

Ensino

Desenvolvimento de um sistema automático para a síntese de nanopartículas usando Open-Source Arduino

Development of an automatic system for the synthesis of nanoparticles using Open-Source Arduino

Vicente Brito Soares¹ , Jhonny Oswaldo Huertas Flores¹ 

¹ Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema automatizado para a síntese de nanomateriais pelo método de coprecipitação com controle de pH. O sistema parte de testes com uma bomba controlada por sinal PWM, evoluindo para a implementação de um sistema composto por duas bombas peristálticas e um sensor de pH. O sistema foi projetado para realizar a leitura em tempo real do pH de uma mistura aquosa reacional e, a partir dessa leitura, acionar de forma seletiva as bombas responsáveis pela adição da solução ácida ou básica, de modo a manter o pH dentro da faixa desejada. O sistema foi desenvolvido utilizando um Arduino como microcontrolador. No código, foram aplicadas técnicas de tratamento de dados, e os dados foram armazenados na memória EEPROM, garantindo confiabilidade e repetibilidade. Para validar o sistema, realizou-se a síntese de nanopartículas de ZnO em três temperaturas distintas: 25 °C, 50 °C e 70 °C. Os resultados obtidos demonstraram a viabilidade do sistema, que se mostrou capaz de controlar o pH de forma eficiente. Partículas da fase ZnO foram obtidas nas três temperaturas no pH de síntese de $7,0 \pm 0,2$.

Palavras-chave: Sistema automático; Coprecipitação; Nanomateriais; Síntese química

ABSTRACT

This work presents the development of an automated system for the synthesis of nanomaterials via coprecipitation with pH control. The system starts with tests using a pump controlled by a PWM signal, then evolves to a system composed of two peristaltic pumps and a pH sensor. The system was designed to perform real-time pH measurements of an aqueous reaction mixture and, based on these readings, selectively activate pumps that add acidic or basic solutions to maintain the pH within the desired range. The system was developed using an Arduino as a microcontroller. Data processing techniques were implemented in the code, and the data were stored in EEPROM, ensuring reliability and repeatability.

To validate the system, ZnO nanoparticles were synthesized at 25 °C, 50 °C, and 70 °C. The results demonstrated the system's viability, showing it could efficiently control pH. ZnO phase particles were obtained at the three temperatures at a synthesis pH of 7.0 ± 0.2 .

Keywords: Automatic system; Coprecipitation; Nanomaterials; Chemical synthesis

1 INTRODUÇÃO

A nanotecnologia é uma nova tecnologia que pode trazer uma nova revolução em todos os campos da ciência (Rico, *et al.*, 2011). Ela tem sido amplamente aplicada em muitos setores industriais, incluindo os farmacêuticos (Díaz; Vivas-Mejia, 2013), têxteis (Abdelhady, 2012) e embalagens (Li, *et al.*, 2009). A nanotecnologia está associada a nanopartículas, agregados de átomos ou moléculas caracterizados por um tamanho inferior a 100 nm (Sabir, *et al.*, 2014).

A síntese de nanopartículas refere-se aos métodos de produção dessas partículas. As nanopartículas podem ser sintetizadas a partir de íons ou moléculas em meio aquoso que promovem etapas como a nucleação e o crescimento de partículas a partir de distribuições moleculares finas em fase líquida (Gutierrez, *et al.*, 2017). A síntese de nanomateriais com alto rendimento e baixo custo tem sido um grande desafio desde os primórdios da nanociência.

A coprecipitação é uma técnica química considerada conveniente e econômica para a preparação de nanopartículas. Nesse método, o metal precipita na forma de hidróxido ou óxido a partir de um precursor, na presença de um agente precipitante. Tanto o precursor quanto o agente precipitante são soluções aquosas que se misturam sob agitação constante, em condições de pH e temperatura controladas, para formar um sólido precipitado (Srivastava, *et al.*, 2022).

A síntese química é uma etapa fundamental em diversos setores da pesquisa científica e da indústria, exigindo um controle preciso de variáveis para garantir a eficiência e a reprodutibilidade dos compostos produzidos. Entre essas variáveis, o pH da solução desempenha papel crucial, influenciando diretamente o andamento das

reações químicas, a estabilidade da síntese e a qualidade do produto. Variações, mesmo que pequenas, no pH podem comprometer significativamente os resultados, tornando indispensáveis o monitoramento contínuo e o ajuste dinâmico desse parâmetro.

A síntese convencional por coprecipitação via gotejamento dos reagentes tem sido realizada em laboratório, com material de vidraria, como buretas e béqueres, termômetro e pH-metro, mantendo a mistura reacional em agitação constante. Esta metodologia não permite um controle adequado das vazões dos reagentes, nem muito menos um pH constante, o que se reflete na falta de reprodutibilidade das sínteses. O ideal seria o uso de um sistema automático didático para a produção de nanomateriais pelo método de coprecipitação, com controle da adição dos reagentes e do pH de síntese.

Com base nessa necessidade, o objetivo do trabalho foi projetar e construir um Sistema Automático de Síntese de Nanopartículas com controle de pH, por meio da adição de reagentes em solução aquosa, proporcionando precisão, agilidade e confiabilidade no processo de síntese. Esse sistema deverá ser capaz de monitorar o pH da mistura reacional em tempo real e realizar correções automáticas por meio da adição controlada de reagentes, garantindo um ambiente reacional estável e ideal para a síntese de nanopartículas pelo método de coprecipitação. Para validar o sistema foi conduzida a síntese de nanopartículas de ZnO. Nanopartículas de ZnO com tamanho e forma controlados por meio de sistemas de síntese química adequados são, de fato, uma importante área de estudo (Kahouli, *et al.*, 2015).

2 METODOLOGIA

2.1 Projeto do sistema automático

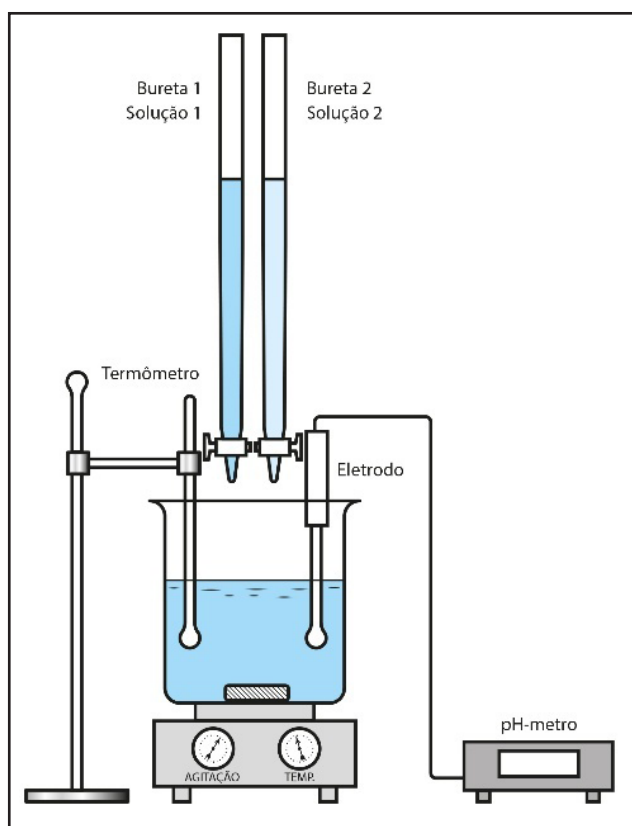
O projeto do sistema automático para a síntese de nanopartículas baseia-se na configuração utilizada em laboratório para a síntese de nanomateriais por

coprecipitação. A configuração que dá as bases para o sistema automático consiste em duas buretas, cada uma com solução diferente. Uma contendo o sal do metal e a outra, o agente precipitante. Ambas as soluções são adicionadas por gotejamento a um béquer contendo água destilada, um eletrodo para medir o pH e um termômetro. A água no béquer deve estar aquecida com uma chapa de aquecimento e agitada com um agitador magnético. Com a adição das soluções contidas nas buretas, o pH da mistura varia: a solução do sal metálico reduz o pH, enquanto a solução do agente precipitante o eleva. Dessa forma, para conduzir uma síntese em pH fixo, é necessário controlar manualmente o gotejamento das soluções nas buretas.

Esta configuração pode ser observada na Figura 1. A agitação da mistura deve ser vigorosa para obter homogeneidade. Geralmente, as concentrações das soluções nas buretas devem ser baseadas na estequiometria da reação que ocorre ao misturar as soluções. Para sínteses em pH neutro, a vazão de gotejamento em ambas as buretas deve ser igual; no entanto, esse controle não é fácil, pois é realizado por meio do manuseio das torneiras localizadas na parte inferior das buretas. Isso acarreta a impossibilidade de reproduzir a síntese. Em outras palavras, produzir nanomateriais com as mesmas características usando as mesmas condições de síntese não é tão simples.

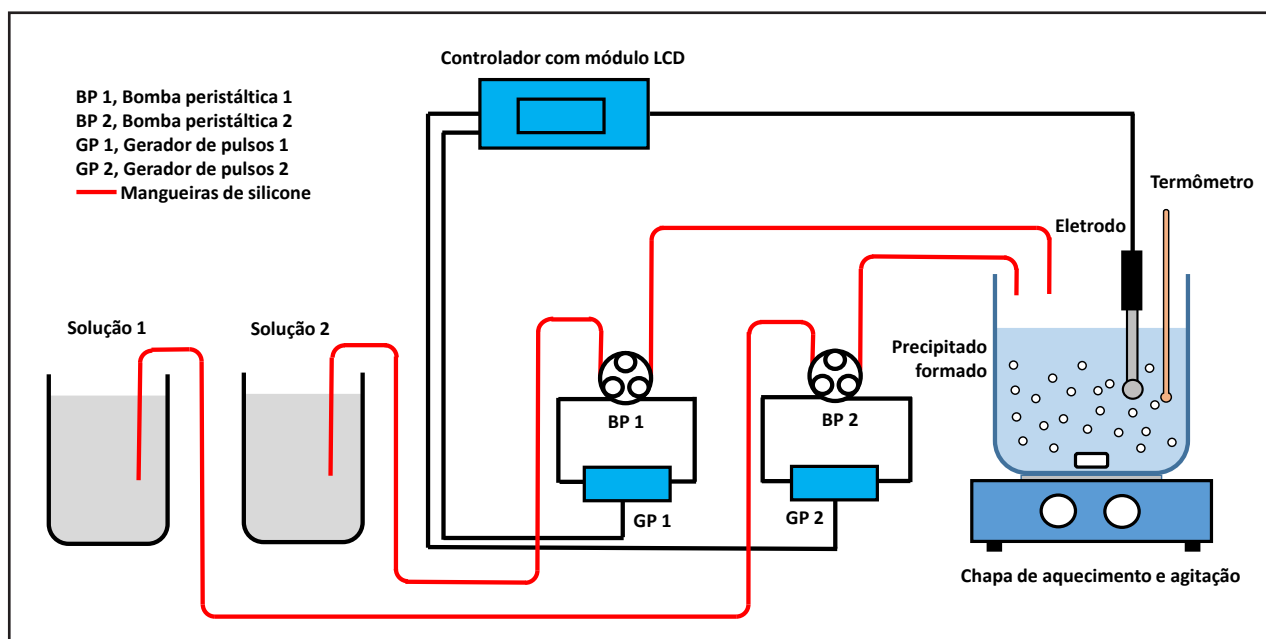
Para contornar esse problema, o sistema automático foi projetado para ter um bom controle da adição das soluções. O sistema foi projetado para ter duas bombas peristálticas e um sensor de pH (eletrodo), conectados entre si, com o objetivo de ter a leitura do pH em tempo real e ajustar a vazão das soluções para manter o pH da mistura predefinido em uma dada síntese. Se o pH da síntese for de 7,0 quando o pH da mistura apresentar um valor de 8,0, a solução do sal do metal é bombeada a uma vazão maior para compensar o aumento do pH. Caso o pH da mistura diminuir para 5,0, a vazão da solução do sal do metal diminui até o pH da mistura atingir o valor predefinido da síntese, dado como exemplo de 7,0. Na Figura 2, é apresentado um esquema do sistema automático de síntese de nanopartículas proposto.

Figura 1 – Esquema do sistema usado para a síntese de nanopartículas por coprecipitação



Fonte: Cardoso, 2022

Figura 2 – Esquema do sistema automático utilizado para a síntese de nanopartículas por coprecipitação



Fonte: elaborada pelos autores

2.2 Componentes do sistema

Para o desenvolvimento do sistema automático foram usados os seguintes componentes:

2.2.1 Arduino UNO

O Arduino é uma placa de prototipagem eletrônica que permite o desenvolvimento de projetos de automação. Ela conta com a tecnologia *Open Source*, ou seja, tem seu código aberto, o que permite o acesso por qualquer pessoa. Ele também conta com uma IDE (*Integrated Development Environment*) para o desenvolvimento do software que foi inserido na placa para realizar as atividades programadas.

2.2.2 Leitor de pH – 4502C

O sistema de leitura de pH 4502C é composto por um módulo eletrônico e um eletrodo de pH. O eletrodo é responsável pela medição química do pH da solução, gerando um sinal elétrico proporcional à concentração de íons H^+ . Já o módulo 4502C atua como um circuito de condicionamento de sinal, amplificando e convertendo esse sinal em um nível de leitura adequado para microcontroladores. Dessa forma, o eletrodo realiza a medição, enquanto o módulo permite a interpretação eletrônica.

2.2.3 Tela LCD 16x2 I2C

A tela LCD 16x2 com interface I2C é um display utilizado para exibir informações textuais em dois conjuntos de 16 caracteres. A interface I2C reduziu significativamente o número de fios necessários para a conexão ao microcontrolador, facilitando a implementação e otimizando o espaço em projetos. Essa tela é amplamente utilizada em sistemas embarcados, permitindo a visualização de dados sem a necessidade de uma interface gráfica mais complexa.

2.2.4 Bombas peristálticas

Bombas peristálticas são um tipo de bomba que transporta líquidos por compressão de um tubo flexível (mangueira de silicone), por meio de roletes giratórios. Esse mecanismo permite um bombeamento preciso e sem contato direto entre o líquido e as partes móveis da bomba, evitando contaminação e permitindo o uso em aplicações químicas e biomédicas. A vazão pode ser controlada eletronicamente, tornando-a ideal para dosagem de líquidos em sistemas automatizados.

2.2.5 ZK-PP2K

O ZK-PP2K é um gerador de sinal PWM (*Pulse Width Modulation*) utilizado no controle de dispositivos eletrônicos, como motores e bombas peristálticas. Ele permite ajustar com precisão a largura do pulso, possibilitando a regulação da velocidade dos motores e a dosagem de líquidos em sistemas automatizados. Sua interface simples e eficiente torna-o um componente valioso para projetos que exigem controle fino de dispositivos eletromecânicos.

2.2.6 Eletrodo de pH E-201 -

O eletrodo de pH E-201 é um sensor utilizado para medir a acidez ou alcalinidade de soluções aquosas. Ele tem uma membrana de vidro sensível ao íon hidrônio (H^+), que gera uma diferença de potencial elétrico proporcional à concentração desse íon na solução. Esse eletrodo é amplamente utilizado em laboratórios e em sistemas de monitoramento da qualidade da água. Para garantir medições precisas e a durabilidade, é essencial realizar calibrações regulares e manter o eletrodo armazenado em solução de KCl (2 mol/L).

2.2.7 Carcaça do sistema automático

Os componentes do sistema foram alocados numa carcaça desenvolvida no SketchUp (software de design 3D), uma ferramenta de modelagem tridimensional

amplamente utilizada por sua interface intuitiva e facilidade de uso, o que permite criar modelos precisos e personalizados de forma ágil.

Após a conclusão do projeto digital da carcaça, a fabricação foi realizada por meio de impressão 3D, utilizando filamento PLA (*Polylactic acid*), material escolhido por suas propriedades, como boa resistência mecânica, estabilidade dimensional e facilidade de impressão. O processo de manufatura aditiva foi executado em uma impressora Creality K1 Max, equipamento que oferece alta velocidade de impressão, grande volume útil e precisão dimensional, garantindo a fidelidade do produto físico ao modelo digital projetado.

2.3 Montagem do sistema

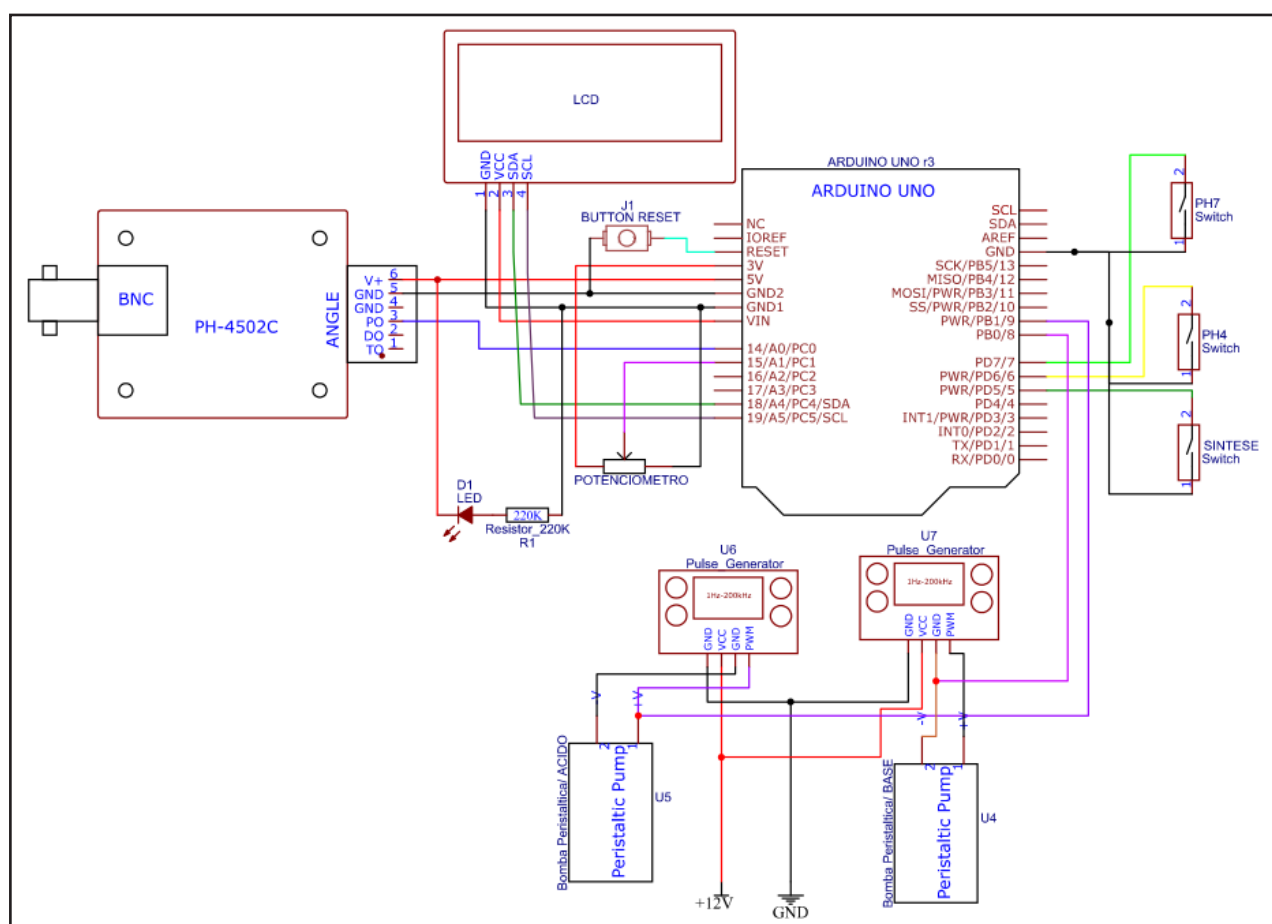
O desenvolvimento do sistema teve início com uma bomba peristáltica acoplada a um gerador de pulso PWM ZK-PP2K “High Power PWM Driver”, com o objetivo de controlar a vazão da bomba com precisão. Esta etapa representou apenas uma fase inicial do projeto.

Com as bombas funcionais, a proposta foi redirecionada para atender a uma necessidade mais abrangente: a leitura e o controle do pH. A partir desse ponto, iniciou-se o planejamento de um sistema mais completo, que incorporasse duas bombas peristálticas e um sensor de pH (eletrodo). Nesse novo conceito, o sensor seria responsável por medir o pH da mistura aquosa reacional e, com base nessas leituras, acionar automaticamente as bombas — uma destinada à adição da solução ácida e outra à adição da solução básica — de modo a manter o pH no valor desejado.

O desenvolvimento avançou para a implementação do código de controle, no qual foi projetada uma rotina completa de calibração do sistema. Para garantir que os valores calibrados fossem preservados mesmo após desligamentos ou reinicializações, optou-se pelo uso da memória EEPROM do microcontrolador, permitindo o armazenamento e a reutilização posterior das informações de calibração, o que aumenta a confiabilidade e a praticidade do equipamento.

A Figura 3 apresenta o diagrama elétrico de um sistema automatizado de controle de pH baseado em um Arduino Uno, integrando sensores, interface de usuário e atuadores.

Figura 3 – Esquema do circuito elétrico



Fonte: elaborada pelos autores

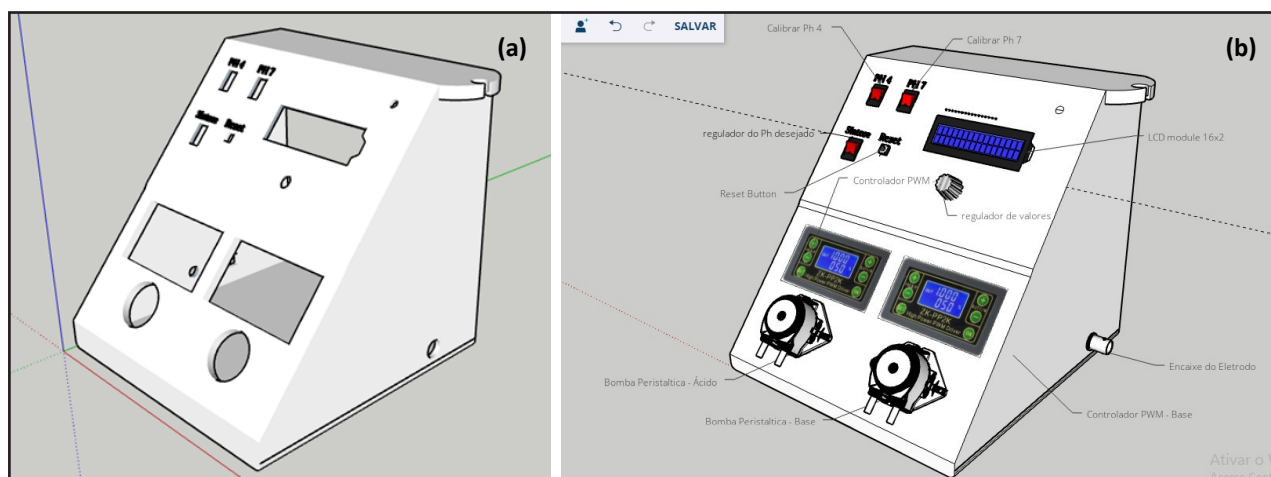
O módulo de leitura de pH PH-4502C está conectado a um eletrodo (por meio de um conector BNC), responsável por medir o pH da solução e enviar um sinal analógico ao Arduino. Esse sinal é processado e ajustado por meio de um potenciômetro, enquanto os valores são exibidos em um display LCD. O sistema ainda conta com um botão de reset e um LED indicador para sinalização. Para o controle do processo químico, há duas bombas peristálticas acionadas por módulos geradores de pulso, que permitem a dosagem de substâncias (ácido/base) conforme necessário para corrigir o pH. Além disso, o circuito inclui chaves (switches) para controle manual de funções,

como a ativação das bombas e o modo de síntese. A alimentação é fornecida por uma fonte de 12V, com referência comum (GND) para todos os componentes.

Todos os elementos foram alocados numa carcaça, na qual, na parte inferior, foram instalados o controle das bombas e as bombas peristálticas. Para o funcionamento das bombas e o controle do pH, foi utilizado um microcontrolador Arduino UNO com 3 switches responsáveis pela calibração e pela definição do pH da síntese, alocado na parte interna da carcaça. Na parte superior foi alocado o controlador com módulo LCD. Botões para ligar o sistema, ajustar o pH na calibração e regulador de valores também foram instalados na carcaça.

A carcaça projetada e desenvolvida no software SketchUp apresenta a configuração exibida na Figura 4(a). A carcaça apresenta uma configuração adequada para seu uso, com a parte frontal em ângulo para facilitar a operação. Os componentes ou elementos do sistema, instalados na carcaça, foram fabricados por impressora 3D e apresentados na Figura 4(b). Pode-se observar o posicionamento das bombas peristálticas, os controladores PWM, o controlador com módulo LCD, o botão para ligar o sistema, os botões para ajustar a calibração do pH e, do lado direito inferior, o conector do eletrodo.

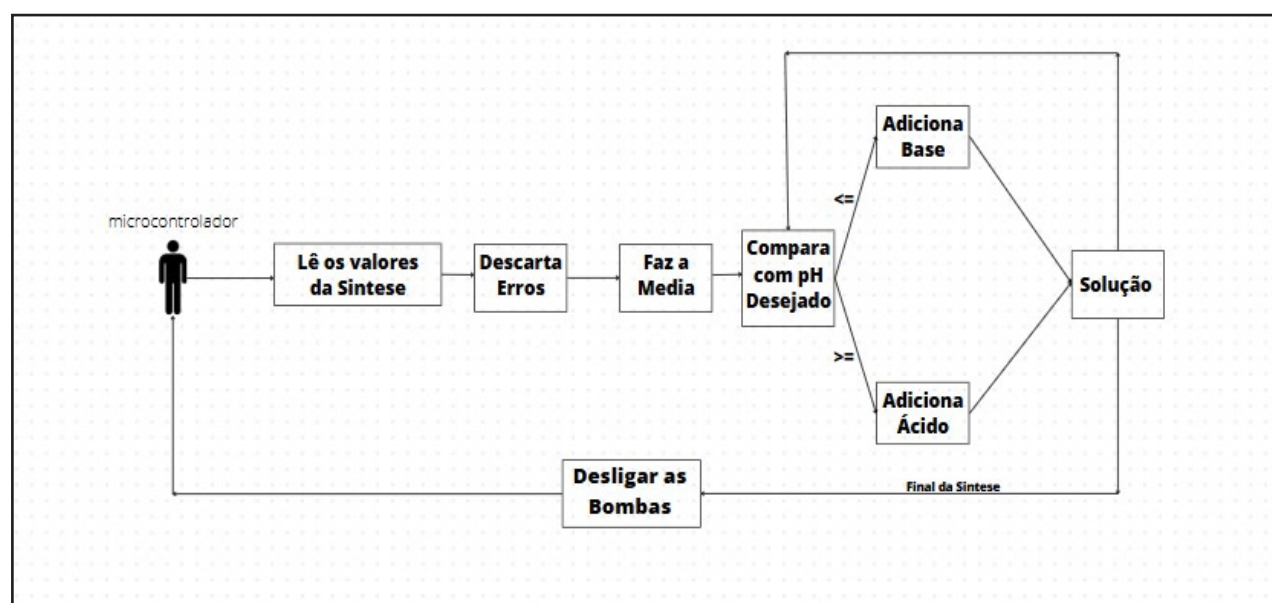
Figura 4 – Esquemas do sistema automático projetado: (a) vista isométrica da carcaça projetada no SketchUp e (b) vista isométrica da carcaça com seus componentes



Fonte: elaborada pelos autores

Para que o sistema atenda ao objetivo, foi definido um mecanismo de uso, apresentado nas Figuras 5 e 6. Estes diagramas de uso mostram como funciona todo o sistema. A Figura 5 apresenta o fluxo de controle automático da síntese, com base na leitura do pH realizada pelo microcontrolador. O processo inicia-se com a leitura dos valores do sensor durante a síntese, seguida de uma etapa de tratamento de dados, na qual erros ou leituras inconsistentes são descartados. Em seguida, calcula-se uma média para garantir maior estabilidade na medição. Esse valor é então comparado ao pH previamente definido. Caso o pH esteja abaixo do ideal, o sistema aciona a adição de base; caso esteja acima, aciona a adição de ácido. Esse ciclo se repete até que o pH atinja o valor desejado, momento em que o sistema considera a solução adequada e finaliza o processo, desligando as bombas.

Figura 5 – Diagrama de Caso de Uso

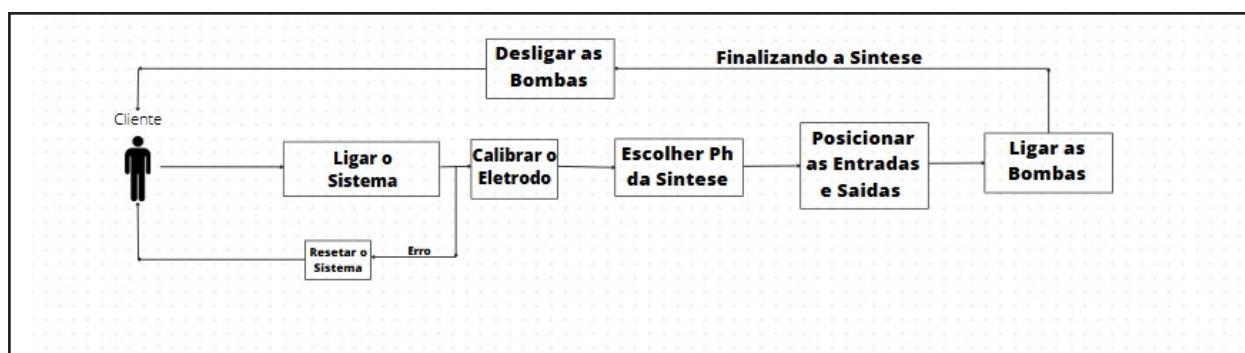


Fonte: elaborada pelos autores

A Figura 6 descreve o fluxo de operação do usuário (cliente) com o sistema, desde a inicialização até a conclusão da síntese. O processo começa com o usuário ligando o sistema, seguido da calibração do eletrodo de pH, etapa essencial para garantir medições precisas. Em seguida, o usuário define o pH desejado para a síntese

e configura as entradas e as saídas do sistema conforme a aplicação. Após essa preparação, as bombas são acionadas para iniciar o processo automático de ajuste do pH. Ao final da síntese, o sistema desliga as bombas, encerrando o ciclo. O diagrama também prevê situações de erro, permitindo resetar o sistema e reiniciar o processo, o que garante maior segurança e confiabilidade na operação.

Figura 6 – Diagrama de operação do sistema



Fonte: elaborada pelos autores

2.3.1 Calibração do leitor de pH

Para a calibração do leitor de pH 4502C, foram testados diferentes métodos, considerando que o sensor de pH é um dispositivo sensível e sujeito a variações significativas quando utilizado em faixas de leitura muito estreitas. Inicialmente, a calibração foi realizada coletando-se dez leituras consecutivas em curto intervalo de tempo (tempo de amostragem previamente definido). Contudo, observou-se que, mesmo assim, as medições apresentavam oscilações consideráveis.

Para minimizar essas variações e aumentar a confiabilidade dos resultados, foram aplicadas três etapas de tratamento de dados. A primeira consistiu na remoção dos dois maiores e dos dois menores valores da amostra, evitando que leituras discrepantes — possivelmente causadas por ruídos ou interferências — influenciassem significativamente o cálculo final. Em seguida, foram descartados os valores negativos, considerados fisicamente inválidos para a medição de pH. Por fim,

calculou-se a média aritmética dos valores restantes, o que resultou em um pH mais estável e representativo.

2.4 Testes experimentais

2.4.1 Síntese de nanopartículas de ZnO

Para validar o sistema, foi realizada a síntese de nanopartículas de ZnO. Foram realizadas três sínteses nas condições indicadas na Tabela 1. Duas soluções, uma contendo acetato de zinco e a outra contendo NaOH, foram adicionadas a um béquer com 100 mL de água destilada, utilizando o sistema automático. A mistura foi conduzida mantendo o pH em 7,0, a 70 °C e sob intensa agitação. O sólido formado foi envelhecido por 1 hora e, depois, lavado e secado a 80 °C por 12 h. O sólido formado foi caracterizado por difração de raios-X e microscopia eletrônica de varredura (MEV).

Tabela 1 – Condições de síntese das amostras de ZnO usando o sistema automático

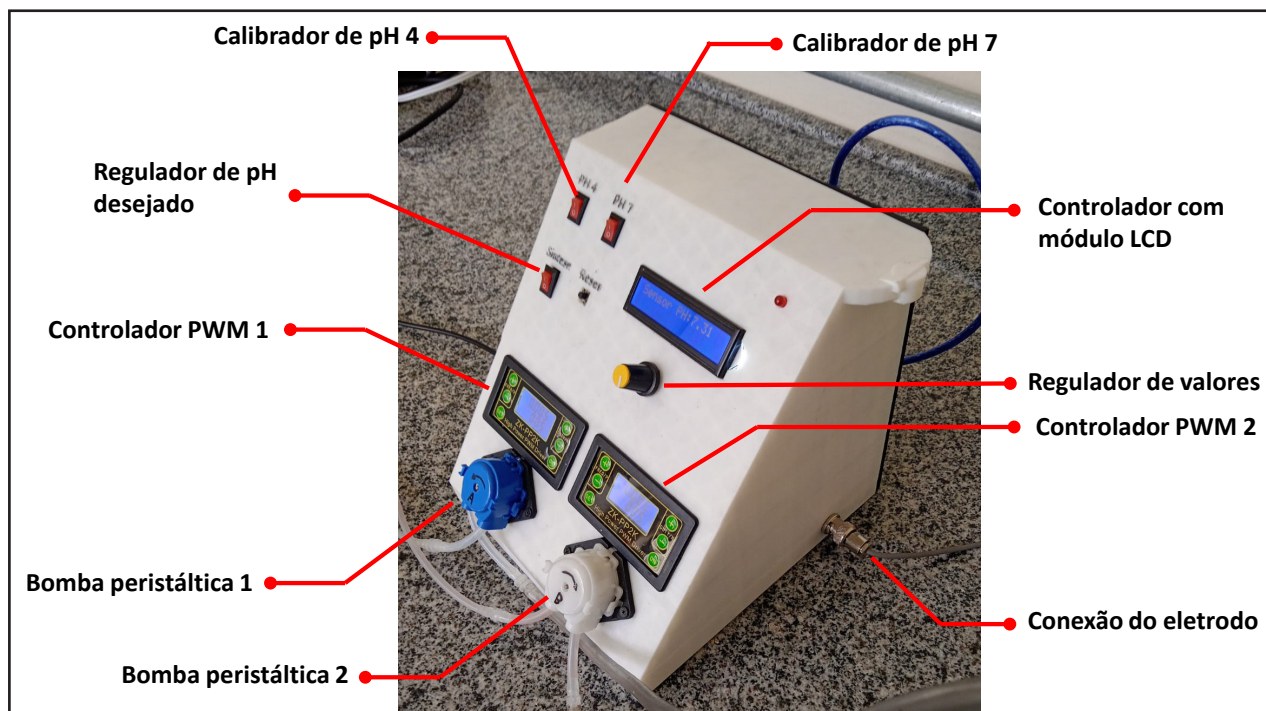
Acetato de Zn (mol/L)	NaOH (mol/L)	Vazão (%)	Vazão Zn (mL/min)	Vazão NaOH (mL/min)	Temperatura (°C)
0,25	0,5	5,0	10,5	9,5	25
0,25	0,5	5,0	10,5	9,5	50
0,25	0,5	5,0	10,5	9,5	70

Fonte: elaborada pelos autores

3 RESULTADOS

Na Figura 7, apresenta-se o sistema automático montado. Pode-se observar que o sistema projetado é bem estruturado e que todos os componentes ficaram bem acolhidos na carcaça de suporte. O sistema pode ser operado por uma pessoa e o procedimento de funcionamento é didático.

Figura 7 – Fotografia do sistema automático montado



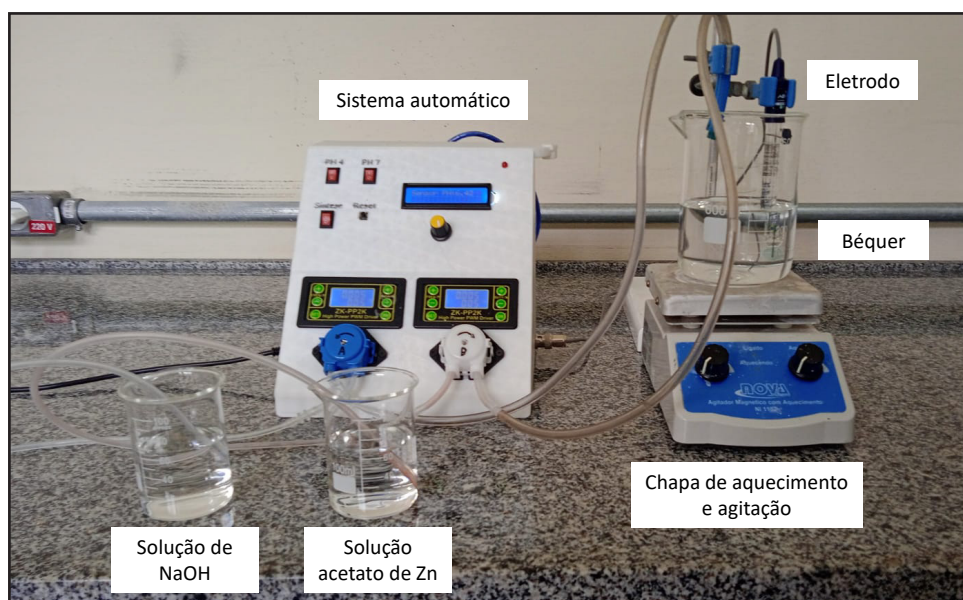
Fonte: elaborada pelos autores

Antes de realizar a síntese das partículas de ZnO, o sensor de pH (eletrodo) do sistema automático foi calibrado. Após ligar o sistema, o eletrodo foi introduzido numa solução tampão de pH 4 e, após estabilizar a leitura do pH, foi apertado o botão de pH 4 da parte frontal do sistema. Depois o eletrodo foi introduzido na solução tampão de pH 7, e após a estabilização da leitura foi apertado o botão do pH 7 da parte frontal do sistema automático. Após a calibração do eletrodo, foi dado início à síntese das partículas de ZnO por coprecipitação.

As sínteses das amostras com o sistema automático foram realizadas numa configuração, conforme apresentada na Figura 8. A configuração apresentou os seguintes elementos: sistema automático de síntese, béquer com solução de acetato de zinco, béquer com solução de NaOH, chapa de aquecimento e agitação, eletrodo para medir o pH conectado ao sistema automático, béquer com água destilada para receber as soluções de zinco e de NaOH, onde ocorre a reação de síntese, e mangueiras de silicone conectando as soluções ao ambiente reacional (béquer com água destilada).

O sistema automático apresentou um bom controle do pH da síntese com valores de $7,0 \pm 0,2$. O sólido precipitado formou-se assim que os reagentes foram adicionados ao béquer contendo água destilada aquecida e sob agitação. O processo de síntese foi interrompido quando o volume total da mistura atingiu 200 mL. A temperatura foi mantida constante em todas as três sínteses. O sistema automático mostrou-se eficiente e de fácil manuseio, muito melhor do que o sistema baseado em buretas utilizado na síntese convencional de nanomateriais por coprecipitação (Figura 1).

Figura 8 – Imagem do sistema durante a síntese de nanopartículas

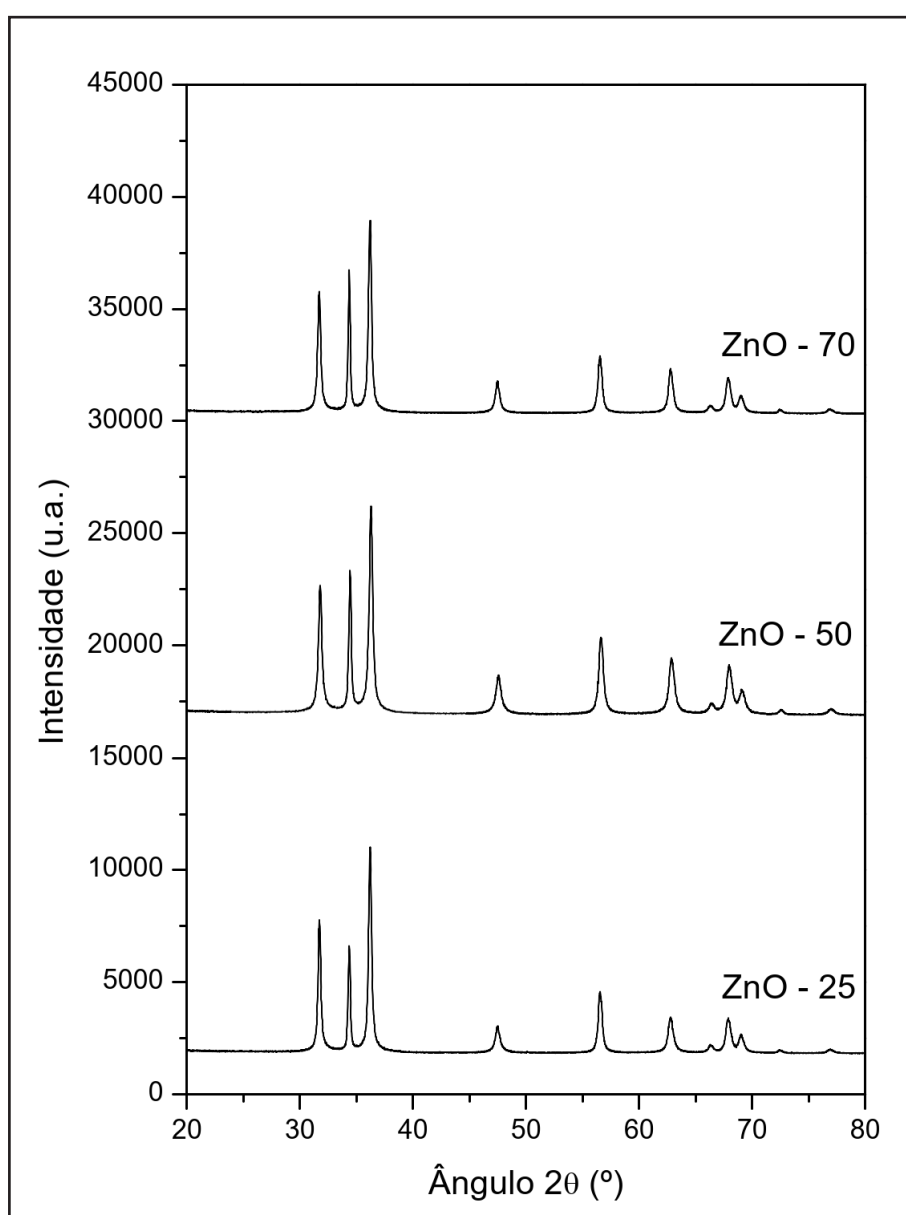


Fonte: elaborada pelos autores

Os resultados da caracterização das amostras sintetizadas são apresentados na Figura 9. Pode-se observar que todas as amostras apresentaram picos de difração correspondentes à fase cristalina de ZnO. Não foram observadas diferenças na fase cristalina formada entre as temperaturas de síntese empregadas. No entanto, as micrografias das amostras mostraram diminuição do tamanho das partículas com o aumento da temperatura de síntese (Figura 10). Estes resultados foram consistentes com o processo de nucleação e crescimento que ocorre durante o método de

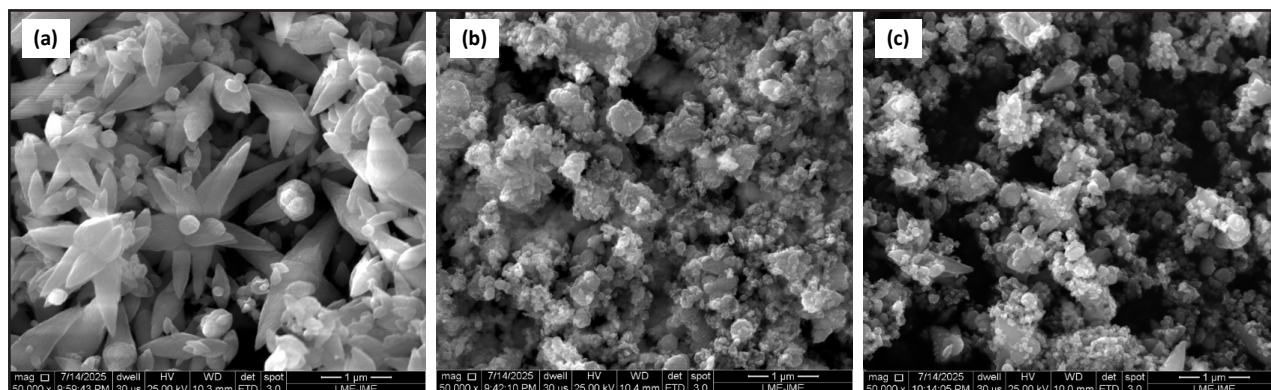
coprecipitação e é favorecido pelo aumento da temperatura (Câmara, 2025). Estes resultados validam o sistema automático de síntese de nanopartículas. O controle do pH por meio da variação da dosagem dos reagentes usados na síntese permitiu manter o pH da síntese em 7,0, com uma oscilação de $\pm 0,2$. Isto permite a reprodutibilidade da síntese de qualquer nanomaterial obtido pelo método de coprecipitação.

Figura 9 – Resultados da difração de raios-X das amostras de ZnO sintetizadas em diferentes temperaturas



Fonte: elaborada pelos autores

Figura 10 – Resultados da microscopia eletrônica de varredura das amostras de ZnO sintetizadas em diferentes temperaturas: (a) 25 °C, (b) 50 °C e (c) 70 °C



Fonte: elaborada pelos autores

O sistema foi estruturado com base em um microcontrolador Arduino Uno, que atuou como gerenciador central das operações. A leitura do pH foi feita pelo sensor modelo 4502C, cuja calibração pode ser ajustada diretamente no equipamento por meio de um display LCD 16x2 com interface I2C e botões físicos integrados. Com base nos dados coletados, o Arduino aciona duas bombas peristálticas, responsáveis pela dosagem de ácido ou base, controladas por módulos ZK-PP2K com ajuste de velocidade via sinal PWM, permitindo ajustes finos no fluxo de reagentes.

A principal funcionalidade do dispositivo reside em sua capacidade de reagir dinamicamente às alterações de pH, dosando automaticamente os reagentes necessários até que o valor-alvo, definido previamente pelo usuário, seja atingido e mantido. Essa característica torna o sistema altamente adaptável a diferentes tipos de sínteses, especialmente em ambientes laboratoriais que exigem precisão e controle em pequena escala.

Além de sua eficiência técnica, o equipamento foi projetado com foco na facilidade de uso, permitindo que o operador configure com simplicidade tanto os parâmetros de calibração quanto o valor de pH desejado. Isso reduziu significativamente a necessidade de intervenções manuais, contribuindo para a redução de desperdícios, maior segurança operacional e economia de reagentes.

Dessa forma, o sistema desenvolvido representou um importante avanço na automação de processos químicos, ao unir tecnologia embarcada, instrumentação analítica e design funcional, promovendo um padrão elevado de qualidade, confiabilidade e eficiência nas atividades de síntese.

4 CONCLUSÕES

O desenvolvimento do sistema proposto possibilitou a integração entre leitura em tempo real do pH e o controle automático de duas bombas peristálticas, resultando em um equipamento funcional capaz de ajustar o pH de soluções de forma precisa e prática. Foram realizados testes com geradores de pulso PWM para controle da vazão, além da implementação de recursos de calibração e armazenamento em memória EEPROM, garantindo confiabilidade e repetibilidade ao sistema. O sistema demonstrou a viabilidade de unir hardware de baixo custo, programação embarcada e técnicas de automação para a construção de um protótipo capaz de atender a demandas reais em processos que envolvem soluções químicas. Foi possível sintetizar nanopartículas de ZnO em condições de pH controladas. Conclui-se que o sistema automático para a síntese de nanopartículas por coprecipitação é funcional, confiável e escalável, com potencial de aprimoramento em versões futuras, como a adição de interfaces gráficas, conectividade IoT e otimização dos algoritmos de controle.

REFERÊNCIAS

ABDELHADY, M. M. Preparation and Characterization of Chitosan/Zinc Oxide Nanoparticles for Imparting Antimicrobial and UV Protection to Cotton Fabric. **International Journal of Carbohydrate Chemistry**. p.1–6, mai. 2012. DOI 10.1155/2012/840591

CÂMARA J. L. M. M., **Estabilidade de nanofluidos baseados em partículas de ZnO: influência do método de síntese**. 2025. 98 p. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais) - Instituto Politécnico, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2025.

CARDOSO, J. I. **Síntese e caracterização de hidróxidos duplos lamelares com diferentes ânions interlamelares**. 2022. 60 p. Monografia (Bacharel em Engenharia Mecânica) – Instituto Politécnico, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2022.

DÍAZ, M. R.; VIVAS-MEJIA, P. E. Nanoparticles as Drug Delivery Systems in Cancer Medicine: Emphasis on RNAi-Containing Nanoliposomes. **Pharmaceuticals**, v. 6 n. 1 p.1361–1380, nov. 2013. DOI 10.3390/ph6111361

GUTIERREZ, R. M. P.; MÉNDEZ, J. V. M.; VAZQUEZ, I. A. A novel approach to the oral delivery of bionanostructures for systemic disease. *In*: GUTIERREZ, R. M. P. *et al.* (org.). Nanostructures for Oral Medicine, Mexico: Elsevier, 2017. p. 27-59

KAHOULI, M. *et al.* Structural and optical properties of ZnO nanoparticles prepared by direct precipitation method, **Superlattices Microstruct**, v. 85, p.7–23, set. 2015. DOI 10.1016/j.spmi.2015.05.007

LI, X. *et al.* Antimicrobial activities of ZnO powder-coated PVC film to inactivate food pathogens. **International Journal of Food Science & Technology**, v. 44 n. 11, p.2161–2168, out. 2009. DOI 10.1111/j.1365-2621.2009.02055.x

RICO, C. M. *et al.* Interaction of Nanoparticles with Edible Plants and Their Possible Implications in the Food Chain. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 59 n. 8, p.3485–3498, abr. 2011. DOI 10.1021/jf104517j

SABIR, S.; ARSHAD, M.; CHAUDHARI, S. K. Zinc Oxide Nanoparticles for Revolutionizing Agriculture: Synthesis and Applications. **The Scientific World Journal**, p.1–8, nov. 2014. DOI 10.1155/2014/925494

SRIVASTAVA, A.; KATIYAR, A. Zinc oxide nanostructures. *In*: SRIVASTAVA, A.; KATIYAR, A. (org.). **Ceramic Science and Engineering**, India: Elsevier, 2022. p.235-262

Contribuição de autoria

1 – Vicente Brito Soares

Graduando em Engenharia de Computação pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro
<https://orcid.org/0009-0007-0022-1769> • vicenteb1999@gmail.com

Contribuição: Metodologia; Software; Validação; Curadoria de dados; Escrita – Primeira Redação; Visualização de dados

2 – Jhonny Oswaldo Huertas Flores

Doutorado em Química Inorgânica pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro
<https://orcid.org/0000-0003-1721-6222> • jhonnyhf@iprj.uerj.br

Contribuição: Análise Formal; Escrita – Revisão e Edição; Supervisão; Administração do Projeto

Como citar este artigo

SOARES, V. B.; FLORES, J. O. H. Desenvolvimento de um sistema automático para a síntese de nanopartículas usando Open-Source Arduino. **Ciência e Natura**, Santa Maria, v. 48, e96486, 2026. DOI: 10.5902/2179460X96486. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/2179460X96486>