

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALFENAS**

**SARAH MARIA BATISTA SÍGOLO**

**EFICIÊNCIA DE CONVERSÃO FOTOTÉRMICA DE NANOBASTÕES DE Au:  
UM ESTUDO EXPERIMENTAL E DE INSTRUMENTAÇÃO CIENTÍFICA**

**POÇOS DE CALDAS/MG**

**2025**

**SARAH MARIA BATISTA SÍGOLO**

**EFICIÊNCIA DE CONVERSÃO FOTOTÉRMICA DE NANOBASTÕES DE Au:  
UM ESTUDO EXPERIMENTAL E DE INSTRUMENTAÇÃO CIENTÍFICA**

TCC apresentado como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Ciências e Tecnologias pela Universidade Federal de Alfenas. Área de concentração: Física.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Gonçalves Vivas

**POÇOS DE CALDAS/MG**

**2025**

Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal de Alfenas  
Biblioteca Campus Poços de Caldas

Batista Sígolo, Sarah Maria .

EFICIÊNCIA DE CONVERSÃO FOTOTÉRMICA DE NANOBASTÕES DE Au: :  
UM ESTUDO EXPERIMENTAL E DE INSTRUMENTAÇÃO CIENTÍFICA / Sarah  
Maria Batista Sígolo. - Poços de Caldas, MG, 2025.

40 f. : il. -

Orientador(a): Marcelo Gonçalves Vivas.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Bacharelado  
Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia) - Universidade Federal de Alfenas,  
Poços de Caldas, MG, 2025.

Bibliografia.

1. Síntese de Nanobastões de Ouro;. 2. Efeito Fototérmico. 3. Terapia  
Fototérmica. 4. Espectroscopia de Absorção. 5. Programação Python. I.  
Gonçalves Vivas, Marcelo, orient. II. Título.

**SARAH MARIA BATISTA SÍGOLO**

**EFICIÊNCIA DE CONVERSÃO FOTOTÉRMICA DE NANOBASTÕES DE Au:  
UM ESTUDO EXPERIMENTAL E DE INSTRUMENTAÇÃO CIENTÍFICA**

O Presidente da banca examinadora abaixo assina a aprovação do TCC apresentado como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Ciências e Tecnologias pela Universidade Federal de Alfenas. Área de concentração: Física.

Aprovada em: 02 de Dezembro de 2025

Me. Gabriel Ferrari de Oliveira  
Universidade Federal de Alfenas

Assinatura:

Me. Richard Silveira Pereira  
Universidade Federal de Alfenas

Assinatura:

Prof. Dr. Marcelo Gonçalves Vivas (presidente)  
Universidade Federal de Alfenas

Assinatura:

## **AGRADECIMENTOS**

Um agradecimento especial a todos do Laboratório de Espectroscopia Óptica e Fotônica, LEO&F, que me acolheram e proporcionaram um ambiente propício para a pesquisa. Ao Prof. Dr. Marcelo Gonçalves Vivas, meu orientador, por ter sido mais que um guia acadêmico, mas também um grande incentivador. Agradeço também à FAPEMIG, à CNPq e à CAPES pelo investimento em ciência e pela oportunidade de contribuir para o desenvolvimento da pesquisa no Brasil.

## RESUMO

As nanopartículas metálicas, como os nanobastões, oferecem uma ampla gama de aplicações tecnológicas devido à sua capacidade de gerar plásmons de superfície localizados. Plásmons são oscilações coletivas de elétrons na interface entre um metal e um dielétrico. Entre suas aplicações, destacam-se a terapia fototérmica, a biodetecção de analitos, a microscopia de super-resolução, a espectroscopia óptica e os dispositivos plasmônicos de escala reduzida, entre outras. Neste trabalho, investigamos o efeito fototérmico, um fenômeno que ocorre quando a luz é absorvida por um material, causando um aumento de temperatura. Esse aumento pode ser aproveitado de diversas maneiras, tanto em aplicações médicas quanto industriais. Para estudar esse efeito em nanobastões de ouro, realizamos a síntese do material utilizando o método descrito por CHANG e MURPHY (2018). Após a síntese dos nanobastões, realizamos diversos ensaios empregando instrumentação científica e programação em Python para avaliar o efeito fototérmico. Com base nesses dados, conseguimos estabelecer uma correlação entre os aspectos experimentais e a instrumentação científica, bem como a absorção de calor pelo material, criando um banco de dados com os resultados obtidos, visando servir como referência para futuras pesquisas na área.

**Palavras-chave:** Síntese de Nanobastões de Ouro; Efeito Fototérmico; Terapia Fototérmica; Espectroscopia de Absorção; Programação Python.

## ABSTRACT

Metallic nanoparticles, such as nanorods, offer a wide range of technological applications due to their ability to generate localized surface plasmons. Plasmons are collective oscillations of electrons at the interface between a metal and a dielectric. Their applications include photothermal therapy, biological detection of analytes, super-resolution microscopy, optical spectroscopy and small plasmonic devices. In this work, we investigate the photothermal effect, a phenomenon that occurs when light is absorbed by a material and causes an increase in temperature. This increase can be used in various ways, both in medicine and in industry. To study this effect in gold nanorods, we synthesized the material using the method described by CHANG and MURPHY (2018). The described method allows the growth of nanorods with tunable plasmonic tips beyond 1000 nm, which enables the production of gold nanorods with absorption peaks in the near infrared range. After synthesizing the nanorods, we performed several tests using scientific instruments and Python programming to evaluate the photothermal effect. Using this data, we were able to establish a correlation between the experimental aspects and the scientific instrumentation as well as the heat absorption by the material, creating a database with the obtained results, aiming to serve as a reference for future research in the field.

**Keywords:** Synthesis of gold Nanorod; Photothermal Effect; Photothermal Therapy; Absorption Spectroscopy; Python Programming.

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AuNPs	Nanopartículas de Ouro
AuNBs	Nanobastões de Ouro
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
FAPEMIG	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais
h	Eficiência de transferência de calor entre as NBs e o solvente
LabVIEW	Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench
LEO&F	Laboratório de Espectroscopia Óptica e Fotônica
LM	Banda de absorção longitudinal
LSPR	Ressonância de Plasmons de Superfície Localizada (do inglês Localized Surface Plasmon Resonance)
UNIFAL-MG	Universidade Federal de Alfenas
TM	Banda de absorção transversal

## LISTA DE SÍMBOLOS

$C_{\text{água}}$	Calor específico da água
$C_{\text{Au}}$	Calor específico das nanopartículas do ouro
$m_{\text{água}}$	Massa da água
$m_{\text{Au}}$	Massa das nanopartículas de ouro
$\eta$	Eficiência de conversão fototérmica das AuNBs
$P_{\text{laser}}$	Potência do laser
$P_{\text{tr}}$	Potência do laser transmitida através da amostra
$q_{\text{in}}$	Taxa de entrada de calor no sistema devido ao laser
$q_{\text{out}}$	Taxa de perda de calor para o ambiente externo
$S$	Área de contato efetiva entre os NBs e o solvente
$T(t)$	Temperatura da solução de AuNBs em um instante $t$
$T_{\text{amb}}$	Temperatura ambiente

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>10</b>
1.1	OBJETIVOS.....	11
1.1.1	<b>Objetivo Geral.....</b>	<b>11</b>
1.1.2	<b>Objetivos Específicos.....</b>	<b>12</b>
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>13</b>
2.1	TÉCNICAS DE SÍNTESE DE NANOBASTÕES DE OURO.....	13
2.2	CARACTERIZAÇÃO DOS NANOBASTÕES POR UV-VIS.....	14
2.3	CONVERSÃO FOTOTÉRMICA.....	17
2.4	FUNDAMENTOS MATEMÁTICOS DA CONVERSÃO FOTOTÉRMICA.....	18
2.5	INSTRUMENTAÇÃO CIENTÍFICA APLICADA À CONVERSÃO FOTOTÉRMICA.....	21
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>22</b>
3.1	SÍNTESE DE NANOBASTÕES.....	23
3.2	CONFIGURAÇÃO EXPERIMENTAL.....	27
<b>4</b>	<b>RESULTADO E DISCUSSÃO .....</b>	<b>31</b>
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>35</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>36</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A nanotecnologia, conceito introduzido pelo engenheiro japonês Norio Taniguchi na década de 1970, refere-se ao controle e manipulação de materiais em uma escala que vai de 1 a 100 nanômetros. Desde sua definição inicial, a nanotecnologia evoluiu para abranger uma ampla gama de técnicas e aplicações, tornando-se um campo multidisciplinar que combina física, química, biologia e engenharia. A manipulação de materiais em escala nanométrica é fundamental, pois esta escala revela propriedades físicas e químicas que não são observáveis em materiais macroscópicos. Esta capacidade de criar e controlar estruturas em nanoescala é crucial para o desenvolvimento de novos materiais com características inovadoras e específicas (USKOKOVIĆ, 2007).

Dentro desse contexto, a nanociência emerge como o estudo dos fenômenos que ocorrem em escalas nanométricas. As aplicações da nanociência são vastas e abrangem áreas como catálise, em que nanopartículas podem aumentar significativamente a eficiência de reações químicas (FERREIRA; RANGEL, 2009); biomedicina, com nanomateriais sendo usados em sistemas de transporte de fármacos e diagnósticos (DE OLIVEIRA; MARTINEZ; FAZZIO, 2022); eletrônica, em que a miniaturização de componentes é essencial; e energia, com a criação de materiais que melhoram a eficiência dos dispositivos fotovoltaicos (“Nanotecnologia e suas Aplicações. O que esperar para o futuro?”, 2024). A síntese de nanomateriais é um aspecto crucial nesse cenário, pois permite projetar e sintetizar nanoestruturas com propriedades físico-químicas específicas, que podem ser ajustadas experimentalmente conforme as necessidades de cada aplicação.

Nesse contexto, o estudo de nanobastões de ouro destaca-se pela relevância científica e tecnológica associada às suas propriedades ópticas singulares, especialmente a ressonância de plásmons de superfície localizada. Essa característica confere a esses nanomateriais uma elevada capacidade de absorver radiação eletromagnética e convertê-la eficientemente em energia térmica, fenômeno conhecido como conversão fototérmica. A compreensão detalhada desse processo é fundamental não apenas para aplicações consolidadas, como terapia fototérmica, sensoriamento e catálise, mas também para o desenvolvimento de novas tecnologias em energia e instrumentação científica. Além disso, o estudo da conversão fototérmica em AuNPs permite integrar conceitos fundamentais da Física,

como a óptica, a termodinâmica e a transferência de calor com abordagens experimentais modernas, reforçando a importância deste trabalho tanto do ponto de vista científico quanto formativo.

O presente estudo se concentra em três áreas de pesquisa interligadas. A primeira consiste na síntese de nanobastões, seguindo o método estabelecido por Chang e Murphy (2018). Os nanobastões sintetizados servirão como base para a segunda etapa, na qual investigaremos a interação entre estes nanomateriais e um feixe de laser, tendo como objetivo compreender em detalhes o mecanismo de conversão de energia luminosa em energia térmica neste sistema (conversão fototérmica). A terceira área a ser discutida neste projeto está relacionada à criação de um banco de dados com os resultados obtidos, visando servir como referência para futuras pesquisas na área de conversão fototérmica em nanobastões de ouro, além de disponibilizar informações valiosas para a comunidade científica.

Diante desse cenário de avanços científicos e tecnológicos proporcionados pela nanotecnologia, investir em pesquisa científica e na produção de nanomateriais de alta qualidade torna-se crucial para fortalecer a formação de recursos humanos qualificados no Brasil, estimulando a inovação e a competitividade do país. Ao oferecer acesso a conhecimentos de ponta e fomentar a curiosidade científica, iniciativas dessa natureza contribuem para a construção de um futuro mais sustentável e tecnológico, além de impulsionar o desenvolvimento de novas soluções para os desafios da sociedade.

## 1.1 OBJETIVOS

Através de uma abordagem multidisciplinar, este estudo busca aprofundar o entendimento dos fenômenos físicos envolvidos na conversão fototérmica em nanobastões de ouro. Combinando experimentos rigorosos e modelagem teórica, pretende-se quantificar a eficiência desse processo e estabelecer relações quantitativas entre as propriedades dos nanobastões e a eficiência de conversão.

### 1.1.1 Objetivo geral

Compreender em profundidade o efeito fototérmico em nanobastões de ouro, caracterizando a relação entre a irradiação luminosa e a resposta térmica desses

nanomateriais, com o objetivo de explorar suas aplicações e desenvolver um material de estudo sobre o tema.

### **1.1.2 Objetivos específicos**

- Otimização da síntese de nanobastões;
- Caracterização completa utilizando espectroscopia UV-Vis;
- Quantificar a conversão fototérmica da solução de nanobastões;.
- Investigar a cinética de aquecimento dos nanobastões em função do tempo de irradiação e da potência do laser;
- Produção e disseminação de conteúdos didáticos para o ensino de Física.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Os nanomateriais apresentam propriedades únicas, como uma alta área superficial e uma reatividade superior, que são fundamentais para suas aplicações (FERREIRA et al., 2017). Um exemplo notável são os nanobastões de ouro, que não apenas possuem uma alta condutividade elétrica, mas também apresentam ressonâncias de plásmons de superfície (BEICKER, 2016). Esses plásmons são oscilações coletivas de elétrons que ocorrem na interface entre o metal e o meio circundante, conferindo aos nanobastões de ouro propriedades ópticas excepcionais (CHEN et al., 2013). Essa capacidade de absorver e espalhar luz em comprimentos de onda específicos torna os nanobastões de ouro particularmente interessantes para aplicações em sensores e dispositivos fotovoltaicos (HUANG; EL-SAYED, 2010).

Com isso, é de extrema importância que sejam levantados estudos que explorem as propriedades destas tecnologias, preparando um arcabouço teórico para o andamento correto dos experimentos, isto é, a definição dos parâmetros que devem ser tomados para que não haja interferência externa nas amostras, e também para auxiliar na comparação dos dados obtidos. A fim de garantir a confiabilidade e a reprodutibilidade dos resultados, realizamos uma revisão da literatura científica. Essa etapa foi fundamental para definir os parâmetros experimentais mais adequados e estabelecer um ponto de referência para a comparação dos dados obtidos. Dito isso, nos seguintes tópicos é apresentado todo o referencial teórico necessário.

### 2.1 TÉCNICAS DE SÍNTESE DE NANOBASTÕES DE OURO

Nanopartículas metálicas, em particular os nanobastões de ouro (AuNBs), têm despertado crescente interesse científico devido às suas propriedades plasmônicas únicas. A ressonância plasmônica localizada (LSPR) confere aos AuNBs propriedades ópticas excepcionais, tornando-os materiais altamente versáteis com grande potencial para diversas aplicações (ROMANI, 2011). Seus atributos os destacam como candidatos promissores em biossensores, terapia fototérmica, dispositivos optoeletrônicos e metamateriais (TOMA, 2004).

A síntese de nanobastões de ouro envolve a redução de íons de ouro em

solução, seguida por um processo de crescimento controlado que promove a formação de uma forma alongada (MELO JR. et al., 2012). Existem vários métodos para sintetizar nanobastões, cada um com suas próprias vantagens e desvantagens. Alguns dos métodos mais comuns incluem: Síntese Química e Síntese Verde.

Dentro da síntese química, há duas estratégias gerais para a preparação de nanobastões de ouro, sendo a primeira baseada no método de redução-proteção, um dos métodos mais tradicionais para a síntese de nanobastões. Envolve a redução de íons de ouro utilizando um agente redutor, como borohidreto de sódio ( $\text{NaBH}_4$ ), na presença de um surfactante protetor, como o brometo de cetiltrimetilamônio (CTAB). O surfactante ajuda a controlar o crescimento das nanopartículas e a promover a formação da forma alongada (CHANG; MURPHY, 2018). Outro método é o de troca iônica em que íons de prata são adicionados a uma solução de nanopartículas esféricas de ouro. Os íons de prata são absorvidos seletivamente nas extremidades das nanopartículas, promovendo o crescimento preferencial nessas regiões e formando os nanobastões (SANTOS, 2022).

Por outro lado, na Síntese Verde, a busca por processos de síntese mais sustentáveis tem impulsionado o desenvolvimento, ao substituir os agentes químicos convencionais por compostos biodegradáveis. Essa abordagem contribui para a criação de uma nanotecnologia mais limpa e segura. A utilização de polifenóis, açúcares e aminoácidos como agentes redutores e estabilizantes demonstra o potencial da natureza como fonte de compostos bioativos para a produção de nanomateriais (TEODORO, 2021).

## 2.2 CARACTERIZAÇÃO DOS NANOBASTÕES POR UV-VIS

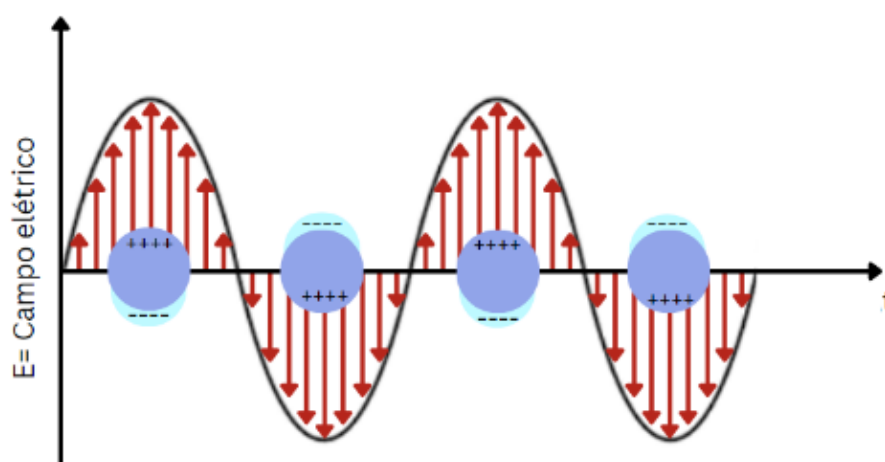
A espectroscopia ultravioleta-visível (UV-Vis) é uma técnica analítica baseada na interação da radiação eletromagnética com a matéria, na faixa espectral do ultravioleta ao visível. Ao incidir um feixe de luz policromático sobre a amostra, parte da radiação é absorvida pelas espécies presentes, promovendo transições eletrônicas, enquanto a radiação não absorvida é transmitida. O detector do espectrofotômetro mede diretamente a intensidade da luz transmitida, permitindo a obtenção do espectro de transmitância, representado por  $\tau(\lambda)$ . A partir desse espectro, calcula-se o espectro de absorbância  $A(\lambda)$ , que está relacionado à transmitância pela expressão  $A = -\log_{10}(\tau)$ . O espectro de absorbância, obtido dessa

forma, fornece informações qualitativas e quantitativas sobre as espécies presentes na amostra, sendo amplamente utilizado na caracterização de materiais (RESERVED, [s.d.]).

A espectroscopia ultravioleta-visível (UV-Vis) se revela uma ferramenta analítica para a caracterização detalhada das propriedades ópticas intrínsecas aos nanobastões de ouro (AuNBs). As características espectrais obtidas por meio dessa técnica, especificamente as posições e intensidades das bandas de absorção plasmônica, estabelecem uma correlação direta com a morfologia e as dimensões desses nanomateriais, permitindo uma análise quantitativa de parâmetros como o comprimento e a largura dos nanobastões (GRASSESCHI; DOS SANTOS, 2020). Essa correlação é de fundamental importância para o desenvolvimento de aplicações que exploram as propriedades plasmônicas dos AuNBs, como a biossensores e a terapia fototérmica (HAMAD-SCHIFFERLI, 2023).

Uma das principais razões para a relevância da UV-Vis na análise de AuNBs reside no fenômeno da ressonância de plasmons de superfície localizada (LSPR). A LSPR, característica de nanopartículas metálicas, ocorre quando a frequência da luz incidente coincide com a frequência de oscilação dos elétrons livres na superfície da nanopartícula. Nos AuNBs, esse fenômeno gera bandas de absorção características no espectro UV-Vis, as quais são altamente sensíveis à morfologia e ao tamanho das nanopartículas (ANGELI, 2017).

**Figura 1** – Ressonância de Plasmons de Superfície Localizada (LSPR)



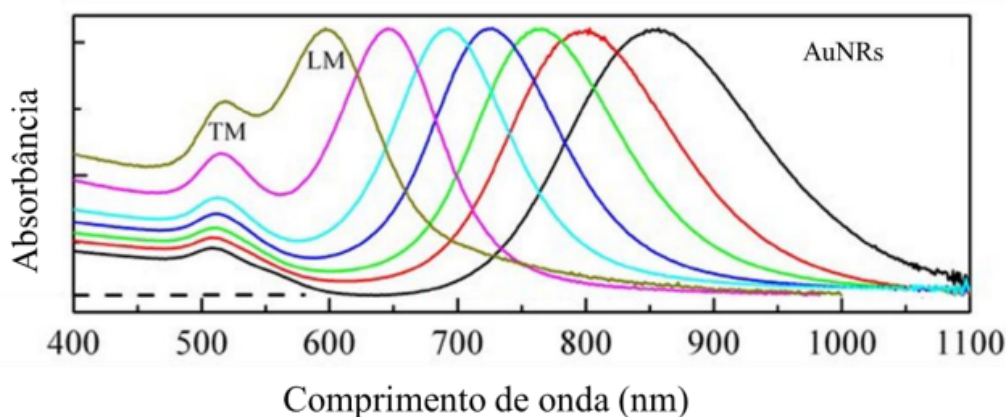
Fonte: do Autor (2025)

Além de fornecer informações sobre as propriedades intrínsecas dos AuNBs, a espectroscopia UV-Vis também permite acompanhar a evolução da síntese dessas nanopartículas em tempo real. Ao monitorar as alterações nos espectros de absorção durante o processo de síntese, é possível obter informações valiosas sobre a formação e o crescimento dos nanobastões (FILHO et al., 2009).

Outra aplicação importante da UV-Vis na caracterização de AuNBs é a avaliação da pureza e homogeneidade de uma amostra. A análise dos espectros de absorção permite identificar a presença de impurezas e avaliar a distribuição de tamanho das nanopartículas (FILHO et al., 2009).

Um espectro de um AuNB apresenta duas bandas de absorção principais: a banda de absorção transversal (TM), associada à oscilação dos elétrons livres perpendicular ao eixo longo do nanobastão, e a banda de absorção longitudinal (LM), relacionada à oscilação dos elétrons livres ao longo do eixo longo do nanobastão. A posição e a intensidade dessas bandas são fortemente influenciadas pelo tamanho e pela forma dos AuNBs. Ao analisar as características dessas bandas, como a posição, largura e intensidade, é possível obter informações valiosas sobre a distribuição de tamanho e forma das nanopartículas, bem como sobre a anisotropia de seus plásmons. A modulação dos parâmetros de síntese, como concentração de reagentes e tempo de reação, permite ajustar essas propriedades de acordo com a aplicação desejada (OTUBO, s.n.), como pode ser observada na Figura 2.

**Figura 2** – Espectros de extinção UV-Vis de AuNBs, cujas bandas de oscilações eletrônicas transversais (TM) e longitudinais (LM) estão em evidência



Fonte: ("Repositório Institucional Unesp", 2024)

Em resumo, a espectroscopia UV-Vis se configura como uma ferramenta analítica para a caracterização de nanobastões de ouro (AuNBs), fornecendo informações detalhadas sobre suas propriedades ópticas, morfologia e pureza. Essa técnica desempenha um papel crucial em diversas áreas de pesquisa e desenvolvimento que envolvem esses nanomateriais.

### 2.3 CONVERSÃO FOTOTÉRMICA

A conversão fototérmica, processo pelo qual a energia luminosa é transformada em energia térmica, adquire uma nova dimensão quando se emprega a radiação laser como fonte de excitação. Em particular, em sistemas contendo nanobastões de ouro, esse fenômeno se torna ainda mais interessante devido às propriedades ópticas dos nanomateriais (OTUBO, s.n).

A interação da radiação laser com os elétrons livres presentes nos nanobastões de ouro induz um fenômeno conhecido como ressonância plasmônica localizada (Figura 1). Essa ressonância amplifica significativamente a absorção de luz pelos nanobastões, resultando em um aquecimento local intenso. A alta eficiência de conversão da energia luminosa em calor, combinada com a possibilidade de controlar a localização e a intensidade do aquecimento através da modulação dos parâmetros do laser, torna essa técnica promissora para diversas aplicações, como terapia fototérmica, catálise e sensoriamento (GRASSESCHI; DOS SANTOS, 2020).

Isso se deve pois, a eficiência de conversão fototérmica dos nanobastões de ouro é um fenômeno que merece destaque, especialmente em um mundo que busca soluções para a crise energética. Quando expostos à luz, esses nanomateriais convertem energia luminosa em calor de forma altamente eficaz (PRATAP et al., 2022). Essa interação é fundamental para o desenvolvimento de tecnologias de energia renovável, como células solares mais eficientes, onde a conversão de luz em energia térmica pode ser aproveitada para gerar eletricidade (ZHAO et al., 2019).

Para investigar a eficiência de conversão fototérmica dos nanobastões de ouro, uma abordagem experimental rigorosa foi adotada. A pesquisa envolveu técnicas avançadas de instrumentação científica, como espectroscopia de absorção e termografia infravermelha, que permitem medir com precisão a temperatura e a

resposta térmica dos nanomateriais sob um feixe de laser controlado. Essas técnicas não apenas garantem resultados confiáveis, mas também proporcionam *insights* sobre as interações entre os nanobastões e a luz.

## 2.4 FUNDAMENTOS MATEMÁTICOS DA CONVERSÃO FOTOTÉRMICA

Para descrever o perfil de temperatura de nanopartículas de ouro (AuNBs) em água excitadas por laser, empregamos o modelo de balanço de energia descrito por Roper *et al* (2007). A evolução da temperatura do sistema é governada pela conservação de energia, expressa como:

$$\sum_i m_i c_{p,i} \frac{d\Delta T}{dt} = \dot{Q}_{in} - \dot{Q}_{out} \quad (1)$$

onde  $\sum_i m_i c_{p,i}$  representa a capacidade térmica do sistema (solvente mais nanopartículas),  $\frac{d\Delta T}{dt}$  é a taxa de variação da temperatura,  $\dot{Q}_{in}$  é a taxa de entrada de energia fototérmica proveniente do laser, e  $\dot{Q}_{out}$  é a taxa com que o calor é dissipado para o ambiente circundante. Dessa forma obtemos a seguinte equação:

$$\frac{d\Delta T}{dt} = \frac{\dot{Q}_{in} - \dot{Q}_{out}}{m_{\text{água}} c_{\text{água}} + m_{\text{au}} c_{\text{au}}} \quad (2)$$

Esse modelo permite analisar a dinâmica térmica de um sistema composto por água e nanopartículas de ouro, considerando a contribuição das nanopartículas para a capacidade térmica do sistema. Sendo fundamental para diversas aplicações, como o desenvolvimento de novos materiais e dispositivos baseados em nanopartículas (FERREIRA; RANGEL, 2009).

De acordo com Jiang, Smith e Pinchuk (2013), a potência de calor que entra no sistema  $\dot{Q}_{in}$  é dada por  $(P_{\text{laser}} - P_{\text{tr}})\eta$ , e a potência de calor que sai do sistema  $\dot{Q}_{out}$  é dada pela soma dos produtos da eficiência de transferência de calor entre os

nanobastões e o solvente ( $h$ ), da área de contato efetiva entre a amostra e o ambiente externo, ( $S$ ) é a diferença entre a temperatura instantânea da amostra ( $T(t)$ ) e a temperatura ambiente ( $T_{amb}$ ).

Utilizando dois lasers com diferentes comprimentos de onda, a potência do laser transmitido ( $P_{tr}$ ) foi determinada em cada caso, considerando a absorção característica dos AuNBs para cada comprimento de onda, através da aplicação da lei de Beer-Lambert:

$$A = \epsilon bC \quad (3)$$

Onde  $A$  é referente a absorção da amostra,  $\epsilon$  que é o coeficiente de extinção molar,  $b$  é o comprimento do caminho óptico e  $C$  é a concentração da amostra.

Definindo a potência do laser absorvida pelas NBs de Au como  $P_{abs} = P_{lasear} - P_{tr}$  e a variação de temperatura como  $\Delta T = T(t) - T_{amb}$ , combinando as equações 2, 3 e 4, e considerando que a massa e o calor específico dos AuNBs são desprezíveis em relação ao solvente, pois estão em volume muito maior, obtemos:

$$\frac{d\Delta T}{dt} = \frac{P_{abs}\eta - \Sigma hS\Delta T}{m_{\text{água}}c_{\text{água}}} \quad (4)$$

Resolvendo a equação diferencial representada pela equação 4 para  $T(0) = T_{amb}$ , obtemos a temperatura da solução de AuNBs em função do tempo quando a temperatura está aumentando:

$$T(t) = T_{amb} + \left[ \frac{P_{abs}\eta}{m_{\text{água}}c_{\text{água}}B} \right] (1 - e^{-Bt}) \quad (5)$$

Em um contexto de transferência de calor,  $B$  representa a taxa constante de dissipação de calor de um corpo para o meio ambiente. Em outras palavras, ela quantifica a rapidez com que um objeto quente esfria ao perder calor para o ambiente mais frio, e é expressada da seguinte maneira:

$$B = \frac{\Sigma hS}{m_{\text{água}} c_{\text{água}}} \quad (6)$$

Essa taxa depende da área de contato do corpo com o meio, da capacidade do material de conduzir calor e da quantidade de calor que o material pode armazenar. Ao analisarmos o comportamento térmico do corpo a partir do momento em que ele atinge sua temperatura máxima e não recebe mais calor externo, podemos determinar como sua temperatura diminui ao longo do tempo.

Dessa forma, ao resolver a equação diferencial considerando potência absorvida nula ( $P_{\text{abs}} = 0$ ) e temperatura inicial máxima ( $T_{\text{máx}}$ ), obtemos a curva de resfriamento do sistema. Em que o parâmetro B presente na solução é determinado por meio do ajuste da curva aos dados experimentais, utilizando o método dos mínimos quadrados:

$$T(t) = T_{\text{amb}} + (T_{\text{máx}} - T_{\text{amb}})e^{-Bt} \quad (7)$$

Resolvendo a equação diferencial para o estado estacionário ( $\Delta T = 0$ ), encontramos que a variação de temperatura é diretamente proporcional à potência absorvida e inversamente proporcional à massa, ao calor específico e ao coeficiente de dissipação de calor:

$$\Delta T = \frac{\eta}{m_{\text{água}} c_{\text{água}} B} P_{\text{abs}} \quad (8)$$

Portanto, o gráfico da variação da temperatura em função da potência do laser absorvida pela amostra possui uma relação linear, cujo coeficiente angular da reta fornece a eficiência da conversão fototérmica, que foi obtido ao ajustar uma reta aos dados experimentais utilizando o método dos mínimos quadrados. Além da dedução do perfil da cinética da temperatura, é fundamental compreender o mecanismo da variação da temperatura dos nanobastões que descreve esse fenômeno (GUILLAUME BAFFOU; ROMAIN QUIDANT; GARCÍA, 2010). Para isso, utilizamos como referência o comportamento de nanoesferas de ouro, que serve para ilustrar essa variação:

$$\Delta T_{NP} = \frac{\sigma_{abs} I}{4\pi R K_{H2O}} \quad (9)$$

Os principais parâmetros considerados incluem a seção de choque de absorção ( $\sigma_{abs}$ ), a irradiância da luz incidente ( $I$ ), o meio com permissividade efetiva da água ( $K_{H2O}$ ), e o raio ( $R$ ) presente na Equação 9, originalmente definido como o raio de uma nanoesfera. No caso dos nanobastões, esse parâmetro é representado por um raio equivalente, de modo a permitir a aplicação do modelo esférico para descrever o aquecimento térmico dessas nanoestruturas:

$$R_{eq} = \left[ \frac{(3D - d)d^2}{16} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (10)$$

Essa abordagem permite uma análise mais aprofundada e precisa da dinâmica térmica dos nanobastões em resposta à irradiação. Esse raio equivalente ( $R_{eq}$ ) é calculado por meio das relações dos diâmetros maiores ( $D$ ) e menores ( $d$ ) do nanobastão.

## 2.5 INSTRUMENTAÇÃO CIENTÍFICA APLICADA À CONVERSÃO FOTOTÉRMICA

O estudo de fenômenos em nanoescala, como a conversão fototérmica em nanobastões de ouro, depende intrinsecamente do desenvolvimento e da aplicação de instrumentação científica de alta precisão. A instrumentação científica pode ser definida como o conjunto de dispositivos, técnicas e aparatos utilizados por cientistas para investigar a natureza, permitindo medições qualitativas e quantitativas com elevado grau de confiabilidade (Advanced Research Instrumentation and Facilities, 2006).

A capacidade de desenvolver novos instrumentos é um fator determinante para o avanço científico e tecnológico de um país, pois possibilita a criação de uma agenda de pesquisa própria. Diferentemente da simples aquisição de tecnologias externas que limita a atuação científica à reprodução de resultados, o domínio da instrumentação promove autonomia e inovação na produção de conhecimento

(CHINCHILLA-RODRÍGUEZ et al., 2018). Assim, o desenvolvimento instrumental representa um componente ativo da ciência, estabelecendo uma triangulação essencial entre teoria, experimentação e instrumentação (Advanced Research Instrumentation and Facilities, 2006).

No contexto da conversão fototérmica, a instrumentação científica moderna não se restringe ao uso de equipamentos isolados, mas compreende a integração sinérgica de componentes ópticos, eletrônicos e computacionais, configurando sistemas experimentais automatizados de alta sensibilidade e precisão. O sistema empregado neste trabalho baseia-se em três elementos fundamentais: uma fonte de excitação controlada, responsável por irradiar a amostra com potência e comprimento de onda rigorosamente definidos; um sistema de detecção de elevada sensibilidade, composto por espectrofotômetros destinados à caracterização óptica e por sensores termoeletrônicos voltados à medição da resposta térmica; e uma interface de aquisição e controle de dados, que interliga o *hardware* ao *software*, possibilitando o registro contínuo, o processamento automatizado e a visualização em tempo real das variáveis experimentais. (ROPER et al., 2007).

A automação do experimento, viabilizada por plataformas como Python e LabVIEW, associadas a microcontroladores e sistemas de aquisição de dados, é crucial para garantir a precisão, a estabilidade e a reprodutibilidade dos resultados. Essa abordagem experimental-computacional conjugada permite o controle preciso de componentes mecânicos, como obturadores e lentes polarizadoras, e a coleta contínua de dados com alta resolução temporal, gerando curvas de aquecimento e resfriamento que sustentam a análise da eficiência de conversão fototérmica (RICHARDSON et al., 2009).

A integração desses elementos em uma bancada óptica personalizada possibilita não apenas a obtenção de dados experimentais confiáveis, mas também a criação de um banco de dados estruturado com os parâmetros e resultados do experimento. Esse repositório serve como referência para estudos futuros e contribui para o aprimoramento de metodologias de análise fototérmica, reforçando a conexão entre os resultados experimentais, os modelos teóricos e os fundamentos matemáticos do fenômeno estudado.

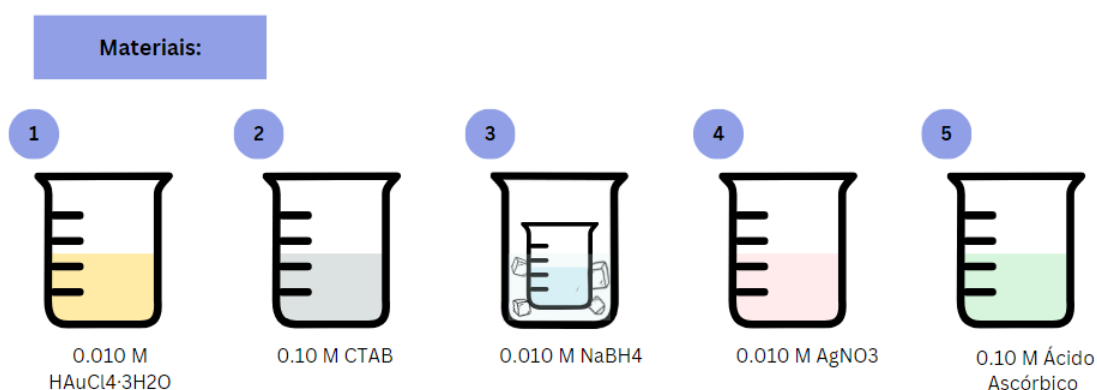
### **3 METODOLOGIA**

### 3.1 SÍNTESE DE NANOBASTÕES DE OURO

A escolha do método de síntese adequado é crucial para a obtenção de nanobastões de ouro com as propriedades desejadas. Em particular, a capacidade de ajustar os picos plasmônicos dos AuNBs em regiões específicas do espectro eletromagnético, como demonstrado por Chang e Murphy (2018), abre novas possibilidades para o desenvolvimento de tecnologias avançadas. No entanto, a síntese de AuNBs com picos plasmônicos sintonizáveis além de 1000 nm ainda representa um desafio significativo, exigindo um controle preciso dos parâmetros de síntese.

No presente projeto, a síntese de nanobastões de ouro seguiu o protocolo descrito por Chang e Murphy (2018), empregando o método mediado por semente. Inicialmente, foram preparadas soluções aquosas de ácido tetracloroáurico ( $\text{HAuCl}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ , 0,010 M), brometo de cetiltrimetilamônio (CTAB, 0,10 M), borohidreto de sódio ( $\text{NaBH}_4$ , 0,010 M) resfriado por meio de banho de gelo atingindo uma temperatura próxima a  $0^\circ\text{C}$ , nitrato de prata ( $\text{AgNO}_3$ , 0,010 M) e ácido ascórbico ( $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$ , 0,10 M) (Figura 3). Todos os reagentes foram diluídos em água ultra-pura Milli-Q® para reduzir a presença de impurezas que podem interferir nos processos de nucleação e crescimento dos nanobastões.

**Figura 3** – Materiais para realizar a síntese de Mini AuNBs com Ácido Ascórbico Reduzido

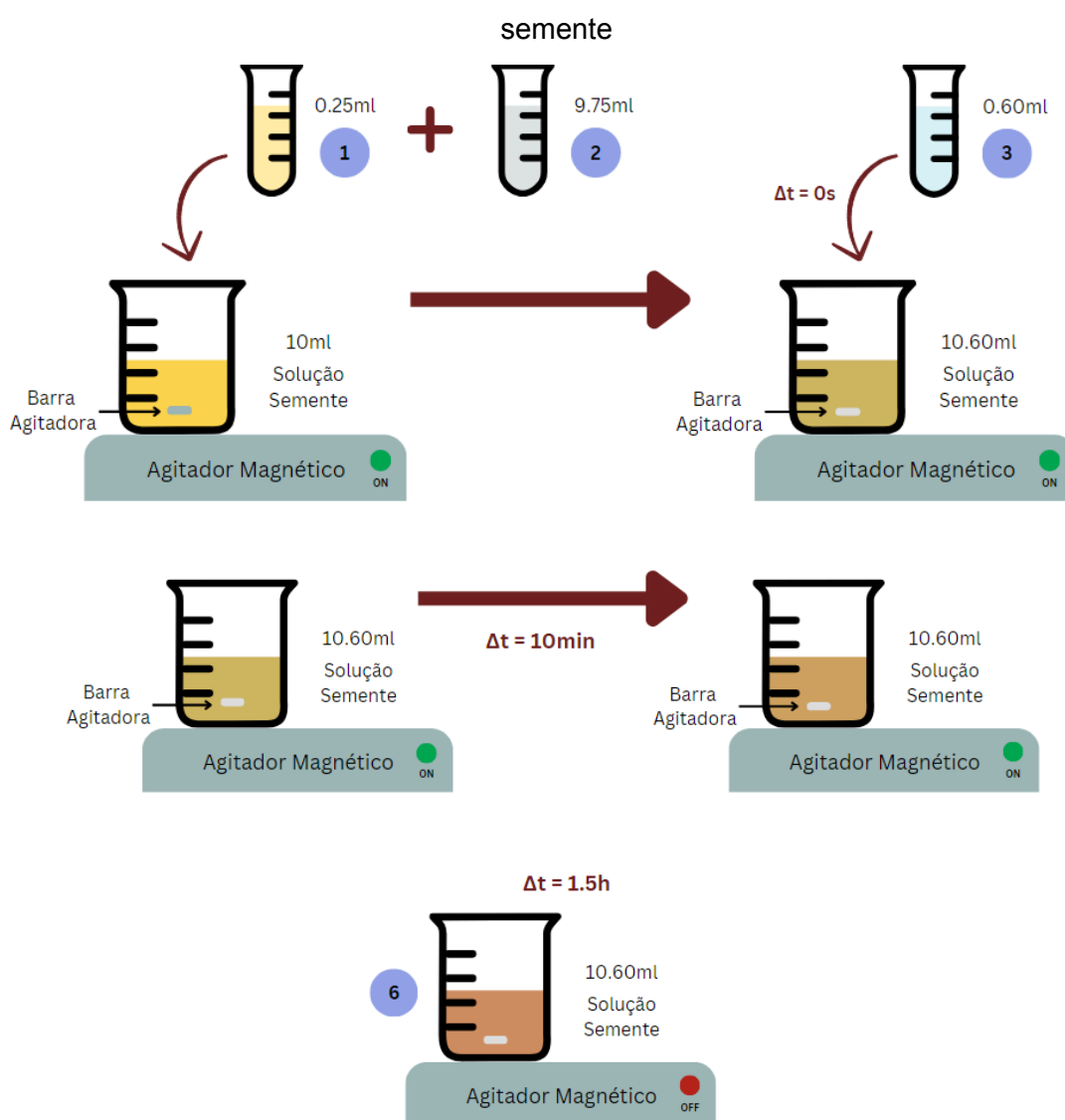


Fonte: do Autor (2025)

Seguiu-se o preparo da solução semente (Figura 4). Em um béquer, foram misturados 0,25 mL da solução de ácido tetracloroáurico ( $\text{HAuCl}_4$ ,  $10 \text{ mmol L}^{-1}$ ),

9,25 mL da solução de brometo de cetiltrimetilamônio (CTAB,  $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ ) e 0,60 mL da solução resfriada de borohidreto de sódio ( $\text{NaBH}_4$ ,  $10 \text{ mmol L}^{-1}$ ), com injeção rápida. A mistura resultante apresentou uma coloração marrom-amarelada característica da formação de nanopartículas de ouro. Após 10 minutos de agitação contínua, a solução foi deixada em repouso, sem agitação, por 1,5 hora para a estabilização das nanopartículas.

**Figura 4** – Diagrama da síntese de Mini AuNRs com Ácido Ascórbico Reduzido – Solução

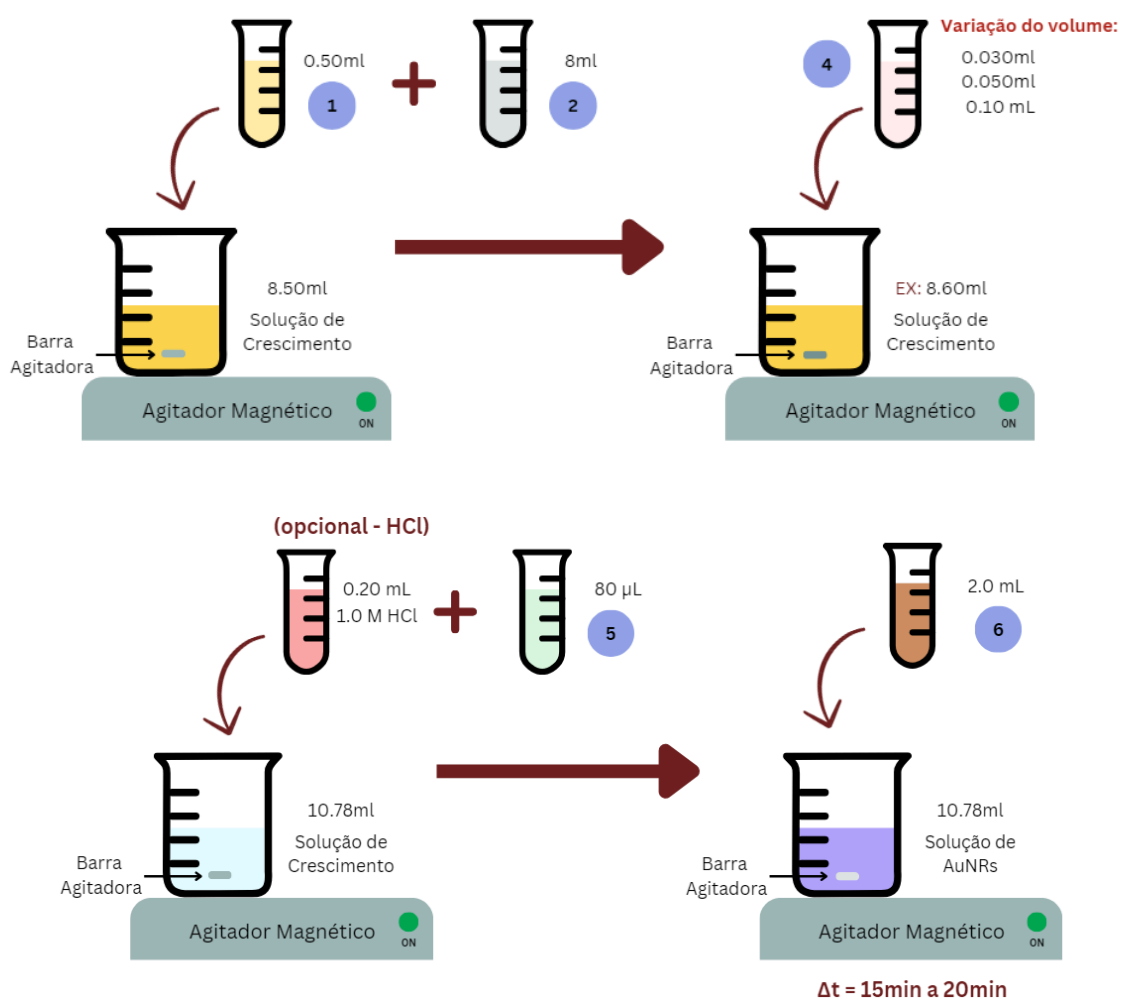


Fonte: do Autor (2024)

Concomitantemente à solução semente, iniciou-se a preparação da solução de crescimento (Figura 5). Em um béquer distinto, foram combinados 0,50 mL de solução aquosa de ácido tetracloroáurico ( $\text{HAuCl}_4$ ,  $10 \text{ mmol L}^{-1}$ ), 8 mL de brometo

de cetiltrimetilamônio (CTAB,  $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ ) e um volume variável da solução aquosa de nitrato de prata que pode modificar o resultado do nanoproduto formado, podendo ser  $0,030 \text{ mL}$ ,  $0,050 \text{ mL}$ ,  $0,10 \text{ mL}$  ( $\text{AgNO}_3$ ,  $10 \text{ mmol L}^{-1}$ ), no estudo foi utilizada apenas  $100 \mu\text{L}$  desta solução, produzindo apenas uma solução final. Sob agitação suave, foram adicionados lentamente  $0,20 \text{ mL}$  de solução aquosa de ácido clorídrico ( $\text{HCl}$ ,  $1,0 \text{ mol L}^{-1}$ ),  $80 \mu\text{L}$  de solução aquosa de ácido ascórbico ( $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$ ,  $0,10 \text{ mol L}^{-1}$ ). A adição do ácido ascórbico promoveu uma mudança de coloração da solução, de amarelo intenso para transparente, indicando a formação das nanopartículas de ouro.

**Figura 5** – Diagrama da síntese de Mini AuNBs com Ácido Ascórbico Reduzido – Solução de crescimento

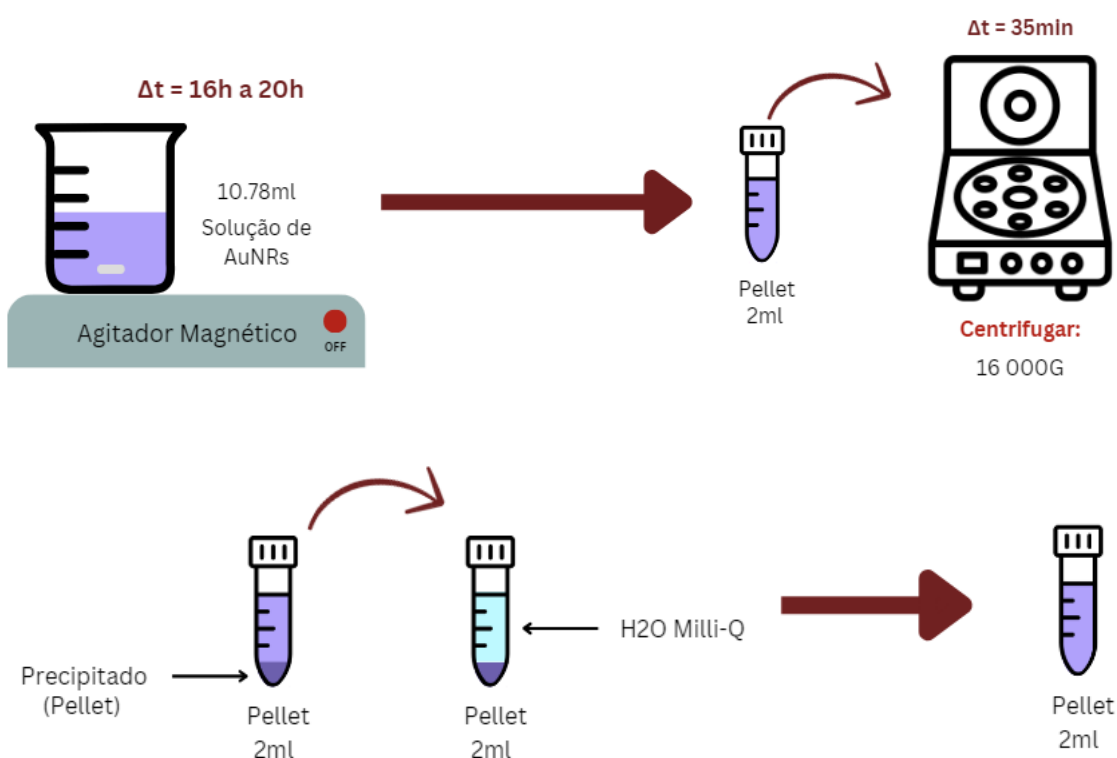


Fonte: do Autor (2024)

Para o crescimento dos nanobastões (Figura 5), foi adicionado à solução de crescimento 2 mL da solução semente e a mistura foi agitada até a homogeneização, fazendo com que cor da solução evoluísse gradualmente para um tom arroxeadado nos primeiros 15-20 minutos, indicando o crescimento dos nanobastões.

Após esse tempo, a solução de AuNBs ficou em repouso por 16h a 20h, visando assegurar a estabilização das partículas e o término da reação. Sendo posteriormente submetida a um processo de purificação (Figura 6).

**Figura 6** – Diagrama da síntese de Mini AuNBs com Ácido Ascórbico Reduzido – Purificação



Fonte: do Autor (2025)

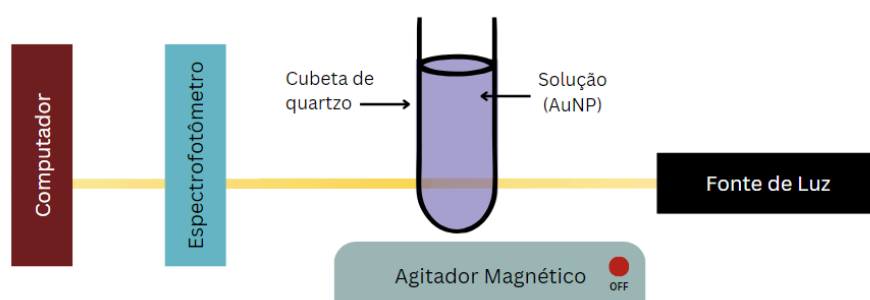
Para a remoção do excesso de reagentes não consumidos (como o ácido ascórbico) e purificação das nanopartículas, procedeu-se à técnica de centrifugação. A solução foi distribuída em microtubos com capacidade de 2mL. O protocolo de purificação consistiu em ciclos de centrifugação sob uma força centrífuga de 16000G por um tempo de residência de 35 minutos. Ao término da centrifugação,

observou-se a separação de fases, com a sedimentação dos nanobastões formando um *pellet* (precipitado) no fundo do tubo e a formação de um sobrenadante límpido. O sobrenadante foi cuidadosamente removido e descartado. O *pellet* remanescente foi ressuspensão em água ultrapura (Milli-Q), resultando em uma suspensão purificada de AuNBs pronta para caracterização.

### 3.2 CONFIGURAÇÃO EXPERIMENTAL

Após a purificação por centrifugação, a solução de nanobastões de ouro (AuNBs) foi transferida para uma cubeta de quartzo com volume de 1 ml e analisada em um espectrofotômetro UV-Vis portátil da Thorlabs de 200-1000 nm (Figura 7). O equipamento, montado em uma bancada óptica personalizada, utilizando a programação em Python para a coleta e análise dos dados, permite a aquisição de espectros de absorvância na faixa de 300 a 800 nm, com resolução espectral de 1 nm. Os dados de absorvância obtidos foram cruciais para a determinação do pico de plásmon de superfície dos AuNBs, fornecendo informações valiosas sobre suas propriedades ópticas e confirmando o sucesso da síntese.

**Figura 7** – Setup experimental para medir a absorvância na solução de AuNR

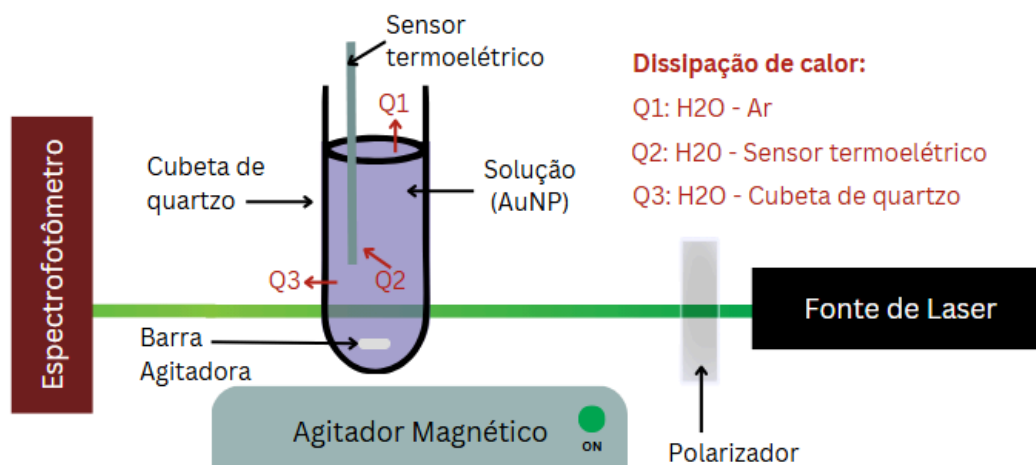


Fonte: do Autor (2025)

Para a análise do perfil térmico (Figura 8), foi montado um aparato experimental em uma bancada óptica personalizada, utilizando a programação em Python para a coleta e análise dos dados, o que permitiu a aquisição dos dados para quantificar a eficiência de conversão fototérmica, revelando uma série de informações cruciais sobre a interação entre a radiação incidente e os nanobastões de ouro. O aumento

de temperatura observado pode ser semelhante à atribuição do efeito Joule, no qual a energia da radiação absorvida é convertida em calor (LIMA, 2014).

**Figura 8** – Setup experimental para medir o perfil de temperatura na solução de AuNPs - Geral



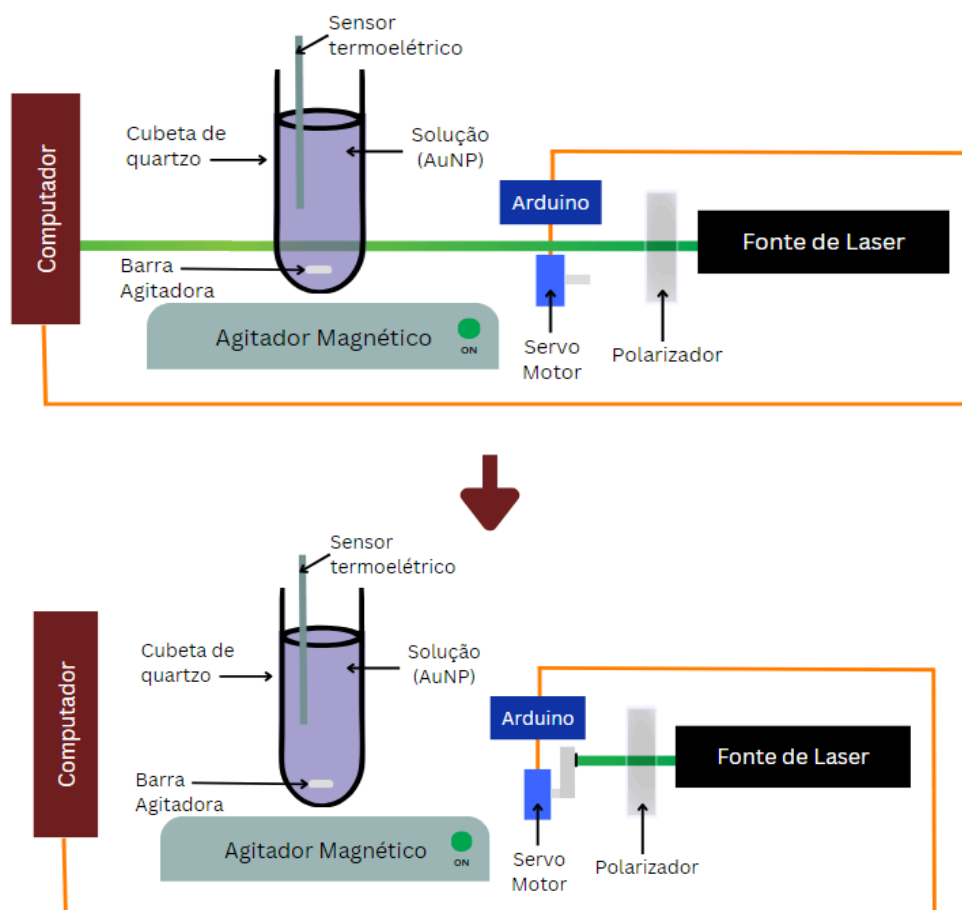
Fonte: do Autor (2025)

A taxa de aumento de temperatura e o tempo para atingir o estado estacionário são parâmetros importantes que podem fornecer a eficiência de conversão da energia luminosa em térmica. Esta informação é fundamental para o desenvolvimento de novas tecnologias e para uma melhor compreensão dos fenômenos físicos envolvidos.

A configuração experimental (Figura 9) consistiu em um sistema de irradiação composto por uma fonte de laser UV de onda contínua com comprimento de onda de excitação de 450 nm e uma lente polarizadora rotativa, que permitiu modular a intensidade e a polarização da radiação incidente. Um servo motor, controlado por um sistema usando Arduino, acionou um sistema que barra a passagem de luz até a amostra, sincronizando a irradiação da amostra com a aquisição de dados. A luz polarizada foi direcionada para uma cubeta contendo a solução a ser estudada. Um sensor termosensitivo, posicionado em contato térmico com a solução de AuNBs, converteu a variação de temperatura em um sinal elétrico, que foi amplificado e digitalizado por um sistema de aquisição de dados. A alta resolução temporal do sistema permitiu a obtenção de curvas de temperatura precisas, revelando a dinâmica do processo de aquecimento e resfriamento da amostra de nanobastões coloidais de ouro, mantida sob agitação magnética contínua, a fim de garantir a

homogeneização térmica da solução e evitar gradientes de temperatura durante a irradiação.

**Figura 9** –Aparato experimental para medir o perfil temporal de temperatura na solução de nanobastões coloidais de ouro



Fonte: do Autor (2025)

Para automatizar a coleta de dados e garantir a estabilidade do sistema, desenvolvemos um programa em LabVIEW, que pode ser reproduzido em programação em Python. Este *software* permitiu controlar a aquisição de dados, a ativação dos lasers e o acionamento do servo motor, para obstruir a passagem do laser em alguns momentos do experimento. O programa foi configurado para iniciar a coleta de dados após um período de estabilização térmica, garantindo que a amostra atingisse o equilíbrio térmico antes das medidas. Além disso, foram implementados botões virtuais para iniciar e interromper o experimento a qualquer momento.

O experimento envolveu a medição da temperatura de uma amostra ao longo

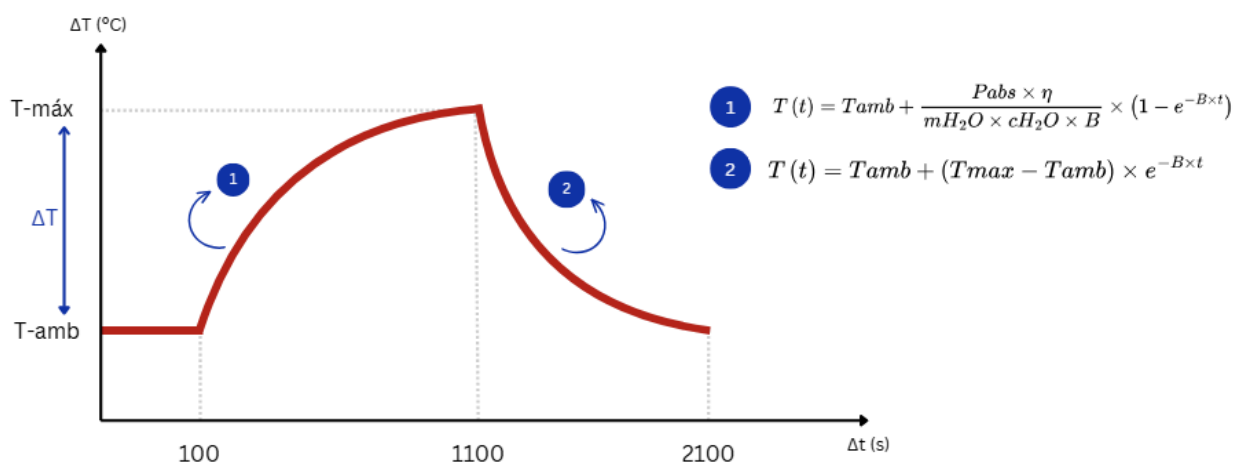
do tempo (Figura 10). No instante inicial, marcado pelo tempo de 100 segundos, deu-se início à coleta de dados sobre a temperatura da amostra. Neste ponto, a amostra se encontrava em equilíbrio térmico com o ambiente externo. A temperatura registrada nesse momento serviu como referência para as etapas subsequentes do experimento.

Entre os 100 e 1100 segundos, a amostra foi submetida a um processo de aquecimento controlado. A abertura do obturador permitiu a entrada de energia na amostra através de uma fonte de luz, elevando sua temperatura. Ao ser fechado aos 1100 segundos, o interruptor de feixe interrompeu o fluxo de energia, iniciando um processo de resfriamento da amostra. A forma da curva de temperatura nesse intervalo é fortemente influenciada por fatores como a capacidade térmica da amostra, a eficiência da transferência de calor e as propriedades térmicas do material do obturador.

Após o fechamento do interruptor de feixe, a amostra entrou em uma nova fase, caracterizada por um gradual decréscimo de temperatura. A partir dos 1100 segundos, a amostra tende a atingir um novo estado de equilíbrio térmico, com uma temperatura diferente da inicial. A taxa de resfriamento e o tempo necessário para alcançar esse novo equilíbrio dependem das propriedades térmicas da amostra e do ambiente.

Ao final do experimento, marcado pelos 2100 segundos, a coleta de dados foi encerrada. A temperatura registrada neste ponto representa o estado final da amostra após todo o processo de aquecimento e resfriamento. Comparando a temperatura inicial (correspondente à temperatura ambiente) e a temperatura máxima atingida pela amostral, é possível avaliar a variação térmica total da amostra e obter informações sobre as propriedades térmicas dos materiais envolvidos no experimento.

**Figura 10** – Perfil do gráfico da medição da temperatura ao longo do tempo.



Fonte: do Autor (2025)

Em resumo, o experimento consistiu em monitorar a evolução da temperatura de uma amostra ao longo do tempo, submetendo-a a ciclos de aquecimento e resfriamento controlados por um interruptor de feixe. A análise da curva de temperatura permite obter informações valiosas sobre as propriedades térmicas da amostra e do sistema experimental como um todo.

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

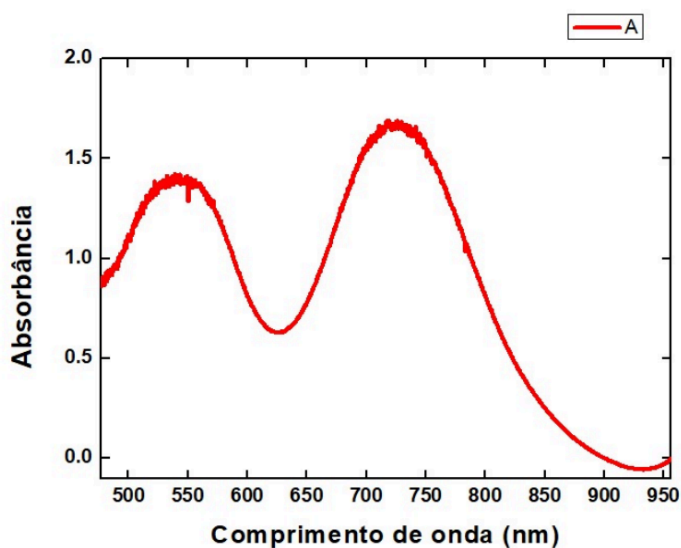
Neste estudo, exploramos a eficiência de conversão fototérmica de nanobastões de ouro, que têm se destacado em aplicações biomédicas, fotocatalise e conversão de energia. A capacidade desses nanomateriais de absorver luz e transformá-la em calor é fundamental para o desenvolvimento de tecnologias como terapia fototérmica e sensoriamento ambiental.

Os experimentos realizados incluíram a síntese de nanobastões de ouro, seguidos de caracterização óptica por meio de espectroscopia UV-VIS. Como observado na Figura 11, o espectro de absorção dos nanobastões em solução aquosa apresenta duas bandas de plásmom bem definidas, o que é característico destes nanomateriais.

Conforme demonstrado por Link e El-Sayed (1999), a anisotropia dos nanobastões de ouro resulta na divisão da banda de ressonância plasmônica em dois modos: transversal e longitudinal. A posição da banda longitudinal depende linearmente da razão de aspecto (comprimento/diâmetro) (Nikoobakht et al., 2003).

Dados experimentais indicam que uma banda longitudinal centrada em 740 nm correlaciona-se com uma razão de aspecto de aproximadamente 3,0 a 3,3. Adicionalmente, o posicionamento da banda transversal em 540 nm, desviado dos típicos 520 nm, sugere um diâmetro médio superior, na ordem de 40 nm, devido a efeitos de retardamento radiativo associados a maiores volumes de partícula (Ye et al., 2012).

**Figura 11** - Espectro de absorbância da solução de nanobastões de ouro



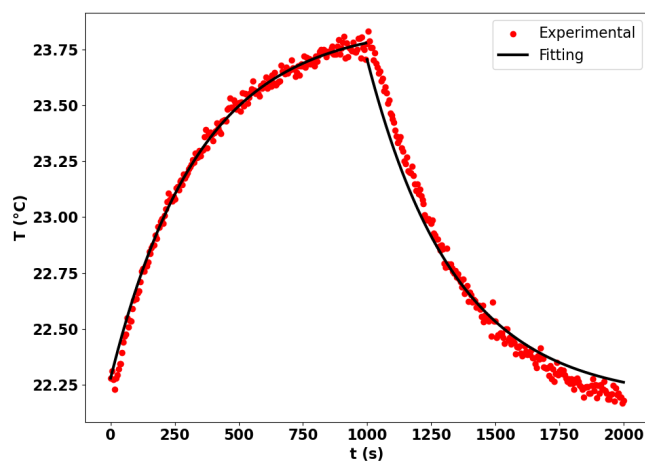
Fonte: do Autor (2025)

Uma vez que os nanobastões de ouro foram sintetizados de forma satisfatória, o trabalho foi conduzido a fim de obter a sua eficiência da conversão fototérmica. As Figuras 12, 13 e 14 mostram a variação da temperatura em função do tempo para diferentes potências de laser, sendo respectivamente 50 mW, 100 mW e 200 mW. Como observado, há um aumento significativo na temperatura dos nanobastões sob irradiação, o qual é proporcional à potência do laser. Após 1000 segundos de excitação, o laser é então desligado e a temperatura da solução aquosa contendo os nanobastões começa a diminuir devido à troca de calor com o ambiente. Em 2000 segundos, a solução entra em equilíbrio térmico com o meio ambiente ( $T_{amb}$ ), devido à dissipação de calor.

A partir da temperatura máxima  $T_{m\acute{a}x}$  encontrada para as soluções de nanobastões para cada potência do laser, foi elaborada a Figura 15. Como mostrado, este gráfico revelou um comportamento linear, demonstrando que a variação da temperatura  $\Delta T = T_{m\acute{a}x} - T_{amb}$  está diretamente relacionada à intensidade da potência do laser aplicada. Esta relação linear sugere que, à medida

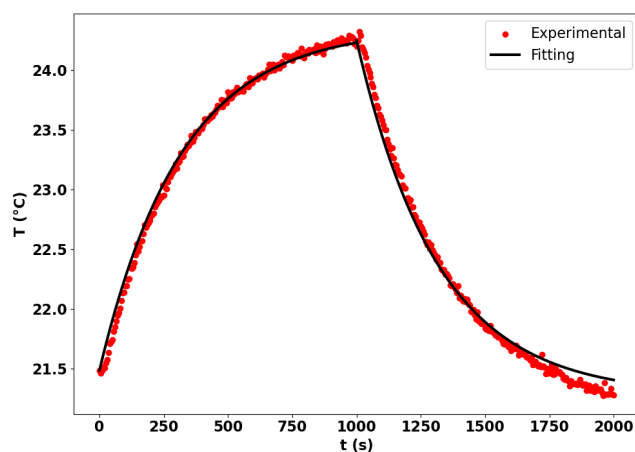
que a potência do laser aumenta, a temperatura dos nanobastões de ouro também se eleva de forma proporcional, cujo coeficiente angular está relacionado ao coeficiente de conversão fototérmica  $\eta$  e à taxa de dissipação de calor  $B$  como ilustrado na Equação 7.

**Figura 12** - Gráfico da cinética da temperatura em relação à potência de 50mW



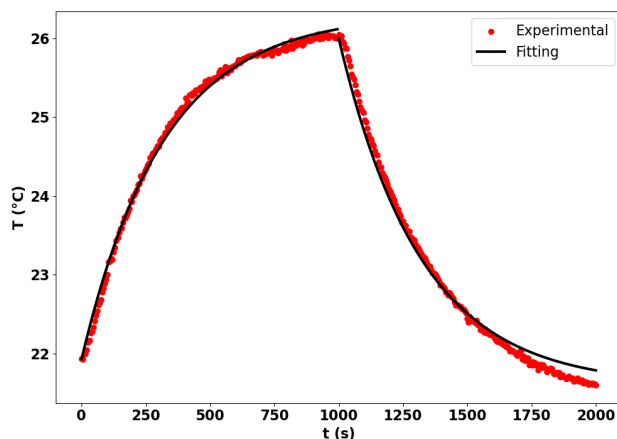
Fonte: do Autor (2025)

**Figura 13** - Gráfico da cinética da temperatura em relação à potência de 100mW



Fonte: do Autor (2025)

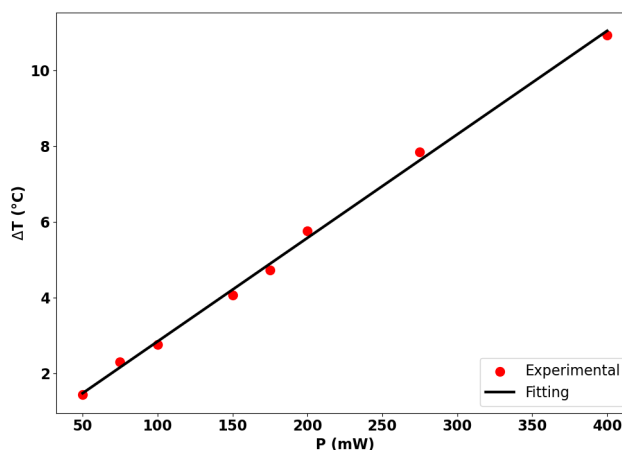
**Figura 14** - Gráfico da cinética da temperatura em relação à potência de 200mW



Fonte: do Autor (2025)

A aplicação da Equação 8 aos dados da Figura 15 resultou em uma eficiência de conversão fototérmica ( $\eta$ ) de aproximadamente 43%. Este valor apresenta-se inferior ao potencial máximo reportado para esta morfologia. Conforme a revisão abrangente de Jaque et al. (2014), nanobastões de ouro (AuNBs) são reconhecidos por apresentarem as maiores eficiências de transdução de calor entre as nanoestruturas metálicas, podendo atingir valores próximos a 100% em regimes de absorção dominante. Esse fenômeno pode ser atribuído a diversos fatores. Um deles refere-se às dimensões do nanobastão, pois de acordo com Guillaume Baffou, a relação entre o raio equivalente do nanobastão é inversamente proporcional à variação da temperatura (equação 9). Isso significa que, à medida que o tamanho do nanobastão aumenta, a eficiência na absorção da luz e na conversão de energia térmica diminui.

**Figura 15** - Aumento da temperatura em função da potência do laser



Fonte: do Autor (2025)

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo proporcionou uma análise detalhada da eficiência de conversão fototérmica de nanobastões de ouro, destacando seu potencial em diversas aplicações. Os resultados obtidos a partir da síntese e caracterização dos nanobastões, seguidos por experimentos de irradiação em comprimento de onda do laser, demonstraram a habilidade desses nanomateriais em absorver luz e convertê-la em calor.

A análise da cinética da temperatura em relação à potência do laser revelou um aumento significativo na temperatura dos nanobastões, com uma relação linear entre a potência incidente e a taxa de elevação da temperatura. Além disso, a correlação linear entre a potência do laser e a variação da temperatura sugere que a otimização desses parâmetros é crucial para maximizar a eficiência fototérmica.

Entretanto, a eficiência de conversão fototérmica observada, de apenas 43%, foi inferior ao esperado. Essa discrepância pode ser atribuída a fatores como as dimensões dos nanobastões, uma vez que um aumento no tamanho pode reduzir a eficácia na absorção de luz e na conversão de energia térmica. Esses achados ressaltam a necessidade de futuras investigações voltadas para a otimização das características dos nanobastões, a fim de melhorar seu desempenho em aplicações práticas.

## REFERÊNCIAS

ABADEER, N. S. et al. **Distance and Plasmon Wavelength Dependent Fluorescence of Molecules Bound to Silica-Coated Gold Nanorods.** v. 8, n. 8, p. 8392–8406, 5 ago. 2014.

Advanced Research Instrumentation and Facilities. Washington, D.C.: National Academies Press, 2006.

ANGELI, D. **Nanopartículas com propriedades plasmônicas: otimização de parâmetros de síntese visando sistemas monodispersos, controle morfológico, estrutural e de composição química, funcionalização de superfície e avaliação de estabilidade coloidal.** 23 jun. 2017. Disponível em: <<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/75/75134/tde-20042017-102736/pt-br.php>>. Acesso em: 4 set. 2025.

ALMEIDA JÚNIOR, Alexandre Mendes. **Sinergia fototerápica a partir de nanobastões de ouro conjugados com azul de toluidina: uma comparação entre modelos bacterianos e tumoral.** Orientador(a): Pedro Henrique Benites Aoki. Coorientador(a): Sabrina Aléssio Camacho. Tese (Doutorado em Farmacologia e Biotecnologia) - Instituto de Biociências de Botucatu, Universidade Estadual Paulista (Unesp), Botucatu, 2024.

BEICKER, C. L. L. **ANÁLISE EXPERIMENTAL DA CONVERSÃO FOTOTÉRMICA EM NANOFLUIDOS DE OURO E NANOTUBOS DE CARBONO EM ÁGUA -UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA,** 2016. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/19451/1/AnaliseExperimentalConversao.pdf>>. Acesso em: 4 set. 2025.

CHANG, H.-H.; MURPHY, C. J. **Mini Gold Nanorods with Tunable Plasmonic Peaks beyond 1000 nm.** Chemistry of Materials, v. 30, n. 4, p. 1427–1435, 7 fev. 2018.

CHINCHILLA-RODRÍGUEZ, Z. et al. Dependencies and autonomy in research performance: examining nanoscience and nanotechnology in emerging countries. Scientometrics, v. 115, n. 3, p. 1485–1504, 21 jan. 2018.

CORRADI, D. **Efeito fototérmico em nanopartículas de polímeros conjugados e fulerenos com potenciais aplicações em biomedicina.** Ufpr.br, 2020.

DE OLIVEIRA, R. F.; MARTINEZ, D. S. T.; FAZZIO, A. **A nanotecnologia na saúde: a nanotecnologia e os nanomateriais são elementos centrais para a inovação e solução de problemas na área da saúde.** Ciência e Cultura, v. 74, n. 4, 2022.

DIAS, M. **Desenvolvimento de instrumentação científica em nanotecnologia: inferências para nanoespectroscopia Raman a partir de Technology Roadmapping retrospectivo adaptado de duas tecnologias consolidadas.**

Disponível em:  
<<https://repositorio.ufmg.br/items/c3c9b57b-b046-4a86-9800-750576034792>>.  
Acesso em: 27 out. 2025.

FERREIRA, H. S.; RANGEL, M. DO C. **Nanotecnologia: aspectos gerais e potencial de aplicação em catálise**. Química Nova, v. 32, n. 7, p. 1860–1870, 2009.

FERREIRA, C. S. et al. **Uso de nanobastões de ouro para o desenvolvimento de aulas práticas de nanotecnologia**. Química Nova, 14 fev. 2017.

GRASSESCHI, D.; DOS SANTOS, D. **NANOMATERIAIS PLASMÔNICOS: PARTE I. FUNDAMENTOS DA ESPECTROSCOPIA DE NANOPARTÍCULAS E SUA RELAÇÃO COM O EFEITO SERS**. Química Nova, 2020.

GRODNISKI, D. C. **EFEITO FOTOTÉRMICO EM NANOPARTÍCULAS DE POLÍMEROS CONJUGADOS E FULERENOS COM POTENCIAIS APLICAÇÕES EM BIOMEDICINA**, 2020. [s.l.: s.n.]. Disponível em:  
<<https://acervodigital.ufpr.br/xmlui/bitstream/handle/1884/73861/R%20-%20T%20-%20DEIZE%20CORRADI%20GRODNISKI.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>.  
Acesso em: 4 set. 2025.

GUILLAUME BAFFOU; ROMAIN QUIDANT; GARCÍA, J. **Nanoscale Control of Optical Heating in Complex Plasmonic Systems**. v. 4, n. 2, p. 709–716, 7 jan. 2010.

HAMAD-SCHIFFERLI, K. **Applications of Gold Nanoparticles in Plasmonic and Nanophotonic Biosensing**. In: LISDAT, F.; PLUMERÉ, N. (eds.). *Trends in Biosensing Research*. Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology, v. 187. Cham: Springer, 2023. Disponível em: [https://doi.org/10.1007/10\\_2023\\_237](https://doi.org/10.1007/10_2023_237). Acesso em: 12 set. 2025.

JAUQUE, D. et al. "Nanoparticles for photothermal therapies". **Chemical Society Reviews**, v. 43, p. 7834-7938, 2014.

JIANG, K.; SMITH, D. A.; PINCHUK, A. **Size-Dependent Photothermal Conversion Efficiencies of Plasmonically Heated Gold Nanoparticles**. The Journal of Physical Chemistry C, v. 117, n. 51, p. 27073–27080, 17 dez. 2013.

LINK, S.; EL-SAYED, M. A. "Spectral Properties and Relaxation Dynamics of Surface Plasmon Electronic Oscillations in Gold and Silver Nanodots and Nanorods". **Journal of Physical Chemistry B**, v. 103, n. 40, p. 8410–8426, 1999.

LIMA, L. S. **Lei de Lambert–Beer**. Revista de Ciência Elementar, v. 1, n. 1, p. 047, 2013. Disponível em: <https://rce.casadasciencias.org/rceapp/art/2013/047/>. Acesso em: 07 set. 2025.

LIMA, L. S. **Efeito Joule**. Revista de Ciência Elementar, 2014. Disponível em:

<https://rce.casadasciencias.org/rceapp/art/2014/069/>. Acesso em: 07 set. 2025.

MELO JR. , M. A. et al. **Preparação de nanopartículas de prata e ouro: um método simples para a introdução da nanociência em laboratório de ensino.** *Química Nova*, v. 35, p. 1872–1878, 2012.

Nanotecnologia e suas Aplicações. **O que esperar para o futuro?** Disponível em: <<https://www.unicep.edu.br/post/nanotecnologia-e-suas-aplica%C3%A7%C3%B5es-o-que-esperar-para-o-futuro>>. Acesso em: 7 set. 2025.

NIKOOBAKHT, B.; EL-SAYED, M. A. "Preparation and Growth Mechanism of Gold Nanorods Using Seed-Mediated Growth Method". **Chemistry of Materials**, v. 15, n. 10, p. 1957–1962, 2003.

OTUBO, L. **MONOGRAFIA TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO DE NANOPARTÍCULAS METÁLICAS FUNCIONALIZADAS.** [s.l: s.n.]. Disponível em: <[https://lqes.iqm.unicamp.br/images/vivencia\\_lqes\\_monografias\\_larissa\\_particulas.pdf](https://lqes.iqm.unicamp.br/images/vivencia_lqes_monografias_larissa_particulas.pdf)>. Acesso em: 17 set. 2025.

**O que é: Efeito fototérmico.** Disponível em: <<https://angelicapimenta.com.br/glossario/o-que-e-efeito-fototermico/>>. Acesso em: 17 ago. 2025.

PEIXOTO, **Síntese e caracterização de nanobastões e nanobipirâmides de Au para aplicação em biossensores plasmônicos.** Uffj.br, 2023.

Repositório Institucional Unesp. Disponível em: <<https://hdl.handle.net/11449/256355>>. Acesso em: 24 out. 2025.

RESERVED, M.-T. I. I. ALL RIGHTS. **Espectroscopia UV Vis: Conhecimento Essencial.** Disponível em: <[https://www.mt.com/br/pt/home/applications/Application\\_Browse\\_Laboratory\\_Analytics/uv-vis-spectroscopy/uvvis-spectroscopy-explained.html](https://www.mt.com/br/pt/home/applications/Application_Browse_Laboratory_Analytics/uv-vis-spectroscopy/uvvis-spectroscopy-explained.html)>. Acesso em: 12 set. 2025.

RICHARDSON, H. H. et al. **Experimental and Theoretical Studies of Light-to-Heat Conversion and Collective Heating Effects in Metal Nanoparticle Solutions.** *Nano Letters*, v. 9, n. 3, p. 1139–1146, 4 fev. 2009.

ROCO, M. C. **International strategy for nanotechnology research.** *Journal of Nanoparticle Research*, v. 3, p. 353-360, 2001.

ROPER, D. K.; AHN, W.; HOEPFNER, M. **Microscale Heat Transfer Transduced by Surface Plasmon Resonant Gold Nanoparticles.** *The Journal of Physical Chemistry C*, v. 111, n. 9, p. 3636–3641, 8 fev. 2007.

ROMANI, Eric Cardona. **Nanopartículas metálicas.** 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais e de Processos Químicos e Metalúrgicos) – Pontifícia

Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011. Disponível em: [https://www2.dbd.puc-rio.br/pergamum/tesesabertas/0912567\\_2011\\_cap\\_2.pdf](https://www2.dbd.puc-rio.br/pergamum/tesesabertas/0912567_2011_cap_2.pdf). Acesso em: 7 set. 2025.

S. A. Maier, **Plasmonics: Fundamentals and Applications** Springer, 2007.

SANTOS, Camila Carvalho de Oliveira. **Síntese NINA: uma estratégia para produção de nanobastões de ouro em larga escala a partir do método mediado por semente assistido por íons prata**. 2022. 149 f. Tese (Doutorado em Química) Instituto de Química, Universidade Federal da Bahia, Salvador, BA, 2022.

SBPMat - **Sociedade Brasileira de Pesquisa em Materiais**. Disponível em: <https://www.sbpmat.org.br/pt/tag/nanobastoes/>. Acesso em: 7 set. 2025.

TEODORO. **Síntese verde de nanopartículas de ouro: detecção e quantificação de íons prata**. Disponível em: <https://locus.ufv.br/handle/123456789/27953>. Acesso em: 7 set. 2025.

**Testes com nanobastões**. Disponível em: <https://revistapesquisa.fapesp.br/testes-com-nanobastoes/>. Acesso em: 5 set. 2025.

TOMA, H. E. **O mundo nanométrico: a dimensão do novo século**. São Paulo: Oficina de Textos, 2004.

USKOKOVIĆ, V. **Nanotechnologies: What we do not know**. *Technology in Society*, v. 29, p. 43-61, 2007.

OTUBO, L. **MONOGRAFIA TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO DE NANOPARTÍCULAS METÁLICAS FUNCIONALIZADAS**. [s.l: s.n.]. Disponível em: [https://lqes.iqm.unicamp.br/images/vivencia\\_lqes\\_monografias\\_larissa\\_particulas.pdf](https://lqes.iqm.unicamp.br/images/vivencia_lqes_monografias_larissa_particulas.pdf). Acesso em: 17 set. 2025.

**O que é: Efeito fototérmico**. Disponível em: <https://angelicapimenta.com.br/glossario/o-que-e-efeito-fototermico/>. Acesso em: 17 ago. 2025.

PEIXOTO, **Síntese e caracterização de nanobastões e nanobipirâmides de Au para aplicação em biossensores plasmônicos**. Ujf.br, 2023.

Repositório Institucional Unesp. Disponível em: <https://hdl.handle.net/11449/256355>. Acesso em: 24 out. 2025.

RESERVED, M.-T. I. I. ALL RIGHTS. **Espectroscopia UV Vis: Conhecimento Essencial**. Disponível em: [https://www.mt.com/br/pt/home/applications/Application\\_Browse\\_Laboratory\\_Analytics/uv-vis-spectroscopy/uvvis-spectroscopy-explained.html](https://www.mt.com/br/pt/home/applications/Application_Browse_Laboratory_Analytics/uv-vis-spectroscopy/uvvis-spectroscopy-explained.html). Acesso em: 12 set. 2025.

RICHARDSON, H. H. et al. **Experimental and Theoretical Studies of Light-to-Heat Conversion and Collective Heating Effects in Metal Nanoparticle Solutions**. *Nano Letters*, v. 9, n. 3, p. 1139–1146, 4 fev. 2009.

ROCO, M. C. **International strategy for nanotechnology research**. *Journal of Nanoparticle Research*, v. 3, p. 353-360, 2001.

ROPER, D. K.; AHN, W.; HOEPFNER, M. **Microscale Heat Transfer Transduced by Surface Plasmon Resonant Gold Nanoparticles**. *The Journal of Physical Chemistry C*, v. 111, n. 9, p. 3636–3641, 8 fev. 2007.

ROMANI, Eric Cardona. **Nanopartículas metálicas**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais e de Processos Químicos e Metalúrgicos) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011. Disponível em: [https://www2.dbd.puc-rio.br/pergamum/tesesabertas/0912567\\_2011\\_cap\\_2.pdf](https://www2.dbd.puc-rio.br/pergamum/tesesabertas/0912567_2011_cap_2.pdf). Acesso em: 7 set. 2024.

S. A. Maier, **Plasmonics: Fundamentals and Applications** Springer, 2007.

SANTOS, Camila Carvalho de Oliveira. **Síntese NINA: uma estratégia para produção de nanobastões de ouro em larga escala a partir do método mediado por semente assistido por íons prata**. 2022. 149 f. Tese (Doutorado em Química) Instituto de Química, Universidade Federal da Bahia, Salvador, BA, 2022.

SBPMat - **Sociedade Brasileira de Pesquisa em Materiais**. Disponível em: <https://www.sbpmat.org.br/pt/tag/nanobastoes/>. Acesso em: 7 set. 2024.

TEODORO. **Síntese verde de nanopartículas de ouro: detecção e quantificação de íons prata**. Disponível em: <https://locus.ufv.br/handle/123456789/27953>. Acesso em: 7 set. 2024.

**Testes com nanobastões**. Disponível em: <https://revistapesquisa.fapesp.br/testes-com-nanobastoes/>. Acesso em: 5 set. 2025.

TOMA, H. E. **O mundo nanométrico: a dimensão do novo século**. São Paulo: Oficina de Textos, 2004.

USKOKOVIĆ, V. **Nanotechnologies: What we do not know**. *Technology in Society*, v. 29, p. 43-61, 2007.

YE, X. et al. "Improved Size-Tunable Synthesis of Gold Nanorods through the Use of Aromatic Additives". **ACS Nano**, v. 6, n. 3, p. 2804–2817, 2012.