

Ranna Torres Barreto

**Geração de vapor em nanoflúidos contendo
misturas de nanopartículas metálicas**

Uberlândia – MG

2023

Ranna Torres Barreto

Geração de vapor em nanoflúidos contendo misturas de nanopartículas metálicas

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à **Universidade Federal de Uberlândia**, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de **Bacharelado em Física de Materiais**.

Universidade Federal de Uberlândia – UFU

Instituto de Física – INFIS

Grupo de Propriedades Ópticas e Térmicas de Materiais – GPOTM

Laboratório de Espectroscopia Óptica – LEO

Bacharelado em Física de Materiais

Orientador: Prof. Dr. Djalmir Nestor Messias

Uberlândia – MG

2023

Barreto, Ranna Torres, 1997-

Geração de vapor em nanoflúidos contendo misturas de nanopartículas metálicas / Ranna Torres Barreto. -2023.

Orientador: Djalmir Nestor Messias.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Uberlândia, Graduação em Física de Materiais.

Modo de acesso: Internet.

Inclui bibliografia.

Inclui ilustrações.

1. Física. I. Messias, Djalmir Nestor, 1977-, (Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia. Graduação em Física de Materiais. III. Título.

Ranna Torres Barreto

Geração de vapor em nanoflúidos contendo misturas de nanopartículas metálicas

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à **Universidade Federal de Uberlândia**, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de **Bacharelado em Física de Materiais**.

Prof. Dr. Djalmir Nestor Messias
Orientador

Prof. Dr. Lucio Pereira Neves
Convidado 1

Prof. Dr. Maurício Foschini
Convidado 2

Uberlândia – MG
2023

Dedico este trabalho de conclusão de curso a todas as pessoas que estiveram ao meu lado ao longo desta jornada, oferecendo seu apoio incondicional, amor e encorajamento. A todos que direta ou indiretamente contribuíram para a minha formação e sucesso acadêmico, meu profundo agradecimento. Este trabalho é dedicado a vocês, pois sem o seu apoio, não seria possível chegar até aqui. Que este trabalho seja uma pequena forma de retribuição por todo o carinho e suporte que recebi ao longo desta jornada. Vocês são minha inspiração constante e minha motivação para buscar sempre o melhor.

Agradecimentos

Meu primeiro contato com o mundo científico foi através de um programa infantil chamado Zoboomafoo. Os irmãos Kratt e um lêmure mostravam aspectos da vida selvagem, e eu assistia com muita empolgação, pois a ciência tem esse poder de despertar curiosidade e fascínio pelo nosso mundo. Logo depois entrei no mundo dos documentários do Discovery Channel que possui uma vasta gama de conteúdo científico, embora com algumas extravagâncias ocasionalmente. Assisti a tudo que pude, desde a formação de células até a estrutura do universo e sempre foi incrível tentar compreender o funcionamento das coisas.

A cereja do bolo foi a série icônica chamada Arquivo X, que traz consigo uma frase marcante: "A verdade está lá fora". Carrego essa frase comigo até os dias de hoje, pois a ciência busca responder a muitos mistérios, mas também aprimorar o que já conhecemos e a "verdade está lá fora", esperando ser descoberta e estudada por nós.

Sou imensamente grata pelo apoio incondicional da minha família, que sempre me incentivou e esteve ao meu lado durante toda essa jornada. À minha irmã, que me fazia companhia nas madrugadas de estudo, e ao meu namorado, pelo apoio e compreensão nas diversas vezes em que não nos víamos devido aos estudos. Vocês sabem o quanto fizeram por mim, e serei eternamente grata.

Não posso deixar de agradecer aos meus colegas, que me ajudaram após momentos de desânimo. Aos professores Maurício Foschini, Wellington Akira Iwamoto, Raimundo Lora Serrano, Acácio Aparecido de Castro e Gustavo Foresto Brito de Almeida, pelo apoio e/ou equipamentos fornecidos. Em especial ao professor Djaldir, que me acolheu e auxiliou durante todo o processo, um professor incrível, e aos órgãos de fomento, CNPq e FAPEMIG, e a Universidade Federal de Uberlândia (UFU) por tornarem possível a realização desta pesquisa.

Obrigada a todos por fazerem parte dessa jornada incrível de descobertas científicas. Vocês foram fundamentais para o meu crescimento acadêmico e pessoal.

“Queremos buscar a verdade, não importa aonde ela nos leve. Mas para encontrá-la, precisaremos tanto de imaginação quanto de ceticismo. Não teremos medo de fazer especulações, mas teremos o cuidado de distinguir a especulação do fato.”
(Carl Sagan)

Resumo

Este trabalho analisou os processos de geração de vapor em nanoflúidos contendo misturas de nanopartículas metálicas de NiO sendo excitadas por uma lâmpada de xenônio. As análises foram divididas em dois conjuntos, A e B, e foi possível observar que com a presença de nanopartículas houve uma melhora significativa na taxa de evaporação da água.

No conjunto A, a maior variação percentual da taxa de evaporação ocorreu na amostra Am_2 com 85%, ou seja, uma eficiência 85% maior na geração de vapor se comparada com a água pura. Para o conjunto B, a amostra Am_4 atingiu uma taxa de 82%. Esses resultados indicam a influência das nanopartículas no processo de geração de vapor em nanoflúidos.

É importante salientar que para ambos os conjuntos, a concentração máxima de NPs nas primeiras amostras não correspondeu diretamente à taxa máxima de evaporação. Isso sugere que a concentração ótima, na qual se obter a máxima taxa de evaporação, não está necessariamente ligada à concentração máxima de NPs de NiO.

Além disso, foram realizadas medidas em relação ao volume inicial da amostra mantendo constante a concentração de NPs de NiO. E com as análises dessas amostras foi possível identificar que há um crescimento da massa evaporada com o volume, e isso pode indicar que a partir de um determinado volume inicial, a massa evaporada não deve variar significativamente.

Palavras-chave: Geração de Vapor, Taxa de Evaporação, Nanopartículas, Nanoflúidos.

Abstract

This work analyzed the steam generation processes in nanofluids containing mixtures of metallic NiO nanoparticles being excited by a xenon lamp. The analyzes were divided into two sets, A and B, and it was possible to observe that with the presence of nanoparticles there was a significant improvement in the water evaporation rate.

In set A, the greatest variation in the evaporation rate occurred in the Am_2 sample and reached a rate of 85%, that is, an 85% greater efficiency in steam generation compared to the pure water. While in set B, sample Am_4 reached a rate of 82%. These results indicate the influence of nanoparticles on the steam generation process in nanofluids.

It is important to highlight that for both sets, the maximum concentration of nanoparticles in the first samples did not directly correspond to the maximum evaporation rate. This suggests that an optimal concentration, to obtain a maximum evaporation rate, is not necessarily linked to the maximum concentration of NiO nanoparticles.

In addition, measurements were taken in relation to the initial volume of the sample, keeping the concentration of NiO nanoparticles constant. And with the analysis of these samples it was possible to identify that there is an increase in the evaporated mass with the volume, and this may indicate that from a certain initial volume, the evaporated mass should not vary significantly.

Keywords: Steam Generation, Water Evaporation Rate, Nanoparticles, Nanofluids.

Lista de Figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1 – Representação de como a nanobolha se forma envolta da NP na água (water), em que R_{NP} é o raio da NP e R_B é o raio da nanobolha. . . . | 18 |
| Figura 2 – Representação de as diluições e fracionamentos são realizados para cada uma das 7 amostras: Amostra 0: Am_0 , Amostra 1: Am_1 , Amostra 2: Am_2 , Amostra 3: Am_3 , Amostra 4: Am_4 , Amostra 5: Am_5 e Amostra 6: Am_6 . No conjunto A, a amostra variando refere-se ao NiO 550 e a amostra fixa refere-se ao NiO 400. | 21 |
| Figura 3 – Aparato experimental utilizado. 1- Lâmpada xenônio, 2- Base de madeira, 3- Lente com foco de 5 cm, 4- Lente com foco de 29 cm, 5- Balança de alta precisão, 6- Becker com suporte de isopor para isolamento térmico. | 24 |
| Figura 4 – Amostras no espectrofotômetro. Cubeta 1- Água milli-q para referência; Cubeta 2- Amostra a ser analisada. | 25 |
| Figura 5 – Lâmpada de xenônio que foi utilizada no experimento. | 26 |
| Figura 6 – Espectro de luminescência da lâmpada de xenônio utilizada para a geração de vapor: A) Espectro completo, B) Detalhe do espectro da região entre 450 nm e 700 nm enfatizando a banda de emissão nesta região. | 28 |
| Figura 7 – Espectro de absorvância retirado das amostras contendo NiO 400 + NiO 550, em que Am_n com n de 0 à 6 representando cada uma das amostras estudadas: A) Espectro completo na região de 200 nm à 900 nm, B) Detalhe do espectro de 250 nm à 400 nm, enfatizando o pico do espectro. | 29 |
| Figura 8 – Espectro de absorvância retirado das amostras contendo NiO 400 + NiO 700, em que Am_n com n de 0 à 6 representando cada uma das amostras estudadas: A) Espectro completo na região de 200 nm à 900 nm, B) Detalhe do espectro de 250 nm à 400 nm, enfatizando o pico do espectro. | 30 |
| Figura 9 – Normalização da massa de água evaporada na Am_1 (descrita na Tabela 2) para exemplificar a diferença na perda de massa quando a NP metálica de NiO é adicionada. | 31 |
| Figura 10 – Variação da massa da amostra (ξ) em mg em função do tempo em minutos para a amostra Am_1 (descrita da Tabela 2), com a taxa inicial (Γ_I) e final (Γ_F) para cada concentração. | 32 |
| Figura 11 – Imagem exemplificando o gradiente de temperatura e o processo de decantação com uma concentração de partículas no fundo da amostra. | 33 |
| Figura 12 – Variação da massa da amostra (ξ) em mg em função do tempo em minutos para as amostras descritas da Tabela 2. | 33 |

| | |
|--|----|
| Figura 13 – Taxa de evaporação das amostras ($\Gamma = \frac{d\xi}{dt}$) na região inicial (Γ_I) e final (Γ_F) e a média da taxa de evaporação da água milli-q ($\Gamma_a = \frac{dM_a}{dt}$) na região inicial (Γ_{aI}) e final (Γ_{aF}). | 34 |
| Figura 14 – Normalização da massa de água evaporada na Am_1 (descrita na Tabela 3) para exemplificar a diferença na perda de massa quando a NP metálica de NiO é adicionada. | 35 |
| Figura 15 – Variação da massa da amostra (ξ) em mg em função do tempo em minutos para a amostra Am_1 (descrita na Tabela 3), com a taxa inicial (Γ_I) e final (Γ_F) para cada concentração. | 35 |
| Figura 16 – Variação da massa da amostra (ξ) em mg em função do tempo em minutos para as amostras descritas da Tabela 3. | 36 |
| Figura 17 – Taxa de evaporação das amostras ($\Gamma = \frac{d\xi}{dt}$) na região inicial (Γ_I) e final (Γ_F) e a média da taxa de evaporação da água milli-q ($\Gamma_a = \frac{dM_a}{dt}$) na região inicial (Γ_{aI}) e final (Γ_{aF}). | 37 |
| Figura 18 – Representação da massa evaporado em mg em (a) e a mudança de temperatura como função do tempo em (b) para nanopartículas de Silício em diferentes concentrações, em que a curva de cor preta representa a água pura. | 38 |
| Figura 19 – Representação da geração de vapor em g/min utilizando soluções contendo nanopartículas de Óxido de Ferro, com diferentes concentrações em wt% para realizar a evaporação. | 38 |
| Figura 20 – Figura a: Variação da massa da amostra (ξ) em mg em função do tempo em minutos, Figura b: Variação da massa da amostra (ξ) em mg em função do volume inicial da amostra | 39 |
| Figura 21 – Esquema da distância que a luz pode percorrer em diferentes volumes. | 40 |
| Figura 22 – Variação de massa da água milli-q para diferentes volumes em função do tempo. | 41 |
| Figura 23 – Taxa de evaporação das amostras ($\Gamma = \frac{d\xi}{dt}$) na região inicial (Γ_I) e final (Γ_F) e a média da taxa de evaporação da água milli-q ($\Gamma_a = \frac{dM_a}{dt}$) na região inicial (Γ_{aI}) e final (Γ_{aF}). | 41 |

Lista de tabelas

| | |
|---|----|
| Tabela 1 – Tabela de concentração das soluções contendo NPs do conjunto A. . . | 19 |
| Tabela 2 – Tabela de concentração das soluções contendo NPs do conjunto A. . . | 22 |
| Tabela 3 – Tabela de concentração das soluções contendo NPs do conjunto B. . . | 23 |
| Tabela 4 – Tabela contendo as datas, os horários e a pressão atmosférica média durante o processo de evaporação do conjunto A. | 46 |
| Tabela 5 – Tabela contendo as datas, os horários e a pressão atmosférica média durante o processo de evaporação do conjunto B. | 46 |
| Tabela 6 – Tabela contendo as datas, os horários e a pressão atmosférica média durante o processo de evaporação para analisar o efeito do volume. . . | 47 |

Lista de abreviaturas e siglas

| | |
|-------------|--|
| NP | Nanopartícula |
| NF | Nanofluido |
| NiO | Óxido de Níquel |
| <i>vol%</i> | Volume por cento |
| UV | Ultravioleta |
| VIS | Visível |
| m_a | Massa da água Milli-Q |
| M_a | Massa da água Milli-Q normalizada |
| m_{np} | Massa da amostra com nanopartícula |
| M_{np} | Massa da amostra com nanopartícula normalizada |
| Am_n | Amostra (n = 0, 1, 2, 3, 4, 5 e 6) |

Lista de símbolos

| | |
|------------|--|
| ξ | Varição da massa da amostra devido a evaporação |
| Γ | Taxa de evaporação da amostra com nanopartículas |
| Γ_a | Taxa de evaporação da água milli-q pura |

Sumário

| | | |
|------------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 15 |
| 2 | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 17 |
| 3 | MATERIAIS E MÉTODOS | 19 |
| 3.1 | Síntese das NPs de NiO | 19 |
| 3.2 | Preparação das amostras em soluções coloidais | 19 |
| 3.2.1 | Conjunto A - NiO 400 e NiO 550 | 20 |
| 3.2.2 | Conjunto B - NiO 400 e NiO 700 | 22 |
| 3.2.3 | Procedimento Experimental | 23 |
| 3.3 | Técnicas de Caracterização | 24 |
| 3.3.1 | Medidas de absorção óptica das amostras | 24 |
| 3.3.2 | Medidas do espectro de luminescência da fonte de luz | 25 |
| 3.3.3 | Perda de massa por evaporação | 26 |
| 4 | RESULTADOS E DISCUSSÕES | 28 |
| 4.1 | Medidas do espectro de luminescência da fonte de luz usada | 28 |
| 4.2 | Medidas de absorção para as solução contendo NiO 400 e NiO 550 | 29 |
| 4.3 | Medidas de absorção para as solução contendo NiO 400 e NiO 700 | 30 |
| 4.4 | Medida da perda de massa por evaporação | 30 |
| 4.4.1 | Amostras de NiO 400 + NiO 550 | 31 |
| 4.4.2 | Amostras de NiO 400 + NiO 700 | 34 |
| 4.4.3 | Efeito do volume durante a geração de vapor | 39 |
| 5 | CONCLUSÃO | 42 |
| | REFERÊNCIAS | 43 |
| | APÊNDICES | 45 |
| | APÊNDICE A – CONDIÇÕES ATMOSFÉRICAS DAS MEDIDAS REALIZADAS | 46 |
| A.1 | Conjunto A (NiO 400 + NiO 550) | 46 |
| A.2 | Conjunto B (NiO 400 + NiO 700) | 46 |
| A.3 | Efeito do volume (NiO 550) | 46 |

1 Introdução

Apesar de existir um grande avanço tecnológico e industrial no século XXI, a humanidade enfrenta grandes desafios sociais, com a crescente desigualdade social entre as populações, e a escassez de recursos para os menos favorecidos é uma situação preocupante e que requer medidas de proteção e assistencialismo. Regiões isoladas e/ou com recursos limitados, como por exemplo: difícil acesso, falta de água potável e falta de eletricidade, sofrem um impacto devastador e contrastante com regiões mais desenvolvidas.

Não ter acesso ao básico como água potável pode trazer diversos riscos à saúde, como infecções por materiais não esterilizados, condições insalubres, desidratação, entre outros. Estima-se que cerca de 2 bilhões de pessoas não possuem acesso a água potável e além do prejuízo a saúde e qualidade de vida, isso implica também na realização de tratamentos médicos, diante desse cenário, é necessário buscar soluções que sejam fáceis de ser aplicadas e não possuam um alto custo (BRASIL, 2023) (BRASIL, 2019).

Existem pesquisas no âmbito da dessalinização e esterilização que podem ser muito úteis para aplicações nas situações já mencionadas, estas pesquisas estão relacionadas com sistemas que visam a troca de calor entre diferentes meios. Esse tipo de estudo pode ser muito benéfico, pois ao conseguir aquecer determinados materiais, coisas como esterilização e dessalinização podem se tornar processos um pouco menos complexos (PATIL; SUBESHAN; ASMATULU, 2022). Já existem métodos para realizar esses processos, embora eles consumam uma quantidade considerável de energia (SOARES et al., 2006) (COSTA, 1994) (OURIQUES; MACHADO, 2013). Portanto, a proposta é que essas atividades possam ser executadas de forma mais eficiente por meio da evaporação da água. No entanto, não é viável aguardar que a evaporação ocorra de maneira natural, isso levaria muito tempo. Dessa forma, para obter um melhor desempenho podem ser utilizadas nanopartículas (NPs) metálicas para acelerar o processo de geração de calor, facilitando a geração de vapor de água.

A ideia é que ao adicionar essas NPs em um líquido e expor essa solução a luz solar, o vapor que será gerado pode ser utilizado para processos de dessalinização, e o calor gerado no fluido pode ser utilizado para a esterilização (NEUMANN et al., 2013). Assim, ao utilizar nanofluidos (NFs) contendo misturas de NPs metálicas, espera-se obter taxas de evaporação maiores se comparado com soluções contendo apenas água. Assim como os materiais metálicos possuem elétrons livres em sua superfície, as NPs metálicas também, quando a radiação eletromagnética (luz) incide nas NPs os elétrons que estão na superfície são excitados, mas eles não tem capacidade para emitir luz, no entanto, podem auxiliar e conseqüentemente melhorar a eficácia da geração de vapor e aquecimento na solução que

contém as NPs (GOVOROV; RICHARDSON, 2007), (NEUMANN et al., 2013), (FANG et al., 2013).

O processo de geração de vapor em NFs contendo NPs metálicas consiste em incidir luz sobre o NF para excitar as NPs, e em volta dessa NP será formada uma "nanobolha" (bolha de vapor) que advém das oscilações geradas entorno da NP, a medida que o tempo passa essa nanobolha se expande e a medida que aumenta o vapor em seu entorno faz com que a NP flutue, mas ao chegar na interface água-ar esse vapor é liberado e a NP afunda e repete esse processo (FANG et al., 2013). Esse processo é fundamental para a geração de vapor, pois é possível obter temperaturas elevadas no entorno da nanopartícula sem a necessidade de aquecer a solução à sua temperatura de ebulição.

As NPs mais utilizadas para esse processo de geração de vapor são o Au (Ouro), Ag (Prata), Al (Alumínio), Pt (Platina), In (Índio) e alguns óxidos metálicos devido às suas capacidades absorvedoras (PANG et al., 2020), (PATIL; SUBESHAN; ASMATULU, 2022). Mas, devido ao alto custo para obter esses metais preciosos, e aproveitando a oportunidade para estudar novos materiais, foi decidido utilizar o Óxido de Níquel (NiO) que além de ser mais acessível, possui propriedades metálicas, que são úteis para este trabalho.

Espera-se que ao utilizar diferentes tamanhos de NPs de NiO, seja possível obter qual a taxa de evaporação das amostras utilizadas e se existe uma concentração ideal para uma maior eficiência de geração de vapor e se é possível obter bons resultados para materiais mais acessíveis.

Sabe-se que o espectro de absorção de nanopartículas metálicas é influenciado pelo tamanho das mesmas. Neste trabalho, foram utilizadas misturas de nanopartículas de diferentes tamanhos com o objetivo de maximizar a região espectral de absorção óptica nesses sistemas. Além disso, ao variar as concentrações relativas, busca-se identificar as concentrações ideais que potencializem a geração de vapor.

2 Fundamentação Teórica

Existem aspectos que são fundamentais para compreender os fenômenos de geração de vapor utilizando NPs metálicas, mas em primeiro lugar deve-se entender o que é uma NP, e como a evaporação funciona. Uma nanopartícula consiste em uma partícula na escala nanométrica que pode apresentar propriedades físicas, químicas e biológicas distintas daquelas apresentadas pelo mesmo material em tamanhos maiores (PRASAD, 2004).

Isso ocorre porque o tamanho de uma partícula interfere diretamente na forma como os elétrons se movem e interagem com a luz, o que pode aumentar ou diminuir a energia de excitação (PRASAD, 2004). Por isso é comum que as nanopartículas de alguns materiais tenham propriedades diferentes do material em tamanho maior. Já a evaporação é um processo físico em que se converte um líquido em vapor devido a energia térmica (agitação das moléculas), dessa forma a evaporação pode acontecer em qualquer temperatura desde que ocorra a absorção de energia pelas moléculas, não somente no ponto de ebulição da substância.

Uma NP metálica possui características ópticas únicas como o *plasmons* de superfície, que podem ser descritos como ondas coletivas de elétrons, ou seja, os elétrons livres no material oscilam em conjunto se comportando como uma onda. Essas oscilações podem gerar campos eletromagnéticos na superfície da nanopartícula que pode estar relacionado com a sua capacidade de absorver e espalhar a luz, e pode ser ajustada através da manipulação do tamanho e formato da nanopartícula para obter maior absorção em determinada região do espectro eletromagnético (MOORES; GOETTMANN, 2006).

Portanto, quando um feixe luminoso incide sobre uma NP metálica, os elétrons na superfície são excitados e geram *plasmons* na superfície. Se a luz incidente possuir uma frequência próxima à da ressonância dos *plasmons*, os elétrons livres na superfície oscilam coletivamente, isso vai aumentar a energia cinética dos elétrons que será convertida em energia térmica. Como resultado haverá um aumento na temperatura no entorno da NP, e consequentemente será gerado o vapor em volta da NP. Esse processo é conhecido como geração de vapor induzida pela luz (*Ligth-Induced Vapor Generation*) (FANG et al., 2013).

Quando o vapor é gerado em volta da NP como mostra a Figura 1, é como se a NP estivesse suspensa dentro da nanobolha:

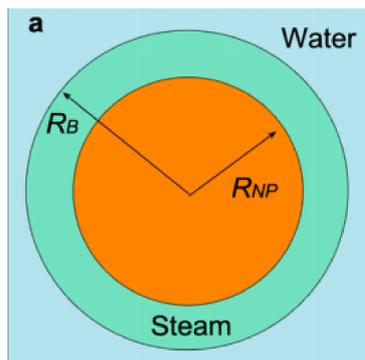


Figura 1 – Representação de como a nanobolha se forma envolta da NP na água (water), em que R_{NP} é o raio da NP e R_B é o raio da nanobolha.

Fonte: (FANG et al., 2013).

Quando a luz incide sobre esse conjunto vapor+NP nota-se uma variação no índice de refração devido aos diferentes meios que o feixe percorre. Ou seja, os raios luminosos sofrem uma maior refração e conseqüentemente espalhamento devido à esses desvios, e ao atingir mais NP o efeito da geração de vapor devido as nanobolhas é potencializado.

A medida que a nanobolha se expande ela flutua até a interface água-ar e devido a diferença de pressão e à tensão superficial da água a nanobolha dissipa liberando calor na superfície, dessa forma a taxa de geração de vapor também aumenta (FANG et al., 2013). Esse aumento de geração de vapor é que se procura com a realização deste trabalho.

3 Materiais e Métodos

3.1 Síntese das NPs de NiO

As NPs utilizadas nesta pesquisa foram obtidas pelo pesquisador Jeann César do Grupo de Propriedades Magnéticas e Estruturais dos Sólidos (GPMES) do Instituto de Física da Universidade Federal de Uberlândia (UFU). O método de síntese dessas NPs foi através de uma técnica chamada Decomposição Térmica no qual o material decomposto foi o hidróxido de níquel ($Ni(OH_2)$), que foi aquecido a temperaturas elevadas para decompor os seus componentes em componentes individuais.

Visando obter diferentes tamanhos usa-se o processo de calcinação, que consiste em aquecer a temperatura das amostras de NPs a temperaturas acima de $250^\circ C$ (ARAÚJO, 2023).

As NPs que foram utilizadas neste trabalhos são listadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Tabela de concentração das soluções contendo NPs do conjunto A.

| NPs metálicas de NiO | Tamanho (nm) | Temperatura de Calcinação ($^\circ C$) |
|------------------------|------------------|--|
| NiO 400 | $16,74 \pm 0,04$ | 400 |
| NiO 550 | $32,39 \pm 0,09$ | 550 |
| NiO 700 | $51,02 \pm 0,26$ | 700 |

Fonte: Autora desta monografia, 2023.

Note que existe uma diferença de tamanhos considerável entre as NPs de NiO, com isso, espera-se a possibilidade de observar os efeitos decorrentes dos distintos espectros de absorção das nanopartículas.

3.2 Preparação das amostras em soluções coloidais

Primeiro foi realizada a pesagem do pó de NiO em uma balança de precisão, tomando cuidado com a calibração da balança para garantir a menor margem de erro nas medidas realizadas. A evaporação será realizada em dois conjuntos de amostras, o conjunto A contendo as NPs de NiO 400 e NiO 550, e o conjunto B contendo as NPs de NiO 400 e NiO 700. Cada conjunto resultará em 7 amostras, com concentrações diferentes: Am_0 , Am_1 , Am_2 , Am_3 , Am_4 , Am_5 e Am_6 .

3.2.1 Conjunto A - NiO 400 e NiO 550

Para as amostras do conjunto A foram utilizadas a massa inicial de 0,0608 g de NiO 550 e 0,0609 g de NiO 400. Em um becker com 40 ml de água milli-q foi adicionado a massa inicial de NiO 550 e em outro becker com 50 ml de água milli-q foi adicionado a massa de inicial de NiO 400. Ambos os frascos iniciais foram colocados em um misturador ultrassônico pelo tempo necessário para garantir que a solução ficasse o mais homogênea possível.

Após a etapa do misturador ultrassônico foi realizado o fracionamento e diluição das soluções contidas nos beckers. O NiO 400 manterá sua concentração fixa e o volume inicial do becker de 50 ml será fracionado em cinco partes de 10 ml cada, quatro dessas serão reservadas para as misturas com o NiO 550 que terá sua concentração variada, e a outra de 10 ml será diluída em 10 ml de água milli-q para obter a Am_5 .

Para a solução de NiO 550 o volume inicial do becker de 40 ml foi fracionado em duas partes de 20 ml, na qual uma dessas será a Am_0 , e as 20 ml restantes serão fracionadas em mais duas partes de 10 ml. Em uma delas adiciona-se 10 ml da solução de NiO 400 obtendo a Am_1 , e na outra parte adiciona-se 10 ml de água milli-q, voltando as 20 ml. Essa nova solução será fracionada em duas partes de 10 ml novamente, em uma delas adiciona-se 10 ml da solução de NiO 400 obtendo a Am_2 , e na outra parte adiciona-se 10 ml de água milli-q, voltando as 20 ml. Esse processo é repetido até obter as 7 amostras conforme representado na Figura 2.

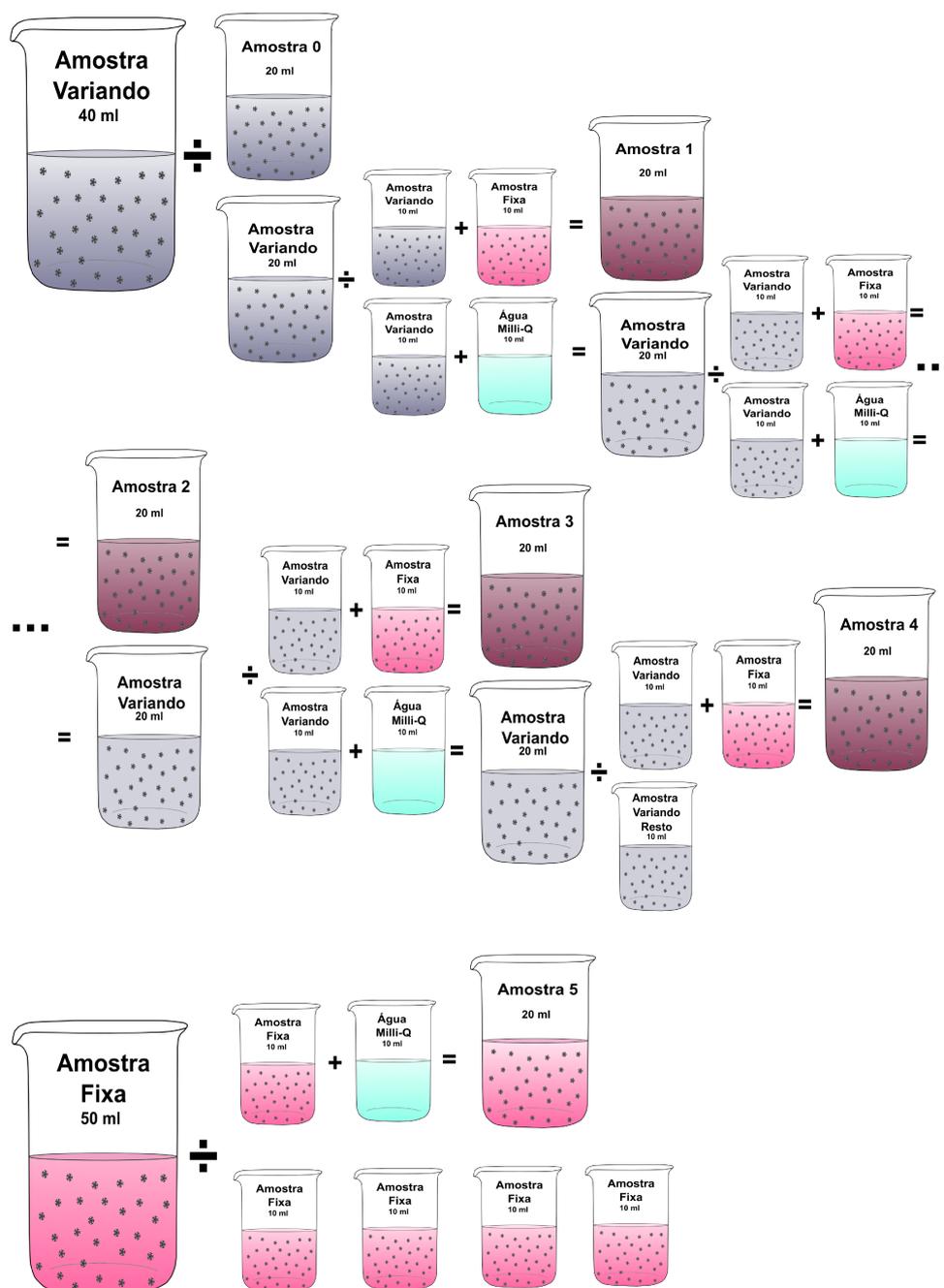


Figura 2 – Representação de as diluições e fracionamentos são realizados para cada uma das 7 amostras: Amostra 0: Am_0 , Amostra 1: Am_1 , Amostra 2: Am_2 , Amostra 3: Am_3 , Amostra 4: Am_4 , Amostra 5: Am_5 e Amostra 6: Am_6 . No conjunto A, a amostra variando refere-se ao NiO 550 e a amostra fixa refere-se ao NiO 400.

Fonte: Autora desta monografia, 2023.

Após realizar o procedimento mostrado na Figura 2, é possível obter a Tabela 2, com a concentração tanto em mg/ml como em $vol\%$ do conjunto A.

Tabela 2 – Tabela de concentração das soluções contendo NPs do conjunto A.

| Amostras | NiO 400 | | NiO 550 | |
|----------|---------|--------|---------|--------|
| | mg/ml | vol % | mg/ml | vol % |
| 0 | 0 | 0 | 1,5200 | 0,0228 |
| 1 | 0,609 | 0,0091 | 0,7600 | 0,0114 |
| 2 | 0,609 | 0,0091 | 0,3800 | 0,0057 |
| 3 | 0,609 | 0,0091 | 0,1900 | 0,0028 |
| 4 | 0,609 | 0,0091 | 0,0950 | 0,0014 |
| 5 | 0,609 | 0,0091 | 0 | 0 |
| 6 | 0 | 0 | 0,9569 | 0,0143 |

Fonte: Autora desta monografia, 2023.

Na Tabela 2 é possível verificar a concentração de todas as amostras que foram utilizadas durante a geração de vapor para o conjunto A.

3.2.2 Conjunto B - NiO 400 e NiO 700

Para as amostras do conjunto B foram utilizadas a massa inicial de 0,0643 g de NiO 700 e a massa inicial de 0,0631 g de NiO 400. Em um becker com 40 ml de água milli-q foi adicionada a massa inicial de NiO 700 e em outro becker com 50 ml de água milli-q foi adicionada a massa inicial de NiO 400. Ambos os frascos iniciais foram colocados em um misturador ultrassônico pelo tempo necessário para garantir que a solução ficasse o mais homogênea possível.

Após a etapa do misturador ultrassônico deve ser realizado o fracionamento e diluição das soluções contidas nos beckers. O NiO 400 manterá sua concentração fixa e o volume inicial do becker de 50 ml será fracionado em cinco partes de 10 ml cada, quatro dessas serão reservadas para as misturas com o NiO 700 que terá sua concentração variada, e a outra de 10 ml será diluída em 10 ml de água milli-q para obter a Am_5 . Deve-se repetir o mesmo procedimento descrito na seção 3.2.1 e na Figura 2.

Após realizar o procedimento mostrado na Figura 2, é possível obter a Tabela 3, com a concentração tanto em mg/ml como em vol% do conjunto B.

Tabela 3 – Tabela de concentração das soluções contendo NPs do conjunto B.

| Amostras | NiO 400 | | NiO 700 | |
|----------|---------|--------|---------|--------|
| | mg/ml | vol % | mg/ml | vol % |
| 0 | 0 | 0 | 1,6075 | 0,0241 |
| 1 | 0,631 | 0,0095 | 0,8038 | 0,0120 |
| 2 | 0,631 | 0,0095 | 0,4019 | 0,0060 |
| 3 | 0,631 | 0,0095 | 0,2009 | 0,0030 |
| 4 | 0,631 | 0,0095 | 0,1005 | 0,0015 |
| 5 | 0,631 | 0,0095 | 0 | 0 |
| 6 | 0 | 0 | 0,9569 | 0,0143 |

Fonte: Autora desta monografia, 2023.

Na Tabela 3 é possível verificar a concentração de todas as amostras que foram utilizadas durante a geração de vapor para o conjunto B.

É importante salientar que ao manter a concentração de NiO 400 (a NP de menor tamanho) fixa, tanto no conjunto A quanto no conjunto B, é possível analisar a contribuição da mistura de tamanhos de NPs para a geração de vapor de água.

3.2.3 Procedimento Experimental

O experimento consiste em utilizar uma lâmpada de xenônio de baixa pressão com potência de 53 ± 9 mW, modelo H1 10000k 12v 35w, que será utilizada como fonte primária de energia para a geração de vapor de água. Além da lâmpada, utiliza-se duas lentes com focos de 5 cm e 29 cm para focalizar o feixe. Este sistema permite substituir, dentro das limitações, um simulador solar (equipamento de alto custo cujo espectro de emissão emula a curva de emissão de corpo negro do sol).

A lâmpada é colocada sobre uma balança de precisão para incidir sobre a amostra, e com isso deve-se observar a quantidade de massa que será evaporada de cada amostra durante 90 minutos. É importante que a lâmpada e a balança sejam ligados aproximadamente 40 minutos antes das medidas para garantir que já passaram do processo de aquecimento do sistema.

As amostras devem passar pelo misturador ultrassônico antes de cada medida para garantir que no momento inicial todas as partículas estarão em condições similares. Além disso, o ar condicionado do laboratório deve ser fixado em $22^{\circ}C$ para garantir que a temperatura ambiente se mantém constante durante todo o experimento, é possível conferir os dados da pressão atmosférica durante o experimento no Apêndice A nas tabelas 4, 5 e 6. O becker no qual as amostras serão colocadas está em um suporte de isopor para evitar a perda de calor para o meio. Observe na Figura 3 que o aparato experimental consiste em um sistema de excitação óptica "home made".

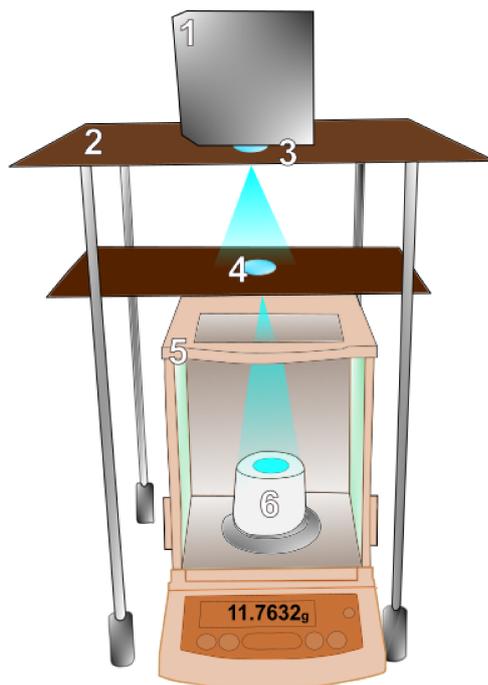


Figura 3 – Aparato experimental utilizado. 1- Lâmpada xenônio, 2- Base de madeira, 3- Lente com foco de 5 cm, 4- Lente com foco de 29 cm, 5- Balança de alta precisão, 6- Becker com suporte de isopor para isolamento térmico.

Fonte: Autora desta monografia, 2023.

Para iniciar as medidas, primeiro deve-se evaporar a água milli-q pura (sem a presença de NPs), e este será o parâmetro de comparação para a análise posterior da taxa de evaporação das NPs. Após colocar a água dentro do becker, inicia-se o processo de evaporação da água milli-q que terá duração de 90 minutos e registra-se o valor da massa a cada 5 minutos. Ao fim dos 90 minutos, retira-se o conjunto becker+isopor para realizar a devida higienização e secagem, e devolvemos para a balança.

Agora deve-se iniciar a evaporação da amostra para por 90 minutos e registra-se o valor da massa a cada 5 minutos. Ao chegar ao fim dos 90 minutos retira-se o becker para limpeza e repete-se o processo para cada uma das amostras restantes. Ao final do experimento é necessário higienizar e desligar os equipamentos para evitar danos.

3.3 Técnicas de Caracterização

3.3.1 Medidas de absorção óptica das amostras

Para verificar a eficácia da evaporação, é necessário saber em qual comprimento de onda que as amostras tem maior absorção, e para tal realiza-se as medidas do espectro de absorção de cada amostra utilizada.

Utilizando o equipamento UV-VIS Spectrophotometer UV-2600i da empresa SHIMADZU como mostra a Figura 4 foi possível realizar a caracterização dos espectros.



Figura 4 – Amostras no espectrofotômetro. Cubeta 1- Água milli-q para referência; Cubeta 2- Amostra a ser analisada.

Fonte: Autora desta monografia, 2023.

O espectrofotômetro funciona utilizando dois tipos de luz, a ultra-violeta (UV) e a luz visível (VIS) para analisar todo o espectro da amostra. Utiliza-se duas cubetas de vidro para poder realizar a medida, a cubeta 1 é a cubeta de referência que capta a intensidade original da fonte. Já a cubeta 2 que contém a amostra, fica no caminho dos dois feixes de luz e dessa forma o gráfico obtido mostra a absorbância em função do comprimento de onda.

3.3.2 Medidas do espectro de luminescência da fonte de luz

A fonte de luz que foi utilizada no experimento, é uma lâmpada de xenônio como mostra a Figura 5 e possui potência de $53 \pm 9 \text{ mW}$.

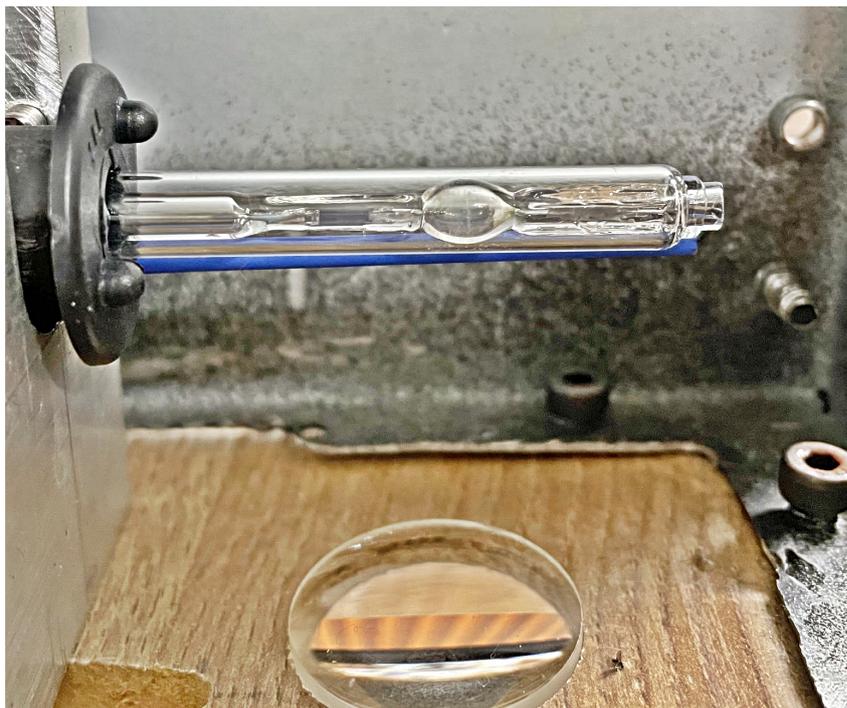


Figura 5 – Lâmpada de xenônio que foi utilizada no experimento.

Fonte: Autora desta monografia, 2023.

Para obter o espectro de luminescência da lâmpada foi utilizado o software SpectraSuite conectado a um espectrômetro HR4000 da Ocean Optics.

3.3.3 Perda de massa por evaporação

Para determinar a perda de massa devido ao processo de evaporação é necessário obter os dados tanto da evaporação da água quanto das amostras, dessa forma obtém-se dois conjunto de dados:

- m_a : massa de água milli-q pura
- m_{np} : massa da amostra contendo nanopartículas

E como a balança de precisão eletrônica utilizada possui incerteza de 0,0001g em suas medidas, os dados são escritos da seguinte forma:

$$m_a \pm \Delta m_a \text{ (g)} \quad m_{np} \pm \Delta m_{np} \text{ (g)} \quad (3.1)$$

Mas, para uma melhor notação e análise a normalização dos dados é necessária, e foi realizada subtraindo a massa a qualquer tempo, pela massa inicial em cada caso, portanto:

- $M_a = m_{a0} - m_a \text{ (g)}$: Massa da água milli-q normalizada em que m_{a0} é a massa inicial da água milli-q

- $M_{np} = m_{np0} - m_{np}$ (g): Massa da amostra normalizada em que m_{np0} é a massa inicial da amostra contendo NPs metálicas

E para determinar a incerteza dessa normalização utiliza-se o cálculo abaixo:

$$\Delta M_a = \sqrt{\left(\frac{\partial M_a}{\partial m_a}\right)^2 \cdot (\Delta m_a)^2} \quad \Delta M_{np} = \sqrt{\left(\frac{\partial M_{np}}{\partial m_{np}}\right)^2 \cdot (\Delta m_{np})^2} \quad (3.2)$$

Logo:

$$M_a \pm \Delta M_a \text{ (g)} \quad M_{np} \pm \Delta M_{np} \text{ (g)} \quad (3.3)$$

A partir dos valores normalizados é possível determinar qual a variação da massa da amostra ao subtrair a massa da água que foi evaporada, esta medida é realizada para descontar da evaporação mediada pelas NPs o efeito da evaporação natural da água milli-q, dessa forma:

- $\xi = M_{np} - M_a$ (g): Variação da massa da amostra

E a incerteza dessa variação é dada por:

$$\Delta = \sqrt{\left(\frac{\partial \xi}{\partial M_{np}}\right)^2 \cdot (\Delta M_{np})^2 + \left(\frac{\partial \xi}{\partial M_a}\right)^2 \cdot (\Delta M_a)^2} \quad (3.4)$$

Portanto, a variação da massa da amostra é dada como:

$$\xi \pm \Delta \xi(g) \quad (3.5)$$

Mas, para obter a taxa de evaporação é fundamental saber a quantidade de massa que evaporou dentro do tempo (t) em que foi realizado o experimento. Ao gerar um gráfico da variação da massa da amostra, é possível obter a taxa através do processo de linearização, dessa forma:

- $\Gamma_a = \frac{dM_a}{dt}$: Taxa de evaporação da água milli-q pura
- $\Gamma = \frac{d\xi}{dt}$: Taxa de evaporação das amostras

Com base nas equações apresentadas na seção 3.3.3, é possível realizar a análise dos dados adquiridos durante o experimento.

4 Resultados e Discussões

Como foi descrito na Seção 3.3 a análise do espectro de absorção e luminescência das amostras foi realizado a fim de compreender o seu comportamento.

4.1 Medidas do espectro de luminescência da fonte de luz usada

O espectro de luminescência da lâmpada utilizada para a geração de vapor pode ser visto na Figura 6.

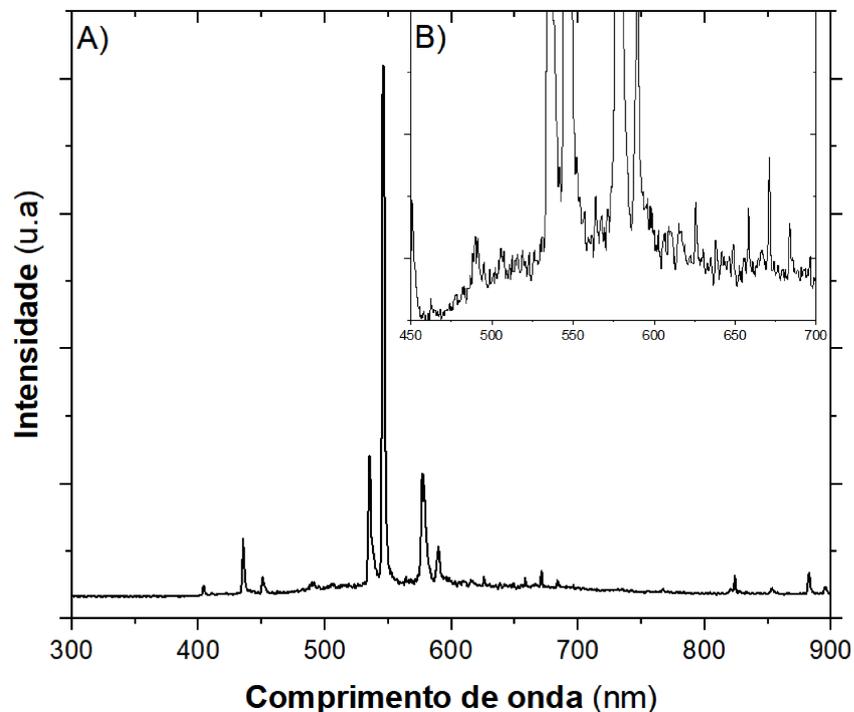


Figura 6 – Espectro de luminescência da lâmpada de xenônio utilizada para a geração de vapor: A) Espectro completo, B) Detalhe do espectro da região entre 450 *nm* e 700 *nm* enfatizando a banda de emissão nesta região.

Fonte: Autora desta monografia, 2023.

Note que o espectro de emissão da lâmpada de xenônio se estende de 400 *nm* à 900 *nm*, como pode ser observado na Figura 6A, mas existe a presença de vários picos em comprimentos de ondas específicos, além da presença de uma banda de emissão que se estende de aproximadamente 450 *nm* à 700 *nm*, como pode ser notado na Figura 6B.

O espectrômetro utilizado para obter este espectro de emissão tem baixa sensibilidade para medidas abaixo de 400 *nm*. No entanto, por já estar na região de ultravioleta é improvável que a lâmpada, tenha emissão nessa região do espectro.

4.2 Medidas de absorção para as solução contendo NiO 400 e NiO 550

Observe que na Figura 7, o espectro de absorbância das amostras de NiO (0 à 6) apresentam um pico em torno de aproximadamente 340 nm, e no restante do espectro não é possível notar nenhuma outra estrutura.

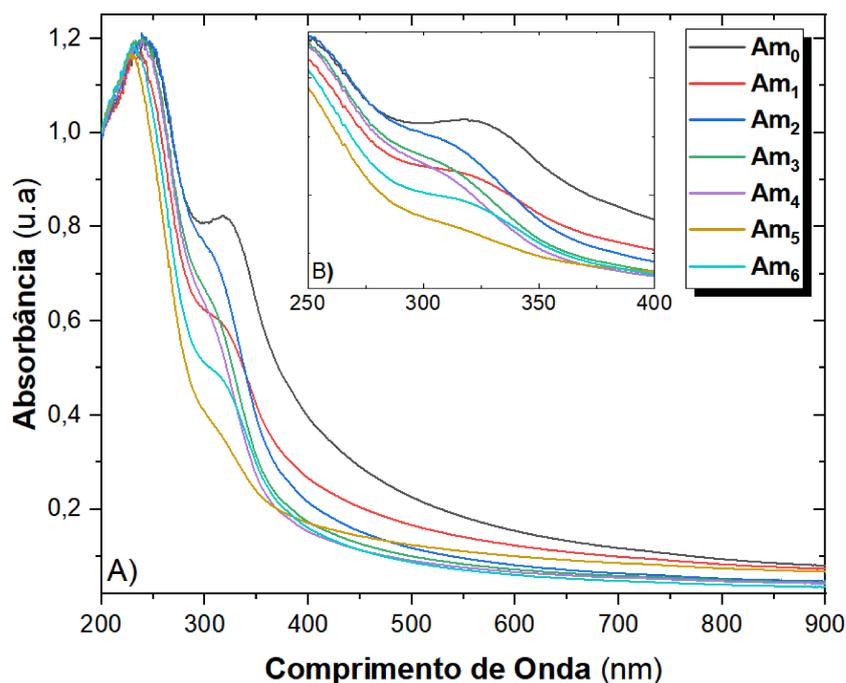


Figura 7 – Espectro de absorbância retirado das amostras contendo NiO 400 + NiO 550, em que Am_n com n de 0 à 6 representando cada uma das amostras estudadas: A) Espectro completo na região de 200 nm à 900 nm, B) Detalhe do espectro de 250 nm à 400 nm, enfatizando o pico do espectro.

Fonte: Autora desta monografia, 2023.

O comportamento observado na Figura 7 é coerente com o comportamento de NPs de NiO que já foram reportados na literatura (ALAGIRI; PONNUSAMY; MUTHAMIZH-CHELVAN, 2012), (LI et al., 2006), (SAGADEVAN; PODDER, 2015). As amostras de 1 a 5 apresentam uma mistura de nanopartículas com tamanhos diferentes (NiO 400 e NiO 550), e por isso não possível observar de uma forma inequívoca a presença dos dois tipos de NPs de forma distinta. A provável causa para essa situação é que devido a mistura de NPs durante a preparação de cada amostra, as distribuições de tamanho estão se sobrepondo no espectro.

A faixa do espectro absorvida pelas NPs de NiO é pequena se comparada ao tamanho total do espectro de emissão da fonte luminosa, e mesmo do espectro solar, (KOWALSKI; MASIERO, 2019). Isso impacta negativamente na geração de vapor, pois a solução não absorve totalmente a energia da fonte de excitação. Ainda assim, como uma parte significativa do espectro de emissão do sol pode ser absorvido por estas NPs, é

importante investigar a dinâmica de geração de vapor nesse sistema.

4.3 Medidas de absorção para as solução contendo NiO 400 e NiO 700

Observe que na Figura 8, o espectro de absorbância das amostras de NiO (0 à 6) não apresentam um pico expressivo no espectro. Além disso, existe muito ruído presente nos comprimentos de onda abaixo de 300 nm.

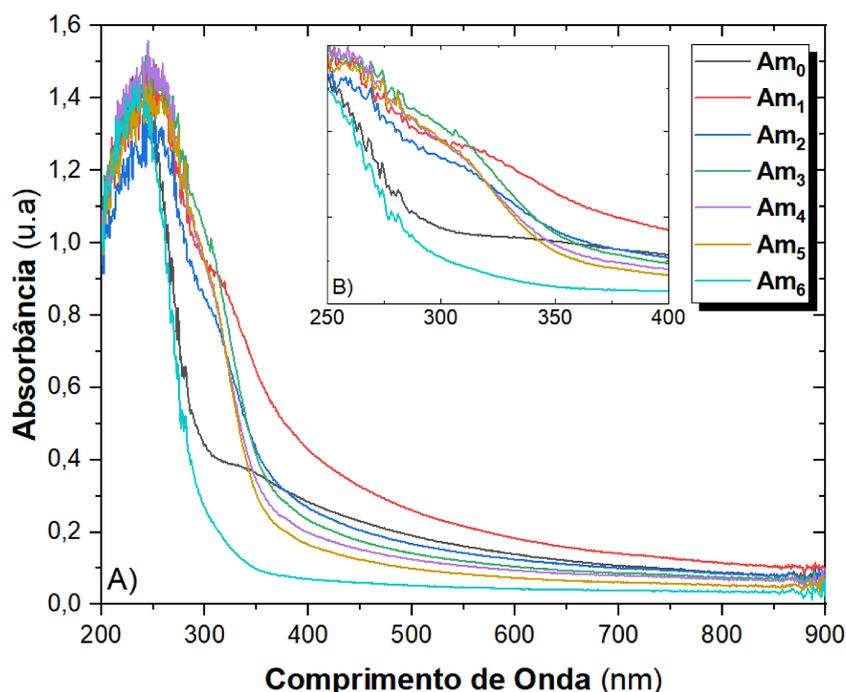


Figura 8 – Espectro de absorbância retirado das amostras contendo NiO 400 + NiO 700, em que Am_n com n de 0 à 6 representando cada uma das amostras estudadas: A) Espectro completo na região de 200 nm à 900 nm, B) Detalhe do espectro de 250 nm à 400 nm, enfatizando o pico do espectro.

Fonte: Autora desta monografia, 2023.

O comportamento observado na Figura 8 é coerente com o comportamento de NPs de NiO, assim como a Figura 7, a Figura 8 tem um comportamento similar. Os gráficos de absorção foram utilizados para localizar as regiões de intersecção com a região de emissão.

4.4 Medida da perda de massa por evaporação

Nesta seção serão apresentados os dados obtidos da evaporação de água milli-q com ou sem a presença de diferentes misturas de NPs metálicas, submetidas à excitação óptica.

4.4.1 Amostras de NiO 400 + NiO 550

Após realizar o procedimento mostrado nas Seções 3.2 e 3.3.3, foi obtida a Figura 9.

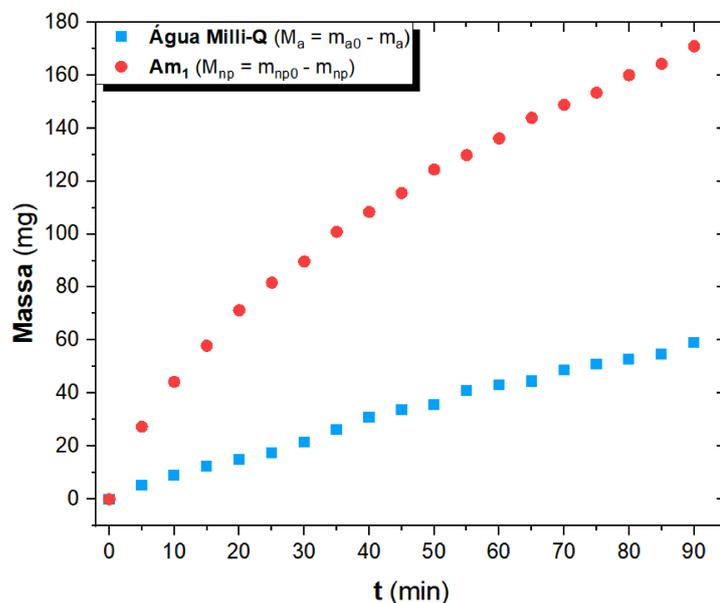


Figura 9 – Normalização da massa de água evaporada na Am_1 (descrita na Tabela 2) para exemplificar a diferença na perda de massa quando a NP metálica de NiO é adicionada.

Fonte: Autora desta monografia, 2023.

A Figura 9 mostra a massa de água evaporada em função do tempo de exposição à lâmpada. É possível perceber que a amostra contendo NPs metálicas apresenta uma maior quantidade de massa de água evaporada do que a amostra pura, com apenas água milli-q. Portanto, a presença de NPs eleva consideravelmente a taxa de evaporação da água, e esse resultado está de bom acordo com outros sistemas similares encontrados na literatura, (NEUMANN et al., 2013), (ISHII et al., 2016), (ZEINY et al., 2018).

Para considerar apenas o efeito das NPs metálicas na evaporação realiza-se a subtração entre as curvas da água milli-q e da amostra na Figura 9. Com isso o efeito da evaporação residual ambiente da água foi subtraído, deixando apenas o efeito de evaporação devido às NPs metálicas, como pode ser observado na Figura 10.

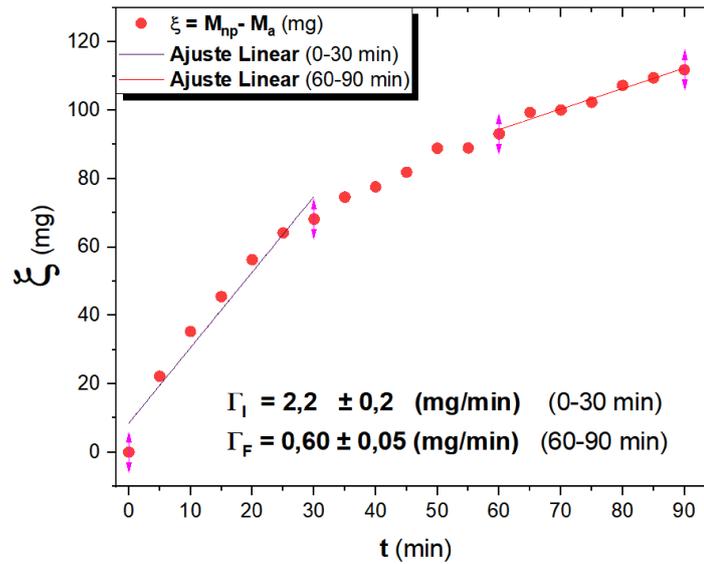


Figura 10 – Variação da massa da amostra (ξ) em mg em função do tempo em minutos para a amostra Am_1 (descrita da Tabela 2), com a taxa inicial (Γ_I) e final (Γ_F) para cada concentração.

Fonte: Autora desta monografia, 2023.

Da Figura 10 é possível notar que a evaporação acontece de forma diferente ao longo do tempo. Durante o regime inicial acontece uma evaporação rápida e em seguida no regime final acontece uma evaporação de forma mais lenta.

Para caracterizar o processo de evaporação foram definidas então duas taxas de evaporação: uma entre 0 e 30 minutos e outra (uma região mais estacionária) entre 60 e 90 minutos. Na região entre 30 e 60 minutos, normalmente encontra-se uma região de transição entre esses regimes de evaporação. Para a amostra 6 descrita nas Figuras 9 e 10, a taxa inicial foi de $\Gamma_I = 2,2 \pm 0,2 \text{ mg/min}$, enquanto a taxa final foi de $\Gamma_F = 0,60 \pm 0,05 \text{ mg/min}$, ou seja, houve uma variação de aproximadamente 73%. Pode-se presumir que este comportamento pode estar associado a diversos fenômenos físicos tais como: gradiente de temperatura entre o topo e o fundo da amostra e decantação das partículas maiores.

O gradiente de temperatura já foi observado experimentalmente em outros sistemas, (ZEINY et al., 2018). Neste caso, infere-se que inicialmente as partículas aquecidas próximas a interface água-ar contribuem para a evaporação com uma taxa elevada. No entanto, com o decorrer do tempo o gradiente gerado indica um fluxo de calor apontando para o fundo do recipiente, essa fuga de energia pode contribuir para uma diminuição na taxa de evaporação.

Já o processo de decantação das partículas maiores pode contribuir para a variação da taxa de evaporação através da retirada de NPs metálicas da interface água-ar. Mas, para compreender a variação da taxa de absorção mais pesquisas são necessárias e isso será deixado para um momento futuro. Uma ilustração desses processos pode ser observada na

Figura 11.

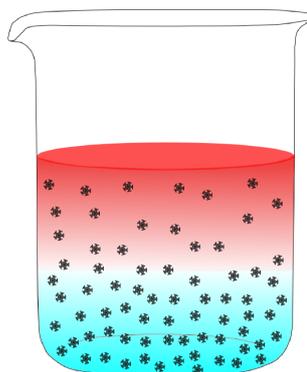


Figura 11 – Imagem exemplificando o gradiente de temperatura e o processo de decantação com uma concentração de partículas no fundo da amostra.

Fonte: Autora desta monografia, 2023.

Uma vez que o processo que ocorre durante a evaporação foi entendido, deve-se analisar a variação de massa (ξ) de todas as amostras para comparar o seu comportamento de acordo com as diferentes concentrações, assim como mostra a Figura 12.

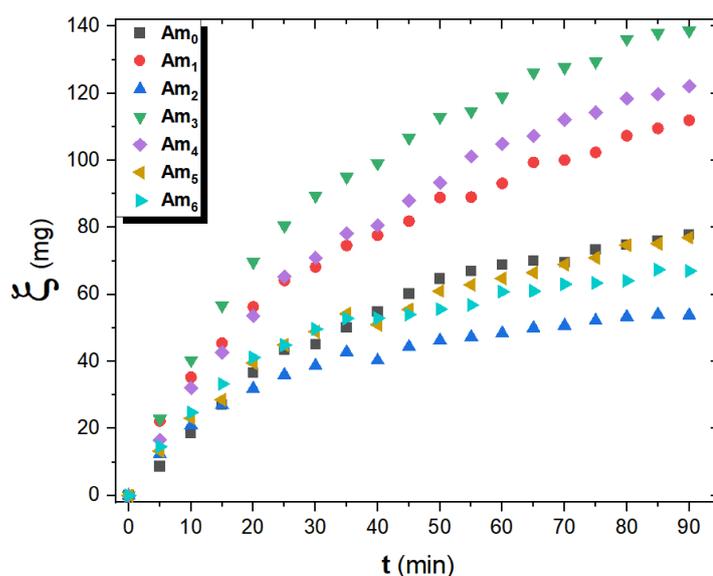


Figura 12 – Variação da massa da amostra (ξ) em mg em função do tempo em minutos para as amostras descritas da Tabela 2.

Fonte: Autora desta monografia, 2023.

Como pode ser observado na Figura 12 a evaporação não se deu de forma proporcional à concentração, ela aumenta e depois decai com o aumento da concentração do NiO 550. Isso pode indicar que existe uma concentração ótima para maximizar a evaporação de água.

Para investigar essa condição é fundamental realizar uma análise das taxas de evaporação inicial e final para todas as amostras, como pode ser visto na Figura 13:

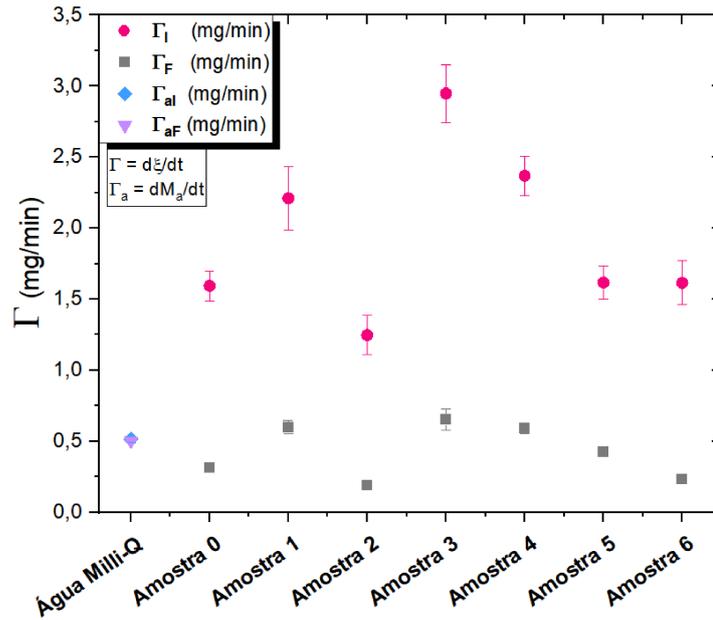


Figura 13 – Taxa de evaporação das amostras ($\Gamma = \frac{d\xi}{dt}$) na região inicial (Γ_I) e final (Γ_F) e a média da taxa de evaporação da água milli-q ($\Gamma_a = \frac{dM_a}{dt}$) na região inicial (Γ_{aI}) e final (Γ_{aF}).

Fonte: Autora desta monografia, 2023.

É possível perceber que a taxa de evaporação máxima foi obtida para a amostra 3, que contém 0,0091% de NiO 400 e 0,0028% de NiO 550. Além disso, note que as taxas iniciais e finais da água milli-q que foram obtidas não sofrem alterações significativas de uma amostra para outra.

Observe que as amostras 0, 5 e 6 que contém apenas uma das espécies presentes NiO 400 ou NiO 550 são as amostras que mantém uma taxa aproximadamente constante, já as amostras 1, 2, 3 e 4 que estão misturadas apresentam em média taxas maiores de evaporação o que pode mostrar que quando se tem tamanhos diferentes de NPs metálicas na solução a eficiência da geração de vapor aumenta.

Este resultado pode ser entendido como um efeito do aumento geral do coeficiente de absorção do sistema devido à presença de partículas com diferentes espectros de absorção.

4.4.2 Amostras de NiO 400 + NiO 700

Seguindo o mesmo processo de análise da seção 4.4.1, pode-se obter a Figura 14:

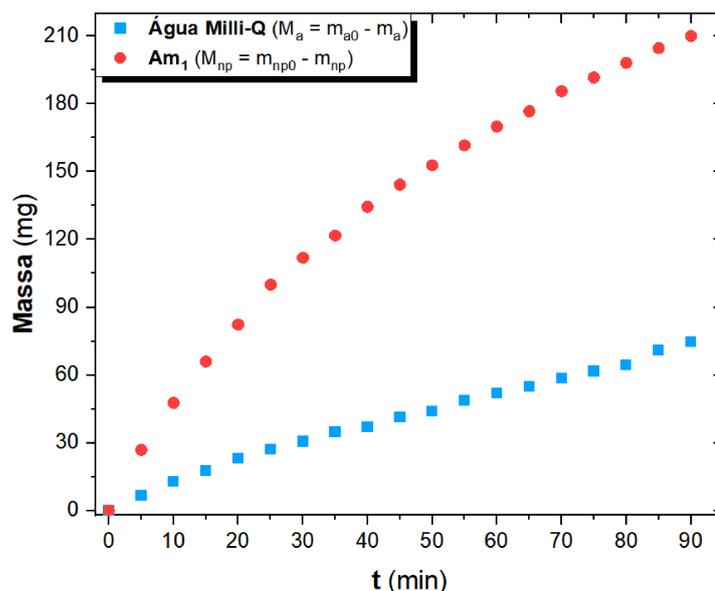


Figura 14 – Normalização da massa de água evaporada na Am_1 (descrita na Tabela 3) para exemplificar a diferença na perda de massa quando a NP metálica de NiO é adicionada.

Fonte: Autora desta monografia, 2023.

A partir da Figura 14 é possível observar que novamente a amostra contendo NPs metálicas apresenta maior massa de água evaporada que a amostra contendo apenas água milli-q. E para considerar apenas o efeito das NPs metálicas desse novo conjunto, desconsidera-se o efeito da evaporação residual da água, como pode ser observado na Figura 15:

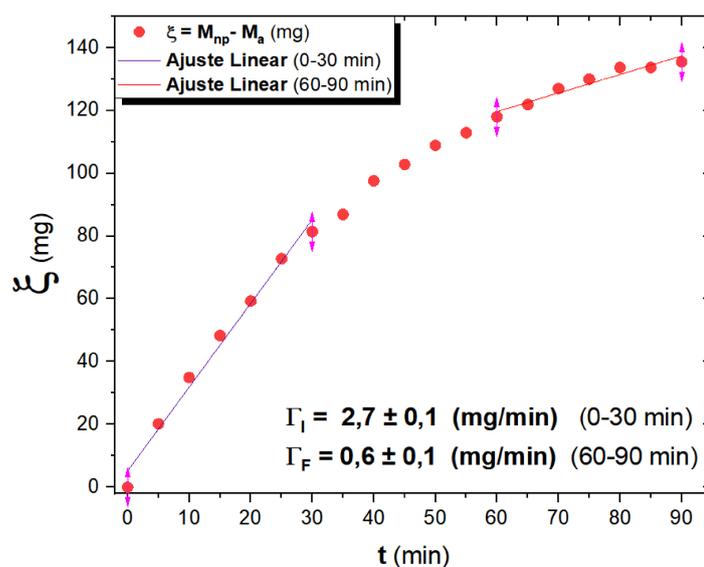


Figura 15 – Variação da massa da amostra (ξ) em mg em função do tempo em minutos para a amostra Am_1 (descrita na Tabela 3), com a taxa inicial (Γ_I) e final (Γ_F) para cada concentração.

Fonte: Autora desta monografia, 2023.

Note que o resultado é similar ao do conjunto A, observa-se que durante o regime

inicial a evaporação acontece de forma mais rápida em comparação com o regime final. Mantendo o padrão de análises que foi estabelecido, para o regime inicial de 0 a 30 minutos, foi obtido a taxa inicial de a taxa inicial foi de $\Gamma_I = 2,7 \pm 0,1 \text{ mg/min}$ e a taxa final foi de $\Gamma_F = 0,6 \pm 0,1 \text{ mg/min}$, portanto, uma variação de aproximadamente 78%. Por se tratar da mesma espécie de nanopartícula, apenas com tamanhos diferentes, podemos pressupor que esse comportamento pode estar associado aos mesmos fenômenos destacados na seção 4.4.1.

Ao analisar a variação de massa (ξ) de todas as amostras do conjunto B, podemos comparar o comportamento das amostras de acordo com as diferentes concentrações do conjunto, como mostra a Figura 16:

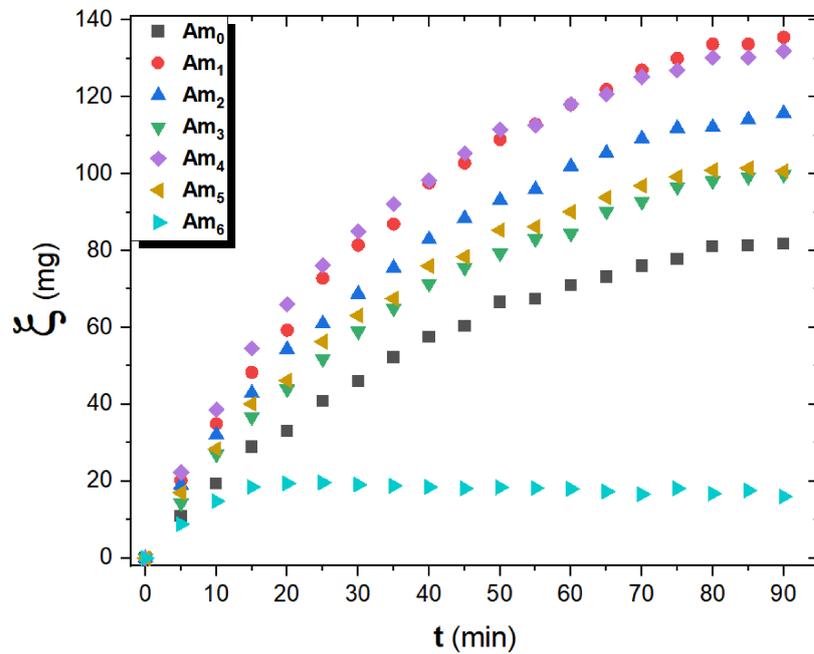


Figura 16 – Variação da massa da amostra (ξ) em mg em função do tempo em minutos para as amostras descritas da Tabela 3.

Fonte: Autora desta monografia, 2023.

Aqui percebe-se que novamente não há uma evaporação proporcional à concentração, o que indica que existe uma concentração ideal de NPs metálicas de NiO para obter a melhor eficiência do sistema. Para verificar essa concentração é necessário averiguar as taxas de evaporação inicial e final de todas as amostras, como mostra a Figura 17:

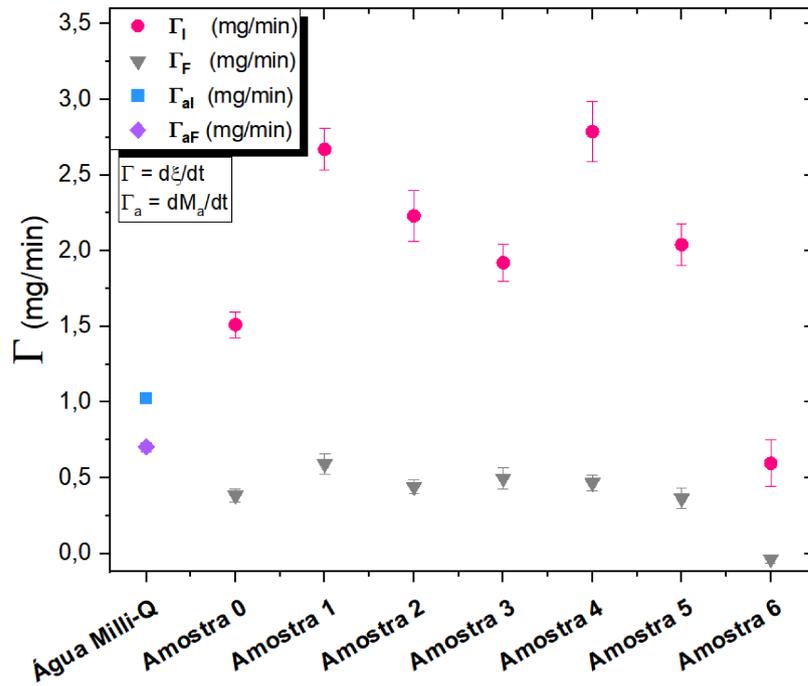


Figura 17 – Taxa de evaporação das amostras ($\Gamma = \frac{d\xi}{dt}$) na região inicial (Γ_I) e final (Γ_F) e a média da taxa de evaporação da água milli-q ($\Gamma_a = \frac{dM_a}{dt}$) na região inicial (Γ_{aI}) e final (Γ_{aF}).

Fonte: Autora desta monografia, 2023.

Note que a taxa de evaporação máxima foi obtida para a amostra 4, que contém 0,0095% de NiO 400 e 0,0015% de NiO 700, essa é a amostra com a menor concentração de NiO 700, e levando em conta que essa é a NPs de maior tamanho, uma menor concentração dela pode auxiliar a amostra a não sofrer efeitos tão drásticos de decantação. Além disso, a Am_6 mostrou valores negativos e esse efeito pode ter acontecido devido ao baixo volume da amostra que foi possível utilizar durante a evaporação, o efeito do volume inicial da amostra sobre o efeito da evaporação será testado na seção 4.4.3.

Na literatura é possível encontrar dados de geração de vapor utilizando NPs, porém com outros aparatos experimentais e fontes de excitação, como por exemplo o simulador solar.

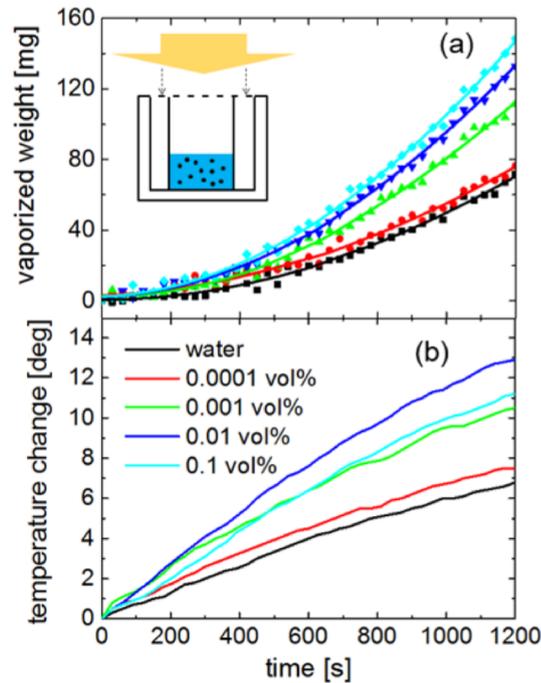


Figura 18 – Representação da massa evaporado em mg em (a) e a mudança de temperatura como função do tempo em (b) para nanopartículas de Silício em diferentes concentrações, em que a curva de cor preta representa a água pura.

Fonte: (CHEN et al., 2016)

Na Figura 18 (CHEN et al., 2016) utilizando nanopartículas semicondutoras mostraram um forte efeito de geração de vapor. Note que a medida que há variação da concentração de NP isso afeta diretamente a evaporação, um comportamento similar aos resultados que foram obtidos neste trabalho.

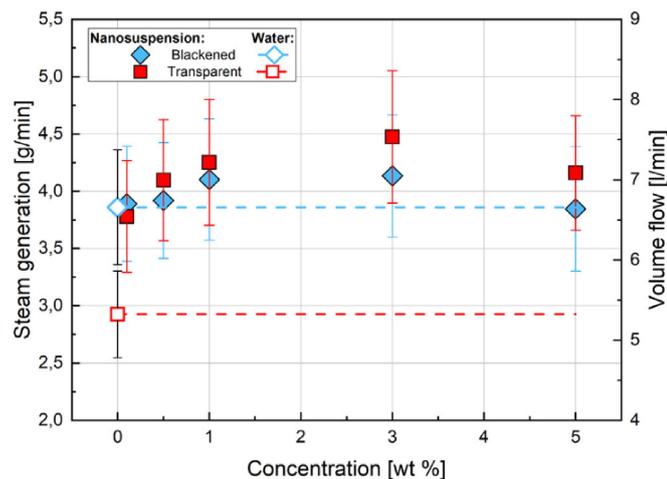


Figura 19 – Representação da geração de vapor em g/min utilizando soluções contendo nanopartículas de Óxido de Ferro, com diferentes concentrações em wt% para realizar a evaporação.

Fonte: (STRUCHALIN et al., 2020)

Nanopartículas de Óxido de Ferro também foram investigadas quanto à sua eficiência na geração de vapor. Na Figura 19 é possível perceber que estas NPs apresentam uma

taxa máxima de geração de vapor para uma concentração específica, diminuindo para concentrações maiores. Um comportamento similar ao que foi observado nas Figuras 13 e 17.

Apesar de ser possível encontrar dados na literatura sobre a geração de vapor em soluções contendo NPs, é necessário se atentar ao realizar comparações. Não há uma forma padronizada de apresentar os dados, e muito menos uma figura de mérito que seja aceita por todos na comunidade científica. Sendo assim, qualquer comparação deve ser feita com muito cuidado.

4.4.3 Efeito do volume durante a geração de vapor

Visando determinar se o volume da amostra interfere diretamente nos resultados, foi utilizado 0,0126 g de NiO 550 diluídos em 50 ml de água milli-q, que foram fracionados em 4 partes: Amostra 0: Am_0 contendo 20 ml de solução, Amostra 1: Am_1 contendo 15 ml de solução, Amostra 2: Am_2 contendo 10 ml de solução e Amostra 3: Am_3 contendo 5 ml de solução.

Para cada amostra o volume correspondente de água milli-q foi evaporado antes, por exemplo, para a Am_0 que possui 20 ml, foi evaporado 20 ml de água milli-q para comparação, para a Am_1 que possui 15 ml, foi evaporado 15 ml de água milli-q para comparação, e assim por diante, seguindo o mesmo processo descrito na seção 3.2. Dessa forma, foi possível obter a Figura 20a:

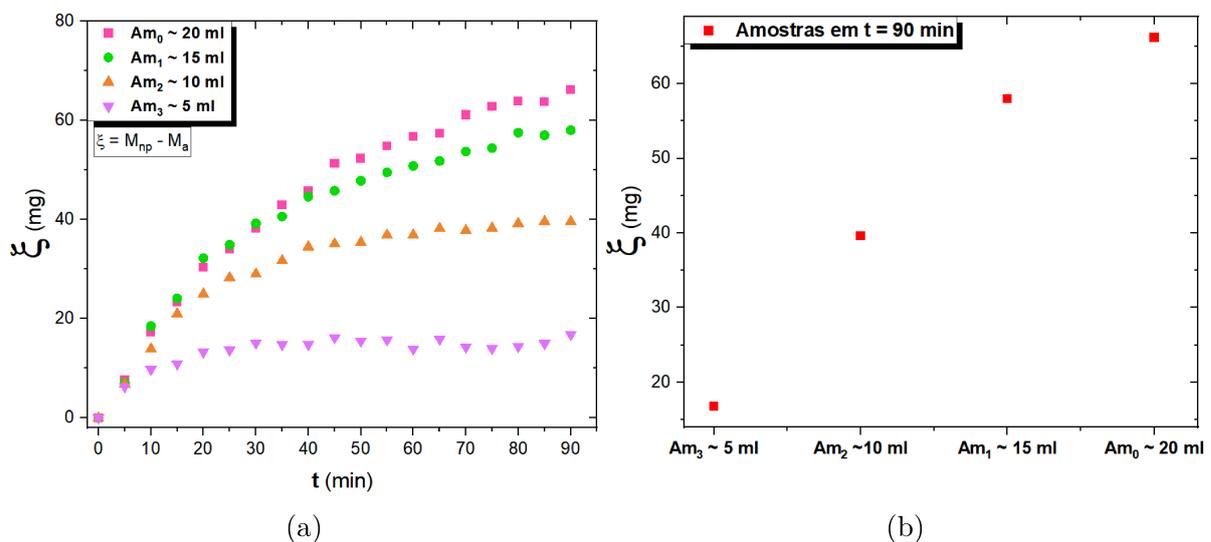


Figura 20 – Figura a: Variação da massa da amostra (ξ) em mg em função do tempo em minutos, Figura b: Variação da massa da amostra (ξ) em mg em função do volume inicial da amostra

Fonte: Autora desta monografia, 2023.

Ao comparar as Figuras 20a e 20b é possível observar que que o sistema apresenta um comportamento que caminha para um valor constante de massa de água milli-q

evaporada. No entanto, para Am_0 com volume de 20 ml a evaporação da água milli-q é mais eficiente do que a Am_3 com volume de 5 ml. Diante dessa observação, assumi-se que o volume ideal para utilizar durante o experimento é de 20 ml ou acima, e espera-se testar volumes acima de 20 ml para verificar se há um ponto em que a curva se estabiliza.

Embora a área iluminada seja a mesma para todas as amostras (área superior do becker) nota-se que as amostras de maior volume apresentam uma massa evaporada maior que as de menor volume. Um possível mecanismo que pode explicar este comportamento é o de espalhamento da luz dentro da amostra. Neste caso, Figura 21, a luz percorre uma distância maior dentro das amostras de maior volume, o que favorece sua interação com a nanopartícula e portanto a geração de calor na água.

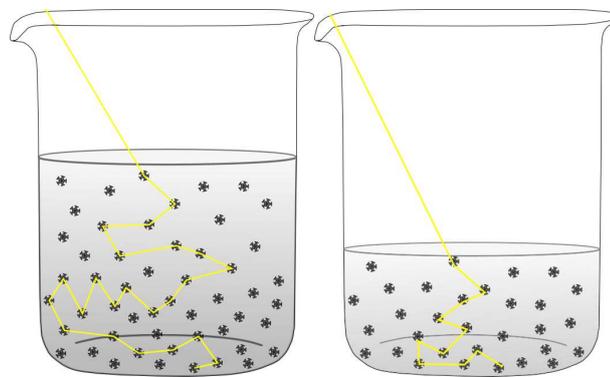


Figura 21 – Esquema da distância que a luz pode percorrer em diferentes volumes.

Fonte: Autora desta monografia, 2023.

O fato de as massas evaporadas nas amostras de água pura, Figura 22, não serem apreciavelmente diferentes entre si corrobora este raciocínio.

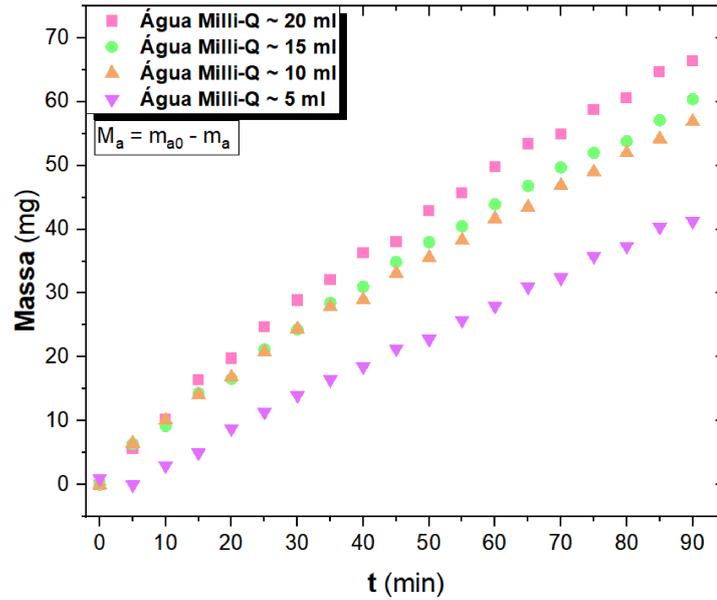


Figura 22 – Variação de massa da água milli-q para diferentes volumes em função do tempo. Fonte: Autora desta monografia, 2023.

As taxas de perda de água por evaporação, por outro lado, apresentam um comportamento médio decrescente, tanto na região de evaporação rápida como na lenta, como mostra a Figura 23. Esse resultado pode ser entendido considerando o efeito do gradiente de temperatura (que para amostras de menor volume, deve ser menor) e da decantação citados na seção 4.4.1.

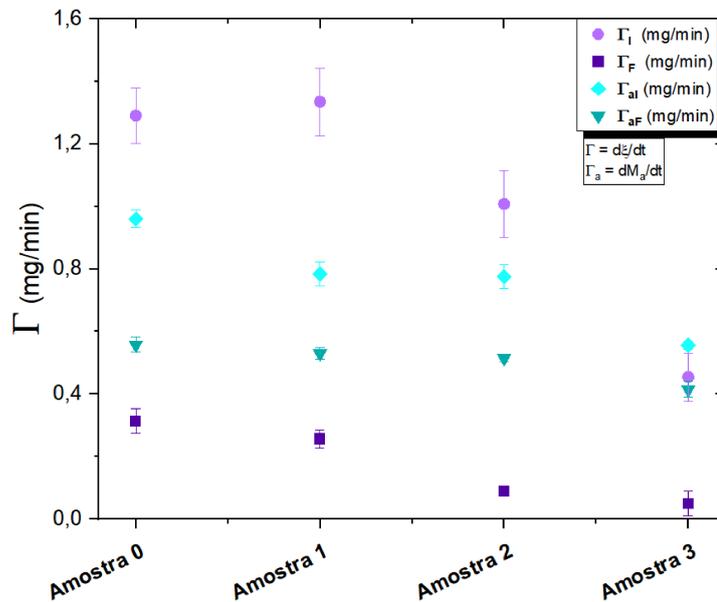


Figura 23 – Taxa de evaporação das amostras ($\Gamma = \frac{d\xi}{dt}$) na região inicial (Γ_I) e final (Γ_F) e a média da taxa de evaporação da água milli-q ($\Gamma_a = \frac{dM_a}{dt}$) na região inicial (Γ_{aI}) e final (Γ_{aF}).

Fonte: Autora desta monografia, 2023.

Desta forma, é mais acertado que as medidas sejam realizadas com valores próximos as 20 ml devido a uma melhor eficiência na geração de vapor apresentada.

5 Conclusão

Neste trabalho foi possível investigar os processos de geração de vapor em nanofluidos, dopados com nanopartículas de NiO, sob a excitação óptica através de uma lâmpada de xenônio.

O experimento foi realizado em dois conjuntos diferentes: o conjunto A e o conjunto B, como mostrado nas seções 3.2.1 e 3.2.2. Em ambos os casos foi possível notar que a presença das NPs favoreceram fortemente à evaporação da água, para o conjunto A a maior variação encontrada para mistura de NP foi para a amostra Am_2 de aproximadamente 85%, enquanto para o conjunto B foi possível obter 82% para a amostra Am_4 .

Para os dois conjuntos de amostras também foi observado que a máxima taxa de evaporação (seja nos tempos iniciais ou finais de aquecimento) aconteceu antes da concentração máxima de NP utilizada. Isso indica que é possível encontrar uma concentração ótima onde a taxa de evaporação seja maximizada.

Além disso, foram realizadas medidas em função do volume inicial do nanofluido, mantendo fixa a concentração de NPs. Essa medida evidenciaram que a massa evaporada cresce com o volume, embora apresente uma tendência a saturar para volumes maiores. Isso indica que a partir de um certo volume inicial de fluido a massa evaporada não deve variar significativamente.

Para as perspectivas futuras, espera-se que seja possível caracterizar o comportamento da taxa de geração de vapor utilizando NPs de espécies diferentes, e buscando materiais que não sejam nocivos à saúde visando uma maior viabilidade do emprego dessa técnica. Devido às restrições associadas ao uso de uma lâmpada de xenônio de baixa pressão, uma abordagem que pode-se propor é a utilização de um laser para substituir uma fonte convencional de excitação óptica de banda larga (como um simulador solar). Embora esta metodologia ainda necessite de testes, espera-se que simplifique a investigação de processos relacionados à geração de vapor e atividades similares, utilizando equipamentos já disponíveis em diversos laboratórios.

Referências

- ALAGIRI, M.; PONNUSAMY, S.; MUTHAMIZHCHELVAN, C. Synthesis and characterization of nio nanoparticles by sol-gel method. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, v. 23, p. 728–732, 3 2012. ISSN 09574522.
- ARAÚJO, J. Estudo da evolução microestrutural de sistemas nanoestruturados em função da metodologia de preparo. 4 2023. Disponível em: <<https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/37906>>.
- BRASIL, M. *Dia Mundial da Água: quatro impactos da falta de acesso à água potável na vida das pessoas - MSF Brasil*. 2023. Disponível em: <<https://www.msf.org.br/noticias/dia-mundial-da-agua-quatro-impactos-da-falta-de-acesso-a-agua-potavel-na-vida-das-pessoas/>>.
- BRASIL, U. *1 em cada 3 pessoas no mundo não tem acesso a água potável, dizem o UNICEF e a OMS*. 2019. Disponível em: <<https://www.unicef.org/brazil/comunicados-de-imprensa/1-em-cada-3-pessoas-no-mundo-nao-tem-acesso-agua-potavel-dizem-unicef-oms>>.
- CHEN, K. et al. Solar water heating and vaporization with silicon nanoparticles at mie resonances. *Optical Materials Express*, Vol. 6, Issue 2, pp. 640-648, Optica Publishing Group, v. 6, p. 640–648, 2 2016. ISSN 2159-3930. Disponível em: <<https://opg.optica.org/viewmedia.cfm?uri=ome-6-2-640&seq=0&html=true>>.
- COSTA, E. D. M. K. e A. J. F. D. Desinfecção e esterilização. *ACTA ORTOP BRAS*, v. 2, 1994.
- FANG, Z. et al. Evolution of light-induced vapor generation at a liquid-immersed metallic nanoparticle. *Nano Letters*, American Chemical Society, v. 13, p. 1736–1742, 4 2013. ISSN 15306984. Disponível em: <<https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/nl4003238>>.
- GOVOROV, A. O.; RICHARDSON, H. H. Generating heat with metal nanoparticles. *Nano Today*, Elsevier, v. 2, p. 30–38, 2 2007. ISSN 1748-0132.
- ISHII, S. et al. Solar water heating and vaporization with silicon nanoparticles at mie resonances. *Optical Materials Express*, The Optical Society, v. 6, p. 640, 2 2016. ISSN 21593930.
- KOWALSKI, L. F.; MASIERO Érico. Seasonal variation of urban heat island at distinct local climate zones in a tropical coastal area view project. 2019. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/342479982>>.
- LI, X. et al. Synthesis and characteristics of nio nanoparticles by thermal decomposition of nickel dimethylglyoximate rods. *Solid State Communications*, v. 137, p. 581–584, 2006. ISSN 00381098.
- MOORES, A.; GOETTMANN, F. The plasmon band in noble metal nanoparticles: an introduction to theory and applications. *New Journal of Chemistry*, The Royal Society of Chemistry, v. 30, p. 1121–1132, 7 2006. ISSN 1369-9261. Disponível em: <<https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2006/nj/b604038c>>.

- NEUMANN, O. et al. Compact solar autoclave based on steam generation using broadband light-harvesting nanoparticles. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 110, n. 29, p. 11677–11681, 2013.
- OURIQUES, C. d. M.; MACHADO, M. Enfermagem no processo de esterilização de materiais. *Texto Contexto - Enfermagem*, Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós Graduação em Enfermagem, v. 22, n. 3, p. 695–703, Jul 2013. ISSN 0104-0707. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S0104-07072013000300016>>.
- PANG, Y. et al. Solar–thermal water evaporation: A review. *ACS Energy Letters*, American Chemical Society, v. 5, p. 437–456, 2 2020. ISSN 2380-8195. Disponível em: <<https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acsenerylett.9b02611>>.
- PATIL, V.; SUBESHAN, B.; ASMATULU, R. Investigating the effects of carbon-based nanofluids on the interfacial evaporation of salt water under infrared light. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, Elsevier, v. 646, p. 129018, 8 2022. ISSN 0927-7757.
- PRASAD, P. N. *Nanophotonics*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2004. A John Wiley & Sons, Inc., Publication. ISBN 0-471-64988-0.
- SAGADEVAN, S.; PODDER, J. *Investigations on structural, optical, morphological and electrical properties of nickel oxide nanoparticles*. 2015. 289-301 p.
- SOARES, T. M. et al. Destinação de águas residuárias provenientes do processo de dessalinização por osmose reversa. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Departamento de Engenharia Agrícola - UFCG, v. 10, n. 3, p. 730–737, Jul 2006. ISSN 1415-4366. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S1415-43662006000300028>>.
- STRUCHALIN, P. G. et al. Solar steam generation enabled by iron oxide nanoparticles: Prototype experiments and theoretical model. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Pergamon, v. 158, p. 119987, 9 2020. ISSN 0017-9310.
- ZEINY, A. et al. Solar evaporation via nanofluids: A comparative study. *Renewable Energy*, Elsevier Ltd, v. 122, p. 443–454, 7 2018. ISSN 18790682.

Apêndices

APÊNDICE A – Condições atmosféricas das medidas realizadas

A.1 Conjunto A (NiO 400 + NiO 550)

Tabela 4 – Tabela contendo as datas, os horários e a pressão atmosférica média durante o processo de evaporação do conjunto A.

| Amostras | Data da medida | Horário da medida | Pressão Atmosférica Média (hPa) |
|----------|----------------|-------------------|---------------------------------|
| 0 | 22/08/2023 | 12:35 - 14:05 | 916,1 |
| 1 | 22/08/2023 | 15:45 - 17:15 | 913,8 |
| 2 | 23/08/2023 | 11:11 - 12:41 | 916 |
| 3 | 22/08/2023 | 19:54 - 21:24 | 915 |
| 4 | 23/08/2023 | 18:05 - 19:35 | 913,4 |
| 5 | 23/08/2023 | 19:45 - 21:15 | 914 |
| 6 | 24/08/2023 | 10:49 - 12:19 | 916 |

Fonte: Autora desta monografia, 2023. (Dados de pressão atmosférica retirados de <<https://tempo.inmet.gov.br/TabelaEstacoes/A507>>)

A.2 Conjunto B (NiO 400 + NiO 700)

Tabela 5 – Tabela contendo as datas, os horários e a pressão atmosférica média durante o processo de evaporação do conjunto B.

| Amostras | Data da medida | Horário da medida | Pressão Atmosférica Média (hPa) |
|----------|----------------|-------------------|---------------------------------|
| 0 | 29/09/2023 | 11:18 - 12:48 | 917,9 |
| 1 | 29/09/2023 | 12:55 - 14:25 | 916,2 |
| 2 | 29/09/2023 | 14:33 - 16:03 | 915,3 |
| 3 | 29/09/2023 | 16:10 - 17:40 | 914,7 |
| 4 | 29/09/2023 | 17:46 - 19:16 | 914,9 |
| 5 | 29/09/2023 | 19:23 - 20:53 | 915,8 |
| 6 | 13/10/2023 | 14:04 - 15:34 | 916,9 |

Fonte: Autora desta monografia, 2023. (Dados de pressão atmosférica retirados de <<https://tempo.inmet.gov.br/TabelaEstacoes/A507>>)

A.3 Efeito do volume (NiO 550)

Tabela 6 – Tabela contendo as datas, os horários e a pressão atmosférica média durante o processo de evaporação para analisar o efeito do volume.

| Amostras | Data da medida | Horário da medida | Pressão Atmosférica Média (hPa) |
|-----------------|-----------------------|--------------------------|--|
| 0 | 15/09/2023 | 11:05 - 12:35 | 918,7 |
| 1 | 15/09/2023 | 14:19 - 15:49 | 916,5 |
| 2 | 15/09/2023 | 17:32 - 19:02 | 916,2 |
| 3 | 15/09/2023 | 20:46 - 22:16 | 918,7 |

Fonte: Autora desta monografia, 2023. (Dados de pressão atmosférica retirados de <<https://tempo.inmet.gov.br/TabelaEstacoes/A507>>)