

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
INSTITUTO DE QUÍMICA - ARARAQUARA

VITOR HUGO RANGEL LAZAROTI

SISTEMA PARA AUTOMAÇÃO DE CONTROLE DE pH E BIOGÁS PRODUZIDO
EM BIODIGESTORES

ARARAQUARA - SP
JUNHO, 2023

VITOR HUGO RANGEL LAZAROTI

SISTEMA PARA AUTOMAÇÃO DE CONTROLE DE pH E BIOGÁS PRODUZIDO
EM BIODIGESTORES

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.

Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Lorena Oliveira Pires.

ARARAQUARA - SP

JUNHO, 2023

L431s Lazaroti, Vitor Hugo R.
SISTEMA PARA AUTOMAÇÃO DE CONTROLE
DE pH E BIOGÁS PRODUZIDO EM
BIODIGESTORES / Vitor Hugo R. Lazaroti. --
Araraquara, 2023
81 p. : tabs., fotos

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado -
Engenharia Química) - Universidade Estadual
Paulista (Unesp), Instituto de Química, Araraquara
Orientadora: Lorena Oliveira Pires

1. Processos. 2. Qualidade. 3. Controle. 4.

5. Biodegradação. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp.
Biblioteca do Instituto de Química, Araraquara. Dados fornecidos pelo
autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

VITOR HUGO RANGEL LAZAROTI

SISTEMA PARA AUTOMAÇÃO, REGISTRO E CONTROLE DE
VARIÁVEIS DE PRODUÇÃO EM BIODIGESTORES

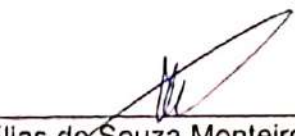
Trabalho de conclusão de curso
apresentado à Universidade Estadual
Paulista "Júlio de Mesquita Filho" como
parte dos requisitos para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia
Química.

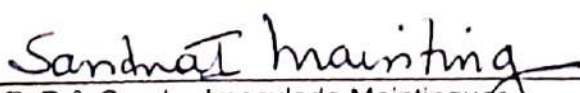
Araraquara, 06 de julho de 2023.

BANCA EXAMINADORA



Profª. Drª. Lorena Oliveira Pires
Instituto De Química / Unesp Araraquara


Prof. Dr. Elias de Souza Monteiro Filho
Instituto De Química / Unesp Araraquara


Profª. Drª. Sandra Imaculada Maintinger
Instituto de Pesquisa em Bioenergia / Unesp Rio Claro

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, por todo o zelo e dedicação que sempre despenderam comigo.

Aos meus amigos, por me incentivarem e darem suporte para eu seguir meus objetivos.

À minha orientadora, Prof^a. Dr^a. Lorena Oliveira Pires, por todo conhecimento transmitido ao longo dos anos de graduação e apoio no desenvolvimento deste trabalho.

À UNESP Araraquara e seus docentes por fornecerem toda a base e estrutura que me permitiram formar como engenheiro.

RESUMO

Desde a fundação dos primeiros processos produtivos, metodologias físicas e químicas de transformação da matéria são objetos de estudo de grande parte da comunidade científica ao redor do mundo. A qualidade de um processo está associada com sua capacidade de imprimir características desejáveis ao seu produto final enquanto mantém seu fluxo de operação estável e equilibra consumo de energia (e matéria) e geração de resíduos. Além disso, vale ressaltar que quanto mais etapas (e quanto mais complexas elas forem) um processo tiver, mais difícil é assegurar sua qualidade. Nesse contexto, a ciência de Controle de Processos surge como base lógica fundamental para garantir que a condução de um método produtivo vai sempre ser a mais eficiente. Essa ciência age por meio da união de mecânica, elétrica, eletrônica e ciências da computação permeados por modelagens matemáticas. Inúmeras são as formas de projetar e programar sistemas reguladores para um mesmo processo, entretanto, a eficiência de controle depende da capacidade do(s) projetista(s) de assimilar diferentes variáveis de alimentação com respostas mecânicas por meio de códigos que garantam agilidade, precisão e confiabilidade. Por isso, o escopo desse projeto envolveu, a partir de componentes eletrônicos básicos e de uma plataforma de prototipagem eletrônica (Arduino) livre, construir um sistema completo de monitoramento e controle de algumas variáveis de reação utilizando metodologia padrão de planejamento, integração e execução (além de fornecer material de apoio para os pesquisadores que o utilizarem). O tipo de processo a ser controlado na prática é a degradação anaeróbica de resíduos em biodigestor e as principais vias a serem monitoradas são o pH e a produção de biogás. A vantagem de desenvolver um projeto voltado para mecanismos biológicos é a de atestar sua robustez, uma vez que essas reações possuem comportamentos menos previsíveis que mecanismos inorgânicos e o tempo de resposta após a atuação de um controle é maior. Ao final do projeto, o sistema foi instalado no Instituto de Pesquisa em Bioenergia da UNESP em Rio Claro (SP) e um manual de operação foi elaborado e entregue para a equipe de pesquisadores.

Palavras-chave: processo; qualidade; controle; eletrônica; prototipagem; decomposição biológica.

ABSTRACT

Since the founding of the first productive processes, physical and chemical methodologies for matter transformation have been objects of study for a large part of the scientific community around the world. The quality of a process is associated with its ability to impart desirable characteristics to its final product while maintaining a stable operation flow, balance of energy (and matter) consumption and waste generation. In addition, it is worth noting that the more steps (and the more complex they are) a process goes through, the more difficult it is to ensure its quality. In this context, the science of Process Control emerges as a foundation to ensure that the conduction of a productive method will always be more efficient. This science arises as the union of mechanics, electrical, electronics and computer science permeated by mathematical modeling. There are countless ways to design and program control systems for the same process, however, control efficiency depends on the designer's ability to assimilate different inputs with mechanical responses through codes that guarantee agility, accuracy and reliability. Therefore, the scope of this project involves, from basic electronic components and a free electronic prototyping platform (Arduino), building a complete system of monitoring and control of some reaction parameters using standard methodology of planning, integration and execution (in addition to providing support material for researchers who use it). The type of process to be controlled in practice is the anaerobic degradation of waste in biodigesters and the variables to be monitored are pH and biogas production. The advantage of developing a project aimed at biological reactors is to attest its robustness, since these reactions are more unpredictable than the inorganics and the response time after the actuation of a control is greater. At the end of the project, the system was installed at UNESP's Bioenergy Research Institute in Rio Claro (SP) and an operation manual was prepared and delivered to the researcher's team.

Keywords: process; quality; control; electronics; prototyping; biological decomposition.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Regulador de Motor a vapor de James Watt.....	14
Figura 2 – Exemplo de SDCD em Fábrica de Papel	16
Figura 3 – Malha de Controle de um Reator genérico.....	18
Figura 4 – Exemplo de Controles: (a) Eficiente e (b) Ineficiente	20
Figura 5 – Pirâmide da Automação	23
Figura 6 – pHmetro industrial	24
Figura 7 – Par Emissor/Receptor de Infravermelho	25
Figura 8 – Esquema de um reator em batelada	33
Figura 9 – Esquema de um reator UASB	34
Figura 10 – Processo simplificado de digestão anaeróbia	35
Figura 11 – Placa Arduino	37
Figura 12 – Módulo Sensor de pH para Arduino	38
Figura 13 – Módulo RTC para Arduino.....	39
Figura 14 – Módulo SD para Arduino	40
Figura 15 – Módulo Relé para Arduino.....	41
Figura 16 – Bomba Dosadora Peristáltica.....	42
Figura 17 – Conjunto Emissor e Receptor Infravermelho.....	43
Figura 18 – Esquema de um tubo em U adaptado para medição de vazão.....	44
Figura 19 – <i>Protoboard</i>	45
Figura 12 – P&ID do reator a ser controlado	48
Figura 21 – Esquema do controlador Arduino	48
Figura 22 – Reator e sistema de controle instalado	49
Figura 23 – Tubo em U instalado no Sistema	50
Figura 24 – Disposição dos módulos do sistema instalado.....	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Nomenclatura Instrumental NBR 8190: Primeiro Termo	19
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CLP	Controlador Lógico Programável
CPU	Unidade Central de Processamento
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
IHM	Interface Homem-Máquina
P	Proporcional
P&ID	<i>Piping And Instrumentation Diagram</i>
PD	Proporcional Derivativo
pH	Potencial Hidrogeniônico
PI	Proporcional Integral
PID	Proporcional Integral Derivativo
RAM	Memória de Acesso Aleatório
RTC	<i>Real Time Clock</i>
SDCD	Sistema Digital de Controle Distribuído

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1	HISTÓRIA DOS CONTROLES: AS REVOLUÇÕES INDUSTRIAIS	14
2.2	TEORIA DE CONTROLE	17
2.2.1	Malhas de Controle	17
2.2.2	Eficiência de Controles	20
2.2.3	Modelagem Matemática	21
2.3	INSTRUMENTAÇÃO.....	22
2.3.1	pHmetro	23
2.3.2	Emissor/Receptor de Infravermelho	25
2.4	TRATAMENTO DE RESÍDUOS	26
2.4.1	Classificação de Resíduos	26
2.4.2	Tratamento Biológico	29
2.4.2.1	Digestão Aeróbia.....	29
2.4.2.2	Digestão Anaeróbia	30
2.4.3	Biorreatores e Reações	31
3	OBJETIVOS	36
4	MATERIAIS E MÉTODOS	36
4.1	MATERIAIS	36
4.1.1	Placa Arduino	36
4.1.2	Módulo Sensor de pH para Arduino	37
4.1.3	Módulo de Relógio em Tempo Real (RTC) para Arduino	38
4.1.4	Módulo Cartão SD para Arduino	39
4.1.5	Módulo Relé para Arduino	40
4.1.6	Bomba Dosadora Peristáltica	41
4.1.7	Emissores e Receptores de Infravermelho	42
4.1.8	Tubo em U adaptado para Medição de Vazão	43
4.1.9	Board Eletrônico (Placa de Circuito Impresso)	44
4.1.10	Materiais Auxiliares e Ferramentas	45
4.2	MÉTODOS	46
4.2.1	Visão Geral	46

4.2.2	Integração de módulos.....	46
5	RESULTADOS E ANÁLISES.....	47
6	PERSPECTIVAS DE MELHORIA	51
7	CONCLUSÃO	52
	REFERÊNCIAS.....	53
	ANEXO A – CÓDIGO PRINCIPAL DE FUNCIONAMENTO DO CONTROLE pH,V.....	57
	ANEXO B – CÓDIGO DE CALIBRAÇÃO DO CONTROLE DE pH.....	63
	ANEXO C – CÓDIGO DE CALIBRAÇÃO DO SISTEMA DE VOLUME ..	64
	ANEXO D – MANUAL OPERACIONAL KIT pH,V	66

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, a busca por fontes de energia sustentáveis e renováveis tem se intensificado, impulsionando a pesquisa e o desenvolvimento de tecnologias inovadoras. Nesse contexto, o biogás tem emergido como uma alternativa promissora, sendo produzido em um processo biológico capaz de aproveitar resíduos orgânicos e transformá-los em uma valiosa fonte de energia. No entanto, para garantir a máxima eficiência de produção, é fundamental monitorar e controlar de forma precisa as variáveis do processo, estabilizando-o. Dentre essas variáveis, destacam-se o volume de produção, sua concentração de reagentes (ou a demanda bioquímica de oxigênio), o pH do meio e sua temperatura.

É nesse cenário que se aplicam sistemas de controle e automação em Arduino, uma plataforma eletrônica de código aberto amplamente utilizada por entusiastas e profissionais da área. O Arduino oferece uma vasta gama de possibilidades para projetos de automação, permitindo o desenvolvimento de soluções customizadas para diversas aplicações.

Este trabalho de conclusão de curso tem como objetivo apresentar um sistema de controle e automação em Arduino aplicado a um reator biológico laboratorial (localizado no Instituto de Pesquisa em Bioenergias da UNESP Rio Claro) para medição do volume de biogás produzido e controle do pH durante o experimento. A utilização dessa tecnologia proporciona uma solução eficiente, confiável e de baixo custo para otimizar a operação do sistema por pesquisadores e estabilizar o processo.

Ao utilizar equipamentos e sensores apropriados, é possível medir de forma precisa o volume de biogás gerado ao longo do ensaio. Além disso, o controle do pH (também realizado com sensores e atuadores) é essencial para garantir um ambiente propício às bactérias responsáveis pela produção de biogás. O Arduino oferece a flexibilidade necessária para implementar um sistema de controle automático eficiente e confiável.

Em resumo, a automação e controle em Arduino representa uma ferramenta poderosa para aprimorar a operabilidade um reator biológico laboratorial. Este trabalho explora os benefícios dessa abordagem, destacando sua relevância para a eficiência e sustentabilidade do processo e ilustra a capacidade do sistema de ser deliberadamente aprimorado.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 HISTÓRIA DOS CONTROLES: AS REVOLUÇÕES INDUSTRIAIS

Durante a Primeira Revolução Industrial, momento de grande desenvolvimento tecnológico e energético, a humanidade consolidou os primeiros métodos industriais de produção e de mecanização que, inevitavelmente, precisavam ser controlados para atuar plenamente. Porém, para que algo possa ser controlado, é necessário que condições do processo sejam conhecidas e, portanto, medidas (YOUNG *et al*, 2014).

Assim, os primeiros mecanismos de medição e atuação (denominados instrumentos) foram idealizados por cientistas da época. Discute-se que o Regulador de Motor a vapor possa ser considerado o primeiro sistema de controle de malha fechada usando instrumentação. Inventado em 1788 por James Watt, esse mecanismo simples era capaz de medir a velocidade de um motor a vapor através da rotação de duas esferas de metal (BELLMAN, 2015). A Figura 1 ilustra o instrumento:

Figura 1 – Regulador de Motor a vapor de James Watt

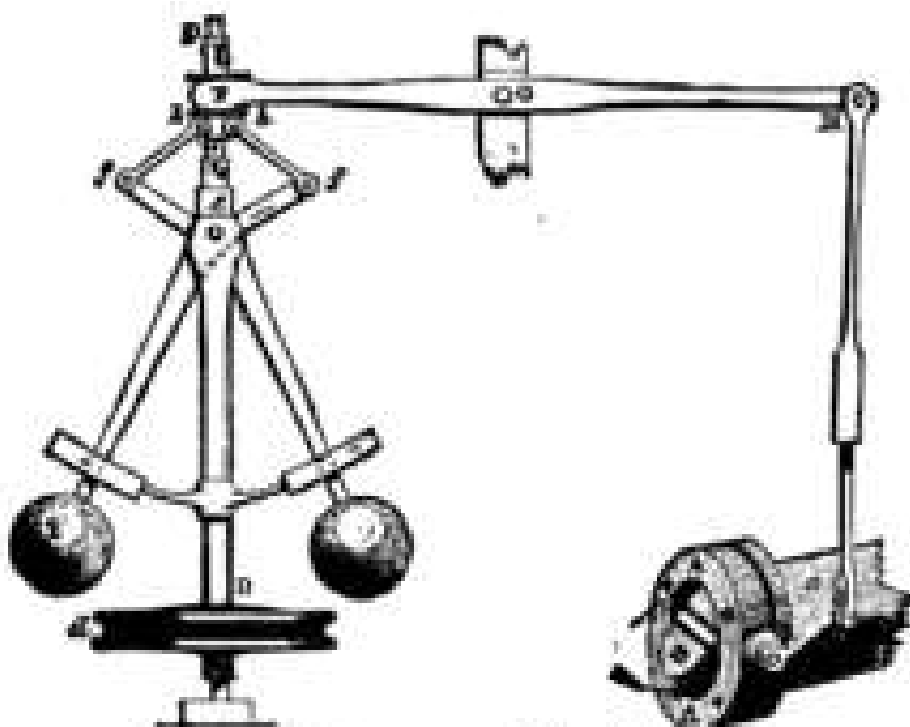


FIG. 4.—Governor and Throttle-Valve.

Fonte: BELLMAN, 2015

À medida que o motor era acelerado, as esferas se afastavam por meio do acréscimo de velocidade tangencial resultante da aceleração centrípeta e do ganho de momento angular. Isso fornecia uma medição direta da velocidade que, quando acoplado a uma válvula de controle de vapor, controlava a rotação final do motor. Evidentemente, esse sistema é puramente mecânico e, portanto, não era capaz de manter a velocidade dos motores constantes, mas apenas estáveis dentro de um intervalo (BELLMAN, 2015).

Entretanto, segundo Bennett (1993), a evolução dos sistemas de controle se deu somente durante a Segunda Revolução Industrial, quando o início da produção em massa e o foco em meios eletromecânicos nas indústrias metalúrgicas e petroquímicas para a produção de motores e automóveis criou demandas por precisão e exatidão em cada etapa do processo. Dessa forma, tornou-se inevitável que modelos mais complexos de instrumentos fossem desenvolvidos, como termopares de lâmina dupla ou medidores de pressão pneumáticos.

No início da Terceira Revolução Industrial, com a explosão do desenvolvimento de sistemas eletrônicos na década de 1960, a instrumentação ainda era amplamente baseada em sensores mecânicos e leituras de medidores dos primeiros motores à vapor e derivados de petróleo. Vale lembrar que, em 1875, a Convenção do Metro foi assinada por 17 nações para coordenar a metrologia internacional e, embora tenha sido atualizada ao longo de décadas, em 1960, o sistema foi revisado e relançado onde os Padrões Internacionais foram definidos e as unidades SI (Sistema Internacional) estabelecidas (ROTONDO e COIMBRA, 2015). As sete unidades básicas a partir das quais todas as grandezas e medições podem ser definidas e calculadas são: Comprimento (m), Massa (kg), Tempo (s), Corrente Elétrica (A), Temperatura Termodinâmica (K), Luminosidade (Cd) e Quantidade de Substância (Mol).

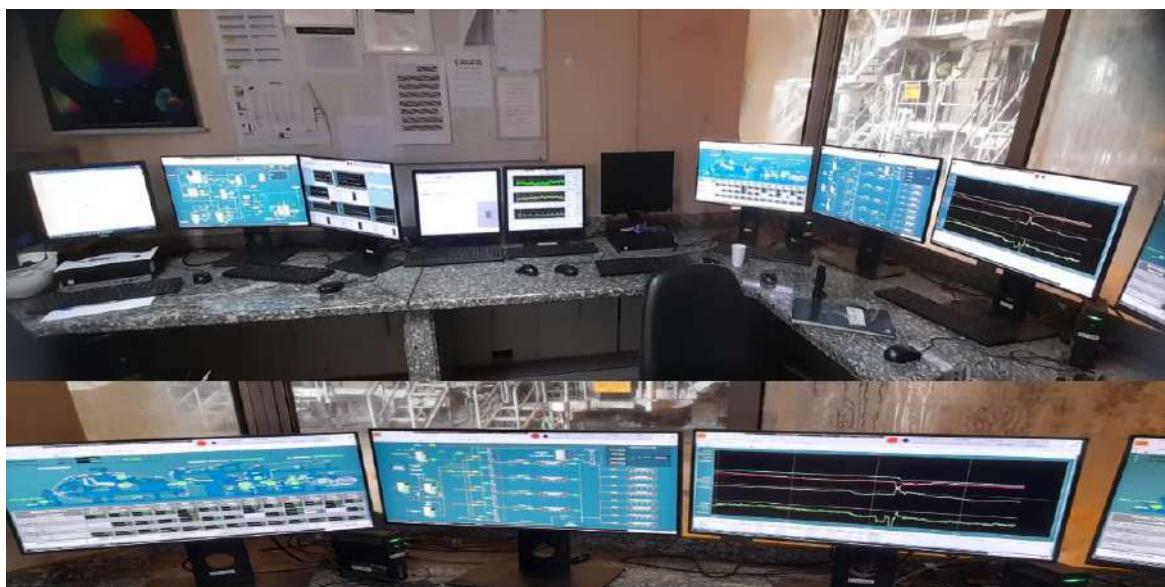
Com isso, sensores primários elétricos foram desenvolvidos. Por exemplo, com equacionamentos simples da física clássica, manômetros de Bourdon puderam ser substituídos por medidores de tensão e, com eletrônica básica, medidores de temperatura passaram a fornecer dados mais estáveis, confiáveis e linearizados (capazes de obter entrada de uma variedade de termopares e fornecer saídas lineares). Além disso, todos os indicadores dos medidores puderam ser instalados remotamente (não necessitando estar acoplados fisicamente aos instrumentos), o que

permitiu a criação dos primeiros painéis de controle que registravam os dados coletados em gráficos de papel.

Avançando para a atualidade, período em que muitos estudiosos como Xu, David e Kim (2018) defendem fazer parte da Quarta Revolução Industrial (a revolução da tecnologia digital), a realidade da ciência de Controle de Processos é totalmente destoante das suas versões passadas (YOUNG *et al*, 2014). O crescimento exponencial da capacidade de integração e processamento e dados em conjunto com a agilidade de transmissão de comandos através de redes eletrônicas permite que todo processo produtivo com controle automático seja assistido pelo Sistema Digital de Controle Distribuído (SDCD).

De maneira resumida, um SDCD consiste em uma interface homem-máquina (IHM) focada no vínculo de um operador com controladores lógicos programáveis (CLP). Em outras palavras, é uma forma de dispor equipamentos de medição e atuação ao longo de um processo e permitir centralizar todas suas informações em uma sala de controle central, onde um operador é capaz de interpretar todos os sinais e tomar decisões visando garantir estabilidade produtiva e econômica na planta. SDCDs são ferramentas robustas capazes de otimizar processos, aumentar segurança e estabilidade operacional e estruturar estatísticas que permitem o desenvolvimento de trabalhos de redução de custos (YOUNG *et al*, 2014). A Figura 2 mostra um exemplo de sala de controle em uma fábrica de Papel:

Figura 2 – Exemplo de SDCD em Fábrica de Papel



2.2 TEORIA DE CONTROLE

Para melhor descrever todos os aspectos fundamentais da Teoria de Controle de Projetos, convém dividir as abordagens em tópicos específicos: malhas de controle, eficiência de controles e modelagens matemáticas. É importante dividir a discussão para facilitar a apresentação e o aprendizado sobre o tema. Entretanto, posteriormente todos os conceitos serão aplicados em conjunto para a definição de elementos e instrumentos de controle (ponto focal deste trabalho).

2.2.1 Malhas de Controle

Malhas de controle são formas representativas práticas das estratégias de um controle. Elas devem conter elementos de processo, instrumentos de medição, de controle e de atuação (MARQUES, 2017).

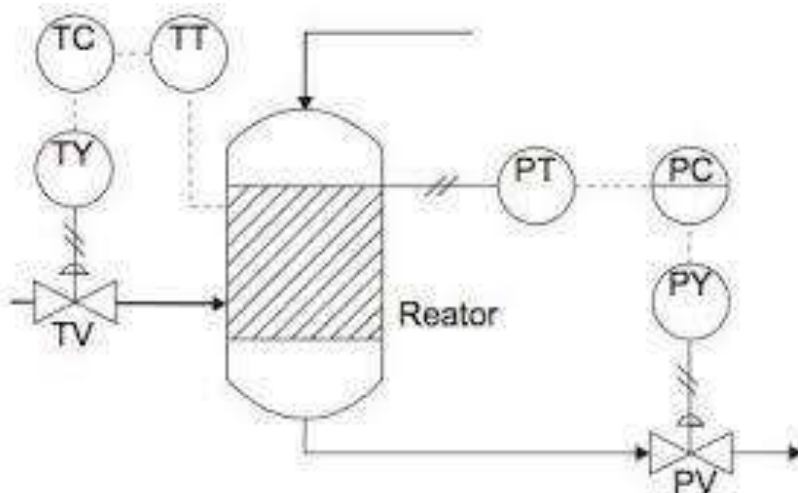
Elementos de processo são equipamentos básicos componentes de uma linha produtiva, como tanques, bombas, tubulações e outros. Quanto à instrumentação, seus tipos são definidos da seguinte maneira:

- De medição (indicação e transmissão): instrumentos responsáveis por receber um sinal físico de entrada e convertê-lo em um sinal analógico ou digital de unidade e escala conhecida (CURRIOU, 2018). Esses são, por exemplo, termômetros, manômetros, pirômetros, rotâmetros e tensiômetros;
- De controle: esses equipamentos são, normalmente, constituídos de circuitos integrados capazes de reconhecer e interpretar um sinal proveniente de um instrumento de medição e convertê-lo em um comando analógico ou digital para um instrumento de atuação;
- De atuação: instrumentos também denominados Elementos Finais de Controle, que recebem sinais dos controladores e executam uma ação que impacta diretamente no processo, controlando-o.

Todos esses elementos podem ser combinados de inúmeras formas diferentes para um mesmo processo e os documentos contendo os desenhos técnicos das propostas das malhas de controle e instrumentação são denominados P&IDs (do inglês, *Piping And Instrumentation Diagram*, ou Diagrama de Tubulação e

Instrumentação). Para exemplificar uma malha de controle, a Figura 3, de Marques (2017) ilustra:

Figura 3 – Malha de Controle de um Reator genérico



Legenda: TT – Transmissor de Temperatura, TC – Controlador de Temperatura, TY – Inversor de Sinal de Temperatura, PT – Transmissor de Pressão, PC – Controlador de Pressão, PY – Inversor de Sinal de Pressão

Fonte: MARQUES, 2017

Nela, está representado o esquema de controle simplificado de pressão e temperatura de um reator genérico, onde podemos notar a existência de instrumentos de controle e válvulas conectadas. O código de identificação de itens de controle (NBR 8190) é feito de forma que o primeiro termo dita o funcional do mesmo e o segundo, o posicional (ABNT, 1983).

No primeiro termo, a primeira letra indica a variável correspondente ao controle, enquanto as letras subsequentes descrevem funcionalidades. No segundo, números e letras complementares indicam a posição do equipamento na malha e/ou na planta. A Tabela 1 abaixo contém os principais componentes para o termo funcional:

Tabela 1 – Nomenclatura Instrumental NBR 8190: Primeiro Termo

1º Termo	
1ª Letra	2ª Letra
P - Pressão	A ^H _L - Alarme de Alto/Baixo
L - Nível	C - Controlador
T - Temperatura	T - Transmissor
F - Vazão	Y - Inversor de Sinal
J - Potência	I - Indicador
S - Velocidade	V - Válvula

Fonte: ABNT, 1983

O traço das linhas contidas em um P&ID indicam o tipo de corrente a que correspondem. Linhas contínuas são linhas de processo (fluxo de matéria), tracejadas são de sinais elétricos e contínuas com traços diagonais, sinais pneumáticos (ABNT, 1983).

Sendo assim, o exemplo da Figura 3 mostra oito instrumentos divididos em dois grupos diferentes apenas pela grandeza controlada: temperatura ou pressão. Cada grupo contém um transmissor conectado com um controlador que direciona comandos de atuação para um inversor de sinal ligado a uma válvula de controle. Ambas as válvulas e o transmissor de pressão são de ativação pneumática, enquanto os demais, de ativação elétrica.

Para construir uma malha de controle, também é necessário definir qual seu mecanismo de ação: aberto ou fechado. Para uma malha aberta, o controle consiste em aplicar um sinal pré-determinado, esperando-se que ao final de um determinado tempo a variável controlada atinja um determinado valor ou apresente um determinado comportamento. Neste tipo de sistema de controle não são utilizadas informações sobre a evolução do processo. Mais especificamente, o sinal de controle não é calculado a partir de uma medição ao longo do processo em intervalos de tempos razoáveis (MARQUES, 2017). Logo, conclui-se que malhas abertas não são métodos ideais de controle de fluxos complexos e que exijam alto grau de precisão.

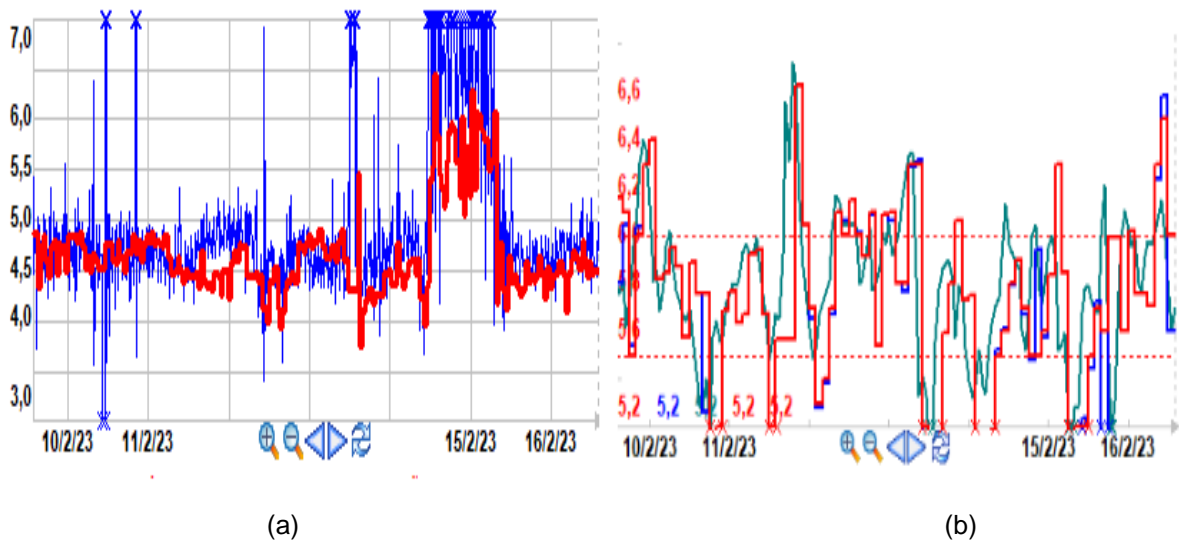
Por outro lado, malhas fechadas geram sinais de controle a partir de uma medição feita na linha a ser controlada. Dessa forma, a atuação do instrumento de ação sempre vai variar de acordo com as necessidades instantâneas do processo. Isso abre margem para dois mecanismos: *feedback* e *feedforward*. O primeiro gera estabilidade a partir da leitura de informações existentes após o ponto de atuação do último elemento de controle (logo, possui rápidas respostas a variações de referência, porém com lentidão no tratamento de distúrbios pontuais); o segundo é tido como

mecanismo antecipatório, uma vez que as medições são feitas antes do elemento de controle (é capaz de tratar distúrbios na linha antes que aconteçam, porém requer grande conhecimento do processo). De acordo com Bellman (2015), um projeto de controle robusto mescla mecanismos *feedback* e *feedforward* de acordo com a criticidade e a disponibilidade de informações de uma etapa.

2.2.2 Eficiência de Controles

Há duas maneiras de avaliar a eficiência de um controle, sendo elas relacionadas à qualidade da medição e à velocidade de resposta e contorno. Na primeira, é importante que os sinais transmitidos pelos medidores não contenham ruídos e sejam suficientemente consistentes para que não haja alarmes falsos (ou controles irregulares) e que um operador humano possa observar tendências claras (NISE, 2004). O exemplo da Figura 4 deixa evidente que o controle à esquerda contém menos ruído, menor variabilidade pico a pico e permite visualizar melhor o patamar da variável controlada em relação ao gráfico da direita. Logo, evidenciando maior eficiência.

Figura 4 – Exemplo de Controles: (a) Eficiente e (b) Ineficiente



Fonte: autor, 2023

Quanto à eficiência de resposta, esta depende da qualidade e estado de conservação e manutenção dos instrumentos finais de controle, mas também tem forte influência da modelagem matemática que converte uma medição em ações. Isso porque a depender do sistema a ser controlado, diferentes tipos de ações podem resultar em diferentes resultados. Além disso, cada variável de processo possui comportamento diferente das demais, ficando a cargo do instrumentista determinar o modelo mais adequado de modelagem (NISE, 2004). Este segmento, em questão, será melhor abordado no Tópico 1.2.3.

2.2.3 Modelagem Matemática

Controladores digitais modernos utilizam a metodologia do compensador Proporcional, Integral e Derivativo (PID) para estabelecer suas ações de controle (GUERRA, 2009). Nesse modelo, os efeitos são:

- A ação proporcional (P) irá prover uma resposta mais rápida ao sistema após uma variação no sinal de entrada (estado desejado);
- A ação integral (I) tem por objetivo cancelar um fenômeno conhecido por erro de estado estacionário (situação em que a resposta de controle garante um estado estacionário com desvio em relação ao *set point*), de forma que ao atingir um estado estável esse valor seja o desejado no sinal de entrada;
- A ação derivativa (D) possui um efeito de antecipação da correção do valor de saída do sistema de forma a melhorar a rapidez de resposta do sistema e reduzir o “efeito chicote” (situação em que um controle age além do esperado e desequilibra o sistema no sentido contrário do primeiro distúrbio, muito comum nas primeiras respostas de ação proporcional).

Quando essas ações são combinadas em diferentes proporções, é possível ajustar um controle capaz de suprir as necessidades de uma linha equilibrando eficiência, confiabilidade e tempo de resposta (GUERRA, 2009). A equação que descreve o estado da saída de um controlador em função de sua entrada é dada pela eq. 1 a seguir:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{d}{dx} e(t) \quad (1)$$

Em que: K_p é o coeficiente da ação proporcional; K_i é o coeficiente da ação integral; K_d é o coeficiente da ação derivativa; t é o instante do estado a ser processado; $u(t)$ é o sinal de saída do sistema no instante t e $e(t)$, o sinal de erro na entrada do controlador no instante t .

Evidentemente, trabalhar com equações íntegro-diferenciais não é a maneira mais eficiente de programar um controle (principalmente quando as funções não são conhecidas), sendo extremamente complexo determinar o valor ideal dos coeficientes de ação ideais para determinada variável (SIMROCK, 2019). Por isso, convém alterar o domínio de análise de tempo para frequência. Isso é facilmente feito aplicando-se a transformada de Laplace na equação de estado do controlador PID.

Por objetividade, o passo a passo da transformada será suprimido. O resultado segue na eq. 2:

$$U(s) = E(s) * \left(K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \right) \quad (2)$$

$$\frac{U(s)}{E(s)} = G(s) = \left(K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \right) \quad (3)$$

Em que s é a variável de frequência do domínio de Laplace e $U(s)$ e $E(s)$ são os sinais de saída e entrada ajustados. A razão $G(s)$ entre os sinais é denominada função de transferência (eq. 3), ou ganho de controlador. Por se tratar de uma expressão puramente algébrica, ela permite a integração de um ou mais controladores em uma malha e identificar os valores ideais dos coeficientes de ação de acordo com a razão das frequências dos sinais desejada e a resolução de equações polinomiais ou racionais simples (SIMROCK, 2019).

É possível, também, criar outros tipos de controladores como P, PD ou PI ao zerar o coeficiente de ação correspondente à contribuição indesejada. Embora não aparente ser vantajoso, controladores mais simples são extremamente eficientes para sistemas que apresentam pouca variabilidade e necessidade de controle imediato.

2.3 INSTRUMENTAÇÃO

Para todo tipo de escala de processo (industrial, laboratorial ou caseira) são necessários equipamentos, denominados instrumentos, para realização da medição e transmissão de informações pela malha de controle (MARQUES, 2017). Embora

previamente citados nesse trabalho, o objetivo desse tópico é ampliar a discussão sobre a instrumentação e instrumentos.

De acordo com a NBR 8190, entende-se que instrumentos são todos os dispositivos que pertencem à base Pirâmide da Automação (Figura 5), como sensores, transmissores, alarmes, botoeiras, entre outros. A lista de instrumentos existentes é imensurável, sendo conveniente apresentar uma visão geral sobre aqueles mais relevantes para o trabalho elaborado e discutido nos tópicos posteriores. São eles: Sensores de pH e Emissores/Receptores de Infravermelho.

Figura 5 – Pirâmide da Automação



Fonte: REDE RS, 2021

2.3.1 pHmetro

O pHmetro é um instrumento de medição de potencial hidrogeniônico (pH) cujo funcionamento analógico é capaz de emitir sinais elétricos que podem ser convertidos em pH de acordo com uma escala a ser calibrada.

De maneira geral, esse equipamento é constituído por dois eletrodos, sendo um deles o eletrodo de referência e o outro, eletrodo de pH (ou de hidrogênio), além de um sensor. Enquanto o sensor eletrodo detecta mudanças na diferença de

potencial com base na atividade do íon hidrogênio, o eletrodo de referência fornece tensão constante para comparação e correta medição. A diferença entre as duas tensões é mostrada como um valor de pH pelo medidor sendo que maiores tensões sinalizam níveis de pH ácido e menor tensão sinaliza nível de pH básico (VANÝSEK, 2004).

Porém, esse instrumento requer uma delicada calibração para pleno funcionamento, uma vez que a tendência da variação do sinal de potencial é linear com o pH, porém logarítmico com a concentração de prótons no meio. Isso implica que a calibração deve ser sempre feita com padrões próximos ao pH de trabalho, afim de evitar maiores desvios.

Outra limitação do pHmetro é a alta sensibilidade a fatores externos que não necessariamente influenciam no pH do meio. Por exemplo, altas concentrações de sódio tendem a desestabilizar o eletrodo de hidrogênio, altas temperaturas reduzem a vida útil da calibração e ácidos muito fortes e em alta concentração induzem as medições a serem acima do real (VANÝSEK, 2004). A Figura 6 mostra o protótipo de um pHmetro industrial em que é possível ver claramente os eletrodos:

Figura 6 – pHmetro industrial



2.3.2 Emissor/Receptor de Infravermelho

De modo geral, um Emissor de Infravermelho é todo instrumento capaz de emitir radiação no espectro eletromagnético do infravermelho de maneira estável e em sinais que podem ser lidos e interpretados por um outro equipamento denominado Receptor de Infravermelho.

Esses equipamentos são muito comuns mesmo fora da área de controle e automação de processos, estando presentes em computadores, aparelhos celulares, televisores, sensores de presença, óculos de visão noturna, entre outros (NISE, 2004).

O princípio de funcionamento de ambos é simples. O Emissor é um tipo de LED (diodo emissor de luz) que envia sinais no infravermelho auto programáveis através de impulsos elétricos que emitem ondas de luz. Já o receptor captura essas ondas e as converte em correntes elétricas que podem ser lidas por controladores analógicos ou digitais. Essa captura segue os princípios do efeito fotoelétrico, fenômeno explicado por Albert Einstein em 1905 (e que o rendeu o Nobel de Física em 1921).

Evidentemente, a comunicação por sinais infravermelhos pode ter problemas, uma vez que qualquer ambiente iluminado é contaminado por essas ondas. Por isso, cada fornecedor estabelece protocolos para que seus receptores sempre detectem os sinais de seus emissores de maneira limpa. O protocolo mais comum atualmente consiste no Emissor enviar somente pulsos a 38kHz e o Receptor filtrar qualquer onda fora dessa faixa (NISE, 2004).

A Figura 7 mostra um par Emissor (transparente) e Receptor (preto) simples para integração de projetos em qualquer escala.

Figura 7 – Par Emissor/Receptor de Infravermelho



Fonte: SENSOGLASS, 2023. Adaptado pelo autor, 2023.

2.4 TRATAMENTO DE RESÍDUOS

Todo tipo de processo e procedimento é passivo de gerar resíduos. De maneira geral, pode-se descrever um resíduo como o remanescente indesejado de uma produção, sendo matéria-prima excedente que não pode ser reaproveitada, um subproduto indesejado, um produto fora de qualidade, uma etapa não otimizada que desperdiça matéria ou energia, entre outros (EPA, 2023).

Existem diversas formas de se classificar um resíduo, porém a primeira separação deve sempre ser feita de acordo com seu estado físico: sólido, líquido ou gasoso. Isso é importante porque cada um desses três exige processos de tratamento, gerenciamento ou purificação diferentes (EPA, 2023).

Por exemplo, resíduos sólidos são majoritariamente separados por filtros, decantadores ou floculadores, e seus destinos finais são aterros, incineradores, processos de reciclagem ou, inclusive, compostagem. Enquanto isso, resíduos gasosos são purificados em lavadores de gases e resíduos líquido, na maioria das vezes, tratados por adição de químicos ou digestão microbiológica anaeróbia ou aeróbia.

Ainda assim, resíduos em cada estado físico ainda devem ser classificados quanto à sua toxicidade, reatividade, radioatividade, inflamabilidade e outras características físico-químicas para melhor orientar profissionais sobre como lidar e gerenciar esses resíduos de maneira segura para si e para o meio ambiente (EPA, 2023).

É evidente que essa classificação se faz necessária para determinação precisa de qual o melhor método de tratamento desses resíduos. Por isso, o tópico 1.4.1 aborda as principais nomenclaturas e enfoca o resíduo mais relevante para o presente trabalho: o orgânico.

2.4.1 Classificação de Resíduos

Quanto a resíduos sólidos, em 2004 a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) instituiu a Norma Brasileira (NBR) 10.004, que definiu critérios para

a classificação desses resíduos quanto aos potenciais riscos ao meio ambiente e à saúde humana. O regulamento definiu as seguintes classes de resíduos:

- **Resíduos Classe I:** Perigosos - perigosos em pelo menos uma das cinco características: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade. Por exemplo, produtos químicos industriais e resíduos hospitalares;
- **Resíduos Classe II:** Não perigosos - que não se enquadram na Classe I;
 - **Resíduo Classe II A:** Não Inerte - que se enquadra na Classe II e possui reatividade inofensiva (como biodegradação). Por exemplo, resíduos orgânicos;
 - **Resíduos Classe II B:** Inertes - que se enquadram na Classe II, mas não sofrem transformação química suficiente para se degradar em contato com o meio ambiente. Por exemplo, sucata de ferro, alumínio e cobre.

Quanto aos resíduos gasosos, sua classificação não se dá necessariamente em classes, mas sim em compostos específicos que, quando em grande quantidade na atmosfera, causam danos severos à saúde humana, animal e ambiental (EPA, 2023). São eles:

- **Dióxido de Carbono:** quando em altas concentrações, esse gás intensifica o efeito estufa favorecendo o aquecimento global. Geralmente, as emissões de gás carbônico estão associadas com a queima de combustíveis fósseis e queimadas ilegais;
- **Dióxido de Enxofre:** esse composto é emitido, assim como o dióxido de carbono, pela queima de combustíveis fósseis e por processos industriais. Quando na atmosfera, o dióxido de enxofre reage com moléculas de água e oxigênio para formar ácido sulfúrico e sulfuroso e precipita como chuva ácida. Esse fenômeno ameaça a vida em corpos hídricos e diminui a vida útil e resistência de construções com fundamento metálico;
- **Óxidos de Nitrogênio:** assim como o resíduo supracitado, os óxidos de nitrogênio também podem causar chuva ácida, além de serem tóxicos ao ser humano. Normalmente, são emitidos pela queima de combustíveis fósseis e usinas siderúrgicas;

- **Monóxido de Carbono:** é emitido pelo mesmo tipo de queima dos anteriores. É especialmente perigoso por ser um agente asfixiante químico (além de ser inflamável);
- **Hidrocarbonetos:** o representante mais conhecido desse grupo é o metano (o principal componente do gás natural), mas também uma série de outros hidrocarbonetos (e suas variações halogenadas) podem ser incluídos nesse grupo (como o etano, isopropano e o GLP). De maneira geral, esses compostos intensificam o efeito estufa, mas também podem ser agentes asfixiantes fortes.
- **Micropartículas:** embora sólidas, micropartículas são incluídas na lista de resíduos gasosos (atmosféricos) por se dispersarem bem em gases e não se separarem facilmente por decantação. Os principais exemplos de micropartículas são cinzas produzidas em queimas e poeira. Também contribuem para variados problemas de saúde, tais como câncer respiratório, arteriosclerose, inflamação de pulmão, agravamento de sintomas de asma, aumento de internações hospitalares e podem levar à morte.

Finalmente, quanto aos resíduos líquidos, estes seguem a mesma diretriz dos resíduos sólidos (NBR 10.004) e recebem a mesma nomenclatura de classificação.

Evidentemente, na maior parte das vezes, ações humanas geram dejetos em mais de um estado físico ou a combinação de resíduos diferentes. Esse tipo de emissão recebe o nome de efluente.

Um efluente pode ter várias origens, sendo as principais os efluentes municipais (domésticos), industriais e hospitalares (EPA, 2023). Por objetividade do trabalho, o único efluente que será detalhado em composição e metodologia de tratamento será o doméstico.

Também chamado de esgoto, esse tipo de resíduo é composto majoritariamente por matéria orgânica, água, sólidos inertes, amônio, cloro, fosforados e alguns íons metálicos. A unidade municipal responsável pelo tratamento desses efluentes é denominada Estação de Tratamento de Efluente (ETE).

ETEs aplicam uma série de processos para purificar efluentes domésticos. Alguns são mais simples, como filtração, decantação e floculação (métodos de remoção de sólidos de variados tamanhos); outros, mais complexos, como o processo de nitrificação/desnitrificação bacteriana (remoção de amoníacos), precipitação de íons e degradação de matéria orgânica por vias bacterianas aeróbias e/ou anaeróbias.

Esse último, por sua vez, é o mais relevante para o presente trabalho e será descrito no tópico a seguir.

2.4.2 Tratamento Biológico

Os métodos de tratamento biológico usam de microrganismos, principalmente bactérias, para realizar a decomposição bioquímica de efluentes orgânicos. Nesse processo, mais microrganismos são formados e uma parte dos resíduos é convertida em dióxido de carbono, água e outros produtos finais. (KOYAMA, 1963).

Geralmente, os métodos de tratamento biológico podem ser divididos em métodos aeróbios e anaeróbios (com base na disponibilidade de oxigênio dissolvido no meio).

O objetivo do tratamento de águas residuárias é, geralmente, remover delas residuais sólidos suficientes para permitir que o restante seja descarregado para o corpo hídrico receptor sem interferir na sua qualidade. É possível, inclusive, que alguns sólidos inorgânicos sejam removidos nesse processo.

Existem vários fatores que governam essas reações bioquímicas, como temperatura, enzimas, cofatores, pH, macro e micronutrientes e oligoelementos. A determinação da utilização do substrato e dos rendimentos de biomassa, seja pelo conceito de estequiometria ou pelo uso de princípios termodinâmicos, desempenha um papel fundamental na compreensão dos fundamentos da digestão bacteriana (KOYAMA, 1963).

Pode-se dizer que, de maneira geral, tratamentos biológicos são preferíveis quando comparados com métodos químicos ou térmicos, uma vez que requerem menos energia e podem gerar subprodutos de interesse ambiental e econômico (como o biogás metano, que é um excelente gás combustível).

2.4.2.1 Digestão Aeróbia

A digestão aeróbia é um processo microbiano que ocorre com a disponibilidade de oxigênio. A matéria orgânica é oxidada em condições aeróbias, resultando na produção de produtos como nitrato, fosfato e dióxido de carbono. O crescimento

microbiano em digestores aeróbios é tipicamente alto, levando a tempos de retenção mais curtos durante a produção de biogás (JUDD, 2022).

A decomposição aeróbia é geralmente empregada como um pré-tratamento para extrair ou remover o conteúdo orgânico de efluentes de petróleo. Porém, também é aplicado em efluentes com demanda bioquímica de oxigênio (DBO) inferior a 1000 mg/L, quando a oxigenação é necessária para o tratamento. Tais opções de tratamento podem ser implementadas em temperatura ambiente (25°C a 35°C), mas o ajuste do pH é crucial para sua utilização (JUDD, 2022).

Embora o tratamento aeróbio remova os poluentes orgânicos biodegradáveis, o alto consumo de energia de aeração continua sendo uma grande desvantagem. Além disso, há possibilidade de problemas que envolvem crescimento excessivo de biomassa e volume. Por isso, a maioria dos processos de digestão empregam bactérias anaeróbias (processo de digestão anaeróbia), uma vez que este elimina o fator de oxigenação do processo.

2.4.2.2 Digestão Anaeróbia

A digestão anaeróbia é um processo pelo qual as bactérias decompõem matéria orgânica (como biossólidos de águas residuais e resíduos de alimentos) na ausência de oxigênio gerando biogás. Este é principalmente metano e dióxido de carbono, com quantidades pequenas de vapor de água e outros gases. O dióxido de carbono e outros gases podem ser removidos, deixando apenas o metano, que é o principal componente do gás natural (SEAI, 2020).

A digestão anaeróbia para a produção de biogás ocorre em um recipiente selado chamado reator, que é projetado e construído em vários formatos e tamanhos específicos para o local e as condições da matéria. Esses reatores contêm comunidades microbianas complexas que decompõem (ou digerem) os resíduos e produzem biogás que é descarregado do digestor.

Múltiplos materiais orgânicos podem ser combinados em um digestor, uma prática chamada co-digestão. Materiais co-digeridos incluem estrume, resíduos sólidos alimentares, culturas energéticas, resíduos de colheita e gorduras, óleos e graxas de caixas de gordura de restaurantes e muitas outras fontes. A co-digestão

pode aumentar a produção de biogás a partir de resíduos orgânicos de baixo rendimento ou difíceis de digerir (SEAI, 2020).

A digestão anaeróbia é considerada um método promissor para estabilizar o lodo de resíduos de esgoto, que não apenas dispensa instalações de aeração e seus custos operacionais e de capital relacionados, mas também produz metano como um recurso de energia renovável. Além disso, a digestão anaeróbia aproveita o metano, o que resulta em menor emissão de gases de efeito estufa quando o lodo digerido é usado em fazendas, florestas e aterros sanitários. Isso é de grande importância porque cerca de 40% do total de emissões de gases de efeito estufa em estações de tratamento de águas residuais é produzido a partir de seções de tratamento de lodo.

2.4.3 Biorreatores e Reações

Geralmente, o processo de digestão anaeróbia é composto por quatro fases principais, denominadas hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese (SILVA *et al*, 2020). Porém, concomitantemente ocorre uma fase chamada sulfetogênese (etapa de redução de sulfatos a sulfetos).

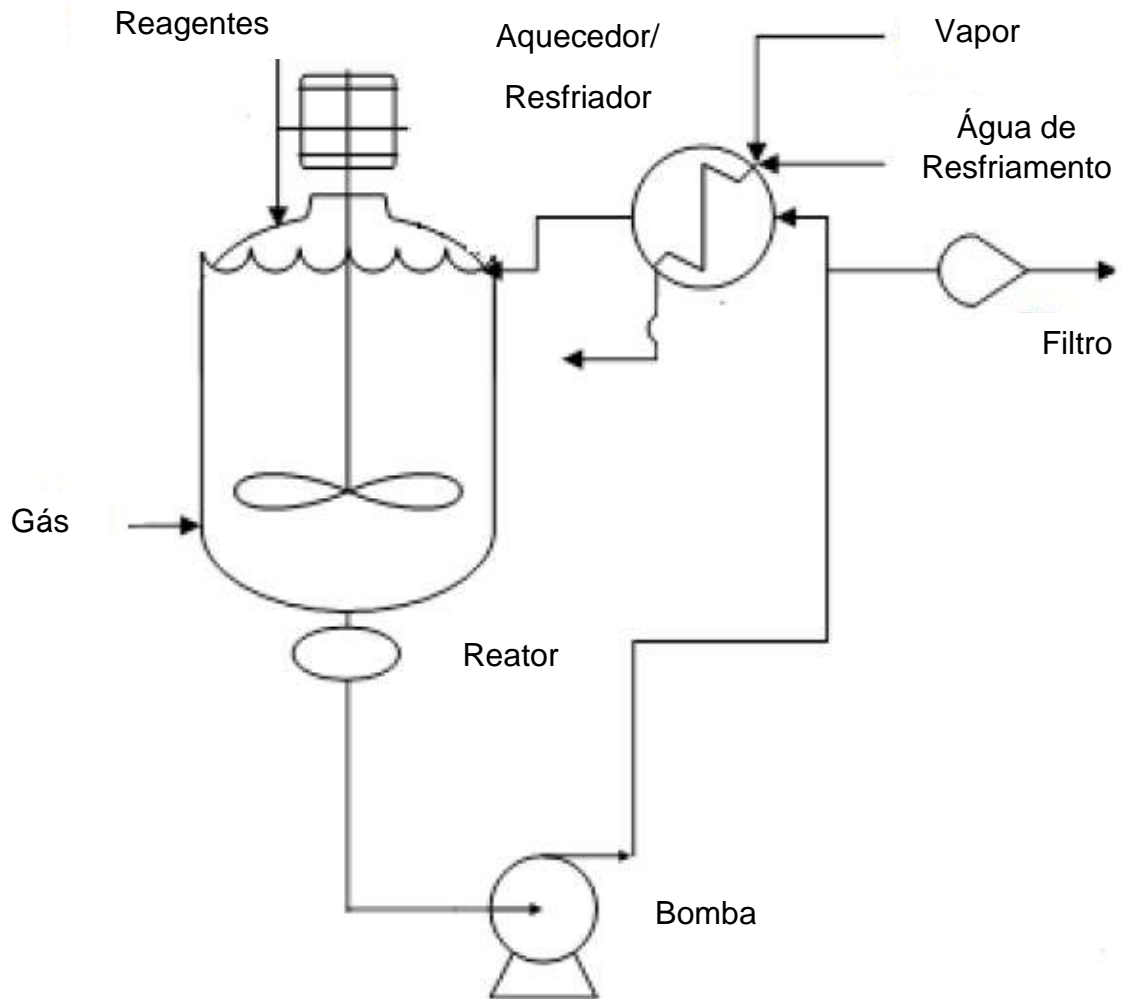
- **Hidrólise:** é a primeira fase do processo de digestão anaeróbia. Também considerada como a fase sólida, onde a matéria orgânica insolúvel é convertida em matéria orgânica solúvel. Sua ação irá facilitar a absorção do substrato pelas paredes celulares das bactérias acidogênicas;
- **Acidogênese:** os micro-organismos que atuam nesta fase consomem os produtos solúveis oriundos da fase de hidrólise. Esses materiais são metabolizados no interior das células produzindo compostos mais simples, tais como: ácidos orgânicos (acético, propiônico e butírico), álcoois (etanol), cetonas (acetona), dióxido de carbono e hidrogênio, além de novas células;
- **Acetogênese:** assim como a acidogênese é considerada uma fase líquida do processo de digestão anaeróbia. É uma fase responsável pela oxidação das substâncias geradas na fase de acidogênese produzindo ácidos orgânicos pela ação das bactérias sintróficas acetogênicas. Os produtos oriundos dessa fase são acetato, hidrogênio e dióxido de carbono;
- **Metanogênese:** última fase da biometanização da matéria orgânica, que é considerada como uma etapa gasosa do processo. Nesta etapa atuam as

arqueias metanogênicas, consumindo acetato, hidrogênio e dióxido de carbono como fonte de energia para o seu metabolismo. Como resultado metabólica as arqueias produzem gás carbônico e metano.

A digestão anaeróbia pode ser realizada em bateladas ou como um processo contínuo. Em bateladas, a biomassa é adicionada ao reator no início do processo e o reator é selado. Em sua forma mais simples, o processamento em bateladas precisa de inoculação com material já processado para iniciar a digestão anaeróbia. Normalmente, a produção de biogás será realizada com um padrão de distribuição normal ao longo do tempo (RICHARDS *et al*, 1991). Os operadores podem usar esse fato para determinar quando acreditam que o processo de digestão da matéria orgânica foi concluído.

Pode haver problemas graves de odor se um reator operado em batelada for aberto e esvaziado antes que o processo esteja bem concluído. Um tipo mais avançado de processo em batelada limita os problemas de odor ao integrar a digestão anaeróbia com a compostagem em vasos (RICHARDS *et al*, 1991). Nesta abordagem, a inoculação ocorre através do uso de percolado desgaseificado. Após a conclusão da digestão anaeróbia, a biomassa é mantida no reator, que é então usado para compostagem no recipiente antes de ser aberto (Figura 8). O uso de mais de um reator em batelada em uma usina pode garantir a produção constante de biogás.

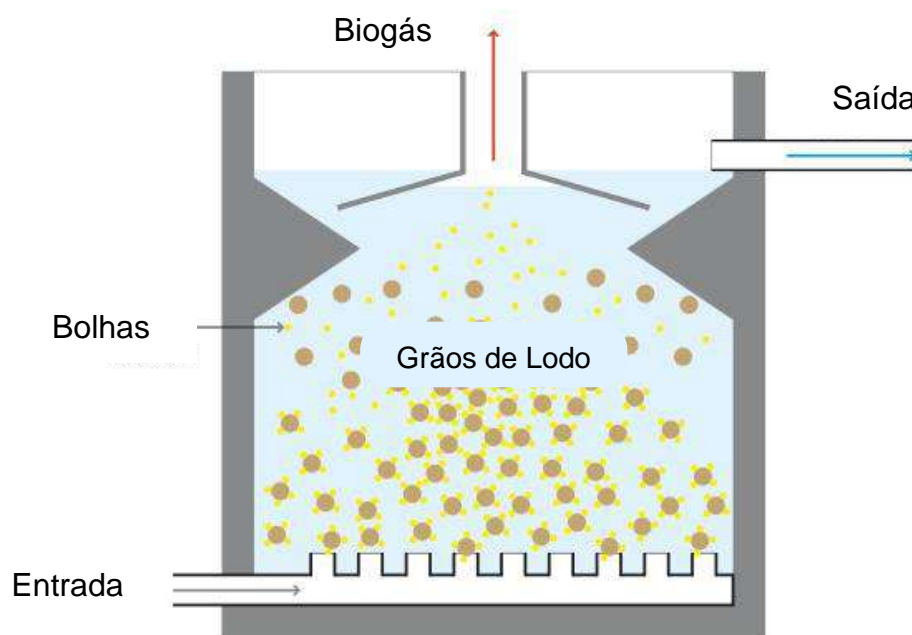
Figura 8 – Esquema de um reator em batelada



Fonte: ALVES, 2012.

Nos processos de digestão contínua, a matéria orgânica é constantemente adicionada ao reator. Aqui, os produtos são removidos constantemente ou periodicamente, resultando em produção constante de biogás. Um único ou múltiplos digestores em sequência podem ser usados. Exemplos desta forma de digestão anaeróbia incluem reatores contínuos de tanque agitado (CSTR), mantas de lodo anaeróbio de fluxo ascendente (UASB – Figura 9), leitos de lodo granular expandido e reatores de circulação interna.

Figura 9 – Esquema de um reator UASB



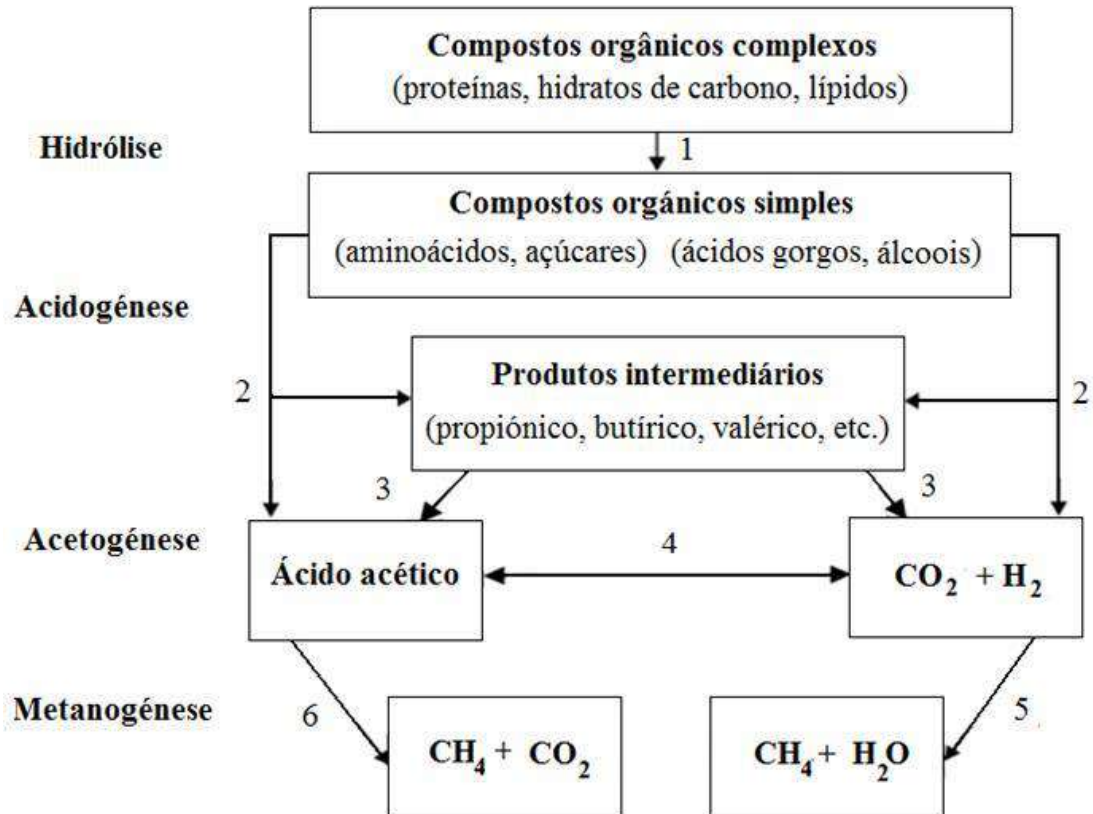
Fonte: CHIU, 2019.

Sistemas de digestão podem ser configurados com diferentes níveis de complexidade. Em um sistema de digestão de estágio único todas as reações biológicas ocorrem dentro de um único reator selado ou tanque de retenção. O uso de um único estágio reduz os custos de construção, mas resulta em menor controle das reações que ocorrem no sistema. Bactérias acidogênicas, através da produção de ácidos carboxílicos, reduzem o pH do tanque em uma reação a ser melhor detalhada neste tópico. As arqueias metanogênicas operam em uma faixa de pH estritamente definida. Portanto, as reações biológicas das diferentes espécies em um reator de estágio único podem estar em competição direta entre si. Outro sistema de reação de um estágio é uma lagoa anaeróbia. Essas lagoas são bacias de terra semelhantes a lagoas usadas para o tratamento e armazenamento de longo prazo de adubos. Aqui as reações anaeróbias estão contidas no lodo anaeróbio natural.

Em um sistema de digestão de dois ou mais estágios, diferentes vasos de digestão são otimizados para trazer o máximo controle sobre as comunidades bacterianas que vivem dentro dos digestores. Vale ressaltar que bactérias acidogênicas crescem e se reproduzem mais rapidamente do que as arqueias metanogênicas e estas requerem pH e temperatura estáveis para otimizar seu desempenho (RICHARDS *et al*, 1991).

A Figura 10 ilustra o mecanismo simplificado da digestão anaeróbia:

Figura 10 – Processo simplificado de digestão anaeróbia



Fonte: ABAD, 2023.

Conforme é esperado, a etapa de acidogênese reduz o pH do meio e, normalmente, reduz a eficiência do processo de digestão. Em casos extremos, a acidificação em um reator pode chegar a níveis em que o processo é interrompido após a morte das colônias (RICHARDS *et al*, 1991). Por isso, é de suma importância que um biorreator seja sempre controlado para garantir que opere com a máxima eficiência possível.

Um estudo, publicado em 2019 por Chiu *et al*, investigou o uso de um biorreator UASB de escala laboratorial para a digestão anaeróbia de resíduos alimentares com a adição de co-substratos (óleo de soja e glicerol). Descobriu-se que a adição de co-substratos aumentou a produção de biogás e metano em relação ao tratamento controle, mas a concentração de ácidos graxos voláteis (AGVs) também aumentou. No entanto, o uso de co-substratos pode ajudar a melhorar a eficiência da digestão anaeróbia de resíduos alimentares em biorreatores UASB.

No entanto, um estudo realizado por Møller e colaboradores (2019) destacou a importância de escolher cuidadosamente o tipo de resíduos alimentares a serem tratados por digestão anaeróbia. Eles mostraram que resíduos alimentares com alta concentração de proteína podem levar à formação de compostos tóxicos durante a digestão anaeróbia, que podem prejudicar a qualidade do biogás produzido.

Finalmente, é importante considerar o impacto ambiental da digestão anaeróbia de resíduos alimentares. Essa reação pode reduzir significativamente as emissões de gases de efeito estufa em comparação com a disposição de resíduos alimentares em aterros sanitários. Porém, destaca-se a importância de considerar cuidadosamente o ciclo de vida completo do sistema de digestão anaeróbia, incluindo a energia necessária para manter o sistema em funcionamento (WANG *et al*, 2017).

3 OBJETIVOS

O objetivo do presente trabalho foi construir um sistema de controle capaz de medir e atuar sobre variações de pH e quantificar o volume da produção de biogás em um reator anaeróbio operado em batelada. Especificamente, esses objetivos consistem em:

- Construir um sistema de controle eletrônico em Arduino;
- Programar a placa e integrar os módulos;
- Instalar o sistema em um reator;
- Produzir um manual operacional para os usuários.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

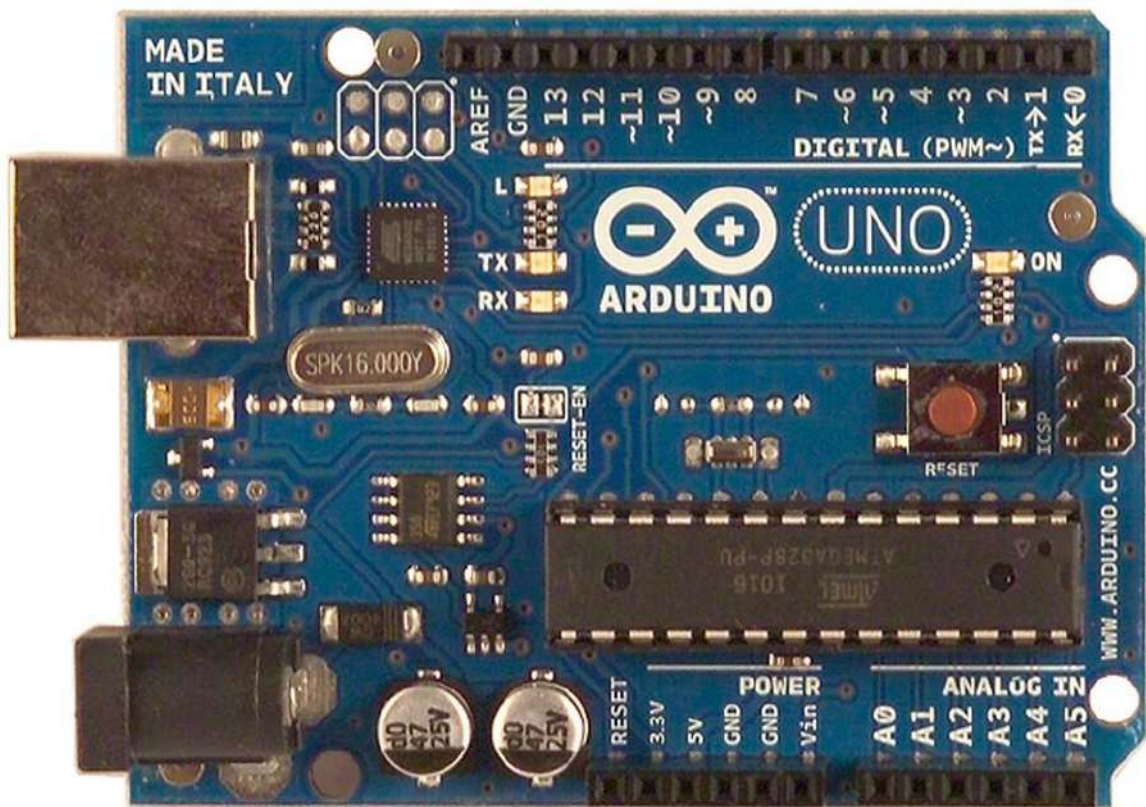
4.1 MATERIAIS

4.1.1 Placa Arduino

Arduino é uma plataforma de prototipagem eletrônica de código aberto baseada em um microcontrolador. A placa Arduino é composta por um microcontrolador, uma série de pinos de entrada e saída (E/S), conectores de alimentação e comunicação, e

um ambiente de desenvolvimento integrado (IDE) para escrever e enviar código para a placa (Figura 11). Ao conectar sensores, atuadores e outros dispositivos à placa Arduino por meio de seus pinos E/S, é possível programar a placa para executar uma ampla variedade de tarefas, como medir temperatura, controlar motores, enviar dados pela internet e muito mais. A simplicidade e flexibilidade da placa Arduino a tornam uma escolha popular para projetos de eletrônica, automação residencial, robótica e outras aplicações de prototipagem eletrônica (ARDUINO, 2023).

Figura 11 – Placa Arduino



Fonte: TechTudo, 2023.

4.1.2 Módulo Sensor de pH para Arduino

Um módulo de sensor pH para Arduino (Figura 12) é um dispositivo eletrônico que permite medir o nível de acidez ou alcalinidade de uma solução líquida, com base na concentração de íons de hidrogênio presentes nessa solução. O módulo consiste

em um sensor de pH (geralmente um eletrodo de vidro) que é conectado a uma placa Arduino por meio de um circuito amplificador de sinal.

Ao conectar o módulo de sensor pH à placa Arduino e programá-la com um código adequado, é possível ler os valores de pH da solução líquida em tempo real e tomar decisões com base nesses valores, como ajustar a dosagem de ácido ou base para manter o pH em um determinado nível. O uso de módulos de sensor pH para Arduino é comum em projetos de controle de qualidade de água, monitoramento de culturas hidropônicas e outras aplicações que exigem medição precisa do pH (MARTINS, 2017).

Figura 12 – Módulo Sensor de pH para Arduino



Fonte: UsinaInfo, 2023.

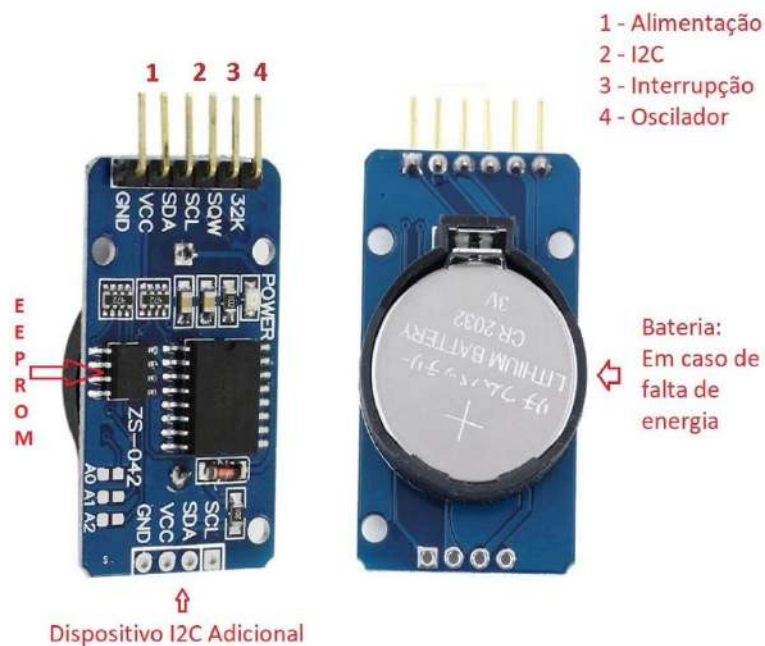
4.1.3 Módulo de Relógio em Tempo Real (RTC) para Arduino

Módulos RTC (*Real Time Clock*) para Arduino são dispositivos que permitem que o microcontrolador mantenha a hora atual mesmo quando não há alimentação elétrica disponível. Eles são constituídos por um relógio de tempo real, que é alimentado por uma bateria de backup, além de um circuito integrado que se comunica com o microcontrolador por meio de um protocolo de comunicação (Figura 13). Dessa forma, um módulo RTC é capaz de fornecer ao microcontrolador informações precisas

sobre a data e a hora atual, permitindo que ele execute tarefas em momentos específicos do dia ou da semana.

Para utilizar um módulo RTC com Arduino, é necessário realizar a conexão do dispositivo com o microcontrolador e utilizar uma biblioteca específica para o gerenciamento do relógio de tempo real (Oliveira, 2018).

Figura 13 – Módulo RTC para Arduino



Fonte: CINTRA, 2023.

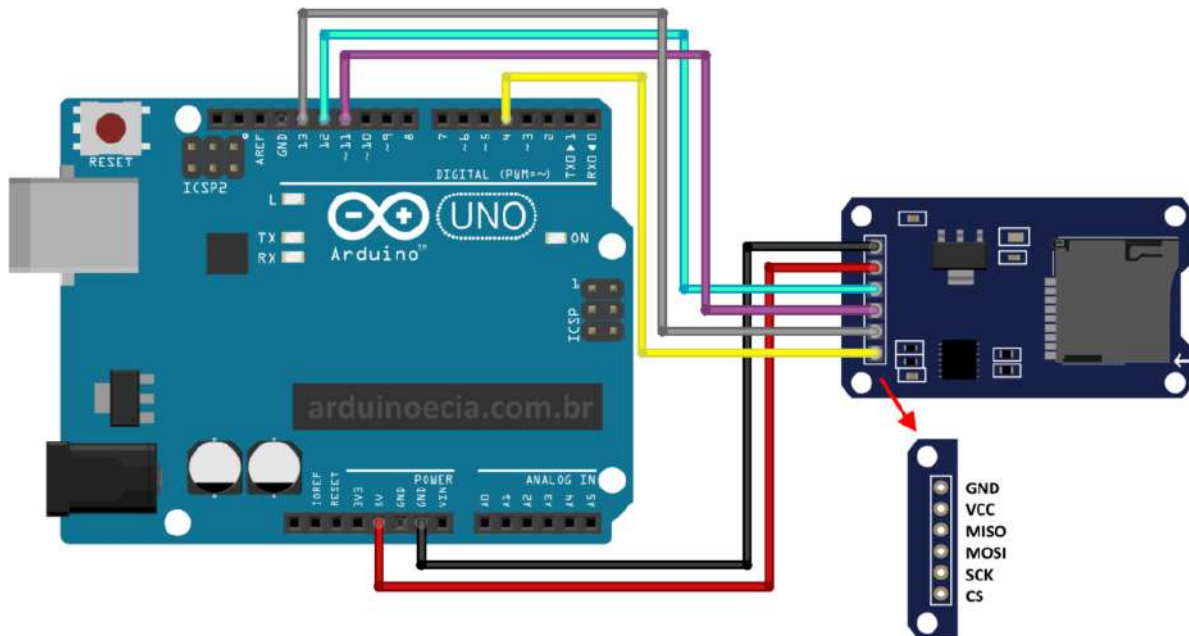
4.1.4 Módulo Cartão SD para Arduino

Um módulo de cartão SD para Arduino (Figura 14) é um dispositivo que permite a comunicação entre o microcontrolador e um cartão de memória SD (Secure Digital). Ele é geralmente utilizado para armazenar dados, como arquivos de áudio, vídeo ou dados de sensores, de forma que possam ser facilmente acessados e utilizados pelo microcontrolador (BARRAGAN *et al*, 2023a).

O módulo de cartão SD é constituído por um slot para o cartão, um circuito integrado que se comunica com o microcontrolador por meio de um protocolo de comunicação (como SPI), além de um conjunto de pinos que permitem a conexão com o microcontrolador. Para utilizar um módulo de cartão SD com Arduino, é necessário

realizar a conexão do dispositivo com o microcontrolador e utilizar uma biblioteca específica para o gerenciamento do cartão de memória.

Figura 14 – Módulo SD para Arduino



Fonte: BARRAGAN, 2023a.

4.1.5 Módulo Relé para Arduino

Um módulo de relé para Arduino (Figura 15) é um dispositivo que permite ao microcontrolador controlar cargas de alta potência (como motores, lâmpadas e outros dispositivos elétricos) por meio de sinais digitais de baixa potência.

O módulo de relé é composto por um circuito eletrônico que, ao receber um sinal de controle do microcontrolador, fecha ou abre um circuito elétrico que está conectado a um dispositivo externo (BARRAGAN *et al*, 2023b).

Isso permite que o microcontrolador controle a ativação ou desativação desses dispositivos de alta potência, sem que seja necessário um circuito complexo de potência. O módulo de relé para Arduino pode ser utilizado em diversas aplicações, como automação residencial e industrial, controle de robôs, entre outros.

Figura 15 – Módulo Relé para Arduino



Fonte: BARRAGAN, 2023b.

4.1.6 Bomba Dosadora Peristáltica

Uma bomba dosadora peristáltica (Figura 16) é um dispositivo utilizado para medir e controlar a quantidade de líquido que é bombeada por meio de um sistema peristáltico. Esse tipo de bomba utiliza um rolo rotativo que pressiona um tubo flexível, criando uma onda peristáltica que empurra o líquido através do tubo. O fluxo de líquido é determinado pelo diâmetro do tubo e pela velocidade do rolo rotativo.

Embora não seja necessariamente projetada para operar em Arduinos, é possível conectar a bomba à uma placa (com auxílio de um módulo Relé) para controlar a velocidade do rolo rotativo, permitindo que o fluxo de líquido seja medido e ajustado conforme necessário (PEREIRA & SOARES, 2019). Isso torna a bomba dosadora peristáltica muito útil em aplicações de dosagem precisas controladas por Arduino, como em processos de tratamento de água.

Figura 16 – Bomba Dosadora Peristáltica



Fonte: ElectroGates, 2023.

4.1.7 Emissores e Receptores de Infravermelho

Emissores e receptores de infravermelho (Figura 17) são dispositivos utilizados para comunicação sem fio entre dispositivos eletrônicos. Os emissores de infravermelho emitem sinais de luz invisíveis ao olho humano, que são detectados pelos receptores. Quando um sinal é emitido pelo emissor, o receptor captura o sinal e o decodifica, permitindo que os dispositivos se comuniquem (KLEIN; RODRIGUES; OLIVEIRA, 2016).

Na plataforma Arduino, esses dispositivos são comumente usados em projetos que envolvem controle remoto, sensores de proximidade e sistemas de segurança. A comunicação é feita por meio do protocolo de comunicação infravermelho, que é relativamente simples e fácil de implementar em projetos de eletrônica.

Figura 17 – Conjunto Emissor e Receptor Infravermelho



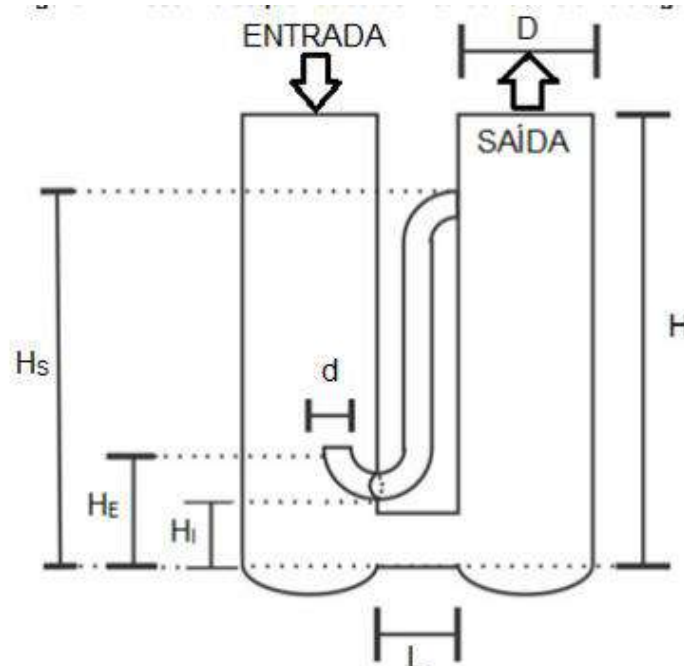
Fonte: TechSul, 2023.

4.1.8 Tubo em U adaptado para Medição de Vazão

Um tubo em U adaptado para medição de vazão (Figura 18) consiste em um tubo em U comum com um escape em altura pré-calculada (*by-pass*) que permite o refluxo de fluidos após uma certa quantidade de gás em pressão ocupar a entrada do tubo (NETO *et al*, 2014).

Ele é especialmente útil para medições de vazão e volume quando acoplado com sensores (como infravermelho) capazes de detectar quando um ciclo de fluidos acontece (NETO *et al*, 2014). Evidentemente, esse processo requer uma calibração precisa dos sensores e do aparelho.

Figura 18 – Esquema de um tubo em U adaptado para medição de vazão



H=altura, D=diâmetro, H_s =altura superior do sifão, L=espaçamento entre os tubos, H_e = altura na entrada do sifão, d=diâmetro do sifão, H_i =altura inferior do sifão

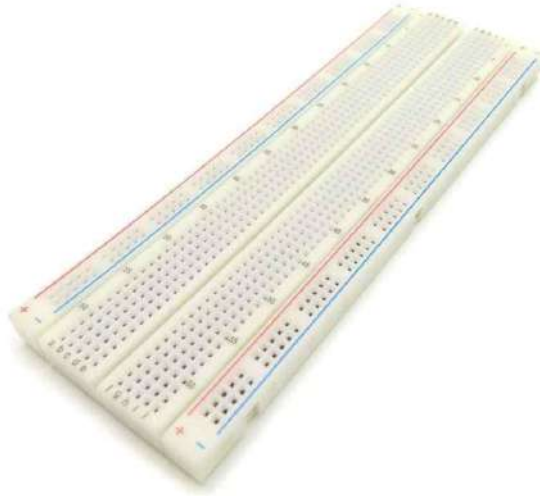
Fonte: NETO *et al*, 2014.

4.1.9 Board Eletrônico (Placa de Circuito Impresso)

Um *board* eletrônico para Arduino (também chamado de *Protoboard* – Figura 19) é uma placa de circuito impresso que permite a montagem e teste de circuitos eletrônicos de forma rápida e fácil. Ele possui uma matriz de furos e trilhas condutoras que permitem a inserção de componentes eletrônicos e a conexão entre eles (HUGHES & DE LA CRUZ, 2015).

Para utilizá-lo com um Arduino, basta conectar os pinos de entrada e saída do board nos pontos corretos da *protoboard* e inserir os componentes necessários. Isso facilita o processo de prototipagem de projetos eletrônicos, permitindo que o usuário teste e ajuste o circuito antes de montá-lo em uma placa de circuito impresso definitiva (quando necessário).

Figura 19 – *Protoboard*



Fonte: Tecnotronics, 2023.

4.1.10 Materiais Auxiliares e Ferramentas

De maneira geral, para projetos eletrônicos e eletromecânicos, materiais auxiliares consistem em fios, cabos, isolantes, conectores, caixas, resistores e outros componentes menores que permitem a interligação de um ou mais módulos.

Ferramentas envolvem chaves (como chaves de fenda e phillips), tesouras, régua, estiletes, entre outros.

Essencialmente, esse tópico apenas menciona tudo aquilo que é complementar para a construção do projeto.

4.2 MÉTODOS

4.2.1 Visão Geral

Tendo em vista todos os equipamentos e módulos apresentados na introdução e no tópico 3.1, apresenta-se a metodologia de trabalho adotada pelo autor:

- **Planejamento:** nesta fase, o autor definiu o objetivo do projeto, fez uma pesquisa sobre o que será necessário para alcançá-lo e esquematizou o circuito (mais informações no tópico 3.2.2). O foco desta etapa é definir os recursos essenciais do Arduino e selecionar os componentes adequados;
- **Prototipagem:** Nesta fase, o autor construiu um protótipo do circuito utilizando uma protoboard, que permitiu testar e ajustar o funcionamento do circuito. O código do programa foi desenvolvido utilizando uma interface de programação integrada (IDE) disponibilizada pela Arduino (mais detalhes no manual de operação do sistema criado – Anexo D);
- **Testes e ajustes:** Com o protótipo feito, foram feitos testes e ajustes necessários, como alterações no código e ajustes na disposição dos componentes;
- **Implementação:** Com o projeto criado, o sistema foi instalado no laboratório onde será utilizado e a equipe de pesquisadores treinada para a melhor operação dele.

Vale ressaltar que, ao longo de todo o processo, foi importante registrar todas as etapas, como a elaboração do circuito, o código fonte do programa e as alterações realizadas. Isso facilitou a manutenção e melhoria do projeto e pode ser útil para o desenvolvimento de novos projetos.

4.2.2 Integração de módulos

Para facilitar a compreensão do processo criativo por trás do sistema de controle, é importante destacar como todos os diferentes módulos são integrados para executar as tarefas definidas nos objetivos do projeto.

Para o controle de pH, o sensor foi conectado diretamente ao Arduino que, ao interpretar os valores medidos, envia um sinal à bomba dosadora peristáltica para dosar uma certa quantidade de solução alcalina para neutralizar o meio (a bomba em questão está conectada ao circuito por meio do Relé, uma vez que esta requer maiores diferenças de potencial para operar do que o Arduino é capaz de fornecer).

Para a medição de Volume de biogás produzido, o tubo em U foi adaptado à saída do biorreator para coletar todo gás e registrar o número de ciclos com auxílio dos emissores e receptores de infravermelho. Esse módulo, em específico, requer muita precisão na calibragem para evitar falsos sinais.

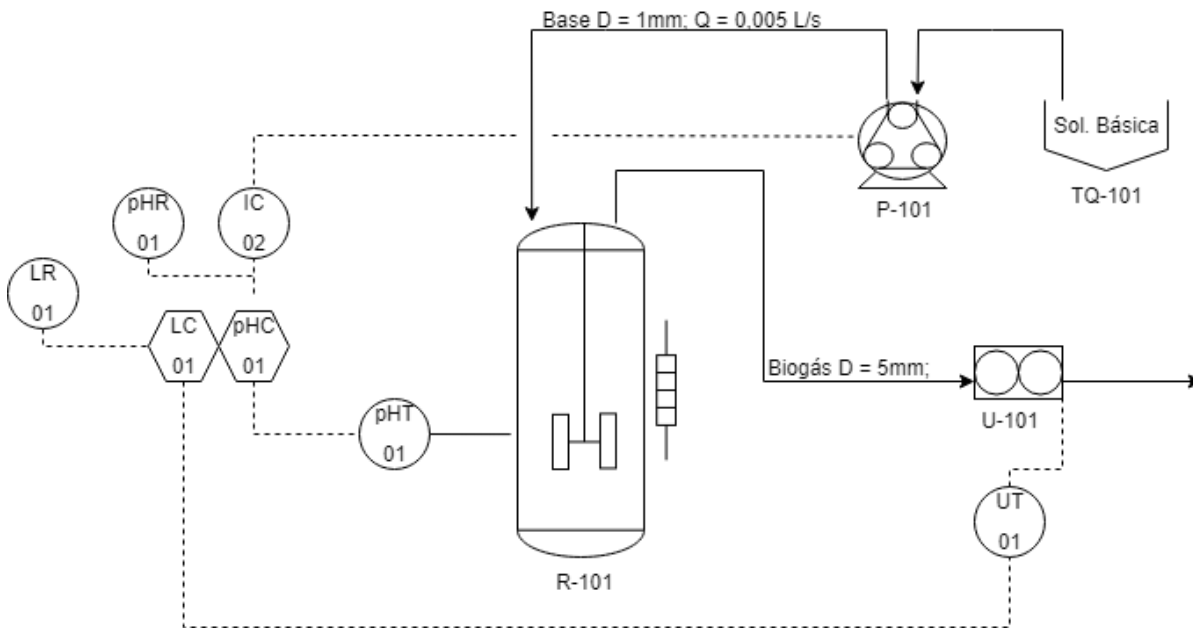
Para a geração de dados do ensaio, o módulo RTC fornece o horário em que um evento ocorre (correção de pH ou registro de vazão do tubo em U) e o envia para uma memória externa contida no módulo de cartão SD.

Evidentemente, todos os circuitos foram conectados entre si por meio de fios ligados ao *Protoboard* e funcionam em sincronismo de acordo com o código fonte que foi produzido (mais informações no tópico 4).

5 RESULTADOS E ANÁLISES

Ao analisar os objetivos do projeto, foi elaborado o primeiro diagrama de controle de processo (P&ID) conforme mostrado na Figura 20. Nele, é possível observar os elementos cruciais do processo, como o reator principal (R-101), o tanque de armazenagem de base (TQ-101), a bomba peristáltica (P-101) e o tubo em U medidor de volume (U-101). Linhas cheias correspondem à linhas de fluxo de matéria, enquanto linhas tracejadas representam sinais elétricos (analógicos, digitais ou correntes).

Figura 12 – P&ID do reator a ser controlado

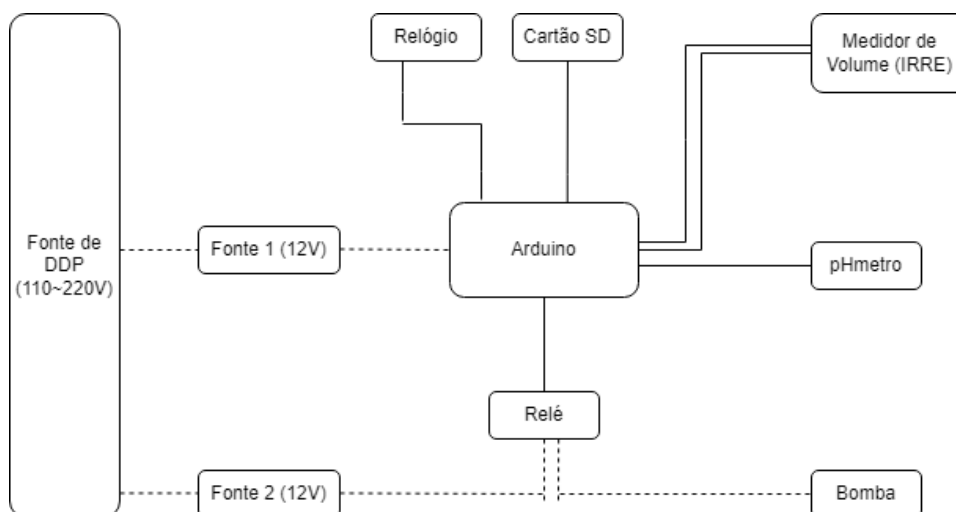


Fonte: Autor, 2023.

Os elementos de controle envolvem transmissores de informação (T), unidades de controle (C) e registradores de dados (R). Pela simbologia, círculos vazios são instrumentos localizados em campo (próximos ao equipamento) e hexágonos controladores que utilizam de processamento computacional.

A partir do P&ID elaborado, foi esquematizado os componentes essenciais do circuito controlador ilustrado na Figura 21:

Figura 21 – Esquema do controlador Arduino



Fonte: Autor, 2023.

Nesse esquema, linhas tracejadas representam corrente elétrica pura, enquanto linhas cheias representam correntes de informação (analógica ou digital) e de alimentação.

A integração de todos os componentes citados (contemplados no Tópico 3.1) foi finalizada em bancada e, em seguida, foram criados os códigos que ditam as lógicas de calibração e funcionamento do sistema. Os códigos podem ser explorados nos Anexos A (código principal), B (calibração do pHmetro) e C (calibração do conjunto emissor e receptor de infravermelho e do tubo em U).

Posteriormente, o sistema foi instalado no reator, localizado na cidade de Rio Claro no Instituto de Pesquisa em Bioenergia (IPBEN) da UNESP. A Figura 22 mostra o sistema instalado:

Figura 22 – Reator e sistema de controle instalado



A bomba, localizada logo acima do reator, tem a função de succionar uma solução básica do reservatório e despejar no tanque para o controle de pH que é medido pelo pHmetro acoplado na lateral do equipamento e processado na placa Arduino dentro da caixa do sistema (cor branca).

O tubo em U está localizado no interior da caixa preta e está conectado com o reator por meio de uma mangueira de silicone de 5 mm de diâmetro. O motivo de isolar o tubo com uma caixa fechada é evitar que o sinal do infravermelho seja afetado pela luz do exterior (luzes do laboratório ou raios solares). É possível ver como foi feita a montagem do tubo em U pela Figura 23:

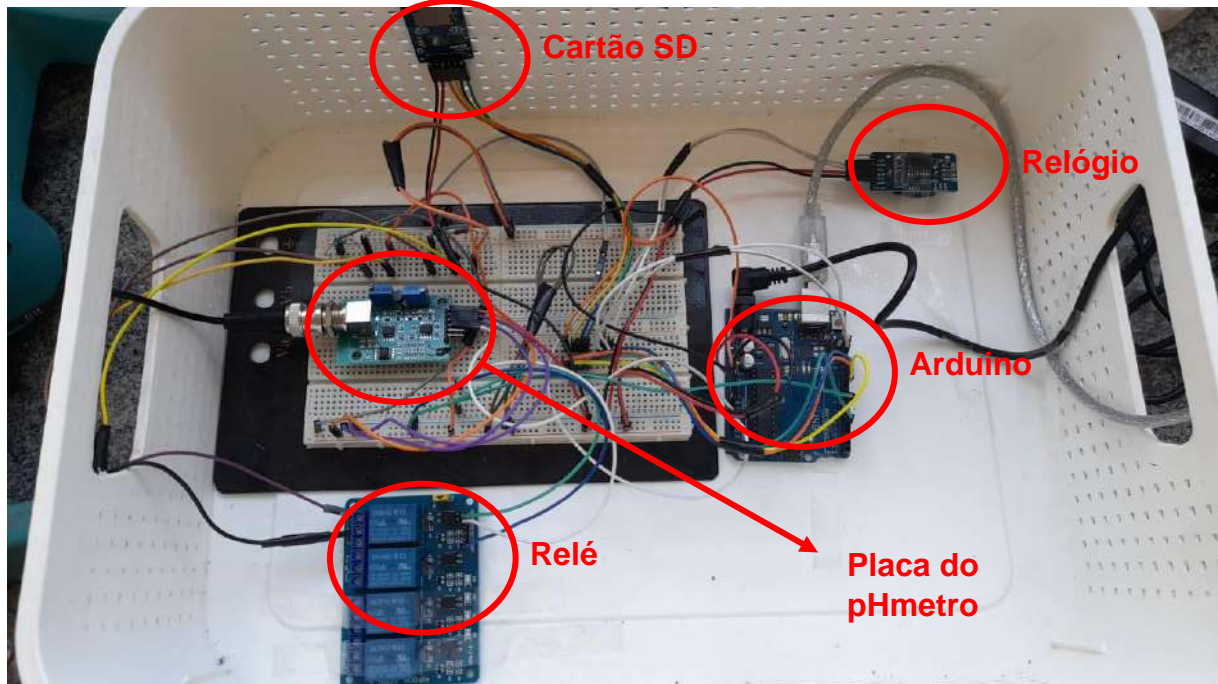
Figura 23 – Tubo em U instalado no Sistema



Fonte: Autor, 2023.

Por final, a unidade de controle e registro de dados foi toda organizada no interior da caixa branca. Seus detalhes estão destacados na Figura 24:

Figura 24 – Disposição dos módulos do sistema instalado



Fonte: Autor, 2023.

Uma vez que o sistema foi instalado, foram realizados todos os procedimentos de calibração e inicialização do sistema para verificação de sua funcionalidade. Os testes foram feitos em ensaios de bancada e a funcionalidade do conjunto foi atestada.

Na data de escrita do presente trabalho o reator ainda não foi operado em ensaios reais e, portanto, nenhum registro do funcionamento do sistema foi gerado. Por isso, como parte do cumprimento dos objetivos, foi elaborado um manual operacional do sistema (localizado no Anexo D) que foi entregue à equipe do laboratório.

6 PERSPECTIVAS DE MELHORIA

Conforme mencionado por vezes neste trabalho, projetos em Arduino são muito flexíveis e quase sempre possuem oportunidades de melhoria e revisão, bem como de expansão de operação.

Tendo em vista tudo o que foi discutido até aqui, o autor sugere que, caso algum outro pesquisador interessado deseje continuar o trabalho aprimorando o sistema, o foco seja direcionado à:

- Integrar novos módulos a fim de unificar o controle de temperatura, pressão e nível no mesmo sistema;
- Explorar novas formas de gerar o arquivo de resultados para melhor atender as necessidades dos usuários;
- Rever a lógica de funcionamento dos módulos para buscar otimizar ainda mais a alocação de memória da placa, aumentando a velocidade de operação e interpretação do sistema como um todo.

7 CONCLUSÃO

Tendo em vista o escopo do projeto desenvolvido como Trabalho de Conclusão de Curso, é possível concluir que sua execução obteve sucesso.

A etapa de preparação permitiu ao autor compreender melhor como integrar um projeto de programação, automação e eletrônica com um reator biológico, além de enriquecer seu conhecimento sobre os temas.

O planejamento foi suficiente para a melhor escolha dos métodos de integração de sistemas, escolha de componentes essenciais e sua disposição após a instalação final.

Durante a execução, todo o controlador foi montado e programado em laboratório e posteriormente instalado no Instituto de Pesquisa em Bioenergia da UNESP Rio Claro (SP). Por questões de tempo, o reator não foi operado em um ensaio real, porém foi testado em bancada e seu funcionamento estava adequado. Além disso, o manual de operação foi elaborado e entregue à equipe do laboratório.

Por fim, todos os objetivos propostos foram concluídos e o sistema abre margem para melhorias e ajustes por outros alunos e pesquisadores interessados caso surjam mais necessidades ou oportunidades.

REFERÊNCIAS

ABNT 03.004. **NBR 8190**. Simbologia de Instrumentação. out, 1983.

ALVES, M.; et al. Anaerobic digestion of food waste: a review focusing on process stability. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 7, p. 452-466, set. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.01.045>.

ARDUINO. **Documentação Arduino**. Disponível em: <https://docs.arduino.cc/>. Acesso em: 04, Abr. 2023.

BARRAGAN, D. et al. SD Card. In: ARDUINO. **Arduino Reference**. Disponível em: <https://www.arduino.cc/reference/en/language/functions/communication/sd-card/>. Acesso em: 05 abr. 2023.

BARRAGAN, D. et al. Relay. In: ARDUINO. **Arduino Reference**. Disponível em: <https://www.arduino.cc/reference/en/language/functions/digital-io/digitalwrite/>. Acesso em: 05 abr. 2023.

BELLMAN, R. **Adaptive Control Processes: A Guided Tour**. Princeton University Press. ISBN- 978-1400874668. Princeton. p. 36. dez. 2015.

BENNETT, S. **A History of Control Engineering**. Institution of Electrical Engineers. London: Peter Peregrinus Ltd. p. 67-83. ISBN 978-0-86341-280-6. 1993.

CHIU, Y.; LI, J.; CHEN, C. Anaerobic digestion of food waste with co-substrates in a laboratory-scale UASB reactor. **Bioresource Technology**, 275, 2019. p. 258-264.

CORRIOU, J. **Process Control: Theory and Applications**. Springer. 2 ed. p. 28-57. 2018.

COSTA, L.; CAULLIRAUX, H. **Manufatura integrada por computador: sistemas integrados de produção: estratégia, organização, tecnologia e recursos humanos**. Rio de Janeiro: Campus, 1995.

EPA. Waste classification guidelines. **New South Wales Environment Protection Authority**. 2023. Disponível em: <<https://www.epa.nsw.gov.au/your-environment/waste-e/classifying-waste/waste-classification-guidelines>>. Acesso em: 08, mar. 2023.

GUERRA, W. **Implementação de Controle Proporcional, Integral e Derivativo Digital em Controladores Lógico Programáveis**. Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2009.

GUERRERO L.; MAAS G.; HOGGLAND W. Solid waste management challenges for cities in developing countries. **Waste Management**. v.33. p. 220–232. 2013.

HUGHES, M.; DE LA CRUZ, J. *Protoboards: What Are They and How to Use Them for Your Electronics Projects?* **CA: O'Reilly Media**, 2015. p. 80-83.

JUDD, S. **Sludge Treatment – an Overview of Aerobic Digestion**. 2022. Disponível em: <<https://www.sludgeprocessing.com/aerobic-digestion/aerobic-digestion/>>. Acesso em: 12, mar. 2023.

KLEIN, J.; RODRIGUES, A.; OLIVEIRA, A. Utilização de emissores e receptores de infravermelho para comunicação entre dispositivos em projetos Arduino. Belo Horizonte: **Sociedade Brasileira de Computação**, 2016. p. 207-212.

KOYAMA, T. Gaseous metabolism in lake sediments and paddy soils and the production of atmospheric methane and hydrogen. **Journal of Geophysical Research**. 1963.

MAHLER C.; MENDEZ G. Waste management systems in Brazilian cities under the National Solid Waste Policy. **Waste Management**. 2018.

MARQUES, R. **Instrumentação Industrial: Documentação e Assuntos Relacionados**. 2017. Disponível em <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/3926031/mod_resource/content/1/02a%20%20Documentac%CC%A7a%CC%83o%2C%20etc%20-%20V2017a.pdf>. Acesso em: 15, fev. 2023.

MARTINS, R. *et al.* Aplicação de um sensor de pH arduino no estudo de reações ácido-base. **Química Nova na Escola**, v. 39, p. 91-97, 2017.

MØLLER, H. *et al.* Protein-rich anaerobic co-digestion of manure and food waste: Methane potential and inhibition effects. **Bioresource Technology**, 282, 2019. p. 169-178.

NETO, J. *et al.* Quantificação de biogás em reatores anaeróbios através do método de deslocamento de volume de água. **Revista de estudos ambientais**. v.16, n. 1, 2014. p. 45-53.

OLIVEIRA, F. **Real Time Clock (RTC) com Arduino**. Curitiba: Novatec Editora, 2018. p. 57-71.

PEREIRA, M.; SOARES, C. Bomba dosadora peristáltica controlada por Arduino. **Anais eletrônicos**. São Paulo: Instituto Federal de São Paulo, 2019.

RICHARDS, B. *et al.* Methods for kinetic analysis of methane fermentation in high solids biomass digesters. **Biomass and Bioenergy**. v. 1. DOI:10.1016/0961-9534(91)90028-B. hdl:1813/60787. 1991.

ROTONDO, M.; COIMBRA, D. Quantificação e o Novo Sistema Internacional de Unidades: pensando algumas faces da poluição. **Universidade Federal de Uberlândia**. 2015. Disponível em: <<http://educapes.capes.gov.br/handle/capes/599058>>. Acesso em 10, fev. 2023.

SEAI. Anaerobic Digestion for On-farm Uses – Overview. **Sustainable Energy Authority of Ireland**. Jun, 2020.

SILVA, A. *et al.* Fatores que influenciam a produção de ácidos carboxílicos a partir de resíduos agroindustriais. **Scielo**. DOI: 10.1590/S1413-4152202020190174. Out. 2020.

SIMROCK, S. **Control Theory**. Harmburg. Germany. 2019 DOI:10.1142/9789811206979_0004. Disponível em <<https://www.semanticscholar.org/paper/Control-theory-Simrock/1ae4b4ce4679e6eae03901e0689389208c05f2d7>>. Acesso em 16, fev. 2023.

NISE, N. **Control Systems Engineering**. John Wiley and Sons, Inc. 4 ed. Chichester. 2004.

VANÝSEK, P. The Glass pH Electrode. Interface. **The Electrochemical Society**. p. 29-20. 2004.

VOLLMAN, T.; BERRY, W.; WHYBARK, D. **Manufacturing Planning & Control Systems**. McGrawHill, 1997.

WANG, L.; ZHAO, Y.; ZHAO, J. Anaerobic digestion of food waste using a UASB pilot-scale reactor: Performance and microbial community structure analysis. **Waste Management**, 68, 2017. p. 617-624.

XU, M.; DAVID, J.; KIM, S. The Fourth Industrial Revolution: Opportunities and Challenges. **International Journal of Financial Research**. doi:10.5430/ijfr.v9n2p90. v. 9, n. 2, 6, mar. 2018.

YOUNG, W *et al.* **"A Brief History of Control and Simulation". A Real Time Approach to Process Control**. John Wiley & Sons Inc. 3 ed. ISBN 978-1119993872. United Kingdom. p. 26-43. 2014.

ANEXO A – CÓDIGO PRINCIPAL DE FUNCIONAMENTO DO CONTROLE pH,V

```

//
*****
// pH AND VOLUME AUTOMATIC MANAGEMENT IN BIOREACTOR
// Vitor Hugo Rangel Lazaroti (181141451) - EQ
// São Paulo State University "Júlio de Mesquita Filho" -
UNESP
// Araraquara - SP - 2023
//
*****

// 1.0 LIBRARIES AND VARIABLES
*****

// Libs
#include <Wire.h>
#include <RTClib.h>
#include <SPI.h>
#include <SD.h>

// Definitions

// RTC
RTC_DS3231 rtc;
int YMDtohour;

// SD Card
File output;

// Variables

float ReactorVolume = -- // Litros
float ControllerSolutionpH = --

```

```

float PumpFlow = 0.005 // Litros s-1
float PumpTime = 1000*(ReactorVolume*(pow(10,-6) -
pow(10,-7))*pow(10,-ControllerSolutionpH)/(PumpFlow*pow(10,-
14)))

// pH Probe **CALIBRATION**
float calibrationpH[2] = {--,--};
float calibrationVol[2] = {--,--};
float slope = (calibrationpH[1]-
calibrationpH[0])/(calibrationVol[1]-calibrationVol[0]);
float calibration = calibrationpH[1]-
slope*calibrationVol[1];

// pH Probe Variables
const int analogInPin = A0;
int sensorValue = 0;
float pHMean;

// IRSignal Volume Controller **CALIBRATION**
int IRCount = 0;
float IRRest = --, IRWater = --, IRAccuracy = 0.2,
CicleVolume = --, TotalVolume = 0;
float IRMean;

// 2.0 SETUP MAIN
*****
void setup() {

    // Serial Communication
    Serial.begin(9600);
    while(! Serial){
        ;
    }
}

```

```
// RTC
if(! rtc.begin()) {
  Serial.println("Error! RTC Not Found");
  while(1);
}
if(rtc.lostPower()) {
  Serial.println("RTC Found");
  rtc.adjust(DateTime(0, 0, 0, 0, 0, 0)); // yy/mm/dd
hour:min:sec
}
rtc.adjust(DateTime(0, 0, 0, 0, 0, 0));
delay(100);

// SD Card
if (! SD.begin(4)) {
  Serial.println("Error! SD Not Found");
  while(1);
}
output = SD.open("output.txt", FILE_WRITE);
output.println("Iniciando Experimento");

// IRSignal Volume Controller
pinMode(A1, INPUT);

// Bomba
pinMode(8,OUTPUT);

output.Close()
}

// 3.0 POST SETUP() FUNCTIONS
*****
```

```

// Total Elapsed Time(RTC)
String ElapsedTime(){
    String timeline;
    DateTime now = rtc.now();
    YMDtohour = ((now.year()-2000)*365 +
now.month()*30)+now.day()*24;
    timeline = String(YMDtohour + now.hour()) + ":" +
String(now.minute()) + ":" + String(now.second());
    return timeline;
}

```

```

// Data Mean Calculator (General)
float DataMean(int number, uint8_t Pin){
    float dataset[number], temp, mean = 0;
    for (int i=0; i<number; i++){
        dataset[i]=analogRead(Pin);
        delay(20);
    }
    for (int i=0; i<number-1; i++){
        for(int j=i+1;j<number;j++){
            if (dataset[i]>dataset[j]){
                temp = dataset[i];
                dataset[i] = dataset[j];
                dataset[j] = temp;
            }
        }
    }
    for (int i=2; i<number-2; i++)
mean += dataset[i]/(number-4);
    return mean;
}

```

```

// 4.0 LOOP MAIN

```

```

*****

```

```

void loop() {
    DateTime now = rtc.now();

    output = SD.open("output.txt", FILE_WRITE);

    // pH Probe Data Collector
    if (now.second()%30 == 0) {
        pHMean = DataMean(12, analogInPin);
        // pH Probe Data Analyser
        float pHVol=(float)pHMean*5.0/1024;
        float pHValue = slope*pHVol+calibration;
        Serial.println("pH = " + String(pHValue) + ", t = " +
ElapsedTime());
        if (pHValue < 6.5){
            Serial.println("**Ativar bomba**");
            digitalWrite(8,LOW);
            delay(PumpTime);
            digitalWrite(8,HIGH);
            output.println("pH Controlado em " + ElapsedTime());
        }
    }

    // IRSignal Volume Controller Pulse Detector
    IRMean = DataMean(20, A1);
    //Serial.println(IRMean);

    if (IRCount == 0){
        if (IRMean > (1-IRAccuracy)*IRWater && IRMean <
(1+IRAccuracy)*IRWater){
            IRCount = 1;
            delay(3000);
        }
    }
    else{

```

```
        if (IRMean > (1-IRAccuracy)*IRRest && IRMean <
(1+IRAccuracy)*IRRest){
            IRCCount = 0;
            TotalVolume += CicleVolume;
            Serial.println("Pulso detectado, complementando
ciclo e registrando volume...");
            output.println("Atualização de volume: " +
String(TotalVolume) + " mL em t = " + ElapsedTime());
            delay(5000);
        }
    }

    output.Close()

    // Iteration Delay (ms)
    delay(1000);
}
```

ANEXO B – CÓDIGO DE CALIBRAÇÃO DO CONTROLE DE pH

```
void setup() {
  Serial.begin(9600);
}

float DataMean(int number, uint8_t Pin){
  float dataset[number], temp, mean = 0;
  for (int i=0; i<number; i++){
    dataset[i]=analogRead(Pin);
    delay(20);
  }
  for (int i=0; i<number-1; i++){
    for(int j=i+1;j<number;j++){
      if (dataset[i]>dataset[j]){
        temp = dataset[i];
        dataset[i] = dataset[j];
        dataset[j] = temp;
      }
    }
  }
  for (int i=2; i<number-2; i++)
    mean += dataset[i]/(number-4);
  return mean;
}

void loop() {
  int value = DataMean(10, A0);
  float volt = value*(5.0/1023.0);
  Serial.println(volt);
  delay(250);
}
```

ANEXO C – CÓDIGO DE CALIBRAÇÃO DO SISTEMA DE VOLUME

```

int IRCOUNT = 0;
float IRRest = --, IRWater = --, IRAccuracy = 0.2,
CicleVolume = --, TotalVolume = 0;
float IRMean;

void setup(){
  Serial.begin(9600);
  pinMode(A1, INPUT);
}

float DataMean(int number, uint8_t Pin){
  float dataset[number], temp, mean = 0;
  for (int i=0; i<number; i++){
    dataset[i]=analogRead(Pin);
    delay(20);
  }
  for (int i=0; i<number-1; i++){
    for(int j=i+1;j<number;j++){
      if (dataset[i]>dataset[j]){
        temp = dataset[i];
        dataset[i] = dataset[j];
        dataset[j] = temp;
      }
    }
  }
  for (int i=2; i<number-2; i++)
    mean += dataset[i]/(number-4);
  return mean;
}

void loop(){

```

```
IRMean = DataMean(20, A1);
Serial.println(IRMean);

if (IRCount == 0){
    if (IRMean > (1-IRAccuracy)*IRWater && IRMean <
(1+IRAccuracy)*IRWater){
        IRCount = 1;
        delay(3000);
    }
}
else{
    if (IRMean > (1-IRAccuracy)*IRRest && IRMean <
(1+IRAccuracy)*IRRest){
        IRCount = 0;
        TotalVolume += CicleVolume;
        Serial.println("Pulso detectado, complementando
ciclo e registrando volume...");
        delay(5000);
    }
}

delay(500);
}
```

ANEXO D – MANUAL OPERACIONAL KIT pH,V



**Manual Operacional
Kit de Controle pH, V**

Vitor Hugo Rangel Lazaroti

R.A.: 181141451

2023

Manual de Operação - Kit Controle pH,V para Biodigestor

Vitor Hugo Rangel Lazaroti

Contato: (19) 99688 3852 - vhlazarotti@gmail.com

1. Introdução	3
1.1. Arduino e Arduino IDE	3
1.1.1. Conectando o Arduino a um Computador	3
1.1.2. Instalando a IDE	4
2. Bibliotecas	5
2. Calibração	7
2.1. Sensor de pH	7
2.2. Medidor de Volume	9
2.2.1. Volume de Ciclo	9
2.2.3. Casal E/R de Infravermelho	11
3. Iniciando o Sistema	13
4. Coleta de Dados	14
5. Cuidados Essenciais e Falhas	15

O objetivo deste manual é entregar, de maneira objetiva, um passo a passo sobre como integrar o sistema de controle pH,V com seu computador e iniciar ensaios controlados. Os conteúdos contemplados envolvem: como conectar seu computador com o sistema, como calibrar equipamentos, iniciar ensaios, coletar dados, quais cuidados tomar durante experimentos e como identificar problemas.

Qualquer dúvida ou informação adicional, consultar projetista.

De maneira geral, o sistema foi pensado para ser o mais simples possível para o operador e os procedimentos aqui descritos cobrem o essencial. Entretanto, recomendo ao usuário se aventurar pelo mundo da prototipagem e programação para poder fazer suas próprias adaptações e ajustes se julgar necessário. Este é um trabalho de código aberto desenvolvido para a Universidade Estadual Paulista (UNESP) e sempre há espaço para melhorias!

1. Introdução

1.1. Arduino e Arduino IDE

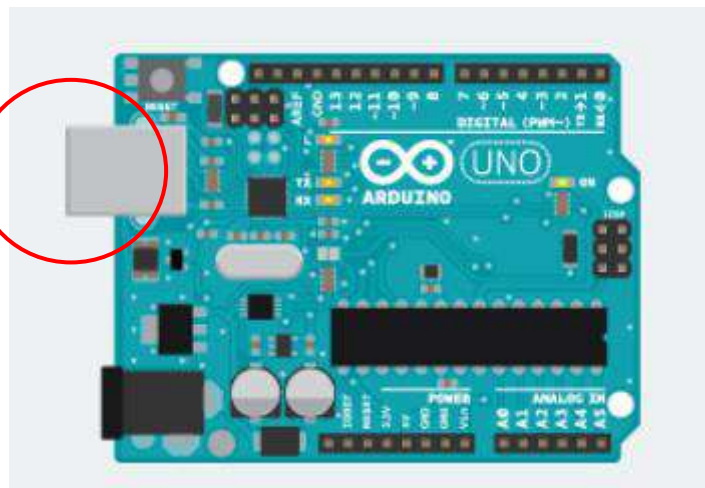
A lógica por trás do controlador pH,V é feita por uma placa de prototipagem de código aberto denominada Arduino. Por objetividade, o manual cobrirá somente os aspectos fundamentais da plataforma para o controle. Entretanto, interessados podem obter informações e tutoriais completos no site oficial do desenvolvedor: <https://www.arduino.cc/>.

É altamente recomendável que o operador se familiarize com o Arduino e seus conceitos básicos (e intrínsecos) de eletrônica e programação antes de realizar os procedimentos de ambientação, calibração e extração de dados aqui descritos.

Isso posto, o primeiro passo consiste em preparar o ambiente para a interface homem-máquina. Essa etapa é fundamental, uma vez que para a funcionalidade completa do sistema, tanto o Arduino quanto o computador de operação devem estar em sintonia e conter todas as ferramentas necessárias para o trabalho.

1.1.1. Conectando o Arduino a um Computador

Figura 1: Placa base Arduino



Fonte: www.arduino.cc

No desenho do Arduino acima, a região destacada é a porta de conexão com fonte externa de alimentação e rede de comunicação. Em outras palavras, é a entrada que permite manter todo o seu sistema eletrônico ligado e, ao mesmo tempo, estabelecer comunicação com a placa.

Para ligar o Arduino a um computador utilizando essa entrada, basta utilizar o cabo de comunicação disponível com o Kit:

Figura 2: Cabo de conexão Arduino-USB



À esquerda, o conector USB deverá ser conectado no computador. À direita, o conector de alimentação/comunicação que deve ser conectado ao Arduino.

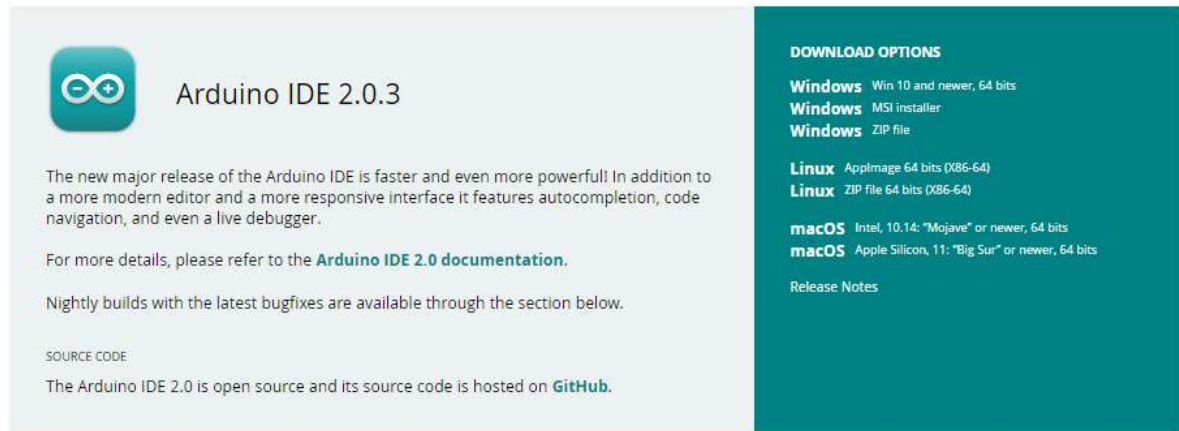
1.1.2. Instalando a IDE


Para se comunicar com a placa, é necessário instalar um ambiente de desenvolvimento integrado (IDE, do inglês *Integrated Development Environment*) específico desenvolvido pela companhia responsável pelo projeto do arduino (Adafruit). O procedimento é relativamente simples, havendo um passo a passo claro no site do desenvolvedor. Entretanto, por praticidade:

- Confira qual a versão do sistema operacional está instalada na máquina (Windows 7, 8, 10, 11, Linux, Mac, etc);
- Vá até o Site <https://www.arduino.cc/en/software>

Figura 3: Página de download da Arduino IDE

Downloads



 **Arduino IDE 2.0.3**

The new major release of the Arduino IDE is faster and even more powerful! In addition to a more modern editor and a more responsive interface it features autocompletion, code navigation, and even a live debugger.

For more details, please refer to the [Arduino IDE 2.0 documentation](#).

Nightly builds with the latest bugfixes are available through the section below.

SOURCE CODE

The Arduino IDE 2.0 is open source and its source code is hosted on [GitHub](#).

DOWNLOAD OPTIONS

Windows Win 10 and newer, 64 bits
Windows MSI installer
Windows ZIP file

Linux AptImage 64 bits (X86-64)
Linux ZIP file 64 bits (X86-64)

macOS Intel, 10.14: "Mojave" or newer, 64 bits
macOS Apple Silicon, 11: "Big Sur" or newer, 64 bits

[Release Notes](#)

- Na página inicial, o setor de download da versão mais recente da plataforma deve aparecer de imediato. Basta selecionar uma das opções à direita (evidentemente de acordo com o sistema operacional do computador) e seguir a instalação com o instalador baixado. **Não há necessidade de se preocupar com vírus ou instalações paralelas indesejadas.**

Uma vez que a IDE for instalada, o ambiente estará pronto para as primeiras configurações e instalações de ferramentas necessárias para a operação do pH,V. **É recomendado que o operador se familiarize com a IDE e com sua lógica básica de programação antes dos próximos passos.**

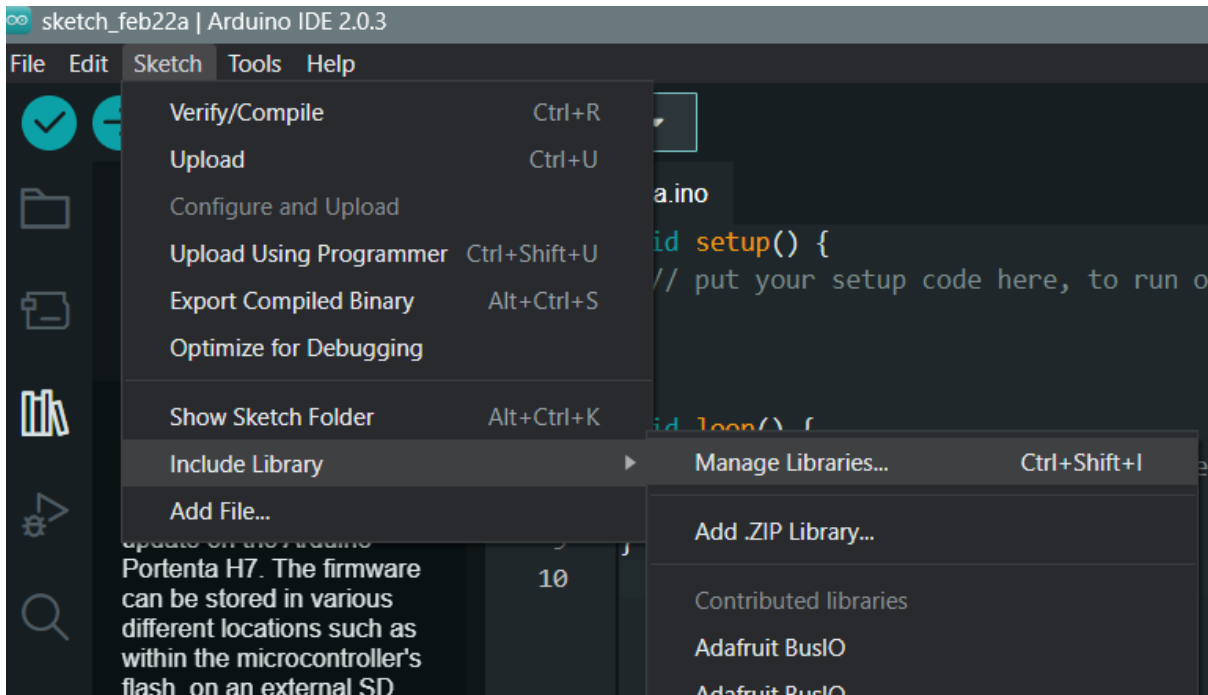
2. Bibliotecas

Em toda linguagem de programação, bibliotecas são pacotes de funções úteis para diversos projetos que economizam tempo (e esforço) no cumprimento de tarefas. Eventualmente, um programador precisa criar bibliotecas próprias, entretanto em grande parte das vezes elas já existem pré-instaladas nas IDEs ou são disponibilizadas gratuitamente (ou não) por outros programadores ou companhias para serem instaladas e utilizadas.

Embora a IDE do Arduino contenha uma grande quantidade de bibliotecas pré-instaladas, para esse projeto será necessário instalar mais duas: **RTClib.h** e **SD.h**. O procedimento é dado abaixo:

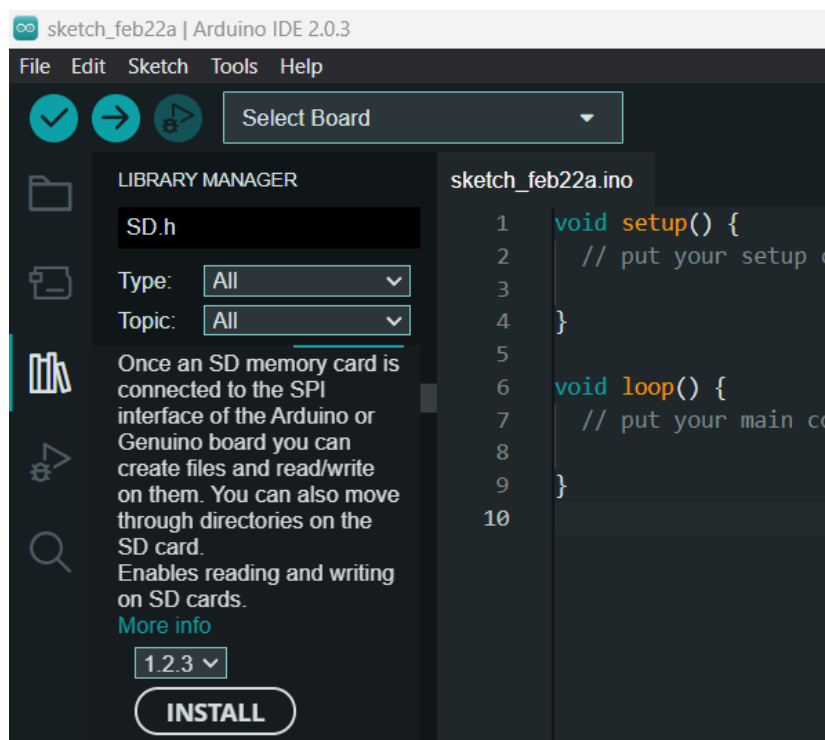
Com a IDE aberta, Selecione Sketch > Include Library > Manage Libraries...

Figura 4: Aba de inclusão de bibliotecas Arduino IDE



Isso abrirá o gerenciador de bibliotecas da IDE. Basta digitar o nome da biblioteca desejada e selecionar Install para instalar a versão mais atual.

Figura 5: Instalador de bibliotecas Arduino IDE



2. Calibração

Antes de submeter o sistema de controle a qualquer teste de longa duração, é de suma importância garantir que todos os componentes estejam devidamente calibrados **e que todas as conexões estejam devidamente vedadas**. Felizmente, a maioria dos módulos contidos no pH,V não precisam ser calibrados pelo operador. Entretanto, duas funcionalidades precisam: O sensor de pH e os sensores do medidor de volume.

Em conjunto com o sistema, o pacote do operador contém três códigos em arquivos de texto. São eles: **main.txt**, **offset.txt** e **IRRE.txt**. Todos eles são necessários para as calibrações.

Antes de qualquer calibração, desligue todas as fontes de energia do sistema!

2.1. Sensor de pH

Figura 6: Sensor de pH



Abra o arquivo **offset.txt**, copie o código completo para a sua IDE e faça o Upload para o Arduino. Observe que o console na tela do computador começará a mostrar os valores da tensão que o sensor está medindo em tempo real (com alguns filtros).

Em seguida, remova o sensor de pH do reator e limpe a ponta do eletrodo muito bem com água destilada. Seque o eletrodo com cuidado utilizando toalhas de papel.

Para realizar a calibragem desse sensor, é necessário utilizar duas soluções padrões de pH próximo da faixa de trabalho almejada. O procedimento então segue:

- Com o sensor limpo, mergulhe-o na solução padrão mais ácida, agite-o levemente e deixe ambientar entre 3 e 5 minutos até a estabilização dos valores de tensão mostrados no console. Anote o valor da tensão e o pH da solução padrão;
- Limpe muito bem o sensor novamente com água destilada e realize a secagem com toalhas de papel;
- Repita o primeiro procedimento para a segunda solução padrão.
- Abra o arquivo **main.txt** (sem enviar para a IDE) e vá até a linha das variáveis de calibração do sensor: 1.0 LIBRARIES AND VARIABLES > Variables > pH Probe ****CALIBRATION**** > calibrationpH / calibrationVol;

Figura 7: Código de calibração de pH

```
// 1.0 LIBRARIES AND VARIABLES *****
// Libs
#include <Wire.h>
#include <RTClib.h>
#include <SPI.h>
#include <SD.h>

// Definitions

// RTC
RTC_DS3231 rtc;
int YMDtohour;

// SD Card
File output;

// Variables
// pH Probe **CALIBRATION**
float calibrationpH[2] = {4,7};
float calibrationVol[2] = {4.4,4};
float slope = (calibrationpH[1] - calibrationpH[0]) / (calibrationVol[1] - calibrationVol[0]);
float calibration = calibrationpH[1] - slope * calibrationVol[1];

// pH Probe Variables
```

- Na linha calibrationpH, insira em sequência (e separado por vírgulas), os pHs das soluções padrões utilizadas;
- Na linha calibrationVol, insira em sequência (e separado por vírgulas), as tensões anotadas para cada ensaio;
- Assim, encerra-se o processo de calibragem do sensor de pH.

Importante

1. Sempre calibre o sensor de pH antes de um ensaio;
2. Um sensor de pH precisa de tempo antes de estabilizar em um meio. Não anote valores pouco tempo após o inserir nas soluções e, caso o mesmo não estabilize em cinco minutos, considere aguardar mais um pouco;

3. Procure sempre calibrar o sensor em uma temperatura próxima da de trabalho;
4. Faça sempre uma boa limpeza entre intervalos de calibragem e NÃO contamine suas soluções padronizadas;
5. Sensores de pH são equipamentos sensíveis e qualquer erro durante a calibragem pode comprometer sua eficácia e, até mesmo, seu funcionamento.

Como identificar problemas no sensor

Todo instrumento de controle possui vida útil e pode se degradar com o tempo caso não seja utilizado com frequência. Para identificar se há algum problema com o sensor, verifique os seguintes sintomas:

1. O sensor não estabiliza a tensão de saída dentro de uma solução (considere um tempo de residência de pelo menos 10 minutos para essa conclusão);
2. O sensor apresenta valores diferentes de tensão para a mesma solução após ser removido do meio, limpo e retornado para o mesmo meio (comprometimento do eletrodo);
3. A calibragem não fornece confiabilidade após ser testada em uma terceira solução padronizada (SEMPRE garanta que os padrões estão adequados antes de avaliar essa possibilidade).

2.2. Medidor de Volume

Calibrar o medidor de volume consiste em duas etapas: o volume de um ciclo de líquido no tubo em U e o casal emissor/receptor de infravermelho.

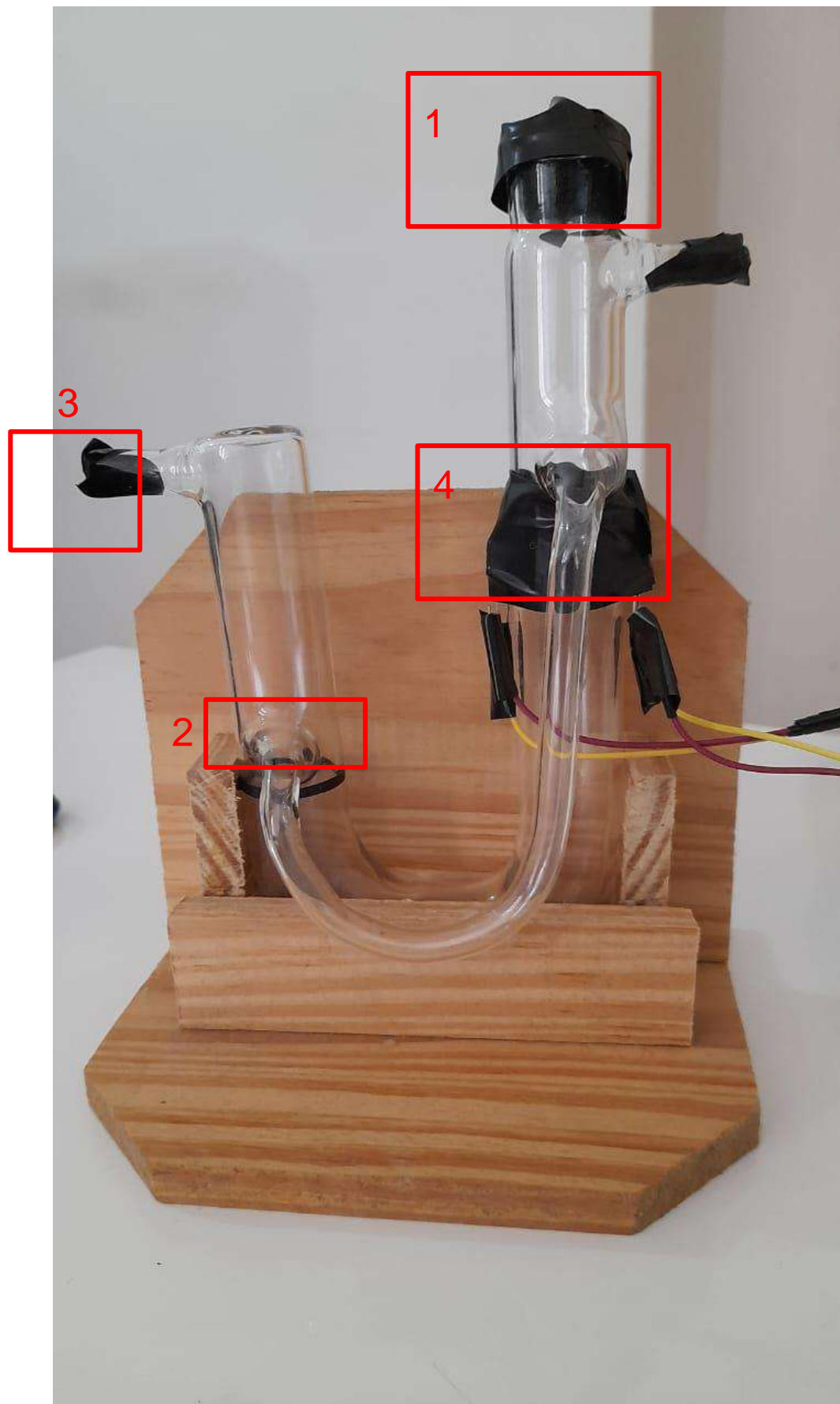
2.2.1. Volume de Ciclo

O Volume de Ciclo é a variável responsável por auxiliar o sistema a contabilizar quanto biogás foi produzido em um ensaio.

A forma como o tubo em U foi construído não permite leitura contínua de produção, apenas registrar em degraus a cada n ciclos que a água completa no tubo. Por isso, calibrar o Volume de Ciclo é fundamental para exatidão das medições.

Comece copiando o código disponível em **IRRE.txt** para sua IDE e fazendo Upload para o Arduino. Depois, coloque água no tubo de acordo com as instruções a seguir:

Figura 8: Medidor de vazão Tubo em U



- Remova a vedação em 1;
- Insira água vagarosamente até o nível ultrapassar a entrada do tubo auxiliar em 2;
- Incline levemente o tubo em várias direções para verificar se não há vazamentos ou escapes;
- Retorne a vedação em 1.

Para calibrar:

- Remova o tubo conectado em 3 e insira uma seringa graduada de 50 mL totalmente preenchida com ar nesse ponto. É conveniente utilizar mangueiras de silicone em conjunto com a seringa para garantir vedação;
- Lentamente pressione o êmbolo até que a água no interior do tubo faça um pulso, liberando o ar pelo escape e retornando pelo tubo auxiliar. Registre a diferença de volumes (inicial - final) da seringa;
- Repita o procedimento em triplicata. O Volume de Ciclo será a média entre os três volumes registrados. Anote esse valor.

É sempre recomendado realizar a calibração do casal emissor/receptor em conjunto com o Volume de Ciclo, uma vez que utilizam da mesma configuração para tal. Portanto, não faça nenhuma alteração no código nesse momento e prossiga para o próximo passo.

2.2.3. Casal E/R de Infravermelho

Para detectar um ciclo, o sistema utiliza a identificação da variação da intensidade de infravermelho detectado por um receptor de infravermelho pelo tubo. Para isso, é necessário calibrar os sinais para o estágio de repouso (quando não há água entre o emissor e o receptor) e para o estágio de pulso (passagem de água pelo receptor). O procedimento é relativamente simples:

- Garanta que o sistema está na mesma configuração necessária para calibração do Volume de Ciclo (seringa posicionada na entrada de gás e água no volume de água adequado);
- Observe que o console registra em tempo real a intensidade do sinal detectado no receptor;

- Para o estágio em repouso, garanta que não há água entre o casal E/R (região 4 da figura). Isso pode ser facilmente garantido após um pulso.
- Feche o sistema na caixa para garantir que nenhuma luz externa chegará ao receptor;
- Aguarde cerca de 30 segundos para a estabilização do sinal e anote o valor indicado no console;
- Remova a caixa de proteção do sistema e o coloque no estágio de pulso. Isso pode ser atingido ao apertar o êmbolo da seringa delicadamente até que a água cubra o intervalo entre o casal E/R e fique na iminência de completar um ciclo;
- Feche mais uma vez o sistema com a caixa, aguarde 30 segundos e anote o valor indicado no console após a estabilização.

Para finalizar o processo, abra arquivo **main.txt** (sem enviar para a IDE) e vá até a linha das variáveis de calibração do sistema de volume: 1.0 LIBRARIES AND VARIABLES > Variables > IRSignal Volume Controller ****CALIBRATION**** > IRRest / IRWater / CicleVolume

Figura 9: Código de calibração do medidor de vazão

```
// 1.0 LIBRARIES AND VARIABLES *****
// Libs
#include <Wire.h>
#include <RTClib.h>
#include <SPI.h>
#include <SD.h>

// Definitions
// RTC
RTC_DS3231 rtc;
int YMDtohour;

// SD Card
File output;

// Variables
float ReactorVolume = 30
float ControllerSolutionpH = 9

// pH Probe **CALIBRATION**
float calibrationpH[2] = {4,7};
float calibrationVol[2] = {4.4,4};
float slope = (calibrationpH[1]-calibrationpH[0])/(calibrationVol[1]-calibrationVol[0]);
float calibration = calibrationpH[1]-slope*calibrationVol[1];

// pH Probe Variables
const int analogInPin = A0;
int sensorValue = 0;
float pHMean;

// IRSignal Volume Controller **CALIBRATION**
int IRCount = 0;
float IRRest = 78, IRWater = 70, IRAccuracy = 0.05, CicleVolume = 20, TotalVolume = 0;
float IRMean;
```

- Na variável IRRest, insira o valor do sinal para o Estado em Repouso;
- Na variável IRWater, insira o valor do sinal para o Estado de Pulso;

- Na variável CycleVolume, insira o valor do sinal para o Volume de Ciclo;
- Assim, encerra-se o processo de calibragem do sistema de Volume.

Importante

1. Sempre calibre o sistema de volume antes de um ensaio;
2. É possível testar manualmente a eficácia da calibragem com o código contido em **IRRE.txt**. Para isso, faça o upload do código para o Arduino e mantenha a mesma configuração do sistema utilizado para a calibragem. Substitua as variáveis pós calibração no código (de maneira idêntica ao feito no código **main.txt**) e refaça o upload para o Arduino. Com isso, basta induzir ciclos no tubo em U com auxílio da seringa e verifique se o console acusa a detecção de ciclos;
3. A variável IRAccuracy indica a tolerância do sinal para a detecção de um pulso. Não é recomendado alterar esse valor, a menos que o fluido no interior do tubo seja diferente da água;
4. Garanta que a caixa de isolamento luminoso sempre esteja sem violações que permitam a passagem de luz, pois isso pode causar descalibragem em poucas horas.

Como identificar se há problemas com o casal E/R

1. Se o sinal do receptor não se estabilizar após 30 segundos em algum estado, o mesmo está desgastado e deve ser substituído. A não substituição deste componente nesse caso compromete a eficácia do sistema de volume;
2. Quando o sistema estiver com isolamento luminoso pela caixa, se o receptor registrar o mesmo sinal nos dois estados, é sinal que o emissor não está funcionando adequadamente e deve ser substituído;

3. Iniciando o Sistema

Uma vez que a Arduino IDE estiver devidamente instalada (assim como suas bibliotecas) e todas as calibrações estiverem feitas e ajustadas em **main.txt**. Prossiga para inicializar seu ensaio e, posteriormente, o sistema.

Os passos são:

- Reconecte a mangueira de gás na entrada do sistema de volume;
- Reposicione o sensor de pH em sua entrada no Reator;

- Reabasteça o reservatório da bomba de solução Alcalina.
- Antes de ligar o sistema, meça (se não for um padrão) e anote o valor do pH da solução básica contida no reservatório da bomba e, também, o volume da solução de trabalho do ensaio no interior do reator.
- Abra o arquivo **main.txt** e ajuste as seguintes variáveis:

Figura 10: Código de calibração do sistema

```
// 1.0 LIBRARIES AND VARIABLES *****  
  
// Libs  
#include <Wire.h>  
#include <RTClib.h>  
#include <SPI.h>  
#include <SD.h>  
  
// Definitions  
  
// RTC  
RTC_DS3231 rtc;  
int YMDtohour;  
  
// SD Card  
File output;  
  
// Variables  
float ReactorVolume = 30  
float ControllerSolutionpH = 9
```

Em que ReactorVolume é o volume útil do reator em litros e ControllerSolutionpH é o pH da solução alcalina de controle.

Vale ressaltar que o sistema é feito para neutralizar o pH de ensaios que tendem à acidez do meio. Para qualquer alteração de escopo consulte o projetista.

Copie o código contido em **main.txt** para a IDE e faça o upload para o Arduino e ligue novamente todas as fontes de energia quando o ensaio estiver pronto para começar.

4. Coleta de Dados

Para coletar todos os dados registrados pelo sistema após o final de um ensaio, desligue as fontes de energia e remova o cartão SD do módulo gravador.

A leitura desse cartão SD pode ser feita de inúmeras maneiras, sendo a mais recomendada utilizando um adaptador e conectando em um computador. Lembre-se de limpar o cartão SD e reconectá-lo no sistema antes do próximo ensaio.

Figura 11: Módulo Arduino de Cartão SD



5. Cuidados Essenciais e Falhas

- Para evitar falhas ou situações indesejadas, sempre verifique se todas as calibrações estão adequadas e se o sistema ligou corretamente na inicialização.
- Não edite ou atualize códigos para o Arduino enquanto o ensaio estiver ocorrendo.
- Nunca desligue fontes de energia durante o ensaio, isso comprometerá a coleta de dados.
- Sempre verifique a integridade dos módulos e equipamentos auxiliares.
- Sempre verifique o nível do reservatório de solução Alcalina.

Códigos seguem sequências de comandos lógicos e não degradam ou “param de funcionar” com o tempo, sempre busque causas raízes para mau funcionamento ou falhas nos módulos ou equipamentos num primeiro momento. “O lucro está no hardware e não no software” - Bill Gates.