: Autoria própria, 2021.

Como mostrado na Figura 4, o *workflow* seguido pode ser dividido em 5 macro etapas, sendo elas, a idealização e pesquisa inicial (fase 1), o projeto do processo (fase 2), o detalhamento (fase 3), a construção e montagem (fase 4), e a fase de testes (fase 5).

A fase 1 foi a de idealização e pesquisa inicial onde foi desenvolvida a ideia com a criação de um esboço que traduzisse as principais funcionalidades que seriam desejáveis para o reator de bancada, e como ele deveria atuar. Para isso, foi feito um brainstorming, onde as ideias geradas foram colocadas no esboço. Como definições iniciais, o reator deveria operar em batelada, pois a maioria dos experimentos em bancada são conduzidos em regime de batelada, um sistema de amostragem

(*sampler*), seria construído para a retirada de amostra de tempos em tempos (para estudos de cinética), o sistema deveria produzir e amostrar diversas bateladas de modo totalmente automatizado por meio de um controlador Arduino® que também deveria ter um código para controle do sistema de aquecimento elétrico do reator; a reação a ser processada para fins de testes seria a de transesterificação (apesar de ser um reator de funcionalidade genérica). Nesta etapa, também foram coletados os dados sobre a reação de transesterificação (obtidos pelo trabalho de Garnica (2009), para a determinação de requisitos preliminares restritivos, como a temperatura que o sistema deveria alcançar.

A seguinte fase foi a de projeto de processo (fase 2), onde, com os dados cinéticos da reação química de transesterificação, um *Process Flow Diagram* (PFD), foi desenvolvido para a determinação dos principais equipamentos que estariam presentes e balanço dos tempos de operação (tempos para o processamento de cada batelada). Em seguida, tendo os equipamentos que seriam necessários, foi feito o *Piping & Instrumentation Diagram* (P&ID), tendo como base a norma ANSI/ISA-5.1-2009, para a determinação dos instrumentos que seriam necessários para automatizar o processo de produção. Outra parte importante dessa fase foi a criação do diagrama do algoritmo da lógica que seria utilizado para automatização de todo o sistema.

Posteriormente, na fase de detalhamento (fase 3), foram determinadas as dimensões do reator (tendo em vista as dimensões padrão dispostas na Figura 3). Uma lista de materiais necessários para a construção do sistema foi elaborada tendo em vista a necessidades de instrumentos, equipamentos, dispositivos elétricos e partes para a construção da estrutura de suporte de todo o conjunto.

Na fase 4 foi feita a construção da estrutura de suporte, montagem das ligações elétricas e dos componentes, bem como a programação do Arduino® e implementação do controle de temperatura.

Por fim, na fase 5 o sistema com o reator foi avaliado e testado, sendo que, um teste de corrida (produção de lotes em batelada), foi feito para verificar se o sistema funcionou de forma satisfatória em conjunto com a avaliação da resposta do controlador on/off atuando no controle de temperatura, finalizando com um comparativo entre o custo do reator montado com os comercialmente disponíveis e aplicáveis à mesma situação de processo deste trabalho.

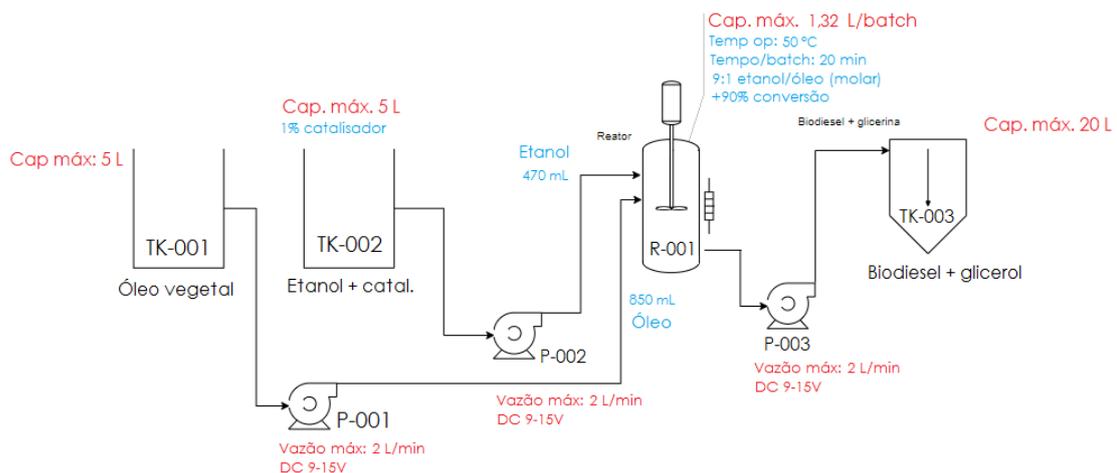
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir da metodologia anteriormente apresentada, foram gerados os principais resultados de cada fase do projeto, aqui explanados.

4.1 Resultados Do Projeto Do Processo

Seguindo as etapas do projeto de processos, foi desenvolvido um PFD de modo a ilustrar as interconexões do reator com as outras partes do processo. O diagrama PFD obtido pode ser observado na figura 5.

Figura 5 – PFD projetado para produção de biodiesel



Fonte: Autoria própria, 2021.

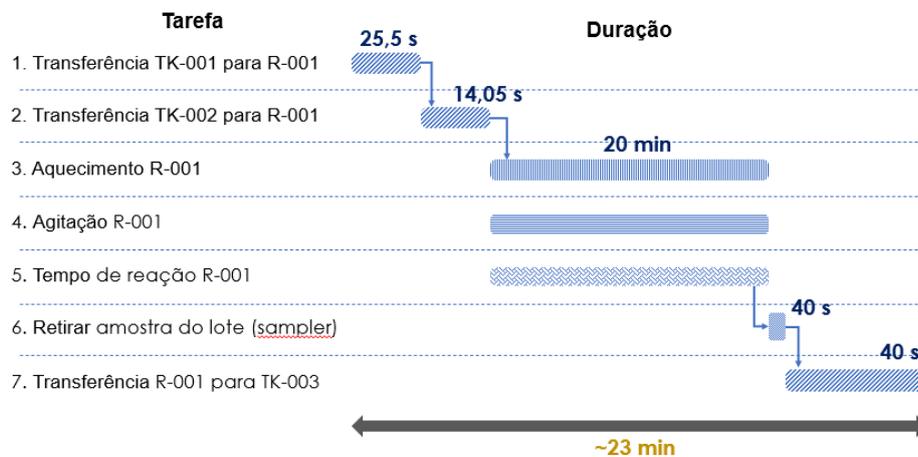
Neste diagrama, 2 recipientes de 5 litros são utilizados, um para armazenamento de óleo vegetal e outro para armazenamento da mistura etanol mais catalisador (o catalisador está presente em 1% em massa em relação a massa de óleo). Esses recipientes alimentam o reator por meio de duas bombas (P-001 e P-002), de igual capacidade máxima de transferência (2 L/min) e que são alimentadas por uma tensão de 12V DC.

O reator (R-001), é do tipo tanque agitado com aquecimento elétrico por resistência, com capacidade máxima de 1,32 L/batch (um lote equivale a 1,32 L). As condições operacionais foram as obtidas na fase 1, onde foi definido que seria utilizado as condições dispostas na tabela 1, que foram obtidas por Garnica (2009). Após o processamento que dura 20 min (tempo estimado com base no cálculo

utilizando a equação do reator batelada para obtenção de +90% de conversão), o lote produzido é descarregado por meio da bomba P-003, onde o volume produzido é estocado no recipiente denominado tanque TK-003, com capacidade de 20 L, para poder ocorrer a separação por decantação entre as fases. Após o termino da corrida, o processo se reinicia automaticamente para a produção de um novo lote.

O sequenciamento da produção de cada lote (ciclo de produção), pode ser visualizado no diagrama de Gantt abaixo.

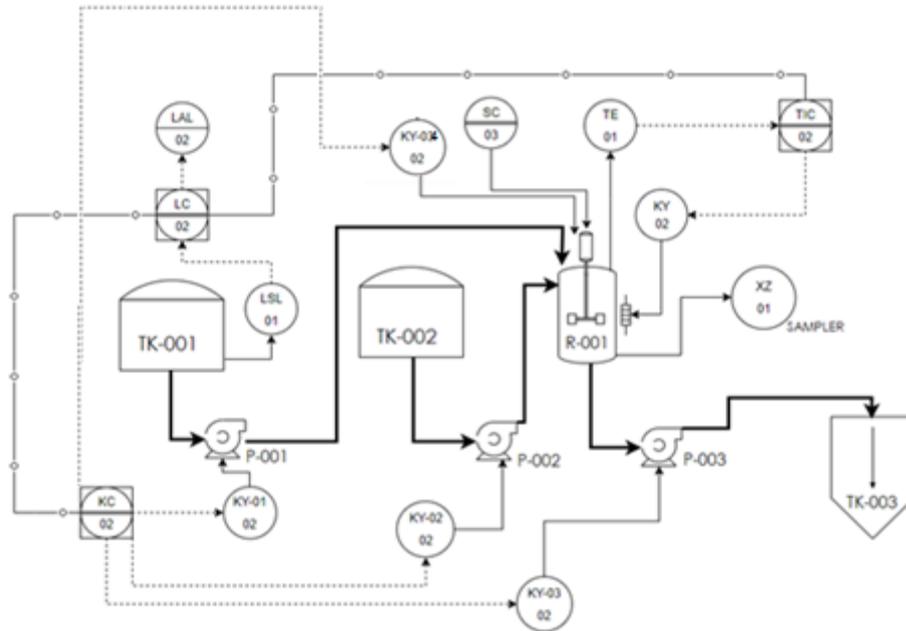
Figura 6– Diagrama de Gantt com os tempos de processo por lote.



Fonte: Autoria própria, 2021.

Como pode ser visualizado na Figura 6, apesar de o processamento ocorrer em batelada, diversas tarefas devem ser cumpridas de modo sequencial para cada lote. Essas tarefas foram planejadas para iniciarem e prosseguirem de forma automática, até que o sistema seja interrompido ou a matéria-prima se acabe. Para isso, um sistema de instrumentação, controle e automatização do reator e periféricos, foi desenvolvido e pode ser consultado na figura 7 com o P&ID criado com base no PFD e no sequenciamento das tarefas (figura 5).

Figura 7 – P&ID com instrumentos para automatização e controle



Fonte: Autoria própria, 2021.

Na figura 7 é mostrado o P&ID, desenhado com base na norma ANSI/ISA-5.1-2009, com os principais instrumentos necessários para o projeto e suas malhas de controle. Como pode ser observado, têm-se 4 controladores, sendo 3 deles em malha aberta e um atuando em malha fechada. Os controladores em malha aberta são: SC (*Speed Controller*) em uma malha aberta para regulação manual da velocidade do agitador, LC (*Level Controller*) que tem a função de parar o processo caso o óleo esteja prestes a acabar e soar um alarme de aviso, e o KC-A (*time or schedule controller*), que tem a função de ligar e desligar as bombas conforme a programação de tempo e o KC-B que também regula o tempo de ativação/desativação, porém do motor agitador. Ambos controladores KC atuam sobre os atuadores KY, que são os relés que funcionam como chave liga/desliga dos motores.

Em malha fechada por feedback, o controlador TIC (*Temperature Indicator Controller*), que tem um algoritmo on/off instalado para controle da temperatura, recebendo o sinal do sensor de temperatura e atuando no elemento de aquecimento elétrico por meio de um módulo relé.

Na realidade, os controladores LC, KC-A, KC-B e TIC são executados apenas por um hardware, a placa de Arduino® UNO, porém, para melhor sistematização do processo, foi utilizada uma visualização fragmentada. Somente o controle de

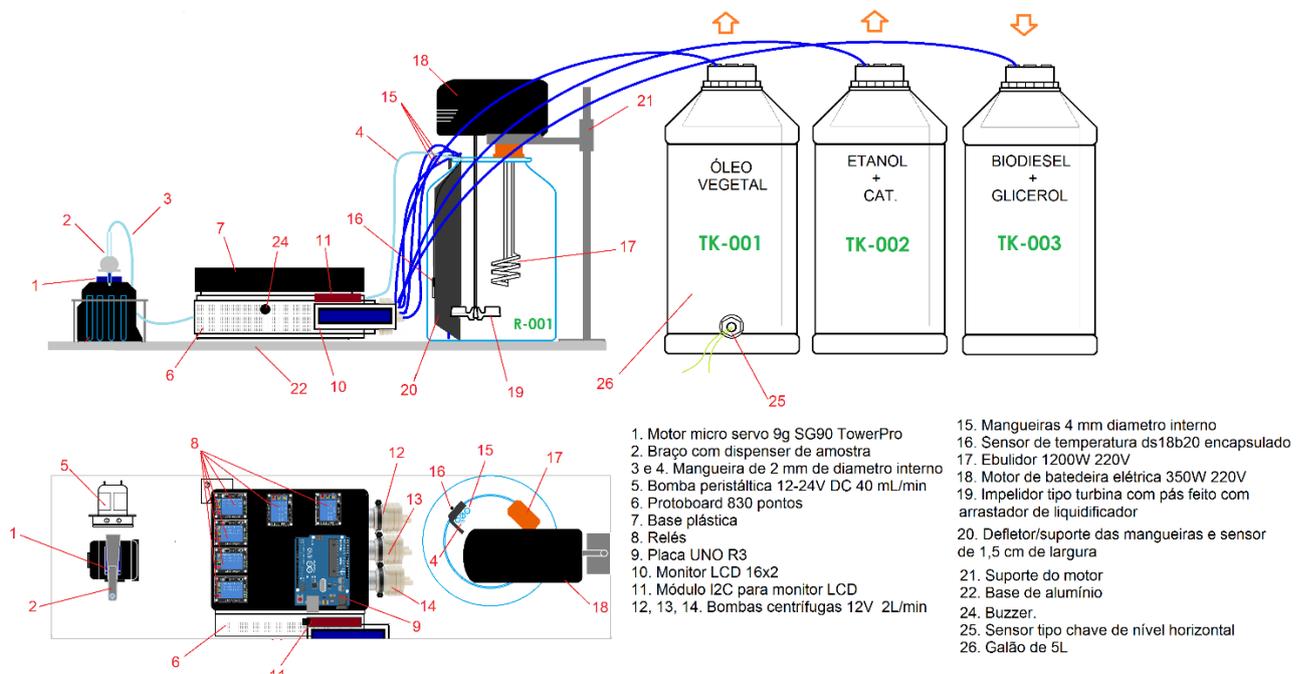
velocidade SC é feito de maneira manual, sendo este um *dimmer* de controle de potência do agitador (3 opções de velocidade).

O reator construído também possui um sistema de amostragem (XZ - sampler), que está programado para, ao terminar o tempo de batelada, retirar uma amostra de 4 mL do lote por meio de uma bomba peristáltica, que junto com um braço atuado por servomotor, a deposita nos tubos de ensaio, permitindo a separação entre as amostras de cada lote. Todo este conjunto está representado apenas pelo símbolo com XZ no P&ID (X: não classificado; Y: equipamentos auxiliares).

4.2 Resultados Detalhamento Estrutural e do Sistema de Automatização

Dado o diagrama P&ID com a instrumentação necessária e equipamentos necessários para o projeto, a fase seguinte foi dimensionar e detalhar quais materiais seriam utilizados. Na figura 10 pode ser conferido o esquema da montagem da bancada junto com a lista de materiais utilizados na sua construção.

Figura 8 – esquema da bancada didática montada.



Fonte: Autoria própria, 2021.

Preservando as proporções padrão para tanques agitados, o impelidor foi alocado à 5 cm do fundo. O recipiente de vidro que tem o papel de reator, possui 15 cm de diâmetro, implicando que seu volume deve atingir a uma altura máxima de 15

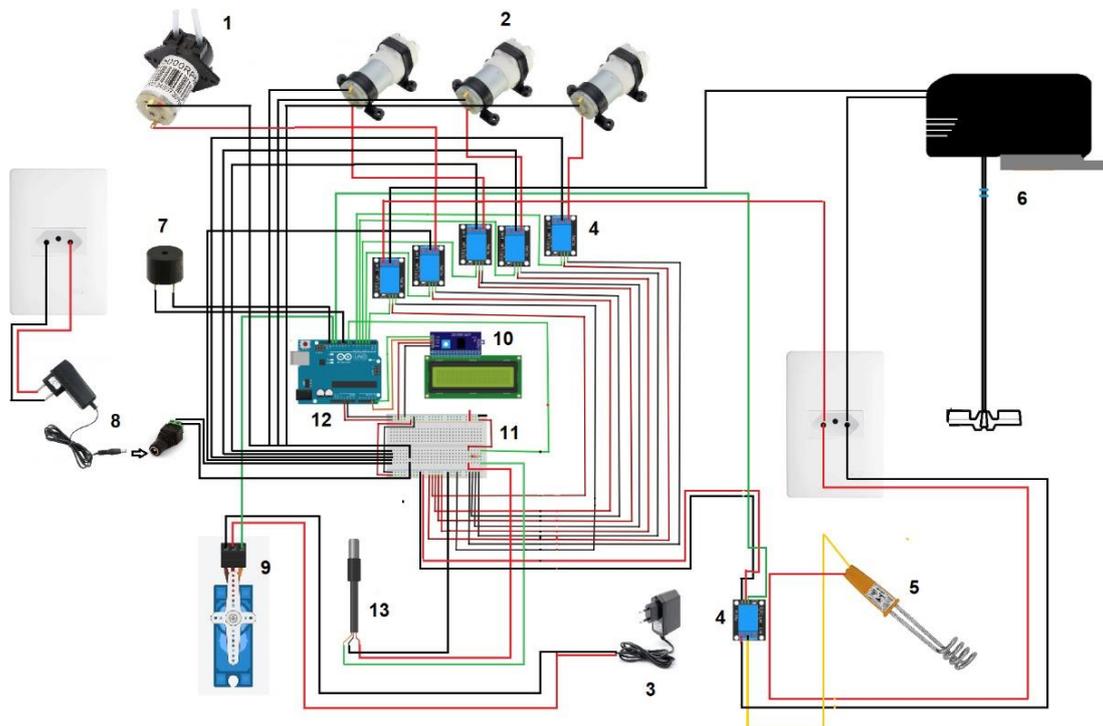
cm. Como pode ser observado na figura 10, o impelidor está deslocado em relação ao centro do tanque. Para evitar a formação de vórtice, ao invés de 4 defletores como em um tanque padrão, apenas um defletor com largura de 1,5 cm foi colocado em uma posição estratégica de modo que sua posição foi determinada pela observação de não formação de vórtice.

O motor do agitador utilizado foi o de uma bateadeira elétrica, que junto com seu conjunto de redução e escolha entre 3 velocidades, se tornam convenientes para a função de agitador. Não foi foco do projeto prover um controle de velocidade de rotação mais preciso, porém este poderia ser facilmente feito também com a inclusão de outros módulos para Arduino®.

Em relação ao dimensionamento da potência do motor a ser utilizado, motores de baixa potência devem funcionar com baixa rotação (maior torque), atingido por uma caixa de redução, de modo a evitar danos ao motor. Em um teste realizado com um motor de 85W e média a alta rotação, este começou a superaquecer, sendo trocado então pelo motor de 350W com conjunto de redução da própria bateadeira elétrica.

Com relação às conexões elétricas realizadas no Arduino® UNO e periféricos, estas podem ser conferidas na figura 11.

Figura 9 – esquema ligações elétricas.



Fonte: Autoria própria, 2021.

A Figura 11 ilustra todas as conexões, componentes eletrônicos, e materiais utilizados na construção do sistema de controle, sendo eles enumerados:

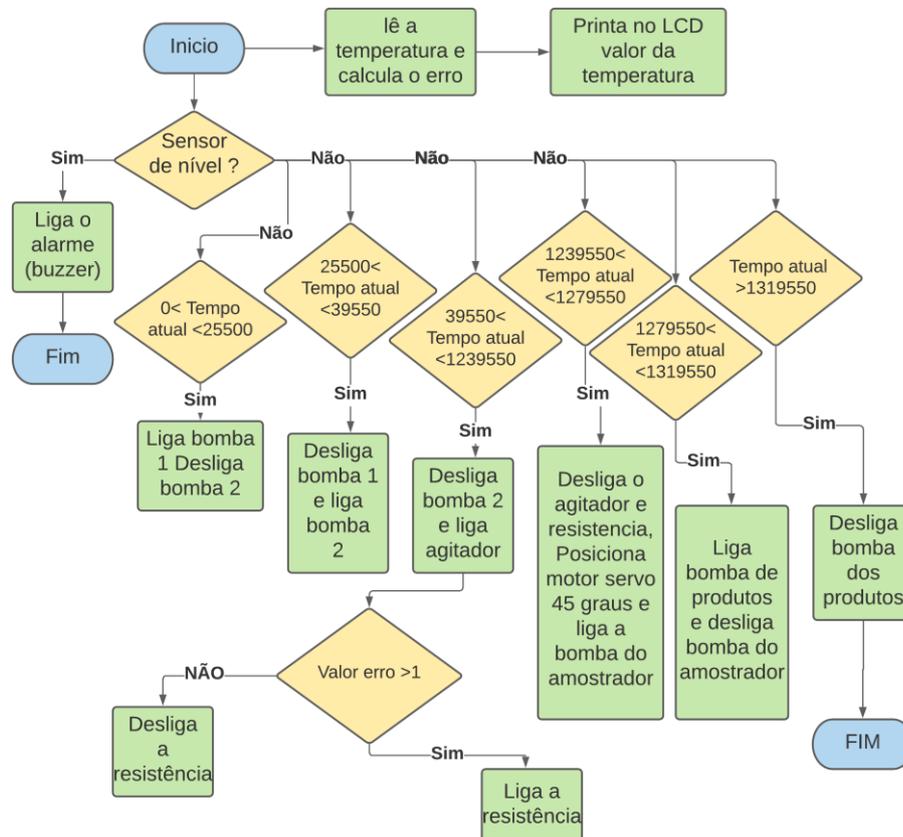
1. Bomba peristáltica: responsável por coletar a amostra do produto após a reação;

- 2. Bomba centrífuga: possuindo 3 unidades, é responsável pelo bombeamento de reagentes no início do processo, e de produto ao final;
- 3. Fonte 5V: Fornece corrente ao motor servo;
- 4. Relés: responsáveis por acionamento e desacionamento das bombas, agitador e resistência;
- 5. Resistência 1200W: fornece calor ao reator;
- 6. Agitador: Responsável pela uniformidade da mistura;
- 7. Buzzer: responsável pelo alarme durante uma possível falta de reagente óleo;
- 8. Fonte 12V: alimentação das bombas;
- 9. Motor Servo: Direciona o bico de saída da mangueira amostrador;
- 10. Módulo I2C + Visor Lcd: responsável por transmitir o valor lido da temperatura em tempo real;
- 11. Protoboard: possibilita a conexão entre as portas;
- 12. Arduino UNO;
- 13. Sensor de temperatura ds18b20: Lê a temperatura em tempo real para o processo.

4.3 Resultados Programação do Arduino® e Controle de Temperatura do Reator

A Figura 12 ilustra o diagrama completo em forma de blocos do algoritmo construído disposto no Apêndice A.

Figura 10– Diagrama de blocos do algoritmo utilizado no processo.



Fonte: Autoria própria, 2021.

Em um primeiro momento, é realizada a leitura da temperatura do reator e calculado o erro com o valor de *set point* previamente definido, sendo então, exposto o valor da temperatura atual para visualização via visor LCD durante toda produção. Paralelamente a isto, é verificado se o tanque de óleo não está vazio, caso esteja, o buzzer é acionado soando o alarme, não iniciando o processo. Caso o tanque não esteja vazio, é dado prosseguimento na produção.

O algoritmo é dividido em 6 tarefas que ocorrem paralelamente sem dependências, porém, utiliza-se a função *millis()* para que cada tarefa ocorra no seu tempo esperado e de uma forma sequencial, Conforme:

- Tarefa 1: Se o tempo atual do processo ainda não superou 25500 milissegundos, liga-se a bomba 1 do óleo, e desliga-se a bomba 2 de álcool;
- Tarefa 2: Se o tempo atual do processo está situado entre 25500 e 39550 milissegundos, liga-se a bomba 2, e desliga-se a bomba1;
- Tarefa 3: Se o tempo atual do processo está situado entre 39550 e 1239550 milissegundos, desliga-se a bomba 2, liga-se o agitador. Além disso, é verificado o valor de erro, em situação onde este é maior que 1, liga-se a resistência, caso contrário, desliga;
- Tarefa 4: Se o tempo atual do processo está situado entre 1239550 e 1279550 milissegundos, desliga-se agitador e resistência, liga-se motor servo e direciona para posição 45°, em seguida é acionado a bomba do amostrador para coleta da amostra;
- Tarefa 5: Se o tempo atual do processo está situado entre 1279550 e 1319550 milissegundos, desliga-se a bomba do amostrador, e liga-se a bomba final para coleta do biodiesel e glicerina produzidos;
- Tarefa 6: Se o tempo atual do processo é maior que 1319550 milissegundos, desliga-se a bomba final.

4.4 Resultados da Fase 5 (Testes/avaliação)

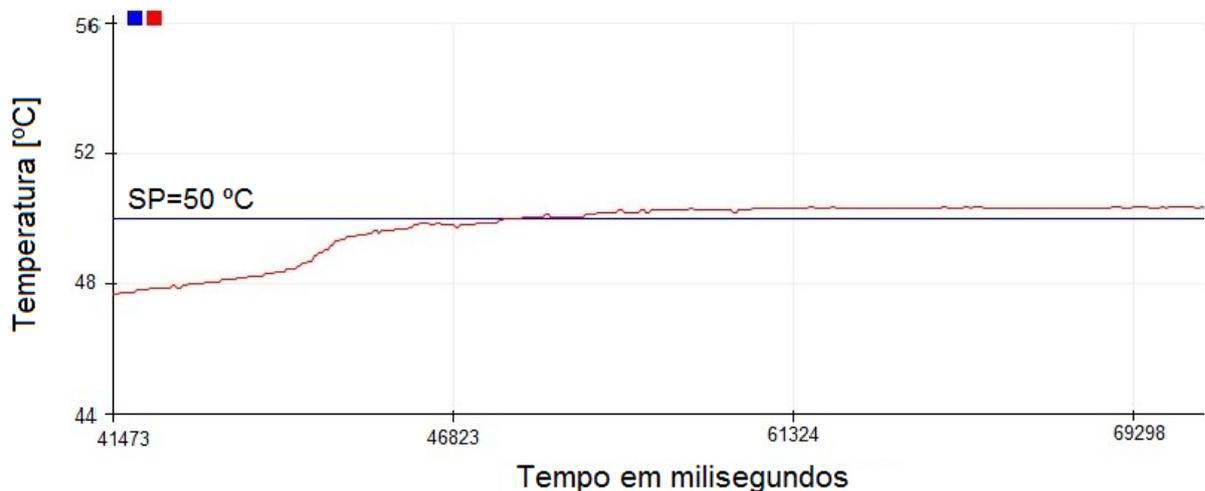
Na fase de teste o sistema foi colocado à prova para verificação se o sequenciamento planejado foi executado, sendo realizado a princípio com água para verificação do funcionamento do programa. Como resultado foi constatado o correto

sequenciamento da programação e cumprimento das etapas de funcionamento de todo o processo. Um problema observado foi o surgimento de interferências em relação às portas digitais quando o sistema de agitação era ligado. Para isso, recomenda-se em trabalhos futuros o uso de relês com optoacopladores, e isolamento eletromagnético de cabos como o do sensor de temperatura, além de um layout que mantenha os relês mais distantes uns dos outros.

Outro ponto avaliado foi a eficácia do sistema de agitação, onde a turbina de pás confeccionada com arrastador de copo de liquidificador, em conjunto com ao defletor, promoveram uma agitação sem a formação de vórtice e com boa intensidade.

Relativo à avaliação do controle de temperatura, a Figura 11 traz o gráfico obtido da resposta do sistema. Foi definido para desligar o aquecimento em erro > 1, ou seja, em 49°C, a inércia térmica do sistema fez com que o mesmo atingisse a temperatura desejada de 50°C em um dado período de tempo. Como o reator é agitado, a distribuição do calor se torna uniforme durante toda reação e a queda de temperatura se torna lenta, atingindo então, na maioria do período de reação, o valor desejado da temperatura.

Figura 11 – resposta do sistema.



Referente à avaliação de custos do projeto, os valores de cada componente podem ser verificados na tabela da figura 9 junto com um comparativo entre equipamentos normalmente utilizados nos laboratórios. O custo total do projeto foi estimado em R\$ 627,20. Este custo é relativamente baixo comparado à complexidade do sistema montado, suas funcionalidades e versatilidade em poder ser desmontado

para que com os mesmos componentes seja construído outros sistemas (por exemplo, com os mesmos componentes poderiam ser feitos conjuntos de CSTRs).

Figura 12 – Tabela com preços de componentes e comparativo de custo.

MATERIAL	Valor unit	Qtd.	Valor total
UNO R3 COM cabo USB	\$15,38	1	\$15,38
Display LCD 16x2	\$4,80	1	\$4,80
Protoboard	\$4,62	1	\$4,62
Relé	\$1,65	6	\$9,91
Buzzer	\$0,72	1	\$0,72
Resistor 10k 1/4W	\$0,04	2	\$0,07
Bombas RS-385 12V DC	\$11,11	3	\$33,33
Micro servo 9g SG90TowerPro	\$4,25	1	\$4,25
Modulo I2C display LCD	\$1,65	1	\$1,65
Sensor DS18B20	\$3,13	1	\$3,13
Fonte chaveada 12V 1A	\$3,13	1	\$3,13
Adaptador P4 fêmea-borne	\$0,72	1	\$0,72
Bomba peristáltica 12V-24V	\$10,94	1	\$10,94
Ebulidor elétrico 1200W 220V	\$5,36	1	\$5,36
Cabos Jumper	\$4,41	1	\$4,41
Motor agitador (350W)	\$9,27	1	\$9,27
Chave de nível de água horizontal 10W	\$4,62	1	\$4,62
	TOTAL		\$ 116,34

Cotação dolar (01/10/2021) R\$ 5,391



\$ 116,34

VS



AGITADOR MECÂNICO INDICADO
PARA AGITAR ATÉ 1,5 LITROS
VELOCIDADE 150 A 2000 RPM REF
7330-PM0304

\$ 362,32



AGITADOR MAGNÉTICO DIGITAL
SEM AQUECIMENTO 20-500RPM
PLATAFORMA EM AÇO INOXIDÁVEL
120MM Q223HAG

\$ 215,69

Fonte: preços dos agitadores mecânicos e agitador magnético consultados no site: <https://www.lojanetlab.com.br/>, acessado em 04/10/2021

5 CONCLUSÃO

Conclui-se que o projeto realizado atendeu aos objetivos esperados, foi possível construir um equipamento automatizado, que atende da proposta de ser uma bancada didática, podendo ser utilizado pelos acadêmicos para a condução de determinadas reações, estudos de cinética, aplicação de metodologias de controle de processos químicos, além de ser um sistema facilmente customizável para realização de diversos outros experimentos práticos.

Como etapas posteriores a esse trabalho, seria o design de experimentos que poderiam ser realizados e a utilização prática do equipamento construído nas aulas de laboratório, o incentivo à customização do sistema pelos próprios alunos, e a avaliação por eles quanto à sua aplicabilidade e contribuição na aproximação do ensino teórico com a prática.

PROJECT AND CONSTRUCTION OF A BATCH CHEMICAL REACTOR FOR USE AS A DIDATIC TOOL

ABSTRACT

The use of didactic tools plays a fundamental role in the development of teaching and learning skills. However, in engineering laboratories at universities, these tools are not always available due to the high cost of equipment, such as didactic laboratory scale reactor, distillation columns, and other equipment. Thus, in this work, an automated and low-cost didactic batch reactor was developed for the production of biodiesel by transesterification as a tool for use in disciplines such as chemical reaction engineering, unit operations and chemical process control, bringing and exploring the possibilities of the maker culture for teaching chemical engineering.

Key words: Reactor. Biodiesel. Benche. Transesterification. Control. Arduino.

REFERÊNCIAS

CREMASCO, Marco Aurélio. **Operações unitárias em sistemas particulados e fluidomecânicos**. 2ª edição. Blucher, 2014.

DE CASTRO, L. H. M.; SANTOS, R. DOS. O uso do Arduino e a criação de objetos educacionais em tempos e espaços desarticulados. **Revista de Ciência da Computação**, v. 2, n. 1, p. 05, 2020.

FRANCHI, Claiton Moro. **Controle de processos industriais**. São Paulo: Érica, 2011

GARNICA, Julián Alfredo González. **Determinação experimental dos dados cinéticos da reação de transesterificação de óleos vegetais**. 2009. 152 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009.

GERIS, R. et al. **Biodiesel de Soja – Reação de Transesterificação para Aulas Práticas de Química Orgânica**. Química Nova, vol. 30, nº 5, 1369-1373, 2007. Disponível em: <http://quimicanova.sbq.org.br/detalhe_artigo.asp?id=1823>. Acesso em: 10 set. 2021.

MACHADO JUNIOR, Iterlandes. **Desenvolvimento de titulador automático baseado na plataforma open source arduino como ferramenta investigativa no ensino de química**. 2019. 133 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Química, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2019,

MARINI, Eduardo. **A expansão da Cultura Maker nas escolas brasileiras**. 2019. Disponível em: <https://revistaeducacao.com.br/2019/02/18/cultura-maker-escolas/>.

Acesso em: 01 set. 20201.

PONTES, Aline Santos de. **Desenvolvimento de um fotômetro LED-Vis portátil e microcontrolado por Arduino**. 2014. 76 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Química, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2014.

REIS, Germinson de Paula dos; MATOS, Saulo Neves; SEGUNDO, Alan Kardek Rêgo; LEAL, Elisângela Martins; FIGUEIREDO, Robson Lage. Instrumentação de uma célula eletrolítica. **Cobenge**, Fortaleza, set. 2019

SCHUCHARDT, U.; SERCHELI, R.; VARGAS, R. M.; *Transesterification of Vegetable Oils: a review*; **Journal of the Brazilian Chemical Society**, vol. 9, nº 1, p.199-210, São Paulo maio/junho 1998.

VIERA, J. S. C, et al. **Esterificação e transesterificação homogênea de óleos vegetais contendo alto teor de ácidos graxos livres**. Química Nova vol.41, n.1, São Paulo, jan. 2018. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-40422018000100010&lang=pt#B4. Acesso em: 12 set. 2021.

APÊNDICE A – CÓDIGO

```

/temperatura
#include <DallasTemperature.h>
#include <OneWire.h>
#include <Servo.h>
int pos = 0;
int buzzerpin=11;

Servo servo_9;

//lcd
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h> //lcd
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27,2,1,0,4,5,6,7,3, POSITIVE);

//variaveis para o millis
extern volatile unsigned long timer0_millis;
unsigned long int tempoanterior1=0;
unsigned long int tempoanterior2=25500;
unsigned long int tempoanterior3=39550;
unsigned long int tempoanterior4=1239550;
unsigned long int tempoanterior5=1279550;
unsigned long int tempoanterior6=1319550;

#define ONE_WIRE_BUS 8
#define bomba1 12
#define bomba2 2
#define agitador 3
#define resistencia 10
#define bombaamost 4
#define bombafinal 5
#define pinsensortanque 13
OneWire oneWire(ONE_WIRE_BUS);
DallasTemperature sensor(&oneWire);

float erro=0;
int sp=50;
bool estadotanque;

void setup() {
//servo
  servo_9.attach(9, 500, 2500);

  lcd.begin (16,2);

  pinMode(bomba1, OUTPUT);
  pinMode(bomba2, OUTPUT);
  pinMode(agitador, OUTPUT);
  pinMode(resistencia, OUTPUT);
  pinMode(bombaamost, OUTPUT);
  pinMode(bombafinal, OUTPUT);

  digitalWrite(bombafinal, HIGH);
  digitalWrite(bombaamost, HIGH);
  digitalWrite(bomba1, HIGH);
  digitalWrite(bomba2, HIGH);
  digitalWrite(agitador, HIGH);

```

```

digitalWrite(resistencia,HIGH);

Serial.begin(9600);
}

void loop() {
//buzzer
estadotanque=!digitalRead(pinsensortanque);

if (estadotanque=LOW) {
tone(buzzerpin, 2500, 100);
delay(400);
noTone(buzzerpin);
}

if (estadotanque=HIGH) {
    if((millis()-tempoanterior1)<25500){
        digitalWrite(bomba1, LOW);
        digitalWrite(bomba2, HIGH);
    }

    if((millis()-tempoanterior2)>0){
        if((millis()-tempoanterior2)<39550){
            digitalWrite(bomba1, HIGH);
            digitalWrite(bomba2, LOW);
        }
    }
}

//lêr temperatura
sensor.requestTemperatures();
float leitura=sensor.getTempCByIndex(0);
//Serial.println(leitura);
//calculo do erro
erro=sp-leitura;

// tarefa 1 ligar o agitador, resistencia e controlar ela
if ((millis()-tempoanterior3)>0) {
    if((millis()-tempoanterior3)<1239550) {
        digitalWrite(bomba2,HIGH);
        digitalWrite(agitador,LOW);
        if(erro>1){
            digitalWrite(resistencia,LOW);
        }
        else{
            digitalWrite(resistencia,HIGH);
        }
    }
}
//tarefa 2 ligar amostrador
if((millis()-tempoanterior4)>0) {
    if((millis()-tempoanterior4<1279550)) {
        pos=45;
        servo_9.write(pos);
        digitalWrite(agitador,HIGH);
        digitalWrite(resistencia,HIGH);
        digitalWrite(bombaamost,LOW);
    }
}
//tarega 3 ligar a bomba final
if((millis()-tempoanterior5)>0) {

```

```
if((millis()-tempoanterior5)<1319550){
  digitalWrite(bombaamost,HIGH);
  digitalWrite(bombafinal,LOW);
}

if (millis(>1319550) {
  digitalWrite(bombafinal,HIGH);
}
}

//monitor lcd
lcd.setBacklight(HIGH);
lcd.setCursor(0,0);
lcd.print("Temperatura");
lcd.setCursor(0,1);
lcd.print(leitura);

}

Serial.print(sp);
Serial.print(" ");
Serial.println(leitura);

}

}
```