

Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza
ETEC Júlio de Mesquita
Ensino Médio Integrado ao Curso Técnico em Eletrônica

TITULADOR AUTOMÁTICO DE BAIXO CUSTO CONTROLADO POR ARDUINO UNO.

Luan dos Santos Silva (1), Miguel Cavallari Soares Pereira (2), Murilo Silva Cruz (3),
Pietro Victorio Caniato (4), Renan Keizo Guidi (5).

Adriana Mariko Yonamine Nakatani (6), Egmar Acceto (7).

Resumo: Na química quantitativa, os métodos volumétricos são amplamente empregados para a caracterização e determinação da concentração de analitos. Dentre esses métodos, a titulação volumétrica, particularmente a titulação ácido-base, destaca-se como uma técnica essencial para a análise de amostras. Para reduzir erros e melhorar a precisão no processo de titulação, foi desenvolvido um sistema automatizado de titulação utilizando a plataforma Arduino Uno, com o objetivo de aprimorar a determinação quantitativa da concentração de substâncias em soluções. O sistema proposto integra sensor de pH e bomba peristálticas controladas eletronicamente, com o Arduino Uno atuando como controlador central. A automação do processo de titulação permite o monitoramento contínuo do pH da solução durante a adição do titulante. Além disso, uma interface gráfica em LCD facilita a interação do sistema com o operador. Ensaios realizados indicaram que o sistema é capaz de realizar titulações, evidenciando seu potencial para aplicações em controle de qualidade e ensino. Este projeto não apenas moderniza uma técnica clássica de análise química, como também oferece uma ferramenta prática e interativa, promovendo uma abordagem mais em métodos volumétricos de análise.

Palavras-Chave: Titulador automático, titulação, Arduino, pHmetro.

(1) Aluno do Curso Técnico em Eletrônica – luan.silva493@etec.sp.gov.br

(2) Aluno do Curso Técnico em Eletrônica – miguel.gomes11@etec.sp.gov.br

(3) Aluno do Curso Técnico em Eletrônica – murilo.cruz25@etec.sp.gov.br

(4) Aluno do Curso Técnico em Eletrônica – pietro.caniato@etec.sp.gov.br

(5) Aluno do Curso Técnico em Eletrônica – renan.guidi@etec.sp.gov.br

(6) Professora do Curso Técnico em Eletrônica – adriana.nakatani@etec.sp.gov.br

(7) Professor do Curso Técnico em Eletrônica – egmar.accetto@etec.sp.gov.br

LOW COST AUTOMATIC TITRATOR CONTROLLED BY ARDUINO UNO

Abstract: In quantitative chemistry, volumetric methods are widely employed for the characterization and determination of analyte concentration. Among these methods, volumetric titration, particularly acid-base titration, stands out as an essential technique for sample analysis. To reduce errors and improve precision in the titration process, an automated titration system was developed using the Arduino Uno platform, aiming to enhance the quantitative determination of substance concentrations in solutions. The proposed system integrates a pH sensor and electronically controlled peristaltic pump, with the Arduino Uno serving as the central controller. The automation of the titration process enables continuous monitoring of the solution's pH during the addition of the titrant. Additionally, an LCD graphical interface facilitates interaction between the system and the operator. Tests conducted indicated that the system is capable of performing titrations, demonstrating its potential for applications in quality control and educational settings. This project not only modernizes a classic chemical analysis technique but also offers a practical and interactive tool, promoting a more efficient approach to volumetric analysis methods.

Keywords: Automatic titrator, titration, Arduino, pHmeter.

Sumário

1. INTRODUÇÃO	4
1.1 Titulação ácido base	5
1.2 Escala de pH	6
1.2.1 Medidor de pH (pHmetro) de bancada	8
1.3 Tituladores Automáticos	9
1.3.1 Tituladores controlados por Arduino UNO presentes na literatura	10
1.3.2 Trabalhos utilizando Arduino para realizar titulações automáticas	11
1.3.3 Características gerais de um titulador controlado por Arduino	11
1.4 Arduino Uno	12
1.4.1 Programação do Arduino	14
1.5 Bomba Peristáltica, conceito e funcionamento	16
1.6 OBJETIVO	17
1.6.1 Objetivo geral	17
1.6.2 Objetivo específico	17
2. DESENVOLVIMENTO	17
2.1 Componentes eletrônicos	17
2.1.1 Descrição dos principais componentes utilizados	18
2.1.1.1 Arduino UNO	18
2.1.1.2 Bomba Peristáltica 12V, 5W	19
2.1.1.3 Teclado Matricial 4x4	20
2.1.1.5 Protoboard 830 pontos	21
2.1.1.6 LCD I2C 16x4	21
2.1.1.7 Sensor de PH 4502C + Eletrodo	22
2.1.2 Materiais / Reagentes químicos	23
2.2 Procedimento Experimental	24
2.2.1 Desenvolvimento do protótipo	24
2.2.2 Montagem do circuito elétrico	25
2.2.3 Calibração da vazão nominal da bomba peristáltica	25
2.2.4 Calibração do pHmetro	28
2.2.5 Montagem do agitador magnético	29
2.2.6 Preparo das Soluções (HCl, NaOH e Biftalato de potássio)	33
2.2.7 Padronização do Hidróxido de Sódio e Ácido Clorídrico	34
2.2.8 Funcionamento do Titulador Automático	36
2.3 Resultados e Discussão	37
2.3.1 Resultado da montagem do titulador automático	37

2.3.2 Titulação automática comparada com a manual	39
2.3.3 Comparativo entre sensor de pH do titulador automático e de bancada	41
3. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS	47
4. APÊNDICE	52
4.1 Programação da calibração da bomba peristáltica.....	52
4.2 Programação do titulador	53

1. INTRODUÇÃO

A titulação automática e a titulação manual são métodos amplamente utilizados para a determinação da concentração de espécies químicas em solução, cada um apresentando vantagens e limitações específicas em relação à precisão, repetibilidade e eficiência.

Na titulação manual, a precisão e a exatidão dos resultados dependem da habilidade e experiência do operador. Como o processo de adição do titulante é realizado manualmente, pequenas variações são inevitáveis, especialmente no momento de identificação do ponto de equivalência. Isso pode resultar em maior variabilidade nos resultados e em menor repetibilidade das análises.

Em contraste, a titulação automática oferece controle sobre a dosagem do titulante. Esse controle automatizado minimiza a interferência humana, proporcionando maior exatidão e reduzindo a variabilidade nos resultados.

Do ponto de vista da eficiência e do tempo de análise, a titulação manual apresenta limitações. O processo requer a presença constante do operador, que deve conduzir cada etapa desde a adição cuidadosa do titulante até a observação de alterações visuais. Esse procedimento demanda tempo considerável, o que pode limitar a capacidade analítica em laboratórios com alto volume de amostras.

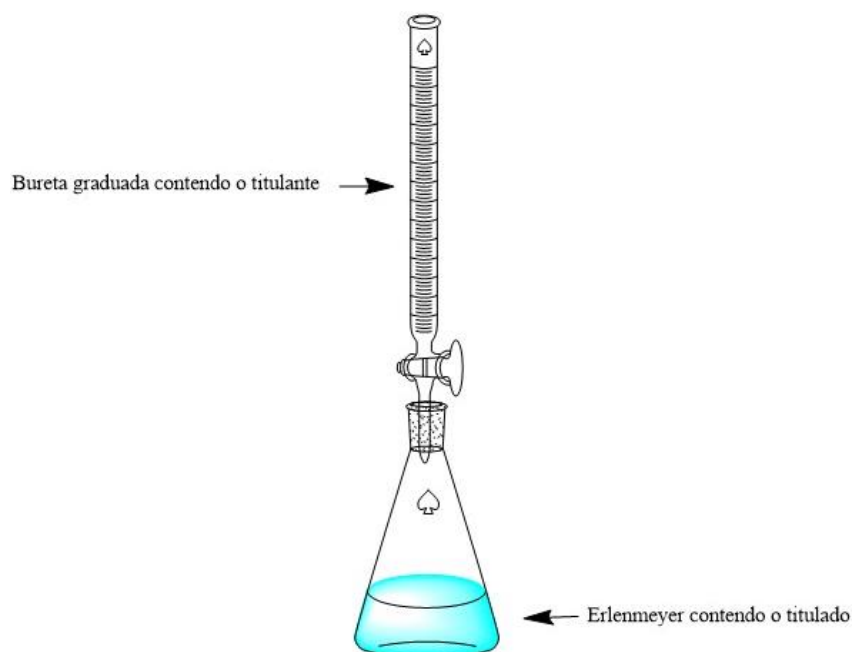
A titulação automática, permite que o processo seja realizado de forma independente após a configuração inicial. O operador precisa apenas definir os parâmetros e iniciar o procedimento, e o equipamento executa a titulação de forma contínua e autônoma. Essa abordagem não apenas otimiza o tempo de análise, mas também permite a realização de múltiplas titulações consecutivas sem a necessidade de supervisão constante, liberando o operador para outras atividades e aumentando a produtividade laboratorial.

Com o objetivo de aumentar a repetibilidade no processo de determinação quantitativa por meio da titulação, foi desenvolvido um protótipo de titulador automático utilizando a plataforma Arduino Uno. O sistema foi construído com um sensor de pH que, ao identificar o ponto de neutralização da reação, desliga automaticamente a bomba peristáltica responsável pela adição do titulante. Esse controle automatizado proporciona maior controle ao processo, reduzindo a interferência de variáveis externas e aumentando a confiabilidade dos resultados obtidos em diferentes ensaios.

1.1 Titulação ácido base

Titulação ácido base, é um método analítico químico que permite a determinação quantitativa de uma substância desconhecida (analito) por meio da adição de uma solução de concentração conhecida (titulante), que reage com o analito em uma proporção estequiometricamente definida e pré-estabelecida, permitindo assim a quantificação precisa da quantidade de analito presente (Universidade Federal de Sergipe, 2012), o processo é demonstrado na figura 1.

Figura 1 - Processo de titulação utilizando uma bureta.

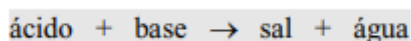


Fonte: VAI Química, 2024.

Ácidos são substâncias que em contato com a água liberam íons H^+ , provocando alterações de pH para a faixa de 0 a 7. Bases são substâncias que em contato com a água, liberam íons OH^- , provocando alterações de pH para a faixa de 7 a 14 (CETESB, 2013).

Numa titulação ácido-base ocorre uma reação completa entre um ácido e uma base. Portanto, o que se tem é uma reação de neutralização (Universidade Federal de Sergipe, 2012). Como mostrado na figura 2.

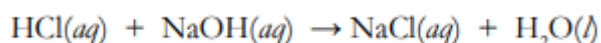
Figura 2 - Reação de neutralização que ocorre entre um ácido e uma base.



Fonte: Adaptado de Universidade Federal de Sergipe, 2012.

Uma das reações mais famosas de neutralização que ocorre por meio do processo de titulação é a de hidróxido de sódio (NaOH) e ácido clorídrico (HCl), como demonstrado na figura 3 abaixo.

Figura 3 - Reação de neutralização do HCl com NaOH, gerando NaCl (cloreto de sódio) e H_2O (água).



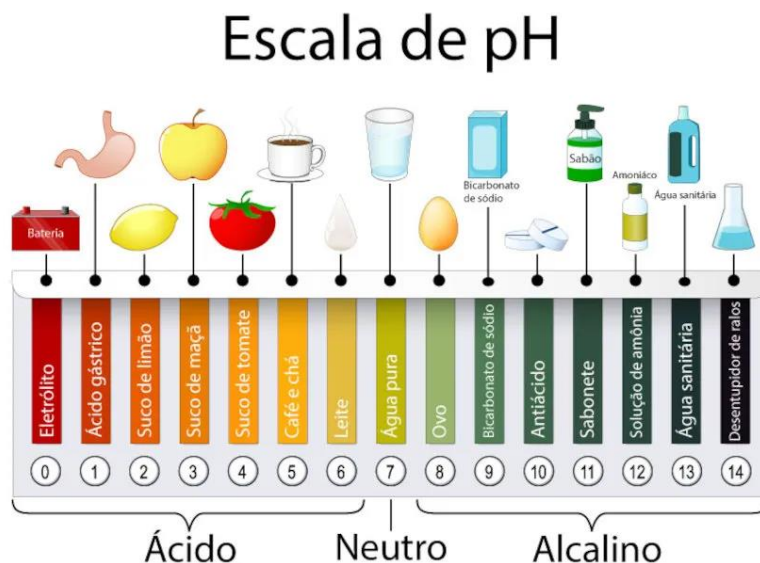
Fonte: Adaptado de Universidade Federal de Sergipe, 2012.

1.2 Escala de pH

O pH é uma medida que reflete o grau de acidez ou basicidade de uma solução, conforme a concentração de íons hidrogênio ($[H^+]$) presentes. A sigla "pH" vem do alemão Potenz Hydrogen, que significa "potência de hidrogênio" (MANUAL DA QUÍMICA, 2024).

A escala de pH varia de 0 a 14, sendo que valores inferiores a 7 indicam soluções ácidas e valores superiores a 7 correspondem a soluções básicas. O valor 7 é considerado neutro, representando substâncias como a água pura. No cotidiano, diversos materiais apresentam pH ácido ou básico, conforme ilustrado na figura 4 abaixo (MANUAL DA QUÍMICA, 2024).

Figura 4 - Algumas substâncias ácidas e básicas presentes no cotidiano.



Fonte: MANUAL DA QUÍMICA, 2024.

Em geral, concentrações molares de $[H^+]_{(aq)}$ e $[OH^-]_{(aq)}$ são bem pequenas, por conveniência elas são expressas em termos de pH (potencial hidrogeniônico) e pOH (potencial hidroxiliônico), que são logaritmos de $[H^+]$ e $[OH^-]$ (concentração de íons de hidroxila), respectivamente (Universidade Federal de Sergipe, 2012):

$$pH = -\text{Log} [H^+]$$
$$pOH = -\text{Log} [OH^-]$$

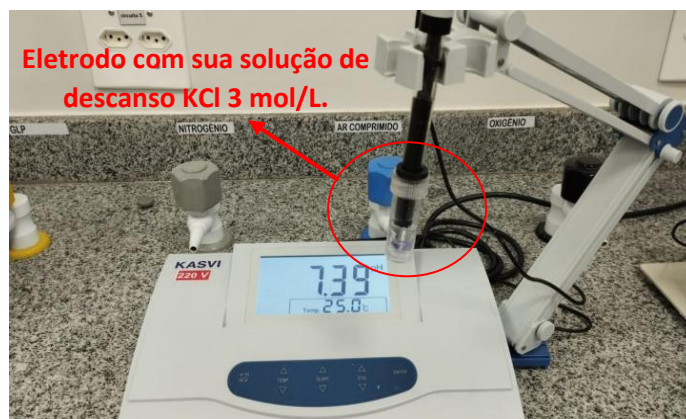
Como regra geral podemos ter:

- Em água neutra a 25 °C, $pH = pOH = 7,00$;
- Em soluções ácidas, a $[H^+] > 1,0 \times 10^{-7}$, então o $pH < 7,00$;
- Em soluções básicas, a $[H^+] < 1,0 \times 10^{-7}$, então o $pH > 7,00$;
- Quanto mais alto o pH, mais baixo é o pOH e mais básica a solução;
- A maioria dos valores de pH e de pOH está entre 0 e 14;
- Não há limites teóricos nos valores de pH ou de pOH. (por exemplo, o pH de HCl 2,0 mol/L é -0,301.) (Universidade Federal de Sergipe, 2012).

1.2.1 Medidor de pH (pHmetro) de bancada

O pHmetro de bancada, como mostrado na figura 5, é um instrumento utilizado para medir o potencial hidrogeniônico de uma substância, classificando-a como ácida, neutra ou básica (alcalina) (PROLAB. 2018).

Figura 5 - pHmetro de bancada com seu respectivo eletrodo imerso em uma solução de descanso de KCl (Cloreto de potássio) 3 mol/L.



Fonte: Adaptado de Universidade Federal de Uberlândia, 2022.

O funcionamento do equipamento baseia-se em um eletrodo que gera uma tensão elétrica ao ser imerso na solução; essa tensão é então medida e convertida em uma escala de pH que varia de 0 a 14. Valores iguais a 7 indicam uma solução neutra, valores abaixo de 7 denotam acidez, e valores acima de 7 indicam alcalinidade (PROLAB. 2018).

A utilização do pHmetro é essencial em diversas atividades industriais e laboratoriais, como agricultura, petroquímica, farmacêutica, cosmética, biologia e indústria alimentícia, entre outras.

O eletrodo do pHmetro está conectado a um potenciômetro, que gera uma leitura em milivolts, posteriormente convertida em unidades de potencial hidrogeniônico (PROLAB. 2018).

A calibração do equipamento é fundamental para assegurar resultados precisos. Em equipamentos estáveis e de uso frequente, a calibração não necessita ser diária. No entanto, é recomendado calibrar o pHmetro quando a frequência de uso é baixa, evitando assim erros durante a medição (PROLAB. 2018).

1.3 Tituladores Automáticos

Tituladores automáticos são instrumentos utilizados para realizar análises volumétricas com elevada precisão e eficiência. Esses dispositivos combinam sistemas de medição, controle e dosagem automatizados para determinar o ponto final de uma reação química, como a neutralização de ácidos e bases. A titulação automática é amplamente utilizada em laboratórios químicos devido à sua capacidade de reduzir erros e aumentar a reprodutibilidade dos resultados.

O funcionamento de um titulador baseia-se na integração de componentes como um bureta motorizada, sensores (geralmente eletrodos de pH e condutivímetros) e um sistema de controle eletrônico. Durante a titulação, o titulante é adicionado à amostra em volumes controlados, enquanto os sensores monitoram continuamente as mudanças no parâmetro químico de interesse. O ponto de equivalência é determinado automaticamente pelo sistema, que interrompe a adição do titulante quando a reação é completada, proporcionando resultados rápidos (SILVA, 2019).

Entre as vantagens dos tituladores automáticos estão a precisão no controle de volumes adicionados, a possibilidade de realizar cálculos automáticos com base nos dados coletados e a capacidade de operar com reagentes perigosos em sistemas fechados, garantindo maior segurança ao operador (COSTA et al., 2020). Além disso, sua aplicação é essencial para atender aos padrões regulatórios de qualidade em setores industriais, como o controle do teor de ácido em produtos alimentícios e a análise de metais em águas residuais.

Contudo, a implementação de sistemas de titulação automática exige investimentos iniciais elevados e o treinamento adequado dos operadores. Apesar disso, os benefícios em termos de eficiência e confiabilidade justificam sua adoção em ambientes laboratoriais que demandam alta produtividade e precisão analítica (OLIVEIRA, 2021).

1.3.1 Tituladores controlados por Arduino UNO presentes na literatura

Tituladores automáticos baseados em Arduino UNO têm ganhado destaque na literatura como uma alternativa acessível e personalizável para análises volumétricas. Esses dispositivos utilizam a plataforma Arduino como controlador principal, integrando sensores, atuadores e sistemas de medição para realizar titulações automáticas.

Os sistemas de titulação baseados em Arduino geralmente incluem uma bomba peristáltica ou uma válvula solenoide para dosagem do titulante, sensores de pH para monitorar as reações químicas e um display LCD para exibir informações como volume utilizado e valores de pH em tempo real. Além disso, é comum o uso de relés ou transistores para controlar os componentes eletrônicos do sistema. Exemplo, estudos recentes demonstraram que dispositivos desenvolvidos com Arduino podem atingir precisão comparável a equipamentos comerciais, sendo particularmente úteis para análises de neutralização em águas residuais e em soluções alimentícias (SANTOS et al., 2022).

A principal vantagem de um titulador controlado por Arduino é a possibilidade de customização do software para atender a requisitos específicos de diferentes tipos de titulação, como ácido-base, complexometria ou redox. Além disso, os custos envolvidos são significativamente menores do que os de tituladores automáticos comerciais, tornando-os ideais para instituições com recursos limitados (MENDES e PEREIRA, 2021).

A literatura enfatiza que esses tituladores têm potencial para desempenhar um papel importante na democratização do acesso a tecnologias analíticas, especialmente em regiões onde laboratórios não possuem infraestrutura avançada (OLIVEIRA et al., 2020). Além disso, o uso de plataformas abertas como o Arduino fomenta a inovação e a colaboração científica em escala global. Contudo, os desafios incluem a calibração precisa dos sensores e a necessidade de conhecimento técnico em programação e eletrônica para desenvolver e operar o equipamento.

1.3.2 Trabalhos utilizando Arduino para realizar titulações automáticas

Tituladores automáticos baseados em plataformas open source (código aberto), como o Arduino, têm sido amplamente explorados em estudos acadêmicos, destacando-se como ferramentas acessíveis e eficazes para diversas aplicações.

No ensino de química, por exemplo, Machado Jr. (2019) desenvolveu um titulador automatizado utilizando Arduino, promovendo sua aplicação como ferramenta pedagógica investigativa. De forma semelhante, Santana (2018) projetou um titulador automático em fluxo-batelada para a determinação de acidez total de vinhos tintos por titulação ácido-base, enquanto Siqueira (2016) aplicou tecnologias digitais em um sistema de titulação para a análise de dureza e alcalinidade total de águas minerais.

A pesquisa de Soares et al. (2021) reforça o uso do Arduino em tituladores automáticos em fluxo-batelada, destacando sua eficiência e custo reduzido. Já Soong et al. (2019) propuseram uma configuração experimental inovadora para titulação automatizada, baseada em princípios de automação e design universal. Sua abordagem integra tecnologia robótica e conversão de texto em fala, promovendo a inclusão de alunos com deficiência.

Entre as vantagens dos tituladores automáticos estão a redução de custos operacionais, a possibilidade de criar sistemas dedicados e a minimização da influência do analista nos resultados. Esses sistemas também registram o sinal analítico a cada adição do titulante, o que permite a obtenção precisa de curvas de titulação e facilita a identificação do ponto de equivalência, mesmo em condições analíticas desafiadoras (SOARES et al., 2021).

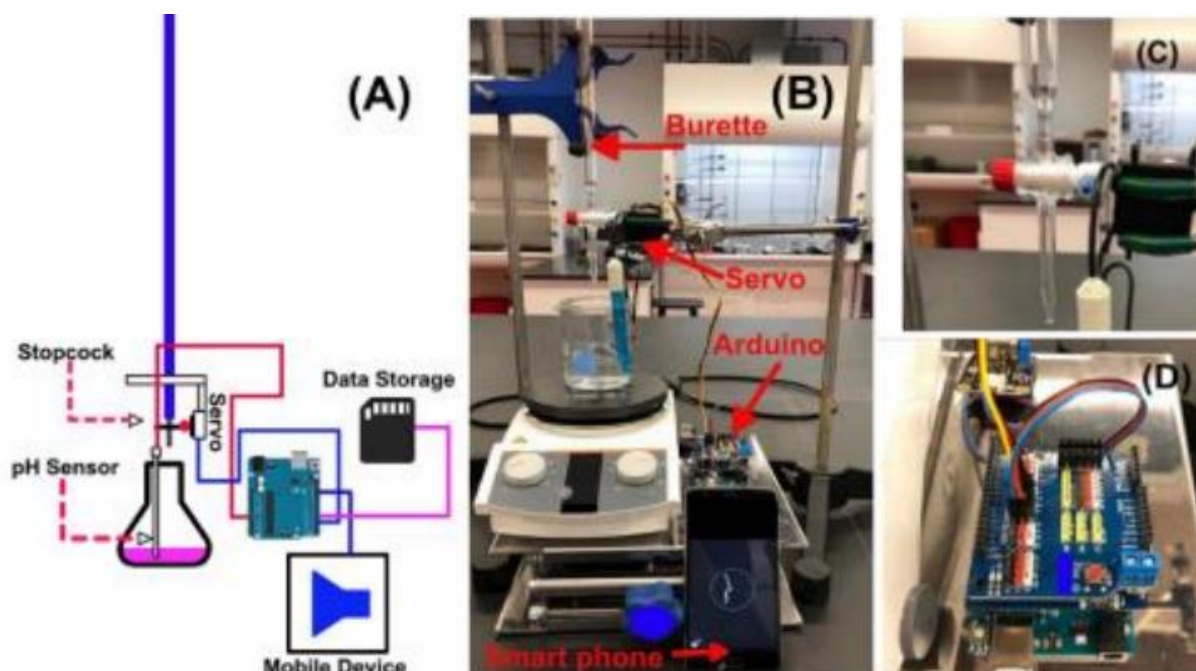
1.3.3 Características gerais de um titulador controlado por Arduino

Os trabalhos citados na seção 1.3.2, destaca-se o trabalho de Soong et al. (2019) apresentando uma abordagem inovadora para a configuração de autotitulação utilizando tecnologia de código aberto.

O sistema desenvolvido, denominado de autotitulação UD, é controlado via Arduino e incorpora elementos de hardware e software acessíveis, destacando-se por sua simplicidade e eficiência, como demonstrado na figura 6, onde na imagem (A) tem-se a ilustração resumida do sistema eletrônico utilizado, (B) configuração de autotitulação com o servo motor conectado à torneira da bureta e controlado via Arduino. (C) Fixação do servo na torneira da bureta.

A alça da torneira está presa no servo usando braçadeiras e tampado com um pequeno pedaço de tubo de silicone. (D) Configuração de hardware Arduino com escudo de expansão do sensor e 1Shield + módulo Bluetooth para transmissão de informações.

Figura 6 - Ilustração representando a montagem de uma configuração de autotitulação UD adaptada de um equipamento de laboratório controlado via Arduino.



Fonte: Adaptado de Soong et al. (2019).

1.4 Arduino Uno

O Arduino, criado em 2005 na Itália, surgiu como uma plataforma destinada a desenvolver projetos de design interativo e sistemas de prototipagem (GEDDES, 2017). Trata-se de uma placa de desenvolvimento que interage com o ambiente através de sensores, permitindo a leitura de variáveis como temperatura, pressão, distância e intensidade sonora (SOUZA et al., 2011).

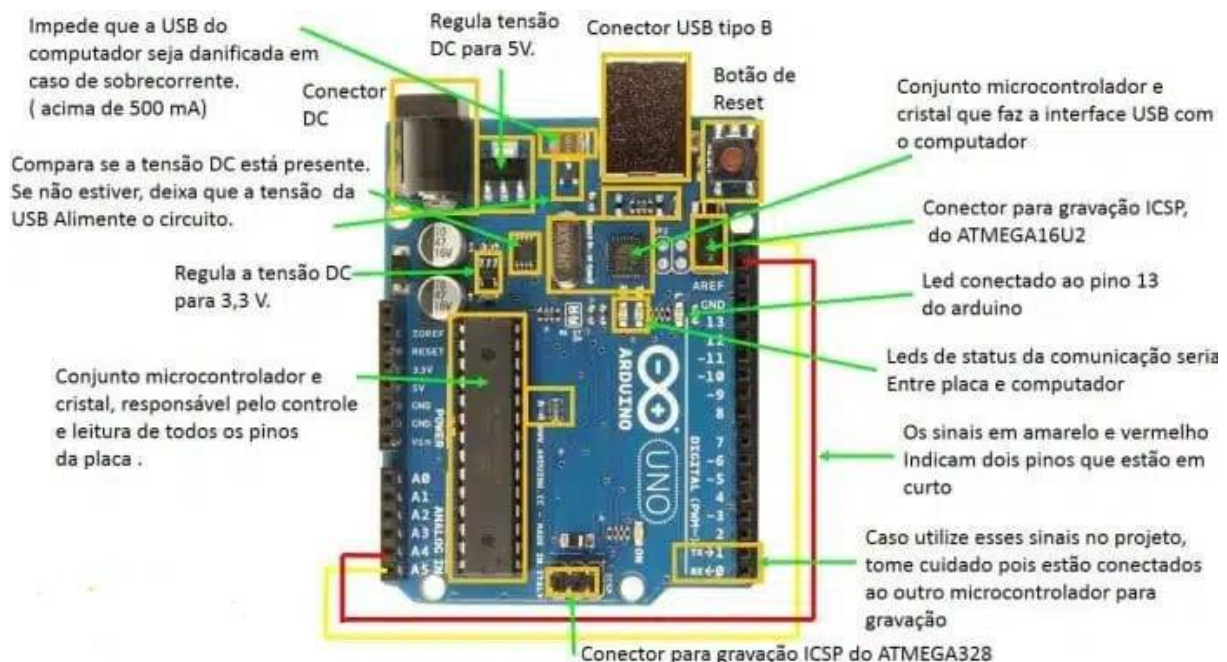
Seu hardware é baseado em um controlador de hardware livre, utilizando um processador Atmel AVR e suporte integrado para entradas e saídas (MCROBERTS, 2018). A plataforma Arduino combina simplicidade e flexibilidade, sendo open-source tanto no hardware quanto no software, facilitando seu uso por pessoas interessadas em criar dispositivos ou ambientes interativos (MCROBERTS, 2018).

Além de ser utilizado para desenvolver objetos interativos autônomos, o Arduino pode ser integrado a redes ou à internet, permitindo o envio e recebimento de dados, ampliando suas possibilidades de aplicação (SOUZA et al., 2011). Ele pode ser conectado a uma ampla variedade de dispositivos, como LEDs, displays de matriz de pontos, sensores de temperatura, módulos Ethernet, receptores GPS, motores e outros atuadores e sensores (SOUZA et al., 2011; MCROBERTS, 2018).

A acessibilidade do Arduino o torna uma ferramenta valiosa tanto para iniciantes quanto para profissionais, sendo amplamente utilizada em projetos de prototipagem, ensino, automação, robótica e Internet das Coisas.

Atualmente existem diversos modelos, sendo os mais utilizados o Arduino Nano para projetos de pequeno porte, Arduino Uno para projetos de pequeno e médio porte e o Arduino Mega, destinado para projetos de grande porte. Essas placas possuem baixo valor comercial e utilizam um sistema operacional de código aberto (MACHADO JR, 2019). O Arduino UNO (Figura 7) é do tipo open source (no qual os projetos podem ser copiados gratuitamente), essa simples placa apresenta inúmeras funcionalidades (GEDDES, 2017).

Figura 7 - Placa do Arduino UNO e seus componentes.



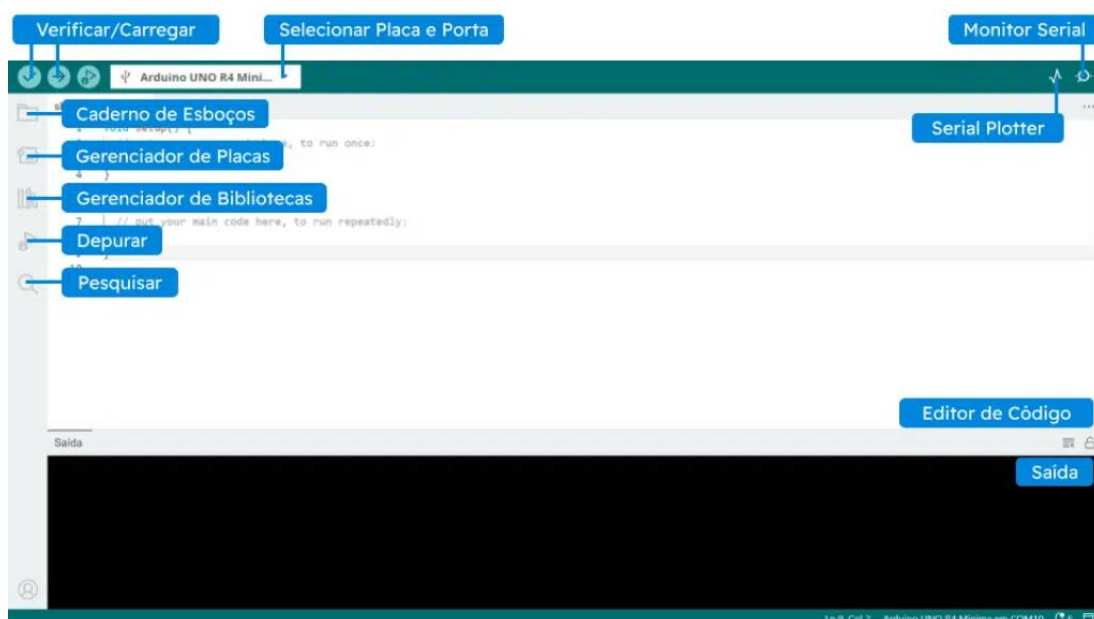
Fonte: Adaptado de EMBARCADOS. Arduino Uno. 2024.

1.4.1 Programação do Arduino

A programação do Arduino é realizada por meio do IDE (Integrated Development Environment - Ambiente de Desenvolvimento Integrado), um software livre que permite escrever e transferir códigos para a placa (figura 8). O código é escrito em uma linguagem baseada em C/C++, compreendida pelo Arduino. Este ambiente possibilita a comunicação entre o computador e o dispositivo, permitindo o envio do programa para a execução (GEDDES, 2017; MCROBERTS, 2018).

No contexto do Arduino, os programas são chamados de sketches, termo que significa rascunho ou esboço. Tanto o hardware quanto o software do Arduino são de código aberto, o que significa que podem ser utilizados, modificados e compartilhados por qualquer pessoa, independentemente do propósito, fomentando uma vasta comunidade de desenvolvedores e inovadores (GEDDES, 2017; MCROBERTS, 2018).

Figura 8 - Detalhes do Software do Arduino IDE.



Fonte: Adaptado de MAKER HERO. 2024.

Como demonstrado na figura 8 o Software do Arduino IDE possui diversas funções onde:

- Editor de Código: Área principal onde se escreve o código. Ele suporta a sintaxe da linguagem de programação baseada em C/C++ usada pelo Arduino.
- Verificar / Carregue: Compila e carrega o código para a sua placa Arduino.

- Selecionar Placa e Porta: As placas Arduino detectadas aparecem automaticamente, junto com o número da porta USB do computador.
- Caderno de Esboços: Sketches armazenados localmente no computador.
- Gerenciador de Placas: Pacotes do Arduino e de terceiros que podem ser instalados. Por exemplo, usar a placa MKR WiFi 1010 requer que o pacote Arduino SAMD Boards esteja instalado.
- Gerenciador de Bibliotecas: Bibliotecas Arduino, contendo programações com diversas novas funções, criadas pelo Arduino e sua comunidade.
- Depurar: Teste e depure programas em tempo real.
- Pesquisar: Busque por palavras-chave no código.
- Monitor Serial: Abre a ferramenta Monitor Serial como uma nova aba no console.
- Serial Plotter: Abre a ferramenta de visualização gráfica como uma nova aba no console.
- Saída: Exibe mensagens de status, erros de compilação, e outros feedbacks sobre o progresso da programação.

O Arduino Uno utiliza o microcontrolador ATmega328, que possui 32 KB (Kilobyte) de memória flash e 2 KB de SRAM. A memória flash é usada para armazenar permanentemente o programa carregado na placa, enquanto a SRAM é destinada ao armazenamento temporário de variáveis durante a execução do programa. A principal diferença entre essas duas memórias é que a flash mantém os dados mesmo após o Arduino ser desligado ou reiniciado, característica que não se aplica à SRAM (SOUZA et al., 2011; MOTA, 2017).

O funcionamento do Arduino é semelhante ao de um computador tradicional, com a capacidade de interpretar instruções enviadas por meio de entradas e controlar sistemas automáticos em resposta a elas. Esse processo é viabilizado pela programação realizada no Arduino IDE, que traduz as instruções descritas pelo operador para a linguagem compreendida pelo microcontrolador (MCROBERTS, 2018).

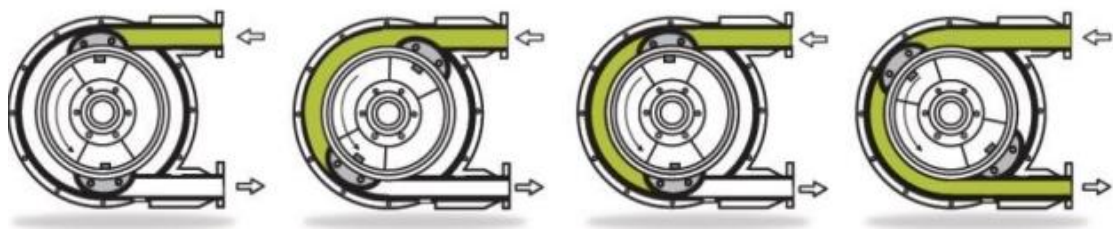
O Arduino IDE é um software de código aberto que facilita tanto a escrita do código quanto o envio (upload) para a placa. Compatível com os sistemas operacionais Windows, Mac OS X e Linux, o ambiente foi desenvolvido em Java e é baseado no Processing, outro software de código aberto.

Ele proporciona uma interface simples e acessível para iniciantes e especialistas (MOTA, 2017; MCROBERTS, 2018). Além disso, a empresa Arduino oferece um ambiente virtual para suporte técnico, consulta sobre hardware e software, e interação com a comunidade (MCROBERTS, 2018).

1.5 Bomba Peristáltica, conceito e funcionamento

Bombas peristálticas (figura 9), também conhecidas como bombas tubulares ou bombas de roletes, receberam esse nome devido ao tipo de movimento que realizam, similar à do sistema digestório, responsável pelo deslocamento de alimentos no intestino (MORAES, 2016; PINHEIRO et al., 2018).

Figura 9 - Funcionamento de uma bomba peristáltica.



Fonte: Adaptado de CASTRO, Francisco. 2021.

Segundo Martins et al. (2016), o funcionamento das bombas peristálticas é relativamente simples: o fluido contido em uma mangueira flexível é movimentado devido à compressão gerada por um rotor com roletes, que pressiona a mangueira contra a carcaça da bomba. Esse movimento cria um vácuo que succiona o fluido por uma extremidade e o expulsa pela outra, definindo o sentido de bombeamento.

A principal vantagem desse tipo de bomba é a isenção de contato do fluido com os componentes internos, uma característica que torna as bombas peristálticas ideais para processos onde a contaminação do produto é crítica, como em aplicações químicas e médicas (MARTINS et al., 2016; LOPES, 2020).

1.6 OBJETIVO

1.6.1 Objetivo geral

Desenvolver um sistema automatizado de titulação utilizando a plataforma Arduino Uno, com o intuito de criar um sistema eficiente que possibilite a execução do processo com maior controle. O sistema visa reduzir erros humanos e otimizar o tempo dedicado às práticas laboratoriais, promovendo uma abordagem confiável e padronizada para o procedimento de titulação.

1.6.2 Objetivo específico

Criar uma interface de usuário intuitiva em LCD (Liquid Crystal Display – Tela de Cristal Líquido) para facilitar a operação do sistema integrando sensores de pH e bombas controladas eletronicamente pelo Arduino UNO, garantindo maior repetibilidade do processo.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1 Componentes eletrônicos

Os componentes descritos na Tabela 1 foram utilizados para a montagem do protótipo. Além disso, outros equipamentos foram empregados, como o ferro de solda 60W potência ajustável profissional 480°C-110V (Fabricante local, Brasil), sugador de solda alumínio com bico (Fabricante local, Brasil), multímetro digital portátil profissional com bateria e cabos (Keyestudio, China), tubo solda estanho 1mm 63x37 1.0mm com fluxo – Cobix (Fabricante local, Brasil) e perfurador para PCI, placa de circuito impresso fenolite manual (Meanwell, China).

Os componentes da tabela 1 foram adquiridos na RS Robótica, localizada na R. Gertrúdes de Lima, 342 - Centro, Santo André – SP.

Tabela 1 – Componentes eletrônicos adquiridos para montagem do protótipo.

Componentes	Preço Médio (R\$)	Quantidade
Adaptador Jack J4 C/Borne (Comimark, China)	R\$ 7,00	2
Arduíno UNO (Arduino, China / Itália)	R\$ 60,00	1
Bomba Peristáltica 12V 5W (Dollatek, China)	R\$ 40,00	1
Caixa de acrílico 20x15x5 (Fabricante local, Brasil)	R\$ 35,00	1
Diodo Retificador 1N4007	R\$ 0,20	1
Conector Borne KRE 2 Vias	R\$ 1,20	3
Fonte 9V (Meanwell, China)	R\$ 20,00	1
Fonte de 12V (Poser Technology, China)	R\$ 30,00	2
Ímãs de neodímio, pacote com 50 ímãs (Neomagnete, China)	R\$ 10,00	8
Jumper macho-fêmea 10cm 40 unidades (Elegoo, China)	R\$ 15,00	-----
Jumper macho-macho 30cm 40 unidades (Elegoo, China)	R\$ 20,00	-----
LCD I2C 16x4 (SunFounder, China)	R\$ 50,00	1
Led 3mm de alto brilho (Keyestudio, China)	R\$ 0,40	1
Mangueira de silicone 3m 2mm (Fabricante local, Brasil)	R\$ 15,00	1
Placa de Fenolite 5x5 cm (Fabricante local, Brasil)	R\$ 2,50	1
Módulo relê 1 canal 5V (Songle, China)	R\$ 12,00	1
Protoboard 830 furos (Elegoo, China)	R\$ 14,00	1
Resistor 220 Ohms (Yageo, China)	R\$ 0,20	1
Resistor 4.7 KiloOhms (Yageo, China)	R\$ 0,27	1
Sensor de PH 4502C + eletrodo (DollaTek, China)	R\$ 139,00	1
Teclado Matricial 4x4 (Keyestudio, China)	R\$ 15,00	1
Transistor TIP-101 (Keyestudio, China)	R\$ 2,30	1
Ventoinha 12V (Sunon, China / Taiwan)	R\$ 20,00	1
TOTAL	R\$ 509,07	-----

Fonte: Os autores, 2024.

2.1.1 Descrição dos principais componentes utilizados

Nas seções abaixo, estão listados os componentes essenciais para o funcionamento do titulador automático controlado pelo Arduino UNO. Outros componentes não mencionados adiante serão abordados e explicados nas seções seguintes.

2.1.1.1 Arduino UNO

Arduino UNO (figura 10) é uma placa de microcontrolador popular baseada no ATmega328P, usada para prototipagem eletrônica, contendo 16 pinos digitais e 6 analógicos. Facilita a conexão com sensores, atuadores e módulos, sendo programável via uma linguagem baseada em C/C++.

Figura 10 – Placa micro controladora Arduino UNO.



Fonte: RS Robótica, 2024.

2.1.1.2 Bomba Peristáltica 12V, 5W

Dispositivo de deslocamento positivo que transporta fluidos comprimindo alternadamente uma mangueira flexível (figura 11). Operando com 12V, essas bombas são ideais para sistemas que necessitam de transporte preciso e controlado de líquidos, como em tituladores automáticos. A bomba é comandada por um controlador, como o Arduino, que regula seu funcionamento para atender às especificações do processo.

Figura 11 - Bomba dosadora peristáltica 3x5 mm 12V Intllab.

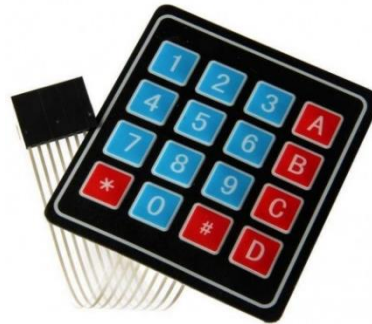


Fonte: RS Robótica, 2024.

2.1.1.3 Teclado Matricial 4x4

Teclado de 16 botões organizados em 4 linhas e 4 colunas (figura 12), utilizado para dar comandos ao Arduino através de seus botões e interagindo com as funções do painel LCD.

Figura 12 - Teclado matricial 4x4 membrana.



Fonte: RS Robótica, 2024.

2.1.1.4 Ventoinha 12V

Dispositivo de refrigeração que ajuda a dissipar o calor gerado por circuitos eletrônicos (Figura 13). Porém nesse projeto foi adotada como um agitador magnético, possuindo 6 ímãs de neodímio colocados na parte superior da ventoinha. Foi utilizada para manter o sistema de titulação em constante agitação, uma vez que a reação da solução só ocorre de maneira adequada quando homogeneizada totalmente.

Figura 13 - Micro ventilador cooler ventoinha 80x80x25mm 12V

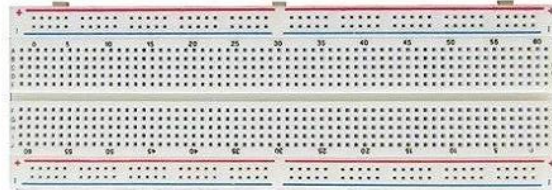


Fonte: RS Robótica, 2024.

2.1.1.5 Protoboard 830 pontos

Placa de prototipagem (figura 14) onde componentes e jumpers (fios) foram conectados sem necessidade de solda, permitindo montagens flexíveis para a confecção do protótipo.

Figura 14 - Protoboard 830 pontos



Fonte: RS Robótica, 2024.

2.1.1.6 LCD I2C 16x4

Display LCD com interface I2C (figura 15) é um componente que simplifica a comunicação entre o Arduino e o display, reduzindo o número de pinos necessários para conexão. Com capacidade para exibir mensagens em quatro linhas de 16 caracteres cada. No protótipo, ele é empregado para mostrar o menu de funcionalidades e exibir informações registradas em tempo real pelo Arduino UNO, permitindo uma interface clara e acessível ao usuário.

Figura 15 – Módulo Arduino display 16x4. caracteres alfanuméricos.



Fonte: AMAZON, 2024.

2.1.1.7 Sensor de PH 4502C + Eletrodo

O sensor de pH 4502C + eletrodo (figura 16) foi utilizado para medir o pH de soluções, indicando acidez ou alcalinidade. O eletrodo detecta íons de hidrogênio na solução, gerando um sinal elétrico proporcional ao pH. Esse sinal é amplificado pelo módulo e convertido para leitura em microcontroladores como o Arduino.

O sensor foi utilizado com a finalidade de identificar o ponto de neutralização da reação durante o processo de titulação, monitorando em tempo real a variação do pH da solução, fornecendo dados para determinar quando a reação alcança a neutralidade, ou seja, o ponto de equivalência. Assim, ao identificar o pH desejado, o sensor de pH sinaliza o momento em que a titulação deve ser encerrada.

Figura 16 - Sensor de pH leitura PH-4502C com eletrodo.



Fonte: RS Robótica, 2024.

2.1.2 Materiais / Reagentes químicos

Os reagentes químicos utilizados neste projeto pertencem ao laboratório de química da ETEC Júlio de Mesquita, localizada na Rua Prefeito Justino Paixão, 150 - Vila Bastos, Santo André – SP.

Tabela 2 – Materiais e vidrarias utilizados para o desenvolvimento do protótipo.

Materiais	Quantidade
Balança Analítica	1
Balão Volumétrico 1L	2
Balão Volumétrico 250 mL	1
Barra magnética (peixinho)	1
Becker de vidro 250 mL	1
Becker de vidro 50 mL	2
Espátula de metal	1
Frasco de plástico 1 L	1
Frasco de Vidro Âmbar 1 L	1
Garra para Condensador	1
Mufa Dupla	1
Pipeta de Pasteur	1
Pipeta Volumétrica 10 mL	1
Placa de Petri	1
Suporte Universal para Laboratório	1

Fonte: Os autores, 2024.

Tabela 3 – Reagentes utilizados.

Materiais	Quantidade
Ácido Clorídrico (HCl) P.A	8,4 mL
Água Deionizada (água D.I)	-----
Biftalato de Potássio 0,1 mol/L	250 mL
Biftalato de Potássio P.A	5,1 g
HCl 0,1 mol/L	1 L
Hidróxido de Sódio (NaOH) P.A	4 g
NaOH 0,1 mol/L	1 L
Solução Tampão pH 4,01	30 mL
Solução Tampão pH 6,86	30 mL

Fonte: Os autores, 2024.

2.2 Procedimento Experimental

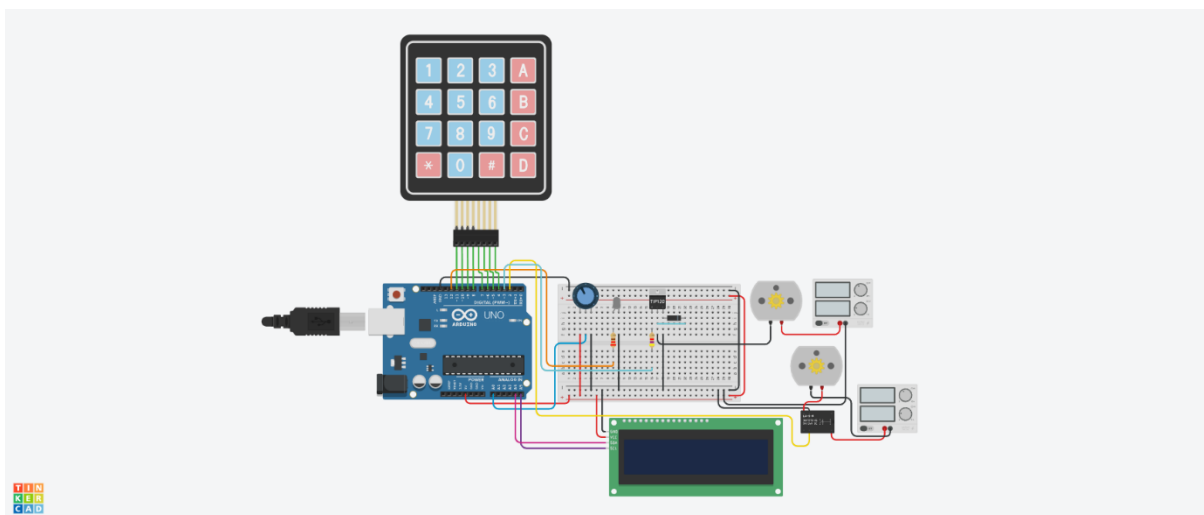
2.2.1 Desenvolvimento do protótipo

Inicialmente, foi realizada uma pesquisa sobre trabalhos anteriores que utilizavam o Arduino Uno para automação de titulações. Um dos estudos analisados apresentava um sistema autônomo no qual o ponto de equivalência da reação era detectado por um sensor TCS3200 (Sensor de Cor). Contudo, essa abordagem foi descartada devido à alta complexidade de integração do sensor ao sistema principal.

Em uma segunda análise, verificou-se que diversos trabalhos, como o de Castro (2023), utilizavam sensores de pH para identificar o ponto de equivalência da reação com base na neutralidade da solução.

Com base nessas observações, foram avaliados outros componentes eletrônicos (Seção 2.1) para a construção do sistema proposto. Após análises e testes, chegou-se ao circuito final, conforme ilustrado na Figura 17.

Figura 17 – Circuito eletrônico do Titulador Automático desenvolvido por meio do Tinkercad, plataforma online e gratuita que permite criar designs 3D de circuitos eletrônicos e programar de forma simples.



Fonte: AUTODESK. Tinkercad. 2024.

2.2.2 Montagem do circuito elétrico

Para a montagem do circuito descrito na Seção 2.2.1, foram realizadas diversas simulações na plataforma Tinkercad. Essas simulações permitiram identificar as conexões necessárias e os componentes mais adequados para o projeto.

Inicialmente, definiu-se as portas lógicas do Arduino que seriam utilizadas para conectar os principais componentes do sistema, incluindo o sensor de pH, o teclado matricial, o LED indicador da bomba peristáltica, o agitador magnético e a própria bomba peristáltica.

Em seguida, utilizando um protoboard de 830 pontos, estabeleceram-se as conexões para o aterramento do circuito (GND) e para a alimentação elétrica (VCC), que fornece 5 volts provenientes do Arduino.

Por fim, as demais conexões foram realizadas conforme o esquema gerado nas simulações no Tinkercad. Para alimentar o protótipo, foram utilizadas três fontes externas: uma de 9 volts, destinada ao funcionamento do Arduino, e duas de 12 volts, empregadas para alimentar a bomba peristáltica e o agitador magnético. Essa configuração garantiu a separação adequada das fontes de alimentação, evitando sobrecargas e assegurando o funcionamento eficiente dos componentes.

2.2.3 Calibração da vazão nominal da bomba peristáltica

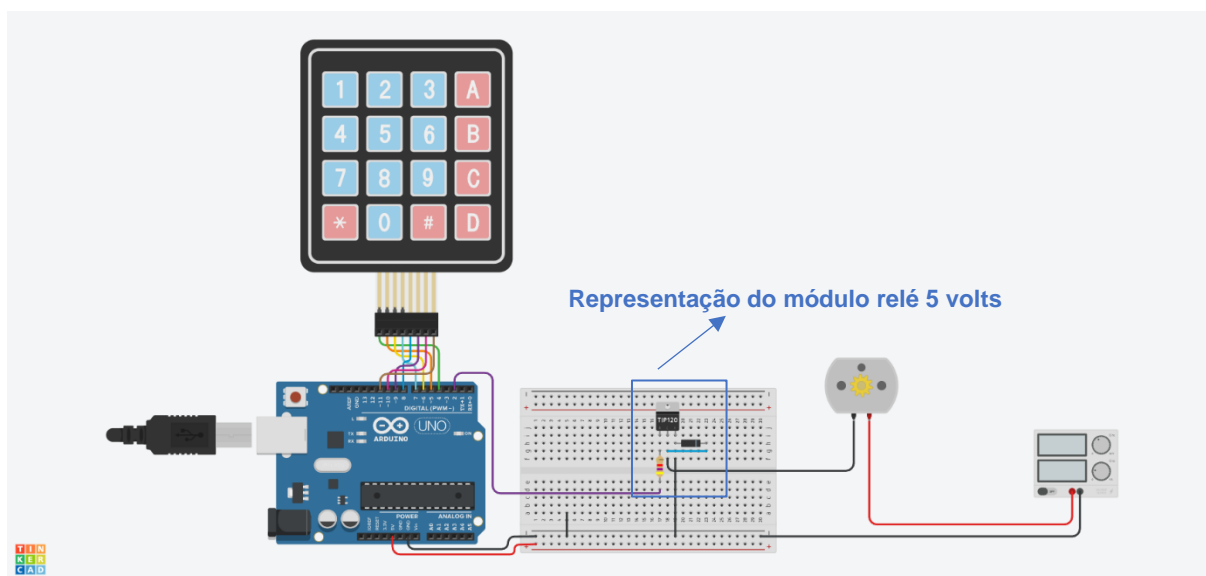
Assim como em titulações volumétricas tradicionais, a precisão no volume de titulante utilizado é fundamental para obter resultados consistentes e confiáveis sobre a real concentração do titulado. Com esse objetivo, foram realizados diversos testes para determinar a vazão nominal de líquidos transferidos pela bomba peristáltica. Para determinar a vazão volumétrica de um fluido, utiliza-se a Equação 1, que relaciona o volume transferido no intervalo de tempo em que o sistema esteve ativo. A fórmula é dada por:

Equação 1 – Cálculo da Vazão

$$Q \text{ (Vazão)} = \frac{\text{Volume(mL)}}{\text{Tempo(seg)}}$$

Inicialmente, desenvolveu-se um programa na linguagem C/C++, que é interpretada pelo Arduino (Apêndice) para executar as funções requisitadas. Esse programa permitia que, ao pressionar a tecla A, se envie um impulso elétrico ao Arduino para acionar a bomba peristáltica (figura 18). Após o acionamento, a bomba permanecia ativa por 60 segundos. O volume de água transferido durante esse período foi medido com o auxílio de uma proveta de vidro com capacidade de 200 mL.

Figura 18 – Circuito para determinação da vazão nominal da bomba peristáltica.



Fonte: AUTODESK. Tinkercad. 2024.

Com o intuito de aumentar a precisão, foram realizados testes adicionais em diferentes intervalos de tempo (60, 50, 40, 30, 20 e 10 segundos) para avaliar a consistência nos resultados. Para cada intervalo, foram executados 10 testes consecutivos, e os dados obtidos foram organizados em tabelas, permitindo calcular a vazão nominal média para cada período.

Por fim, os valores médios de vazão foram organizados em formato de tabela (tabela 4) para determinar a vazão média total, que será utilizada como base para calcular o volume de titulante adicionado durante a titulação.

Tabela 4 – Vazão média em diferentes períodos de tempo, utilizados para calcular a vazão total da bomba em mL/segundos.

AMOSTRAS	Tempo da bomba ativa em segundos					
	60	50	40	30	20	10
1	100	84	68	51	33	16,5
2	100	84	68	51	33	16,5
3	102	84	68	50	33	16,5
4	101	84	68	51	33	16,5
5	100	84	68	51	33	16,5
6	101	84	68	51	33	16,5
7	102	84	68	50	33	16,5
8	101	84	67	51	33	16,5
9	100	84	68	50	33	16,5
10	101	84	67	50	33	16,5
MÉDIA (mL/min)	100,8	84	67,8	50,6	33	16,5
MÉDIA TOTAL (mL/seg)	1,6736					

Fonte: Os autores, 2024.

Para verificar a conformidade dos dados obtidos nos testes de vazão, foi elaborado um gráfico de regressão linear, utilizando a média dos volumes transferidos (em mL) pela bomba peristáltica em função do tempo de ativação (em segundos) (tabela). O gráfico, apresentado como gráfico 1, demonstra a relação linear entre o tempo de funcionamento da bomba e o volume de líquido transferido, permitindo avaliar a consistência dos dados e a adequação do modelo para prever o comportamento da vazão em diferentes intervalos de tempo.

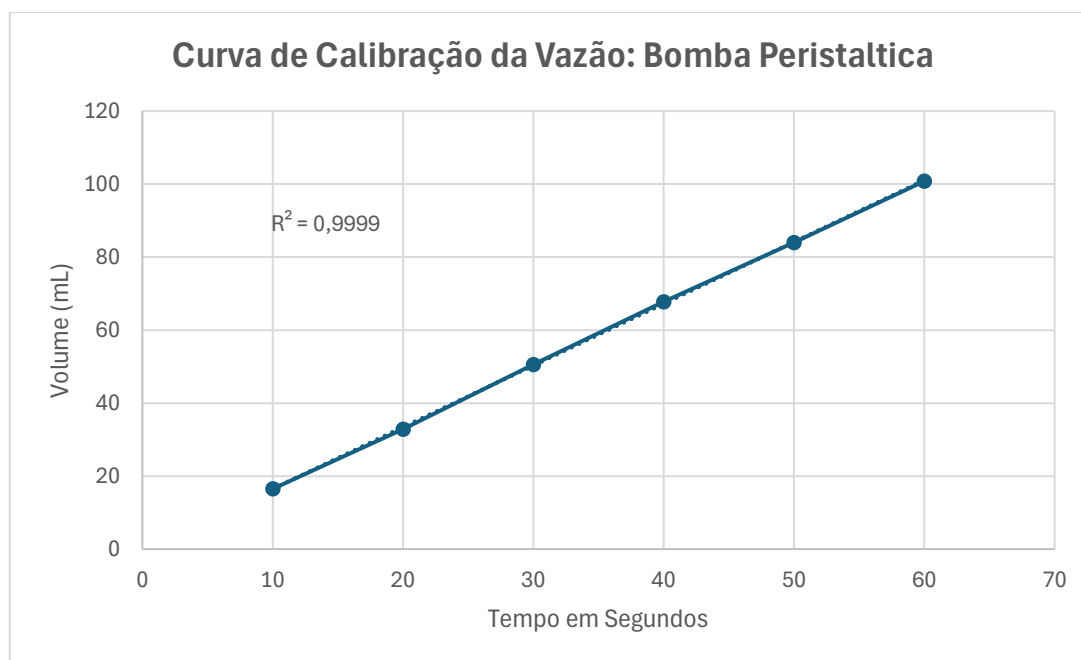
Em uma curva de calibração, o R^2 é usado para verificar a precisão do método utilizado, se a relação entre o tempo de ativação da bomba e o volume de líquido transferido é consistente, quanto mais próximo de 1 for o valor de R^2 , maior será a confiabilidade do método para prever o comportamento da bomba.

Tabela 5 – Relação da vazão média da bomba em mL em períodos diferentes de tempo.

Tempo ativo da bomba (seg.)	Volume (mL)
60	100,8
50	84,0
40	67,8
30	50,6
20	32,9
10	16,5

Fonte: Os autores, 2024.

Gráfico 1 - Curva de calibração da vazão: Bomba Peristáltica.



Fonte: Os autores, 2024.

2.2.4 Calibração do pHmetro

Inicialmente, foi desenvolvido um programa na linguagem C/C++, interpretado pelo Arduino (Apêndice), para executar as funções necessárias. O programa foi projetado para realizar a calibração do sensor de pH-4502C e consiste em duas etapas principais. A primeira etapa é responsável pela leitura do valor analógico do sensor de pH, utilizando soluções tampão com pH conhecido para referência.

O processo começou com a remoção da solução de armazenamento de KCl do eletrodo, seguida pela limpeza cuidadosa de sua ponta com água deionizada e secagem com um papel macio, como papel higiênico, para evitar danos. Em seguida, o eletrodo foi imerso na primeira solução tampão com pH 6,86; o valor analógico correspondente foi registrado no Serial Monitor da plataforma IDE do Arduino. Esse valor pode variar entre 0 e 1023, conforme a leitura do pino analógico.

Por fim, o eletrodo foi novamente limpo com água deionizada e inserido na segunda solução tampão, com pH 4,01. Mais uma vez, o valor analógico foi registrado no Serial Monitor.

A segunda etapa consistiu em utilizar os valores analógicos obtidos para cada solução tampão e inseri-los na equação 2 de calibração do sensor.

Equação 2 – Determinação do valor de pH a partir dos valores analógicos lidos pelo sensor.

$$pH = m \cdot \text{Leitura} + b$$

Onde:

- m, coeficiente angular da equação;
- Leitura, valor analógico lido pelo Arduino;
- b, coeficiente linear (determinado para ajustar a curva à origem dos dados).

Entretanto é necessário determinar o valor de m, para isso utiliza-se a equação 3.

Equação 3 – Determinar valor de m na equação.

$$m = \frac{\Delta pH}{\Delta \text{Leitura}} \rightarrow m = \frac{pH2 - pH1}{\text{Leitura1} - \text{Leitura 2}}$$

Para determinar o valor do coeficiente linear, basta substituir os valores conhecidos na Equação 2, utilizando um dos pares de valores obtidos durante a calibração (pH e valor analógico). Com isso, é possível resolver a equação para encontrar o valor de b.

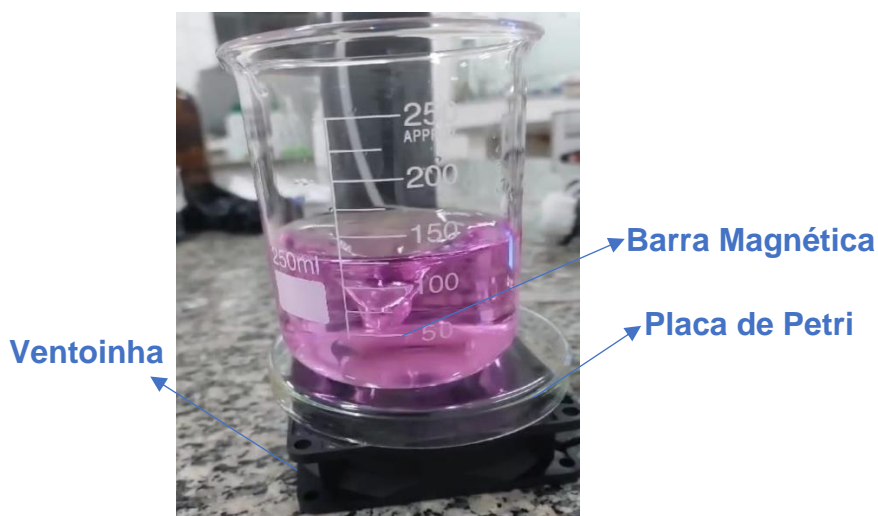
Esse sistema de calibração foi integrado ao programa principal do titulador, garantindo que, sempre que o protótipo for utilizado, o sensor de pH seja calibrado de forma adequada, utilizando as soluções tampão de pH 6,86 e 4,01 como referência.

2.2.5 Montagem do agitador magnético

Durante o processo de titulação, é fundamental garantir uma agitação constante para que a reação ocorra de maneira homogênea e eficiente. Como o objetivo do projeto é a automação do processo, foi necessário desenvolver um sistema que realizasse essa agitação de forma automática.

A solução proposta para o agitador magnético envolveu a adaptação de uma ventoinha (cooler) de computador 12 volts. Dois ímãs de neodímio foram fixados na parte superior da ventoinha, permitindo a criação de um campo magnético giratório. Para dar suporte ao béquer onde a reação ocorre, foi fixada uma placa de Petri de vidro sobre a ventoinha, garantindo estabilidade e funcionalidade, conforme ilustrado na Figura 19.

Figura 19 – Agitador magnético desenvolvido para o titulador



Fonte: Os autores, 2024.

Entretanto, o cooler utilizado no agitador opera com uma tensão de 12 volts, o que resulta em uma rotação excessivamente alta. Isso acarretou dois problemas principais durante os testes.

O primeiro problema é que, ao iniciar a titulação, a barra magnética responsável pela agitação dentro do béquer pode ser ejetada devido à alta velocidade de rotação. Esse incidente exige que o sistema seja completamente desligado e reiniciado, interrompendo o processo automatizado e tornando-o menos eficiente.

O segundo problema está relacionado à alta velocidade do cooler, que pode causar respingos da solução titulada para fora do béquer. Esse efeito não apenas compromete a precisão da titulação, mas também representa um risco à segurança do sistema, podendo danificar componentes eletrônicos próximos ou causar acidentes.

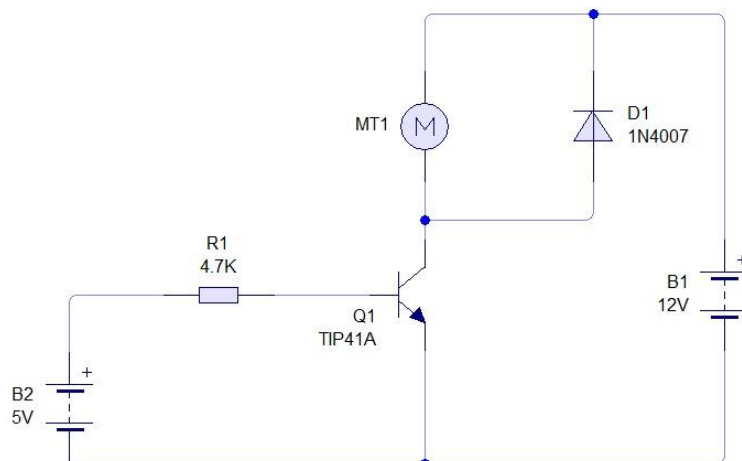
Para resolver esse problema, foi desenvolvido um sistema de controle da velocidade do motor da ventoinha. Esse sistema utiliza um transistor TIP101, que permite regular a tensão aplicada ao cooler, controlando assim sua velocidade de rotação.

O transistor TIP101 foi integrado ao circuito principal do titulador e configurado para operar como um elemento de chaveamento e controle. Por meio de um sinal PWM (Pulse Width Modulation - Modulação de largura de pulso) gerado pelo Arduino, é possível ajustar a rotação do cooler de acordo com as necessidades do processo de titulação.

O circuito proposto foi desenvolvido no software Circuit Wizard, sistema que combina design de circuitos, design de PCI (Placa de circuito impresso) e simulação (NEW-WAVE CONCEPTS. Circuit Wizard. 1998).

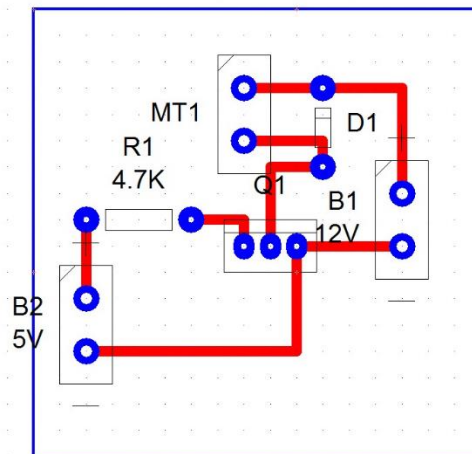
O procedimento foi realizado em etapas sequenciais, começando pela montagem e simulação do circuito no software, conforme ilustrado na Figura 20. Posteriormente, o circuito foi transferido para a plataforma de design PCI (Figura 21) para a elaboração do projeto de fabricação.

Figura 20 – Circuito de controle de velocidade da ventoinha.



Fonte: Circuit Wizard, 2024.

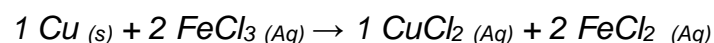
Figura 21 - Circuito de prototipagem para montagem na placa de fenolite.



Fonte: Circuit Wizard, 2024.

Após a finalização do design, realizou-se o desenho na placa de fenolite e o processo de corrosão utilizando percloroato de ferro para criar as trilhas condutoras. Esse processo com percloroato de ferro ocorre quando a placa de fenolite revestida com cobre é submersa em uma solução desse composto químico. Durante a corrosão, o percloroato de ferro reage com o cobre exposto (não protegido por uma tinta – caneta de DVD nesse caso), dissolvendo-o e deixando apenas as trilhas desejadas (CAMPOS, Sofia Pereira. 2022).

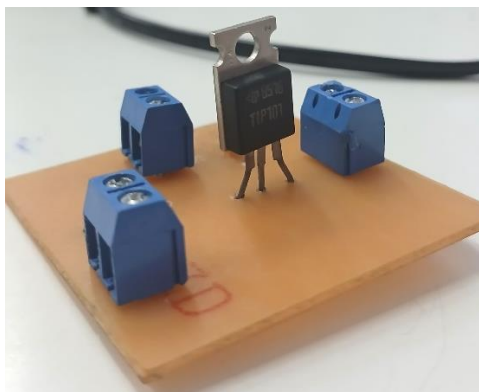
A reação química básica pode ser representada pela interação do íon férrico (Fe^{3+}) do percloroato com o cobre metálico (Cu):



Nessa reação, o cobre forma cloreto de cobre (II) ficando dissolvido na água, enquanto o íon férrico é reduzido a íon ferroso (Fe^{2+}) permanecendo solúvel em água, dependendo das condições ambientes o Fe^{2+} pode ser encontrado precipitado na reação (CAMPOS, Sofia Pereira. 2022).

Por fim, o circuito fabricado foi montado e testado com o programa desenvolvido para o titulador automático (Figura 22).

Figura 22 - PCI controle de velocidade da ventoinha.



Fonte: Os autores, 2024.

2.2.6 Preparo das Soluções (HCl, NaOH e Biftalato de potássio)

Para a realização dos testes manuais e automáticos, foi necessária a preparação de três soluções: ácido clorídrico (HCl), hidróxido de sódio (NaOH) e biftalato de potássio.

Inicialmente, preparou-se o ácido clorídrico. Para isso, aplicaram-se as equações 4 e 5. A primeira equação foi utilizada para calcular a massa do soluto (em gramas) necessária. No entanto, considerando que o HCl é uma solução aquosa, utilizou-se a equação da densidade para determinar o volume que deveria ser pipetado. Assim, foi possível preparar uma solução 0,1 mol/L de HCl em um balão volumétrico de 1 L, considerando a densidade do ácido clorídrico a 36%, que é de 1,18 g/cm³ (MERCK MILLIPORE, 2024).

Equação 4 – Calculo da massa a ser usada de HCl.

$$\text{Concentração Molar} = \frac{\text{massa (g)}}{\text{massa molar} \cdot \text{Volume (L)}}$$

Equação 5 – Calculo do volume por meio da densidade.

$$\text{densidade} = \frac{\text{massa}}{\text{volume(L)}} \rightarrow \text{volume(L)} = \frac{\text{massa}}{\text{densidade}}$$

Em seguida, utilizou-se a equação 4 para calcular a massa de NaOH necessária para preparar uma solução com concentração de 0,1 mol/L em um volume de 1 litro. Após a pesagem da quantidade calculada de hidróxido de sódio em um béquer, o sólido foi solubilizado com água deionizada. A solução foi então transferida cuidadosamente para um balão volumétrico de 1 litro, completando-se o volume até o menisco, com extrema cautela uma vez que a solução de hidróxido é extremamente exotérmica (libera calor).

Por fim, aplicou-se o mesmo procedimento utilizado para a preparação da solução de NaOH na confecção da solução de biftalato de potássio 0,1 mol/L em um volume de 250 mL. A equação 4 foi utilizada para calcular a massa necessária, que foi posteriormente pesada, solubilizada em água deionizada e transferida para um balão volumétrico de 250 mL, completando-se o volume até o menisco.

2.2.7 Padronização do Hidróxido de Sódio e Ácido Clorídrico

A fim de ter resultados comparativos entre a titulação manual e automática além de descobrir a molaridade real das soluções, realizou-se a padronização dos reagentes NaOH e HCl.

A padronização do hidróxido foi feita utilizando uma bureta de 25 mL, pipeta volumétrica de 10 mL, fenolftaleína (indicador ácido base) e três Erlenmeyer a fim de realizar o procedimento em triplicata (três resultados a fim de comparação).

O procedimento de padronização foi iniciado ambientando a bureta com solução de NaOH três vezes, com o objetivo de remover eventuais impurezas e assegurar a uniformidade da titulação. Em seguida, a bureta foi preenchida e ajustada ao zero utilizando a solução de hidróxido de sódio. Paralelamente, foram pipetados 10 mL da solução de biftalato de potássio para um Erlenmeyer, ao qual foram adicionados 30 mL de água deionizada e duas gotas de indicador ácido-base. Por fim, realizou-se a titulação manualmente. Após cada titulação, anotou-se o volume de NaOH utilizado e, em seguida, aplicaram-se as equações 6 e 7 para cada valor registrado.

Equação 6 – Fator de correção (Fc) da solução.

$$\text{Concentração Molar}_1 \cdot \text{Volume pipetado (mL)}_1 \cdot Fc_1 = \text{Concentração Molar}_2 \cdot \text{Volume}_2 \cdot Fc_2$$

O cálculo do fator de correção de uma solução é utilizado para garantir a precisão em análises químicas e experimentos laboratoriais. Este fator é usado para ajustar a concentração de uma solução padrão para compensar pequenas variações no preparo, como desvios na pesagem ou impurezas no reagente. No entanto, para determinar o Fc_1 , conforme mostrado na equação 6, é necessário calcular previamente o valor utilizando a equação 7. Nessa etapa, se divide a massa teórica do padrão primário de NaOH (biftalato de potássio), calculada para a concentração desejada, pela massa efetivamente pesada na balança.

Equação 7 – Calculo do fator de correção para padrões primário.

$$\text{Fator de Correção} = \frac{\text{massa calculada}}{\text{massa pesada}}$$

Por fim, realiza-se o cálculo da verdadeira concentração molar da solução preparada, utilizando a equação 8. Essa equação considera os fatores de correção obtidos anteriormente, permitindo ajustar a concentração da solução para refletir a variação entre a massa calculada e a massa real de NaOH, proporcionando um valor mais preciso para a molaridade da solução.

Equação 8 – Calculo da Molaridade Real da solução.

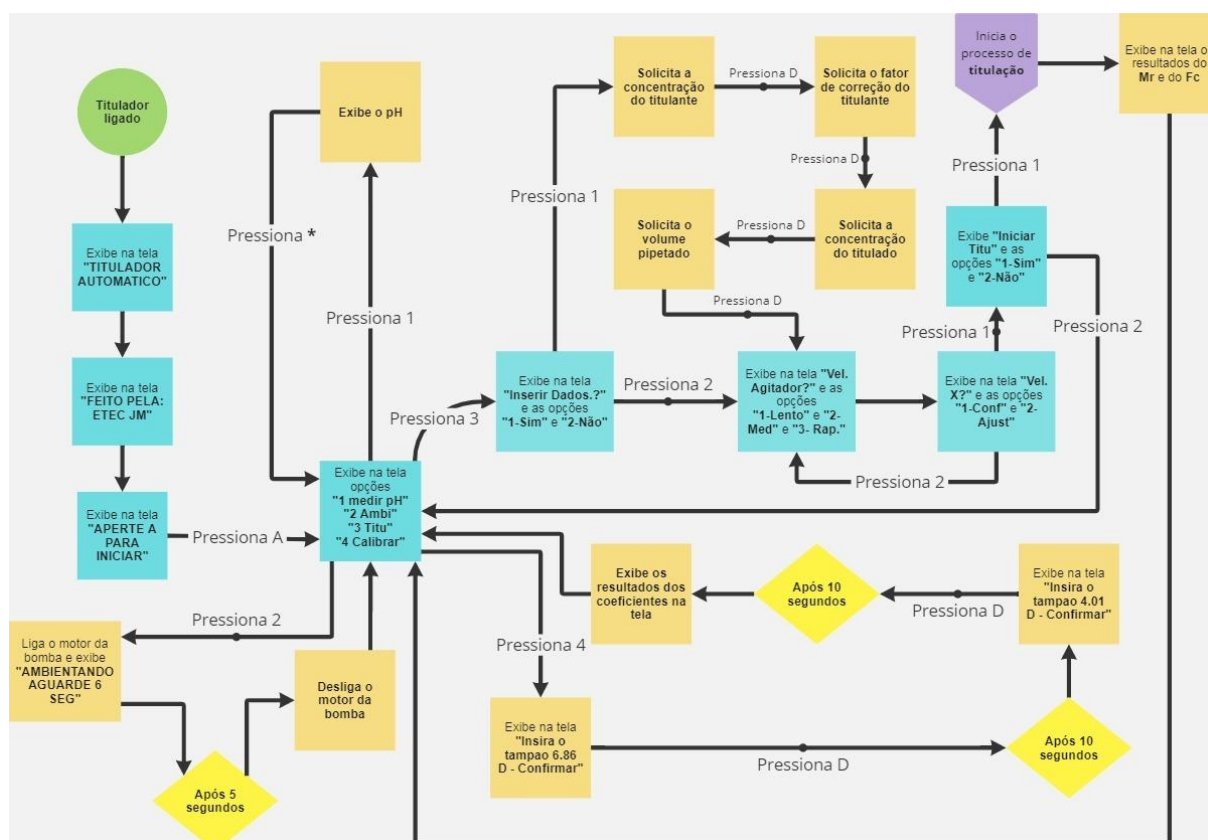
$$\text{Molaridade Real} = \text{Concentração molar teórica} \cdot \text{Fator de correção}_2$$

Finalizando o processo de padronização, o procedimento foi repetido para determinar o fator de correção do HCl e sua molaridade real. Neste caso diferentemente, em vez de pipetar a solução de biftalato de potássio, utilizou-se o próprio ácido clorídrico no Erlenmeyer. Além disso, foram adicionadas duas gotas de fenolftaleína, que atua como indicador ácido-base, para indicar o ponto de equivalência durante a titulação.

2.2.8 Funcionamento do Titulador Automático

O processo de titulação automática foi dividido em três etapas principais: iniciação do sistema, exibição do menu de opções e titulação, seguidas dos resultados. Para simplificar o funcionamento do sistema, foi desenvolvido um diagrama de blocos (Figura 23), que descreve claramente o fluxo das operações.

Figura 23 – Diagrama de funcionamento do titulador.



Fonte: Os autores, 2024.

O protótipo desenvolvido integra cinco subsistemas, cada um com uma função. O primeiro subsistema é o sensor de pH, que pode ser utilizado tanto no processo de titulação quanto para a medição de pH de soluções em geral. O segundo é responsável pelo processo de ambientação dos tubos da bomba peristáltica, assegurando que estes sejam preenchidos com a solução adequada antes da titulação. O terceiro subsistema é o sistema de titulação, que inclui o controle de agitação constante da solução, facilitando a ocorrência da reação.

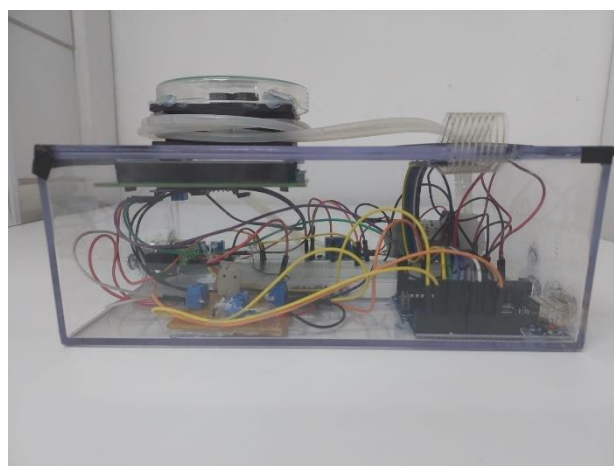
O quarto subsistema envolve o processo de calibração do pHmetro, utilizando soluções tampão com pH conhecido, assegurando a precisão das medições durante as operações de titulação.

2.3 Resultados e Discussão

2.3.1 Resultado da montagem do titulador automático

A montagem completa do titulador foi concluída após a realização de testes comparativos entre uma titulação manual e uma titulação automática. Esses testes permitiram avaliar a eficiência, precisão e funcionalidade do sistema automatizado, garantindo que todos os componentes estivessem integrados de forma adequada para replicar ou superar os resultados obtidos manualmente (Figuras 24, 25 e 26).

Figuras 24, 25 e 26 – Protótipo montado dentro de uma caixa de acrílico.

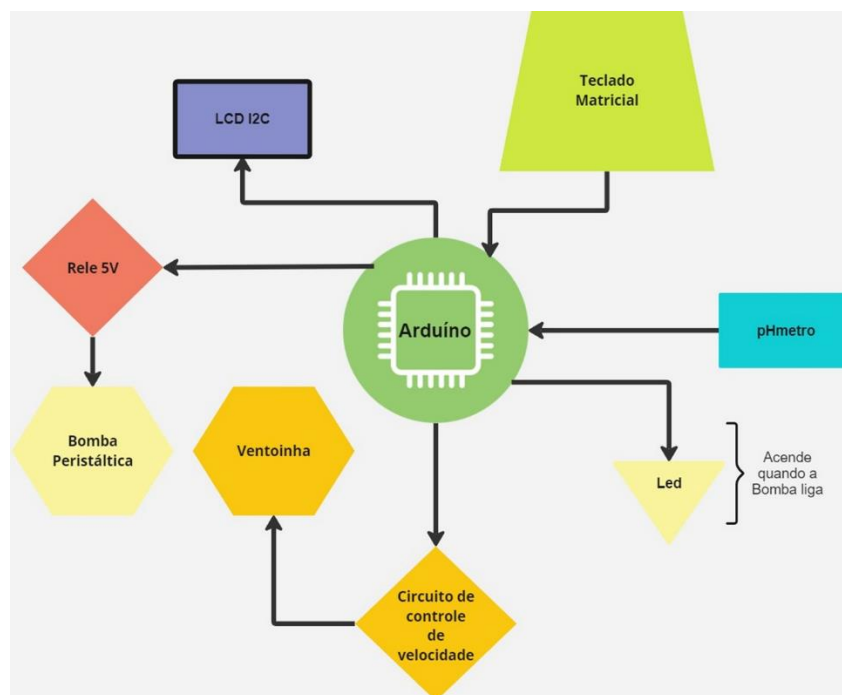


Fonte: Os autores, 2024.

O titulador utiliza, ao todo, três fontes externas para seu funcionamento: uma fonte de 9 volts responsável por alimentar o Arduino e duas fontes de 12 volts destinadas ao agitador magnético e à bomba peristáltica. O funcionamento do sistema é facilitado por uma interface intuitiva com display LCD I2C, permitindo ao operador interagir facilmente com o sistema autônomo e executar os comandos necessários.

A simplicidade técnica do funcionamento do titulador possibilita que sua montagem seja replicada por qualquer pessoa com conhecimentos básicos em eletrônica e programação, tornando-o acessível e eficiente. O diagrama com as peças que compõem o sistema está ilustrado na figura 27, detalhando a integração de seus componentes principais.

Figura 27 – Diagrama de componentes eletrônicos com suas respectivas conexões.



Fonte: Os autores, 2024.

2.3.2 Titulação automática comparada com a manual

Inicialmente, foram realizadas titulações manuais com o objetivo de estabelecer uma comparação entre os dois métodos de análise. Para as análises manuais, utilizou-se uma bureta de 25 mL contendo hidróxido de sódio previamente padronizado e ácido clorídrico. O procedimento foi executado em duplicata, visando determinar a molaridade real e o fator de correção da solução.

Os resultados obtidos foram organizados na tabela 6 para melhor visualização e análise, permitindo uma comparação clara entre as titulações manuais e o processo automatizado.

Tabela 6 – Resultados da titulação manual.

Titulação Manual (NaOH / HCl)			
Amostras	Volume utilizado (mL)	Fator de Correção	Molaridade Real (mol/L)
1	10,1	1,0093	0,1009
2	10,2	0,9994	0,0999
Média	10,15	1,0044	0,1004

Fonte: Os autores, 2024.

Como esperado, podem ocorrer variações no volume utilizado para determinar o fator de correção e a molaridade real do HCl nas titulações manuais. No entanto, no modelo automatizado, não houve alteração no volume utilizado, embora tenha sido observado um excesso de adição de NaOH, esse excesso ocorreu devido às variações apresentadas pelo sensor de pH durante o processo de titulação.

A Tabela 7 apresenta os resultados obtidos durante a titulação realizada pelo sistema autônomo, destacando o desempenho do modelo em comparação com o método manual e evidenciando os desafios relacionados à estabilidade do sensor de pH.

Tabela 7 - Resultados da titulação automática.

Titulação Automática (NaOH / HCl)			
Amostras	Volume utilizado (mL)	Fator de Correção	Molaridade Real (mol/L)
1	10,878	0,9371	0,0937
2	10,878	0,9371	0,0937
Média	10,878	0,9371	0,0937

Fonte: Os autores, 2024.

Por fim, foi calculado o erro relativo do titulador automático com base nos resultados obtidos para a molaridade real. O cálculo foi realizado utilizando a equação 9, amplamente empregada em análises estatísticas para fins de comparação.

Equação 9 – Cálculo do erro relativo de um sistema.

$$\text{Erro relativo} = \frac{\text{valor especulado} - \text{valor exato}}{\text{valor exato}} \cdot 100$$

Após o cálculo, foi obtido um erro de 6,69% ao comparar os resultados do titulador automático com os do processo manual. Esse erro, considerado relativamente elevado, ocorre devido a variações no pH durante a titulação e à vazão nominal média da bomba peristáltica, utilizada para calcular o volume exato de solução adicionada.

Apesar disso, o titulador demonstrou consistência nos resultados, apresentando volumes utilizados, fator de correção e molaridades reais estáveis em todas as execuções. Isso comprova a eficiência do sistema, embora seja necessário aprimorar sua precisão para se igualar ao método manual.

Pode-se observar a diferença do ponto de equivalência (cor rosa) na figura 28, onde os Erlenmeyer da direita são da titulação manual e os da esquerda da titulação automática.

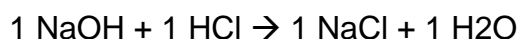
Figura 28 – Comparativo dos sistemas de titulação.



Fonte: Os autores, 2024.

Podemos observar a diferença de tonalidade na solução, causada pela quantidade de base injetada pela bomba peristáltica. Essa mudança de cor é explicada pela reação ácido-base que ocorre entre os reagentes presentes na solução. O indicador utilizado, ao reagir com a base (hidróxido de sódio), provoca uma alteração de cor, típica do comportamento químico dos indicadores ácido-base em diferentes faixas de pH.

A reação pode ser representada genericamente como:



2.3.3 Comparativo entre sensor de pH do titulador automático e de bancada

Para realizar o comparativo, foi utilizado o método potenciométrico, uma técnica amplamente empregada na química analítica. Esse método mede o potencial elétrico (voltagem) de uma solução para determinar o ponto de equivalência em uma titulação. Diferentemente de métodos que utilizam indicadores visuais, a titulação potenciométrica emprega um eletrodo sensível, como um pHmetro, para monitorar as variações no potencial conforme o titulante é adicionado à solução.

O experimento foi conduzido com uma bureta de 25 mL, agitador magnético, béquer de 250 mL, pipeta de 10 mL, e reagentes como NaOH e HCl, além de um indicador ácido-base. Para permitir uma análise visual e gráfica, o sistema de comparação foi montado de acordo com a ilustração na Figura 29.

Figura 29 – Sistema de comparação de sensores de pH (Sensor bancada).



Fonte: Os autores, 2024.

Com o sistema montado, a bureta foi preenchida com solução de NaOH e o béquer com solução de HCl. Após a preparação, o processo de titulação potenciométrica foi iniciado. Durante o experimento, registrou-se cuidadosamente o volume de titulante adicionado e o pH correspondente após cada etapa. Esses dados foram organizados e apresentados na Tabela 8, facilitando a análise das variações de pH em função do volume de titulante adicionado.

Tabela 8 – Tabela comparativa de volume e pH, além de cálculos da derivada.

Titulação Potenciométrica						
Volume	pH	Variação de Vol.(mL)	Variação pH	Média Vol. (mL)	$\Delta \text{pH} / \Delta \text{vol. 1a der.}$	$\Delta \text{pH} / \Delta \text{vol. 2a der.}$
0,00	1,93	5,00	0,35	2,50	0,07	0,04
5,00	2,28	1,00	0,11	5,50	0,11	0,03
6,00	2,39	1,00	0,14	6,50	0,14	0,07
7,00	2,53	1,00	0,21	7,50	0,21	0,13
8,00	2,74	0,50	0,17	8,25	0,34	0,12
8,50	2,91	0,50	0,23	8,75	0,46	0,44
9,00	3,14	0,10	0,09	9,05	0,9	-0,2
9,10	3,23	0,10	0,07	9,15	0,7	0,1
9,20	3,30	0,10	0,08	9,25	0,8	0,7
9,30	3,38	0,10	0,15	9,35	1,5	-0,1
9,40	3,53	0,10	0,14	9,45	1,4	0,7
9,50	3,67	0,10	0,21	9,55	2,1	4,5
9,60	3,88	0,10	0,66	9,65	6,6	3,3
9,70	4,54	0,10	0,99	9,75	9,9	-6,2
9,80	5,53	0,10	0,37	9,85	3,7	20,5
9,90	5,90	0,10	2,42	9,95	24,2	-11,9
10,00	8,32	0,10	1,23	10,05	12,3	-9,1
10,10	9,55	0,10	0,32	10,15	3,2	-1
10,20	9,87	0,10	0,22	10,25	2,2	-0,6
10,30	10,09	0,10	0,16	10,35	1,6	0
10,40	10,25	0,10	0,16	10,45	1,6	-0,6
10,50	10,41	0,10	0,10	10,55	1	-0,4
10,60	10,51	0,10	0,06	10,65	0,6	-1,07E-14
10,70	10,57	0,10	0,06	10,75	0,6	-7,10E-15
10,80	10,63	0,10	0,06	10,85	0,6	1,77E-14
10,90	10,69	0,10	0,06	10,95	0,6	-0,1
11,00	10,75	0,20	0,10	11,10	0,5	-0,1
11,20	10,85	0,20	0,08	11,30	0,4	3,55E-15
11,40	10,93	0,20	0,08	11,50	0,4	-0,1
11,60	11,01	0,20	0,06	11,70	0,3	0,05
11,80	11,07	0,20	0,07	11,90	0,35	0
12,00	11,14	0,20	0,07	11,90	0,35	0

Fonte: Os autores, 2024.

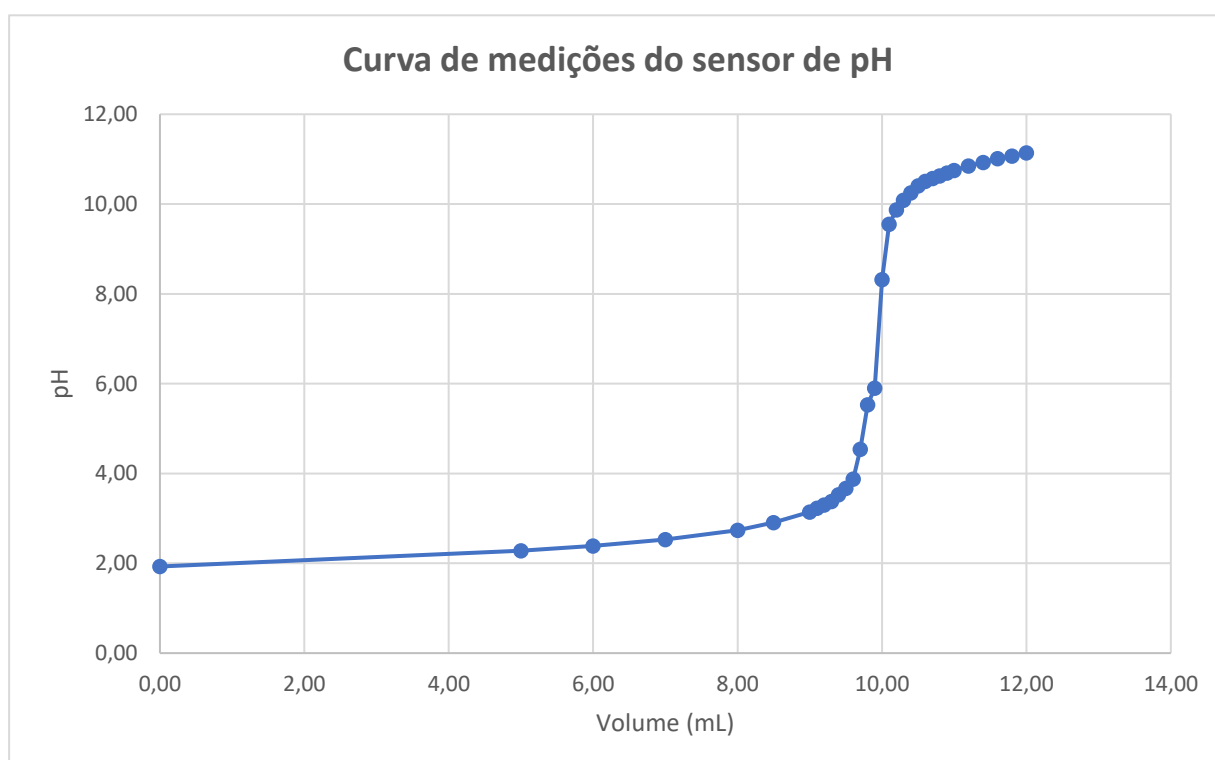
Com essa tabela gerou-se 3 gráficos, sendo eles a curva de pontos do pHmetro, primeira derivada e segunda derivada.

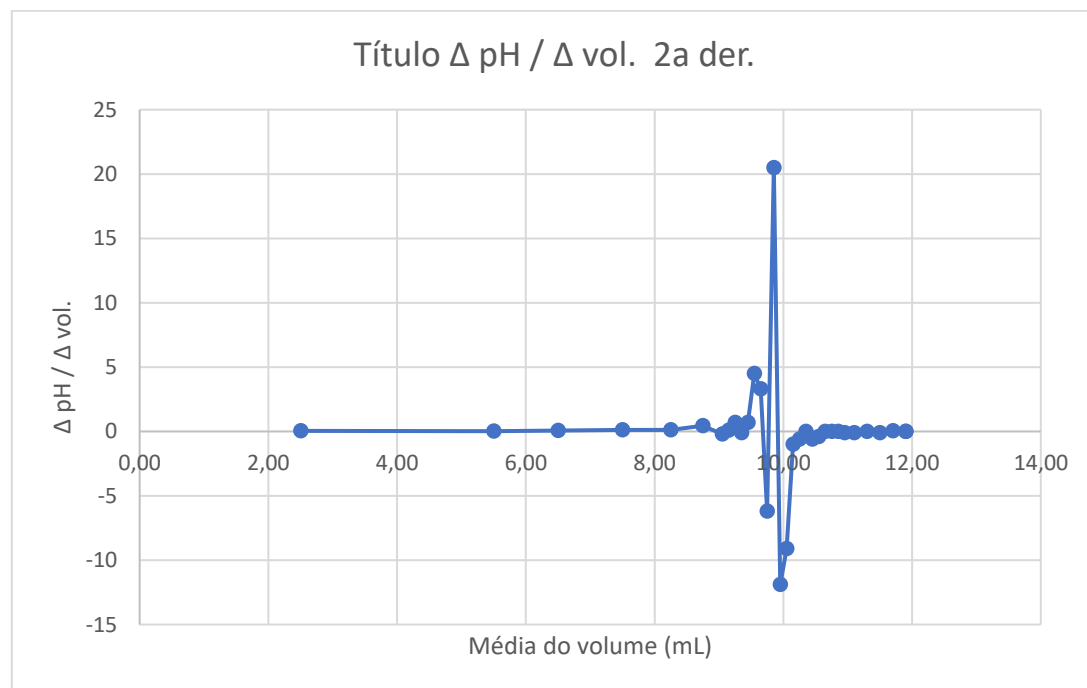
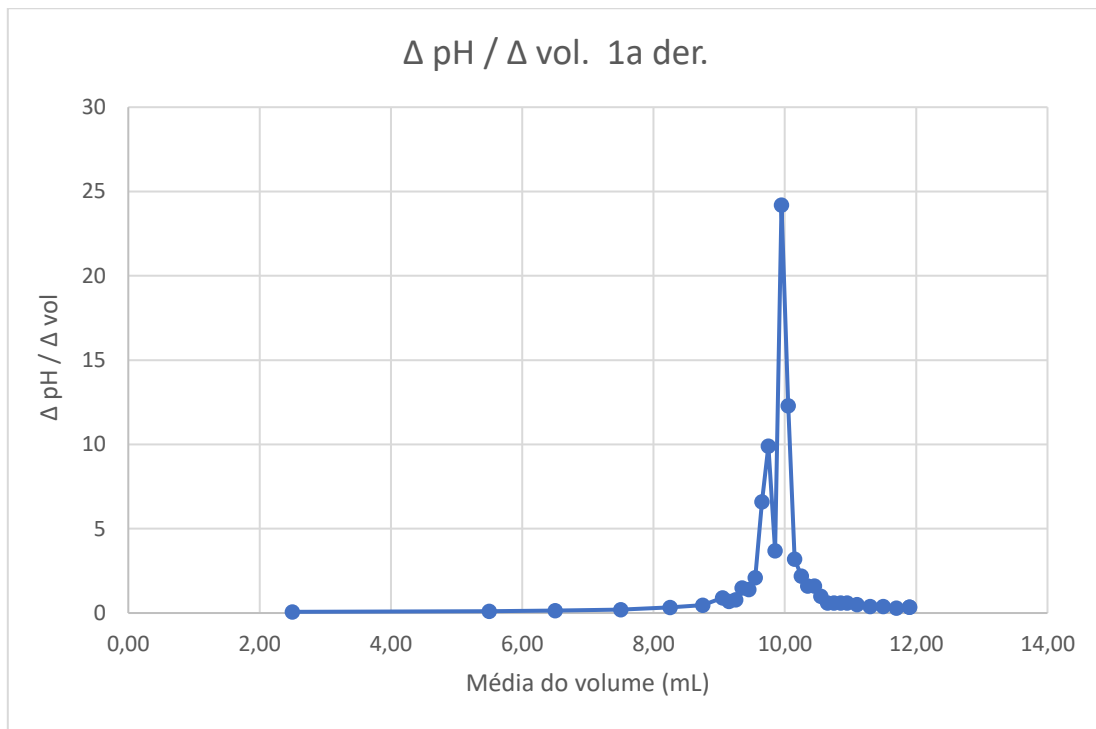
A primeira e a segunda derivada são conceitos importantes no cálculo diferencial, usados para analisar funções e entender como elas se comportam.

A primeira derivada de uma função $f(x)$ fornece a taxa de variação ou a inclinação da função em relação à variável independente, geralmente representada por x . Em termos simples, ela nos diz o quão rapidamente a função está mudando em um determinado ponto.

Já a segunda derivada de uma função $f(x)$ é a derivada da primeira derivada. Ela descreve a taxa de variação da inclinação, ou seja, como a taxa de variação da função muda à medida que x varia. Geometricamente, a segunda derivada está relacionada à curvatura da função.

Gráfico 2, 3 e 4 – Resultado da análise da potenciométrica do sensor de pH de bancada.

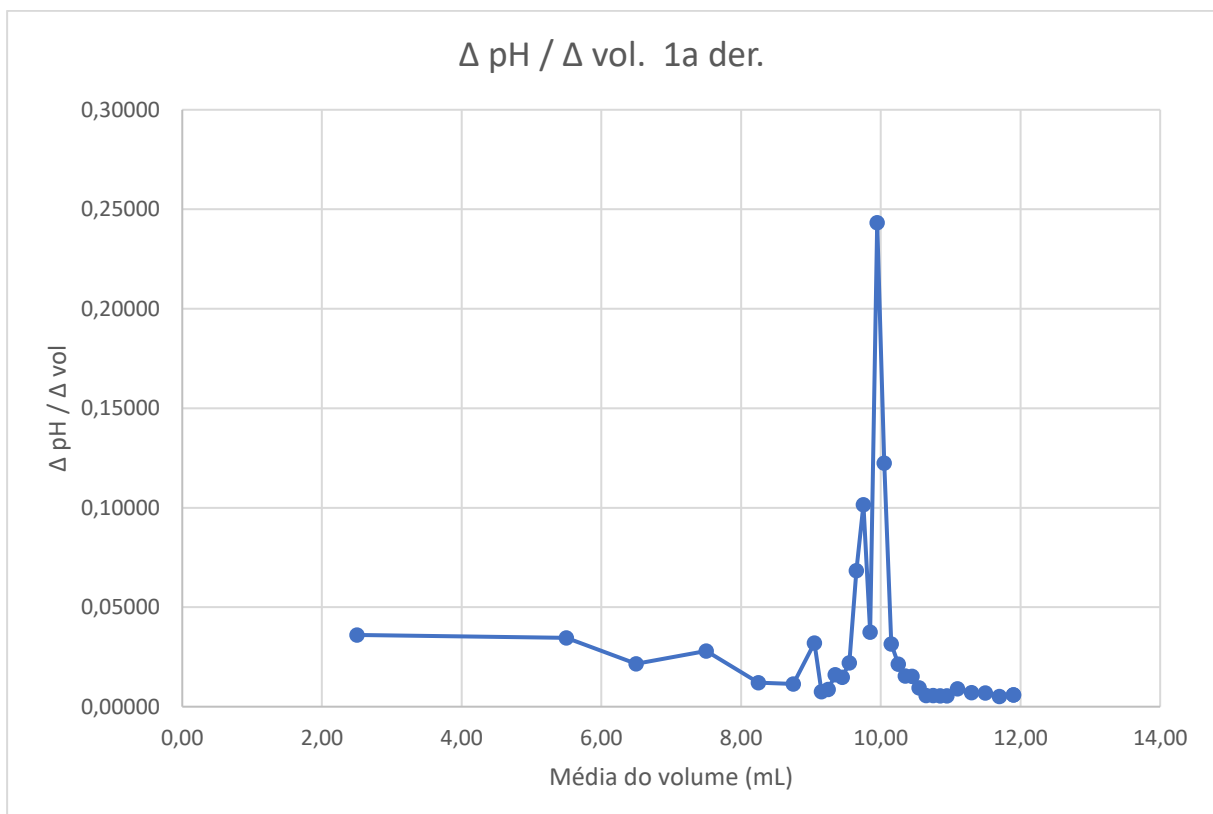
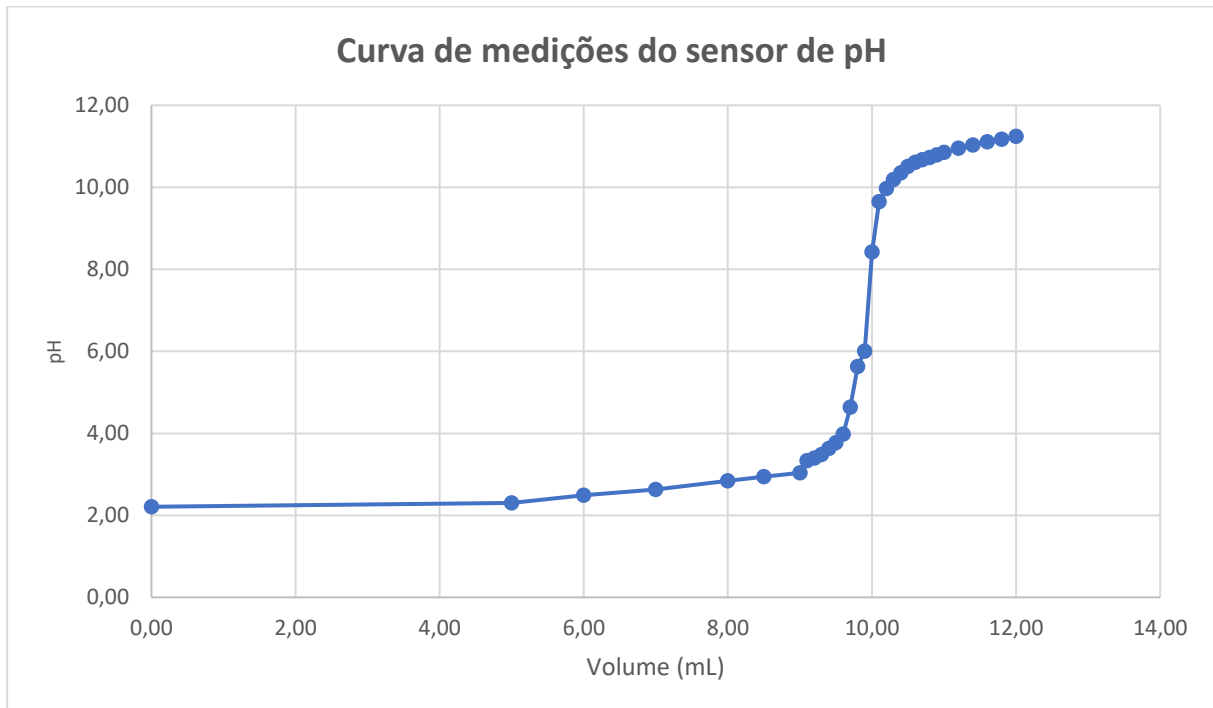


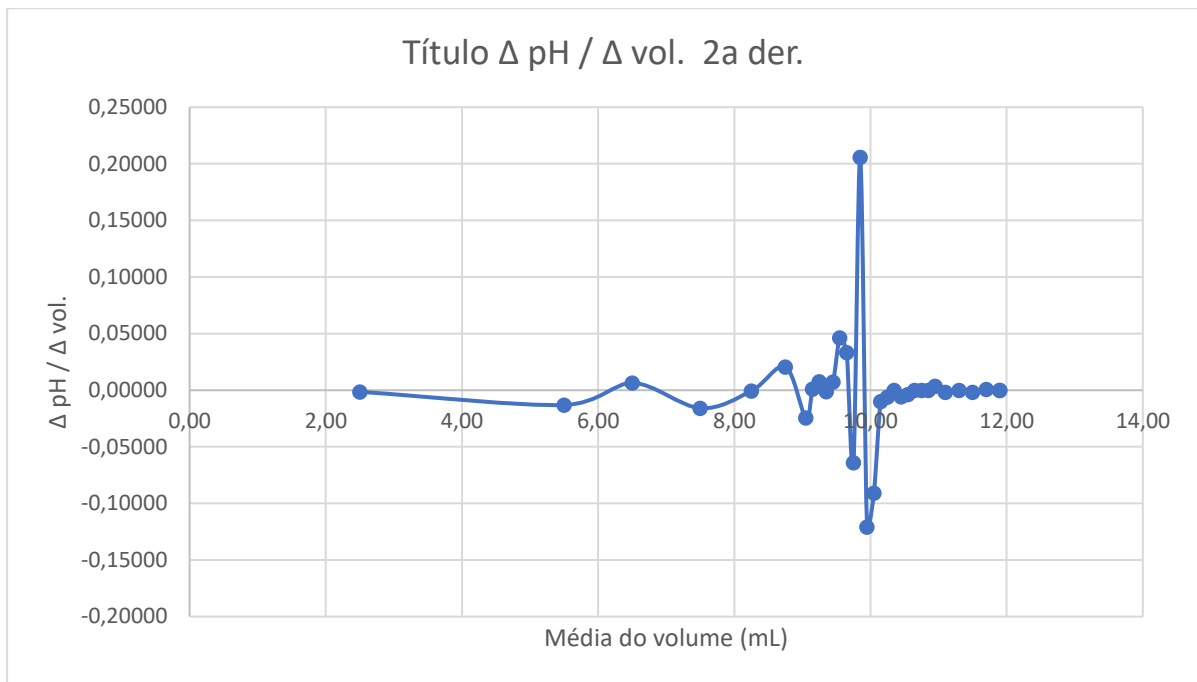


Fonte: Os autores, 2024.

Com isso, realizou-se o mesmo procedimento para o sensor de pH do titulador, obtendo os resultados nos gráficos 5, 6 e 7.

Gráfico 5, 6 e 7 - Resultado da análise da potenciométrica do sensor de pH do titulador.





Fonte: Os autores, 2024.

Com a análise dos seis gráficos apresentados, é possível concluir que, em todos eles, tanto o pHmetro de bancada quanto o sensor de pH do titulador automatizado mantiveram medições muito próximas. No entanto, foi observado que o sensor de pH do sistema automatizado apresentou maior variação em comparação ao pHmetro de bancada do laboratório.

O erro no pH medido pelo sistema automatizado foi calculado com base nas diferenças de pH registradas em ambos os volumes adicionados. O valor do erro relativo foi de 1,2%, indicando que o pHmetro calibrado no titulador possui um erro relativamente baixo para medições de pH, evidenciando a eficiência do sistema mesmo com as pequenas variações identificadas.

3. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

Foi desenvolvido um sistema automatizado de titulação baseado na plataforma Arduino Uno, com o objetivo de modernizar e aprimorar a técnica clássica de titulação, muito utilizada na química analítica.

O protótipo integrado com sensor de pH e bomba peristáltica controladas eletronicamente proporcionou um controle constante durante o processo de adição do titulante, o que resultou na redução de erros no ponto de equivalência. Os ensaios realizados confirmaram a funcionalidade do sistema, que demonstrou ser capaz de realizar titulações, com resultados consistentes e reproduzíveis.

A interface gráfica em LCD, por sua vez, ofereceu uma experiência interativa e facilitou o monitoramento do processo pelo operador. O sistema se apresentou como uma alternativa eficiente, de baixo custo e fácil implementação, com grande potencial para ser adotado em contextos acadêmicos e futuramente em indústrias.

O desenvolvimento do protótipo apresentou desafios consideráveis, especialmente na parte de programação do Arduino e na integração dos componentes eletrônicos. A calibração do sensor de pH, por exemplo, exigiu um processo de ajustes contínuos e testes exaustivos para garantir resultados precisos.

Além disso, a montagem e a conexão dos diversos módulos, como a bomba peristáltica e o sensor de pH, exigiram um grande esforço para assegurar que todas as partes funcionassem de forma integrada. Apesar das dificuldades enfrentadas, o trabalho foi extremamente enriquecedor, contribuindo significativamente para o aprimoramento das habilidades técnicas dos autores.

A experiência também reforçou a importância da multidisciplinaridade, uma vez que a realização do projeto envolveu conhecimentos em áreas como programação, eletrônica, e química analítica.

O desenvolvimento do protótipo abre diversas possibilidades para a continuidade do desenvolvimento do sistema automatizado de titulação.

Futuras melhorias podem ser feitas, como o aprimoramento da interface do usuário, tornando-a mais intuitiva e acessível, e a otimização do código para torná-lo mais eficiente e de fácil manutenção. Além disso, a utilização de uma placa de circuito impresso (PCB) no lugar do protoboard atual garantirá maior robustez e durabilidade ao protótipo, o que é essencial para garantir a estabilidade do sistema em aplicações de longo prazo.

Também é possível a adoção de um microcontrolador mais compacto e com maior capacidade de processamento, o que permitiria a redução do tamanho do dispositivo, além de aumentar sua precisão e desempenho. Outro caminho promissor é a utilização do protótipo para a análise de amostras mais complexas, como líquidos industriais, bebidas e produtos farmacêuticos, ampliando as áreas de aplicação do sistema.

4. REFERÊNCIAS

VAI Química. Titulação ácido-base. S.l.: VAI Química, 2024. Disponível em: <https://vaiquimica.com.br/titulacao-acido-base/>. Acesso em: 6 nov. 2024.

Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB). Emergência: diluição e neutralização. São Paulo: CETESB, 2013. Disponível em: https://cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/sites/22/2013/12/emerg_dil_neut.pdf. Acesso em: 6 nov. 2024.

MANUAL DA QUÍMICA. Conceito de pH. Disponível em: <https://www.manualdaquimica.com/fisico-quimica/conceito-ph.htm>. Acesso em: 6 nov. 2024.

PROLAB. pHmetro de bancada: entenda sua função e como usar o equipamento corretamente. Disponível em: <https://www.prolab.com.br/blog/equipamentos-aplicacoes/phmetro-de-bancada-entenda-sua-funcao-e-como-usar-o-equipamento-corretamente/>. Acesso em: 14 nov. 2024.

SILVA, R. "Técnicas de titulação automatizada: princípios e aplicações". Revista de Química e Tecnologia, v. 45, n. 3, p. 123-129, 2019. Acesso em: 20 nov. 2024.

COSTA, A. L. et al. "Automação em processos analíticos: estudo de caso de tituladores automáticos". Journal of Analytical Chemistry, v. 52, n. 7, p. 456-462, 2020. Acesso em: 20 nov. 2024.

OLIVEIRA, M. R. "Uso de equipamentos automáticos em laboratórios químicos". Química Industrial, v. 34, n. 2, p. 87-94, 2021. Acesso em: 20 nov. 2024.

SANTOS, R. A. et al. "Desenvolvimento de tituladores automatizados baseados em Arduino: uma abordagem educacional". *Revista Brasileira de Química Aplicada*, v. 12, n. 3, p. 89-97, 2022. Acesso em: 20 nov. 2024.

MENDES, C. F.; PEREIRA, J. L. "Tituladores de baixo custo: integração de sensores e microcontroladores Arduino". *Revista de Instrumentação Científica*, v. 8, n. 1, p. 45-52, 2021. Acesso em: 20 nov. 2024.

OLIVEIRA, G. R. et al. "Automação e acessibilidade em sistemas de análise química: o papel do Arduino em laboratórios acadêmicos". *Journal of Open Hardware and Science*, v. 5, n. 4, p. 102-111, 2020. Acesso em: 20 nov. 2024.

MACHADO Jr., R. "Desenvolvimento de um titulador baseado na plataforma Arduino para o ensino de química". *Revista de Educação Química*, v. 7, n. 2, p. 45-53, 2019. Acesso em: 20 nov. 2024.

SANTANA, P. F. "Titulador automático em fluxo-batelada para determinação de acidez total de vinhos tintos". *Química Nova*, v. 41, n. 6, p. 726-731, 2018. Acesso em: 20 nov. 2024.

SIQUEIRA, M. F. "Titulador automático baseado em filmes digitais para determinação de dureza e alcalinidade total de águas minerais". *Revista Brasileira de Análise de Águas*, v. 10, n. 3, p. 135-142, 2016. Acesso em: 20 nov. 2024.

SOARES, T. R. et al. "Desenvolvimento de tituladores automáticos em fluxo-batelada com Arduino: análise e aplicação". *Journal of Analytical Automation*, v. 15, n. 4, p. 233-245, 2021. Acesso em: 20 nov. 2024.

SOONG, R. et al. "Accessible titration using open-source robotics for inclusive education". *Journal of Universal Design in Chemistry Education*, v. 12, n. 3, p. 98-107, 2019. Acesso em: 20 nov. 2024.

OLIVEIRA, A. M. et al. "Tituladores automáticos: eficiência e limitações em laboratórios de pequeno porte". *Química Industrial*, v. 22, n. 5, p. 67-73, 2010. Acesso em: 20 nov. 2024.

EMBARCADOS. Arduino Uno: Introdução e detalhes sobre a placa mais utilizada da plataforma Arduino. Disponível em: <https://embarcados.com.br/arduino-uno/>. Acesso em: 20 nov. 2024.

GEDDES, M. Arduino Project Handbook. 2. ed. Londres: Wiley, 2017. Acesso em: 20 nov. 2024.

MCROBERTS, M. Beginning Arduino. 2. ed. Nova York: Apress, 2018. Acesso em: 20 nov. 2024.

SOUZA, C. R.; OLIVEIRA, A. F.; SILVA, J. R. "A utilização do Arduino em projetos interativos". Revista Brasileira de Tecnologia Educacional, v. 5, n. 3, p. 25-33, 2011. Acesso em: 20 nov. 2024.

GEDDES, M. Arduino Project Handbook. 2. ed. Londres: Wiley, 2017. Acesso em: 20 nov. 2024.

MOTA, C. F. Introdução ao Arduino: conceitos e aplicações. São Paulo: Novatec, 2017. Acesso em: 20 nov. 2024.

SOUZA, M. et al. Aplicações do Arduino em sistemas embarcados. In: Anais do Congresso Brasileiro de Computação. Porto Alegre: SBC, 2011. Acesso em: 20 nov. 2024.

LOPES, P. Bombeamento de fluidos em aplicações industriais. São Paulo: TecnoFluídos, 2020. Acesso em: 20 nov. 2024.

MARTINS, F. R.; SOUZA, G. R.; ALMEIDA, C. S. Estudo de aplicações de bombas peristálticas em processos industriais. In: Anais do Congresso de Engenharia e Tecnologia. Belo Horizonte: CETEC, 2016. Acesso em: 20 nov. 2024.

MORAES, J. F. Equipamentos em processos farmacêuticos: aplicações e princípios de funcionamento. Rio de Janeiro: PharmaTech, 2016. Acesso em: 20 nov. 2024.

PINHEIRO, A. P. et al. Bombeamento peristáltico e aplicações médicas. In: Anais do Simpósio Nacional de Engenharia Biomédica. Recife: SENB, 2018. Acesso em: 20 nov. 2024.

AR COMPRIMIDO. Funcionamento bombas peristálticas. Disponível em: https://arcomprimido.com.br/funcionamento_bombas_peristalticas/. Acesso em: 20 nov. 2024.

AUTODESK. Tinkercad. Disponível em: <https://www.tinkercad.com/dashboard>. Acesso em: 24 nov. 2024.

NEW-WAVE CONCEPTS. *Circuit Wizard*. Disponível em: <https://www.new-wave-concepts.com/ed/circuit.html>. Acesso em: 25 nov. 2024.

MONOGRAFIAS UFOP. Protótipo para corrosão otimizada de placas de circuito impresso utilizando solução aquosa de percloroato de ferro. 2023. Disponível em: <http://www.monografias.ufop.br/handle/35400000/4043>. Acesso em: 26 nov. 2024.

4. APÊNDICE

4.1 Programação da calibração da bomba peristáltica

```
#include <Keypad.h>

// Definindo os pinos
const int bombaPin = 2; // Pino da bomba (relé)

const byte LINHAS = 4;
const byte COLUNAS = 4;

// Mapeamento das teclas do teclado matricial
char teclas[LINHAS][COLUNAS] = {
  {'1', '2', '3', 'A'},
  {'4', '5', '6', 'B'},
  {'7', '8', '9', 'C'},
  {'*', '0', '#', 'D'}
};

byte pinosLinhas[LINHAS] = {4, 5, 6, 7}; // Pinos das linhas
byte pinosColunas[COLUNAS] = {8, 9, 10, 11}; // Pinos das colunas

Keypad teclado = Keypad(makeKeymap(teclas), pinosLinhas,
pinosColunas, LINHAS, COLUNAS);

void setup() {
  // Configurando os pinos
  pinMode(bombaPin, OUTPUT); // Configura a bomba como saída
  digitalWrite(bombaPin, HIGH); // Bomba começa desligada
}

void loop() {
  // Lê a tecla pressionada
  char tecla = teclado.getKey();

  // Verifica se a tecla foi pressionada
  if (tecla == 'A') { // Se a tecla 'A' for pressionada
    digitalWrite(bombaPin, LOW); // Liga a bomba (LOW para ativar o
relé)
    delay(60000); // Espera 1 minuto (60000 milissegundos)
    digitalWrite(bombaPin, HIGH); // Desliga a bomba após 1 minuto
  }
}
```

4.2 Programação do titulador

```
#include <Keypad.h> //Biblioteca do teclado matricial
#include <Wire.h> //Biblioteca para comunicação para o I2C
#include <LiquidCrystal_I2C.h> //Biblioteca para LCD I2C

LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 4); // Configuração do LCD
const int PH = A0; // Pino do sensor de pH
const int RELE_BOMBA = 2; // Pino do relé para a bomba peristáltica
const int AGITADOR = 3; // Pino do relé para o motor de agitação
const int LED = 12; // Pino do LED para indicar a bomba

// Configuração do Keypad
const byte LINHAS = 4;
const byte COLUNAS = 4;

char teclas[LINHAS][COLUNAS] = { //teclas do teclado matricial

    {'1', '2', '3', 'A'},
    {'4', '5', '6', 'B'},
    {'7', '8', '9', 'C'},
    {'*', '0', '#', 'D'}
};

byte pinosLinhas[LINHAS] = {4, 5, 6, 7}; // Pinos das linhas
byte pinosColunas[COLUNAS] = {8, 9, 10, 11}; // Pinos das colunas

Keypad teclado = Keypad(makeKeymap(teclas), pinosLinhas,
pinosColunas, LINHAS, COLUNAS); // mapeia as linhas e as colunas

bool sistemaLigado = false; //determina sistema como desligado
bool medirpH = false; //determina medição de pH como desligado
bool ambientando = false; //determina ambientação como desligado
bool titulando = false; //determina titulação como deligada
float volumeUtilizado = 0.0; //Valor decimal do volume utilizado
pela bomba peristáltica
float volumepipetado = 0.0; //Valor decimal do volume pipetado a ser
inserido
float molaridadetitulante = 0.0; //Valor decimal da molaridade do
titulante a ser inserido
float molaridadetitulado = 0.0; //Valor decimal da molaridade do
titulado a ser inserido
float fctitulante = 0.0; //Valor decimal do titulante a ser inserido
float fctitulado = 0.0; //Resultado do fator de correção em decimal
float molaridadereal = 0.0; //Resultado da mol real em decimal
float m = 0.0; // Coeficiente angular
float b = 0.0; // Coeficiente linear
```

```

float inserirNumero() { //Número decimal a ser inserido
  String entrada = "";
  char tecla;

  while (true) {
    tecla = teclado.getKey(); //Configura o teclado matricial

    if (tecla == 'D') { // Confirmação com 'D'
      return entrada.toFloat();
    }
    if (tecla == '#') { // Apagar último caractere
      if (entrada.length() > 0) {
        entrada.remove(entrada.length() - 1);
        lcd.setCursor(0, 1);
        lcd.print("                "); // Limpa a linha de entrada
        lcd.setCursor(0, 1);
        lcd.print(entrada); // Exibe a entrada atualizada
      }
    }
    if (tecla == '*' || (tecla >= '0' && tecla <= '9')) {
//Configuração do botão voltar (*)
      entrada += (tecla == '*') ? '.' : tecla;
      lcd.setCursor(0, 1);
      lcd.print(entrada);
    }
  }
}

void setup() {

  pinMode(RELE_BOMBA, OUTPUT); //Define o Rele como saída
  pinMode(AGITADOR, OUTPUT); //Define o Agitador como saída
  pinMode(LED, OUTPUT); //Define o Led como saída
  digitalWrite(RELE_BOMBA, HIGH); // Desliga a bomba
  digitalWrite(AGITADOR, LOW); // Desliga o motor (lógica invertida)
  digitalWrite(LED, LOW); // LED desligado
  analogWrite(AGITADOR, 0); // Agitador desligado (estado inicial)

  // Ativa resistores pull-up internos nos pinos do keypad
  for (int i = 0; i < LINHAS; i++) { //Pull-up das linhas
    pinMode(pinosLinhas[i], INPUT_PULLUP);
  }
  for (int i = 0; i < COLUNAS; i++) { //Pull-up das colunas
    pinMode(pinosColunas[i], INPUT_PULLUP);
  }

  lcd.init();
  lcd.backlight(); //liga a luz de trás do LCD
  lcd.clear(); //Esvazia a tela do LCD
}

```

```

//Exibe na tela TITULADOR AUTOMATICO
lcd.home();
lcd.print("  TITULADOR  ");
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print("  AUTOMATICO  ");
delay(1000);

//Limpa a tela e exibe na tela FEITO PELA: ETEC JM
lcd.clear();
lcd.home();
lcd.print("  FEITO PELA:  ");
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print("    ETEC JM    ");
delay(1000);

//Limpa a tela e exibe na tela APERTE A PARA INICIAR
lcd.clear();
lcd.home();
lcd.print("  APERTE A  ");
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print("  PARA INICIAR");
}

void loop() {
  char tecla = teclado.getKey(); //Para interação do teclado
matricial com o menu

  if (tecla == 'A') { //Se o usuário pressionar a tecla A o sistema
será ligado
    sistemaLigado = !sistemaLigado;
    lcd.clear();

    if (sistemaLigado) { //Se o sistema for ligado exibe o menu
principal
      exibirMenu();
    }
    //Se o sistema for desligado, exibe SISTEMA DESLIGADO e depois
de limpar a tela exibe APERTE A PARA INICIAR
    else {
      lcd.home();
      lcd.print("    SISTEMA");
      lcd.setCursor(0, 1);
      lcd.print("    DESLIGADO");
      delay(1000);
      lcd.clear();
      lcd.print("  APERTE A  ");
      lcd.setCursor(0, 1);
      lcd.print("  PARA INICIAR");
    }
  }
}

```

```

// Desliga tudo ao desligar o sistema
digitalWrite(RELE_BOMBA, HIGH); //Lógica da bomba é invertida,
quando está 'HIGH' encontra-se deligado e vice-versa
digitalWrite(AGITADOR, LOW);
digitalWrite(LED, LOW);
medirpH = false;
ambientando = false;
titulando = false;
volumeUtilizado = 0.0;
volumepipetado = 0.0;
molaridadetitulante = 0.0;
molaridadetitulado = 0.0;
fctitulante = 0.0;
fctitulado = 0.0;
molaridadereal = 0.0;
}
}

if (sistemaLigado && tecla) { //se o sistema estiver ligado e
indentificar alguma tecla pressionada

    if (tecla == '1' && !titulando) { //Se apertar a tecla 1 começa
a medir o pH
        medirpH = true;
        ambientando = false;
        lcd.clear();
        lcd.print("MEDIR pH");
        delay(1000);
        lcd.clear();
    }
    else if (tecla == '2' && !titulando) { //Se apertar a tecla 2
começa a ambientar a bomba peristáltica
        ambientando = true;
        medirpH = false;

        //Exibe na tela AMBIENTANDO AGUARDE 6 SEG
        lcd.clear();
        lcd.print("  AMBIENTANDO");
        lcd.setCursor(0, 1);
        lcd.print("  AGUARDE 6 SEG");
        ambientar();
    }
    else if (tecla == '3' && !titulando) { //Se apertar a tecla 3
prossegue o processo de titulação

        //Escolha por inserir ou não dados para titulação
        lcd.clear();
        lcd.print(" Inserir Dados.?");
        lcd.setCursor(0, 1);
        lcd.print(" 1-Sim 2-Nao");
    }
}
}

```

```

char escolha = 0;
while (escolha != '1' && escolha != '2') {
    escolha = teclado.getKey();
}

if (escolha == '2') {} //Se apertar a tecla 2 pula o processo
de inserir dados

if (escolha == '1' || escolha == '2') {

    //Se apertar a tecla 1 solicita os dados da titulação
    if (escolha == '1') {
        titulando = true;
        medirpH = false;
        ambientando = false;

        //Solicita a Concentração do titulante
        lcd.clear();
        lcd.print("Conc. titulante"); //Concentração do Titulante
        lcd.setCursor(0, 1);
        molaridadetitulante = inserirNumero();

        //Solicita a fator de correção do titulante
        lcd.clear();
        lcd.print("Fc do titulante");
        lcd.setCursor(0, 1);
        fctitulante = inserirNumero();

        //Solicita a Concentração do titulado
        lcd.clear();
        lcd.print(" Conc. titulado");
        lcd.setCursor(0, 1);
        molaridadetitulado = inserirNumero();

        //Solicita o volume pipetado
        lcd.clear();
        lcd.print(" Vol. Pipetado");
        lcd.setCursor(0, 1);
        volumepipetado = inserirNumero();
    }

    // Pergunta e confirmação da velocidade do agitador
    char escolhaVelocidade = 0;
    int velocidadeAgitador = 0;
    bool velocidadeConfirmada = false;

    while (!velocidadeConfirmada) {

        // Sempre desligar o agitador ao entrar no menu de seleção de
        velocidade

```

```

analogWrite(AGITADOR, 0);

// Exibe menu de seleção de velocidade
lcd.clear();
lcd.print("Vel. Agitador?");
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print("1-Lento 2-Medio");
lcd.setCursor(0, 2);
lcd.print(" 3-Rapido");

// Aguarda a seleção do usuário
char escolhaVelocidade = 0;
while (escolhaVelocidade != '1' && escolhaVelocidade != '2' &&
escolhaVelocidade != '3' && escolhaVelocidade != '0') {
    escolhaVelocidade = teclado.getKey();
}

// Verificar escolha do usuário
if (escolhaVelocidade == '0') {

    // Caso o usuário cancele a seleção
    lcd.clear();
    lcd.print(" Sem ajuste...");
    delay(1000);
    continue; // Volta ao menu inicial
}

// Configurar velocidade de acordo com a escolha
int velocidadeAgitador = 0;
if (escolhaVelocidade == '1') {
    velocidadeAgitador = 100; // Velocidade lenta
} else if (escolhaVelocidade == '2') {
    velocidadeAgitador = 125; // Velocidade média
} else if (escolhaVelocidade == '3') {
    velocidadeAgitador = 150; // Velocidade rápida
}

// Liga o agitador com a velocidade escolhida
analogWrite(AGITADOR, velocidadeAgitador);

// Exibe o menu de confirmação
lcd.clear();
lcd.print("Vel: ");
lcd.print((escolhaVelocidade == '1') ? "Lento" :
(escolhaVelocidade == '2') ? "Medio" : "Rapido");
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print(" 1-Conf 2-Ajust");

```

```

// Aguardar confirmação ou ajuste
char confirmacao = 0;
while (confirmacao != '1' && confirmacao != '2') {
    confirmacao = teclado.getKey();
}

if (confirmacao == '1') { // Confirma a velocidade
    velocidadeConfirmada = true;
}

else {
    // Ajustar: desligar agitador e retornar ao menu
    analogWrite(AGITADOR, 0);
}
}

// Confirma o início da titulação
lcd.clear();
lcd.print(" Iniciar Titu.?");
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print(" 1-Sim 2-Nao");

//Aguarda a escolha do usuário
char escolha1 = 0;
while (escolha1 != '1' && escolha1 != '2') {
    escolha1 = teclado.getKey();
}

if (escolha1 == '1') { //Escolha para iniciar titulação
    lcd.clear();
    lcd.print(" TITULANDO !");

    delay(1000);
    lcd.clear();
    titulando = true;
} else {
    // Reinicia variáveis e retorna ao menu principal
    titulando = false;
    medirpH = false;
    ambientando = false;
    volumeUtilizado = 0.0;
    volumepipetado = 0.0;
    molaridadetitulante = 0.0;
    molaridadetitulado = 0.0;
    fctitulante = 0.0;
    fctitulado = 0.0;
    molaridadereal = 0.0;
    lcd.clear();
    exibirMenu();
}
}
}

```

```

    }
}

if (tecla == '4') { //Escolha para a calibração do pHmetro
    calibrarPH();
}

if (medirpH) {
    medirPH();
    if (tecla == '*') { //Retorna para o menu principal
        lcd.clear();
        medirpH = false;
        exibirMenu();
    }
}

if (titulando) {
    titular();
    if (tecla == '*') { //Retorna para o menu principal
        lcd.clear();
        titulando = false;

        digitalWrite(RELE_BOMBA, HIGH);
        digitalWrite(AGITADOR, LOW); // Desliga o motor quando sai da
titulação
        digitalWrite(LED, LOW);
        volumeUtilizado = 0.0;
        exibirMenu();
    }
}

}

void exibirMenu() {
    lcd.clear();
    lcd.print(" 1      2      3"); //opções numericas
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("pH      Ambi Titu"); //Descrição das opções numericas
    lcd.setCursor(0, 3);
    lcd.print("4 - Calibrar pH");
}

void ambientar() {
    digitalWrite(RELE_BOMBA, LOW); //Logica invertida - bomba liga
    digitalWrite(LED, HIGH); //Led indicador do acionamento
    delay(6000);
    digitalWrite(RELE_BOMBA, HIGH); //Logica invertida - bomba desliga
    digitalWrite(LED, LOW);
    lcd.clear();
    exibirMenu();
}
}

```

```

void calibrarPH() { //Acionamento da calibração que solicita a
solução tampão
  lcd.clear();
  lcd.print("Insira o tampao");
  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print("      6.86");
  lcd.setCursor(0, 3);
  lcd.print("D - Confirmar");

  // Espera o usuário confirmar que o tampão 6,86 está inserido
  while (true) {
    char key = teclado.getKey(); // Alterado para 'teclado'
    if (key == 'D') {
      break; // Sai do loop ao pressionar 'D'
    }
  }

  // Calibração do primeiro tampão
  lcd.clear();
  lcd.print("Calibrando 6.86");
  delay(1000); // Tempo para estabilizar leitura
  float v1 = analogRead(A0); // Leitura analógica do pHmetro
  delay(10000); // Aguarda 30 segundos para calibrar

  // Solicita o segundo tampão
  lcd.clear();
  lcd.print("Insira o tampao");
  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print("      4.01");
  lcd.setCursor(0, 3);
  lcd.print("D - Confirmar");

  // Espera o usuário confirmar que o tampão 4,01 está inserido
  while (true) {
    char key = teclado.getKey(); // Alterado para 'teclado'
    if (key == 'D') {
      break; // Sai do loop ao pressionar 'D'
    }
  }

  // Calibração do segundo tampão
  lcd.clear();
  lcd.print("Calibrando 4.01");
  delay(1000); // Tempo para estabilizar leitura
  float v2 = analogRead(A0); // Leitura analógica do pHmetro
  delay(10000); // Aguarda 30 segundos para calibrar

  // Cálculo dos coeficientes m e b
  m = (4.01 - 6.86) / (v2 - v1);
  b = 6.86 - (m * v1);

```

```

// Exibe que a calibração foi concluída
lcd.clear();
lcd.print("Cali. Finalizada");
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print("m="); //Exibição do coeficiente angular
lcd.print(m, 4);
lcd.print(" b="); //Exibição do coeficiente linear
lcd.print(b, 4);
delay(5000);

// Volta para o menu
lcd.clear();
exibirMenu();
}

void medirPH() {

    // Leitura do sensor
    int leitura = analogRead(PH); // Leitura analógica do sensor
    float pH = m * leitura + b; // Conversão para pH

    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("pH:");
    lcd.setCursor(5, 0);
    lcd.print(pH, 2); // Mostra o valor médio com 2 casas decimais
    lcd.setCursor(14, 0);
    lcd.print(" "); // Limpa resíduos de caracteres antigos

    delay(1000); // Aguarda 1 segundo antes de atualizar
}

void titular() {

    // Leitura do sensor
    int leitura = analogRead(PH); // Leitura analógica do sensor
    float pH = m * leitura + b; // Conversão para pH

    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("pH: ");
    lcd.setCursor(4, 0);
    lcd.print(pH, 2);
    lcd.setCursor(9, 0);
    lcd.print(" ");

    if (pH <= 6.0 && pH <=7.0) {
        digitalWrite(RELE_BOMBA, LOW);
        digitalWrite(LED, HIGH);
        delay(500);
        digitalWrite(RELE_BOMBA, HIGH);
        digitalWrite(LED, LOW);
    }
}

```

```

    volumeUtilizado += 0.5 * 1.6736;
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("Volume: ");
    lcd.print(volumeUtilizado, 3);
    lcd.print(" mL");

    delay(10000);

    }else {
        delay(5000);
        digitalWrite(AGITADOR, LOW);
        lcd.clear();
        resultados();
    }
}

void resultados() {
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("  Exibir");
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("  Resultados?");
    lcd.setCursor(0, 3);
    lcd.print("  1-Sim 2-Nao");

    char escolha2 = 0;
    while (escolha2 != '1' && escolha2 != '2') {
        escolha2 = teclado.getKey();
    }
    if (escolha2 == '1') {
        titulando = false;
        medirpH = false;
        ambientando = false;

        float fctitulado = ((molaridadetitulante * fctitulante *
volumepipetado)/(molaridadetitulado * volumeUtilizado));
        float molaridadereal = fctitulado * molaridadetitulado;
        delay(1000);

        lcd.clear();
        lcd.print("Fc. Titu:");
        lcd.setCursor(10, 0);
        lcd.print(fctitulado);
        lcd.setCursor(0, 1);
        lcd.print("MR Titu:");
        lcd.setCursor(9, 1);
        lcd.print(molaridadereal);

    }else {
        titulando = false;

```

```

    medirpH = false;
    ambientando = false;
    lcd.clear();

    digitalWrite(RELE_BOMBA, HIGH);
    digitalWrite(AGITADOR, LOW); // Desliga o motor quando sai da
titulação
    digitalWrite(LED, LOW);
    volumeUtilizado = 0.0;
    volumepipetado = 0.0;
    molaridadetitulante = 0.0;
    molaridadetitulado = 0.0;
    fctitulante = 0.0;
    fctitulado = 0.0;
    molaridadereal = 0.0;
    exibirMenu();

    }

char escolha4 = 0;

    while (escolha4 != '*') {
        escolha4 = teclado.getKey();

    }
    if (escolha4 == '*') {
        titulando = false;
        medirpH = false;
        ambientando = false;
        exibirMenu();

    }
}

```