

CAROLINA LAU LINS BEICKER

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DA CONVERSÃO
FOTOTÉRMICA EM NANOFUIDOS DE OURO E
NANOTUBOS DE CARBONO EM ÁGUA**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

2016

CAROLINA LAU LINS BEICKER

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DA CONVERSÃO FOTOTÉRMICA EM
NANOFLUIDOS DE OURO E NANOTUBOS DE CARBONO EM ÁGUA**

Dissertação apresentada ao Programa de
Pós-graduação em Engenharia Mecânica da
Universidade Federal de Uberlândia, como parte
dos requisitos para obtenção do título de **MESTRE**
EM ENGENHARIA MECÂNICA.

Área de Concentração: Geração e Conservação
de Energia.

Orientador: Prof. Dr. Enio Pedone Bandarra Filho

UBERLÂNDIA – MG
2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

B422a Beicker, Carolina Lau Lins, 1992-
2016 Análise experimental da conversão fototérmica em nanofluidos de
ouro e nanotubos de carbono em água/ Carolina Lau Lins Beicker. -
2016.
116 f. : il.

Orientadora: Enio Pedone Bandarra Filho.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.
Inclui bibliografia.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Nanofluidos - Teses. 3. Absorção
- Teses. 4. Nanotubos de carbono - Teses. I. Bandarra Filho, Enio
Pedone. II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

CDU: 621

A Jesus, meu salvador.

*“Todas as coisas foram feitas por ele,
e sem ele nada do que foi feito se fez.”*

João 1:3

AGRADECIMENTOS

À Deus, porque sem Ele eu nada seria.

Ao meu marido, Guilherme Oliveira, por toda ajuda, por todos os conselhos e pelo companheirismo durante o desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus pais, Adilson e Jusely, por sempre quererem para mim muito mais do que eles puderam ter, se sacrificando por isso, e pela incondicional prontidão em me ajudar.

Ao técnico Reinaldo pela solicitude e trabalho sempre primoroso.

Ao orientador Prof. Enio Pedone Bandarra Filho pelo direcionamento e auxílio no desenvolvimento deste projeto.

À University of Leeds, na pessoa do Prof. Dongsheng Wen, pela doação de amostras de nanofluido de ouro para a presente pesquisa.

À Universidade Federal de Uberlândia e à Faculdade de Engenharia Mecânica pela oportunidade de realizar este curso.

Ao CNPq, FAPEMIG e CAPES pelo apoio financeiro.

BEICKER, C. L. L., **Análise experimental da conversão fototérmica em nanofluidos de ouro e nanotubos de carbono em água.** 2016. 110 f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil.

Resumo

Este trabalho apresenta um estudo experimental do comportamento de nanofluidos de ouro e nanotubos de carbono de paredes múltiplas dispersos em água destilada quando submetidos a condições reais de conversão foto-térmica utilizando-se coletores solares de absorção direta sem concentração. Nanofluidos de ouro e de nanotubos de carbono em baixas concentrações, entre 1 e 40 ppm e 1 e 300 ppm, em volume, respectivamente, foram obtidos por intermédio de dispersão seguida de sonicação das amostras. Um aparato foi construído para exposição simultânea das diferentes concentrações de nanofluidos e seu fluido base à radiação solar. Os resultados indicaram que os nanofluidos estudados possuem excelente capacidade de conversão foto-térmica, mesmo em baixas concentrações. Notou-se uma acentuada mudança na temperatura dos nanofluidos na primeira hora de experiência e um aumento linear da energia total armazenada em função da concentração volumétrica de nanopartículas para as concentrações entre 1 e 10 ppm. Os nanofluidos de nanotubos de carbono com concentrações acima de 10 ppm apresentaram comportamentos de aquecimento muito semelhantes. Para o nanofluido de nanotubos de carbono com concentração de 10 ppm, foi registrado um aumento na temperatura 90% maior que o da água, resultado superior ao apresentado pelo nanofluido de ouro com concentração de 40 ppm (75% superior ao da água). A taxa de absorção específica ("SAR") apresentou um decréscimo exponencial com o aumento do volume de nanopartículas presente no fluido base. Na análise da razão de energia absorvida ("SER") os nanofluidos com concentração 40 ppm apresentaram melhores resultados. Após cinco dias de teste os nanofluidos de ouro apresentaram indícios de decantação, enquanto os de nanotubos de carbono permaneceram estáveis. A análise conjunta dos parâmetros estudados indicou a existência de uma concentração ótima, próxima a 40 ppm (ouro) e 10 ppm (nanotubos de carbono), para aplicações solares desses nanofluidos e, em razão do menor custo, maior estabilidade e resultados promissores, os nanotubos de carbono mostraram-se uma alternativa mais viável para tal que as nanopartículas de ouro.

Palavras-chave: nanofluidos, absorção direta, conversão foto-térmica, comparação.

Abstract

The present work experimentally investigated the behavior of Au/Water and MWCNT/Water nanofluids under realistic conditions of photothermal conversion using direct absorption solar collector. Nanofluids (gold and carbon nanotubes) at low volumetric concentrations (1 to 40 ppm and 1 to 300 ppm, respectively) were obtained by sonication process. An apparatus was built for simultaneous exposition of the different concentrations of nanofluids as well as base fluid to the solar radiation without any solar concentration device. The results showed that the nanoparticles have excellent photothermal conversion capability, even at very low concentrations. It also showed a remarkable change in temperature of nanofluids at the first hour of exposition and a linear augmentation in the total storage energy as function of nanoparticle mass for concentrations from 1 to 10 ppm. The heating behavior of carbon nanotube nanofluid with higher concentration ($>10\text{ppm}$) showed to be very similar (both temperature variation and maximum temperature). For 10ppm concentration of carbon nanotubes it was observed an increase of 90% in the temperature in comparison to the pure water, presenting a better result obtained by the 40ppm gold nanofluid ($\sim 75\%$ higher). The analysis of specific absorption rate (SAR) showed an exponential decay with the concentration increase. The analysis of the stored energy ratio (SER) showed that the 40ppm volumetric concentration presented better results. After five days of tests, gold nanofluids has shown clear evidences of sedimentation, differently from the behavior presented by the carbon nanotubes nanofluids. The combined analysis of the studied parameters indicates that exists an optimal volumetric concentration, near 40ppm and 10ppm, for solar applications of gold and carbon nanotubes nanofluids. In comparison of nanoparticles nature, the higher stability, lower cost and good results presented by carbon nanotubes indicates that it is a better choice for solar applications under the same conditions presented on this work.

Keywords: nanofluids, direct absorption, photothermal conversion, comparison.

Lista de símbolos

Arábicos

Au: ouro
 B_{total} : erro sistemático total
 c: calor específico [J/g°C]
 CNT: Carbon Nanotube (nanotubo de carbono)
 dT: diferencial de temperatura [°C]
 dt: diferencial do tempo [s]
 INMET: Instituto Nacional de Meteorologia
 k: número de rodadas
 m: massa [g]
 MWCNT: Multi-Walled Carbon Nanotube (nanotubos de carbono de paredes múltiplas)
 N: número de medições por rodada
 Q: calor armazenado [J]
 RPSL: Ressonância de Plasmon de Superfície Localizado
 SAR: Specific Absorption Rate [kW/g]
 S_{cal} : erro de calibração
 SER: Storage Energy Ratio (Razão de energia armazenada)
 $S_{rnd;meas}$: erro aleatório de uma medição
 S_{total} : erro total
 SWCNT: Single-Walled Carbon Nanotube (nanotubos de carbono de parede simples)
 T : temperatura (°C)
 t: tempo (s)
 TP: termopar
 t_{95} : valor da distribuição t de student com 95% de confiança
 U_{total} : incerteza total
 V: volume [ml]

Gregos

ΔT : variação na temperatura [°C]
 Δt : variação no tempo [s]
 ϕ : concentração [%]
 ρ : densidade [g/cm³]
 σ : desvio padrão

Subscritos

m: mássica
v: volumétrica
fb: fluido base
np: nanopartícula
a: água
nano:
f: fluido
nf: nanofluido
máx: máxima
mín: mínima

Sumário

1.	INTRODUÇÃO	1
1.1.	Objetivos	3
1.2.	Estrutura da dissertação	3
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1.	Nanofluidos	5
2.2.	Preparação e caracterização de nanofluidos	6
2.3.	Aplicação de nanofluidos em sistemas de conversão foto-térmica	8
2.4.	Resumo das referências utilizadas	29
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	34
3.1.	Bancada experimental	34
3.2.	Software de aquisição de dados	36
3.3.	Calibração dos termopares e incerteza associada às medições	37
3.4.	Preparação dos nanofluidos	38
3.5.	Condições e cronograma de testes	41
3.6.	Cálculo da energia total armazenada na fase de aquecimento	42
3.7.	Cálculo da taxa de variação da temperatura	43
3.8.	Cálculo da taxa de absorção específica - “SAR”	43
3.9.	Cálculo da razão de energia armazenada - “SER”	44
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	46
4.1.	Nanofluidos resultantes do processo de diluições sucessivas	46
4.2.	Perfis de temperatura	47
4.3.	Energia total armazenada na fase de aquecimento	54
4.4.	Cálculo da taxa de variação da temperatura	59
4.5.	Taxa de absorção específica “SAR”	64
4.6.	Razão de energia armazenada “SER”	69
5.	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	74
5.1.	Conclusões	74

5.2. Trabalhos futuros	76
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	77
Apêndice A – Curvas de calibração dos termopares.....	82
Apêndice B – Cálculo das incertezas de medição.....	87
Apêndice C – Dados Meteorológicos para os dias de teste	88
Apêndice D – Resultados dos demais dias de teste.....	92

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

Fluidos considerados tradicionais para processos que envolvem transferência de calor tais como água, etileno-glicol e certos tipos de óleo têm papel fundamental em processos industriais de geração de energia, de aquecimento e resfriamento e processos químicos. No entanto, esse tipo de fluido possui limitações térmicas associadas a condutividade térmica relativamente baixa. Como uma forma de ultrapassar as barreiras de transferência de calor inerentes aos fluidos tradicionais passou a ser investigada uma nova classe de fluidos, denominada nanofluidos por Choi em 1995, que possui potencialidades em diversas áreas. Nanofluidos são compostos de partículas sólidas em escala nanométrica (1 - 100nm) dispersas em um fluido convencional de transferência de calor, o que possibilitaria a melhora da condutividade térmica dos mesmos, além de agregar características ausentes ou limitadas do fluido base. Assim sendo, o tema passou a ser foco de grande interesse de diversos pesquisadores nos últimos anos, como mostra a Fig. 1.1.

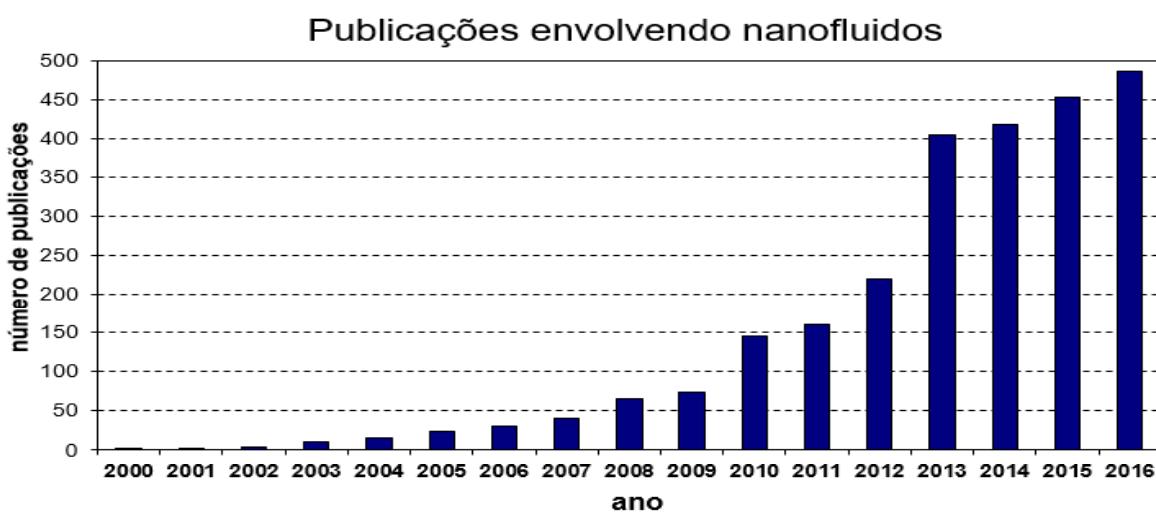


Figura 1.1 - Quantidade de publicações envolvendo nanofluidos por ano (Fonte: Web of Science).

Entre as características proporcionadas pela adição de nanopartículas pode-se citar a melhora nas propriedades termofísicas dos nanofluidos quando comparados ao seu fluido base, dessa maneira, foram estudados diversos métodos de preparação e caracterização e utilizados diferentes modelos para o cálculo de propriedades dos nanofluidos como condutividade térmica, viscosidade e densidade (Li et al., 2009; Lee et al., 2010; Ghamdimi et al., 2011; Ramesh e Prabu, 2011; Khanafer et al., 2011; Fan e Wang, 2011; Vajjha et al., 2012; Trisaksri et al., 2007).

Outro resultado da dispersão de partículas em escala nanométrica em diversos fluidos é o aprimoramento de propriedades óticas como a alta absorvividade de radiação solar pelas nanopartículas e o aumento que estas causam no trajeto dos fótons que atravessam o fluido o que, consequentemente, amplifica a capacidade de absorção e armazenamento da energia.

Coletores solares tradicionalmente utilizados para absorver energia solar e transferi-la para um fluido a ser aquecido possuem limitações referentes à sua eficiência devido ao aumento de perdas radiativas sofridas pela superfície absorvedora, conforme a temperatura da mesma se eleva. Diante disso, coletores solares de absorção direta tem se tornado mais conhecidos por possuírem um revestimento transparente e um fluido de trabalho responsável por realizar a conversão fototérmica, em oposição às superfícies seletivas usualmente utilizadas para essa tarefa, o que proporcionaria a redução das perdas anteriormente citadas e um consequente aumento da eficiência do dispositivo.

Diante do panorama apresentado, os nanofluidos surgiram como objeto de estudo como uma alternativa ao uso de coletores solares tradicionais (coletores planos, coletores de tubo evacuado, coletores parabólicos, etc) através de sua aplicabilidade como fluido de conversão foto-térmica em coletores adaptados à sua utilização.

Nessa vertente, alguns pesquisadores investigaram o aumento da eficiência desse tipo de sistema. Natarajan et al. (2009) investigaram a possibilidade de aumento na eficiência dos aquecedores solares de água convencionais utilizando-se nanofluidos como meio de transferência de calor e concluiu que esses são mais eficazes que os fluidos convencionais. Tyagi et al. (2009) realizaram um estudo teórico onde analisou-se a possibilidade de construção de um coletor solar que utilizasse nanofluidos como absorvedor direto e comparou sua eficiência com a de um coletor plano convencional, obtendo um resultado 10% superior utilizando-se nanofluido. Otanicar et al. (2010) concluiu experimentalmente ser possível um aumento de 5% na eficiência de coletores térmicos solares utilizando-se nanofluidos como meio de absorção. Taylor et al. (2010) realizou um estudo teórico acerca das propriedades ópticas dos nanofluidos e sua possível aplicação como receptor volumétrico solar, vislumbrando uma maior eficiência baseada na redução das resistências térmicas inerentes

ao sistema convencional e concluíram ser possível uma melhora de 10% na eficiência dos coletores que utilizaram nanofluidos em relação aos coletores convencionais.

Portanto, tendo como objetivo estudar a conversão foto-térmica de nanofluidos em relação ao seu fluido base e determinar uma concentração “ótima” para sua aplicação foi construído um aparato experimental para expor à radiação solar nanofluidos de ouro e de nanotubos de carbono de paredes múltiplas em água em diferentes concentrações volumétricas, visando acompanhar seu processo de aquecimento paralelamente ao do fluido base estabelecendo uma comparação entre as temperaturas e taxas de aquecimento de cada um dos fluidos analisados, a energia térmica total armazenada por eles, a taxa de absorção específica, “SAR”, do inglês Specific Absorption Rate, e a razão de energia armazenada “SER”, do inglês Storage Energy Ratio.

1.1. Objetivos

Este trabalho tem como principal foco avaliar o comportamento de nanofluidos quando expostos à radiação solar, apresentando comparativamente parâmetros de desempenho de conversão fototérmica obtidos por cada um deles e pelo fluido base utilizado. Desta maneira, destacam-se os seguintes objetivos específicos:

- Produzir nanofluidos estáveis a partir do método de sonicação.
- Projetar uma bancada que permita a exposição solar dos fluidos estudados e a coleta de dados de temperatura ao longo dos dias de teste.
- Avaliar quantitativamente o aquecimento apresentado pelos nanofluidos estudados e comparar os resultados com os obtidos pelo fluido base.
- Estabelecer um comparativo entre as máximas temperaturas alcançadas por cada um dos fluidos testados tendo como base suas respectivas concentrações volumétricas.
- Obter a energia térmica armazenada pelos fluidos durante a fase de aquecimento.
- Analisar a taxa de variação da temperatura para cada caso estudado.
- Verificar a taxa de absorção específica (“SAR”) e a razão de energia armazenada (“SER”) de cada nanofluido.
- Determinar uma faixa de concentração volumétrica ideal para a utilização dos nanofluidos estudados como meio de absorção direta em coletores solares.

1.2. Estrutura da dissertação

O trabalho foi dividido em cinco capítulos conforme apresentado a seguir.

No Capítulo I foi realizada uma breve introdução ao conceito de nanofluidos e suas potencialidades, além de terem sido estabelecidos os objetivos do presente trabalho.

No Capítulo II é apresentada uma revisão da bibliografia sobre a produção e caracterização de nanofluidos, bem como a aplicação de diferentes tipos de nanopartículas e fluidos base em sistemas de conversão fototérmica.

O Capítulo III descreve os materiais e procedimentos utilizados no desenvolvimento deste trabalho. É apresentado o método de síntese dos nanofluidos utilizados, os componentes da bancada experimental, o cronograma e as condições de teste, assim como um descriptivo dos cálculos realizados a partir dos dados coletados.

O Capítulo IV apresenta os resultados obtidos na etapa de produção dos nanofluidos e os perfis de temperatura para alguns dias de teste. São também apresentados os parâmetros de eficiência de conversão fototérmica calculados e analisado o comportamento dos nanofluidos com a variação da concentração de nanopartículas.

O Capítulo V encerra o trabalho, destacando as principais conclusões obtidas a partir dos testes realizados. Apresentam-se também sugestões de trabalhos futuros baseadas nas contribuições do trabalho.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Nanofluidos

O termo nanofluidos foi introduzido por Choi (1995) para denominar suspensões coloidais de sólidos em escala nanométrica (1 a 100nm) em líquidos. Devido à elevada condutividade térmica das nanopartículas de metais, óxidos metálicos e formas alotrópicas do carbono, os nanofluidos resultantes possuem uma condutividade térmica também superior em relação a seus respectivos fluidos base, ou seja, os nanofluidos possuem um grande potencial de transferência de calor.

Suspensões de sólidos em meios líquidos como meio de transferência de calor eram conhecidas, no entanto, as partículas usadas encontravam-se em tamanhos maiores que o das nanopartículas (tamanhos da ordem de milímetros ou micrômetros). Ainda segundo Choi (1995), a redução para a escala nanométrica trouxe algumas vantagens a essas suspensões, tais como:

- grande área superficial, o que implica em uma elevada área de contato entre as partículas e os líquidos, o que intensifica a troca de calor;
- alta estabilidade de dispersão devido à predominância do movimento browniano entre as partículas;
- reduzida potência de bombeamento comparado à do fluido base para obtenção de uma intensificação na transferência de calor equivalente;
- reduzida aglomeração de partículas quando comparado com suspensões convencionais (com partículas em escala micrométrica);
- propriedades (como a condutividade térmica) “ajustáveis”, variando-se as concentrações de partículas visando diferentes aplicações.

Dessa maneira, as características e vantagens apresentadas pelos nanofluidos despertaram o interesse da comunidade científica na viabilidade de aplicações envolvendo essa nova classe de fluidos.

2.2. Preparação e caracterização de nanofluidos

A investigação de possíveis aplicações de nanofluidos em sistemas térmicos convencionais depende da produção de nanofluidos estáveis uma vez que, sem este critério, o estudo de suas propriedades não seria confiável e seu uso inviabilizado. Assim sendo, este tópico tratará de forma breve acerca dos métodos de produção de nanofluidos estáveis e sua caracterização.

Embora existam vários métodos atualmente utilizados para síntese de nanofluidos, eles podem ser categorizados, basicamente, em dois tipos: de um passo e de dois passos. Nos métodos de um passo a síntese das nanopartículas e sua dispersão no fluido base ocorrem em uma única etapa, podendo ocorrer através de processos físicos ou reações químicas. Os métodos de dois passos consistem na síntese de nanopartículas em forma de pó e posterior adição e dispersão das mesmas ao fluido base pretendido.

Dentre os métodos de um passo, segundo Liz-Marzán (2004), o de reações químicas em soluções líquidas é o mais utilizado para produção de nanofluidos compostos por nanopartículas metálicas. Pereira (2009) explica que, nesse caso, um sal metálico sofre redução química pela presença de uma outra substância que atua como agente redutor e o produto final tem suas propriedades influenciadas por fatores como razão de proporção dos reagentes, temperatura da reação e uso de surfactantes. O autor ainda esclarece que os surfactantes são substâncias que se ligam às nanopartículas e propiciam dupla ação no produto final: controle da taxa de crescimento das nanopartículas após a reação e estabilização estérica, ou seja, manutenção do afastamento das superfícies das nanopartículas entre si.

Pereira (2009) destacou ainda outros dois métodos de um passo obtidos por processos físicos. No primeiro deles, é feita a evaporação das nanopartículas em condições de vácuo juntamente com o fluido base pretendido, deposição da mistura em paredes resfriadas e posterior aquecimento da matriz obtida para que os átomos se agreguem até que o processo de união se torne energeticamente desfavorável. O segundo, denominado ablação por laser, tem como princípio o uso de pulsos de um feixe luminoso de alta potência para remoção de agregados de átomos de placas metálicas que se encontram imersas no fluido base pretendido.

No método de dois passos, a dispersão de nanopartículas em forma de pó no fluido base escolhido é usualmente relatada na literatura através de três processos distintos: sonicação, banho ultrasônico e homogeneização à alta pressão. Os dois primeiros têm como princípio de funcionamento a quebra de aglomerações pela vibração em frequências da ordem

de 10kHz, se diferenciando pelo fato de que no primeiro um elemento vibrante é imerso diretamente na mistura e, no segundo, a vibração é transmitida através de um fluido que circunda o recipiente da amostra. No caso da homogeneização à alta pressão, a mistura é inserida em um equipamento composto por microcanais e pistões que pressurizam o material provocando o surgimento de microbolhas (proveniente de cavitação) e choques das nanopartículas com as paredes e delas entre si, o que proporciona a quebra das aglomerações e estabilização da amostra.

Dentre os métodos citados, os de dois passos possuem algumas desvantagens comparados aos de um passo como a menor estabilidade e a dificuldade na quebra de aglomerações. No entanto, é mais barato, mais facilmente adaptado para produção em grande escala e proporciona uma gama mais ampla de combinações de materiais de nanopartículas e fluidos base.

Ghadimi et al. (2011) analisou a influência dos métodos de síntese nas características do nanofluido obtido. Para o método de dois passos, concluiu ser necessário uma concentração maior de nanopartículas para obter-se os mesmos aumentos na transferência de calor apresentada pelos obtidos pelo método de um passo, o que implica em uma maior probabilidade de formação de aglomerados e sedimentação de nanopartículas. Ressaltou que nanofluidos produzidos pelo método de um passo ainda não são fabricados em larga escala, o que aumenta em muito o custo e quase impossibilita maiores investigações experimentais. Relatou uma inconsistência nos valores obtidos para viscosidade e condutividade térmica entre diferentes autores e a atribuiu a uma série de fatores como diferentes fornecedores de nanopartículas, diferentes métodos de preparação e estabilização e demora entre a síntese de nanofluidos e a medição das propriedades. Destacou ainda a necessidade de otimização dos métodos de estabilização dos nanofluidos de acordo com o tipo de nanopartícula.

Li et al. (2009) revisou vários métodos de síntese e caracterização de propriedades dos nanofluidos como condutividade térmica e estabilidade. A partir dessa revisão, concluiu que existem alguns desafios envolvendo a utilização dos nanofluidos. Em seu estudo, ressaltou que ainda não foram desenvolvidos nanofluidos adaptados às exigências de um sistema real de engenharia e apontou a falta de estabilidade a longo prazo como um obstáculo à aplicação científica e prática dessa nova classe de fluidos. Além disso, apontou a necessidade de investigação aprofundada dos fatores que influenciam o aumento da condutividade térmica para melhor entendê-la, visto que não há coesão entre resultados experimentais e modelos apresentados. Concluiu, ainda, a ausência de um padrão científico no tangente à síntese, medição da condutividade térmica e avaliação da estabilidade dos nanofluidos.

Khanafer et al. (2011), com suas investigações, alimentou a incógnita acerca de propriedades como condutividade térmica e viscosidade efetiva de nanofluidos. Através de

uma profunda revisão de resultados apresentados por diversos autores para o tema, notou grande discrepância entre eles. Concluiu ser possível utilizar equações clássicas para estimar essas propriedades apenas em condições de temperatura ambiente e baixas concentrações de nanopartículas.

2.3. Aplicação de nanofluidos em sistemas de conversão foto-térmica

A utilização de energia solar atingiu um importante patamar nos últimos anos em resposta à crescente conscientização acerca da necessidade de substituição de algumas fontes de energia convencionais não renováveis ou poluentes. Diante desse cenário, a utilização de nanofluidos em processos de conversão foto-térmica surgiu como uma possibilidade de aplicação para o aprimoramento dos sistemas e equipamentos atualmente utilizados, o que motivou vários pesquisadores a iniciarem investigações das propriedades ópticas dos nanofluidos e da sua capacidade de aumentar a eficiência de sistemas de aquecimento solar.

Tyagi et al.(2009) analisou teoricamente a viabilidade de utilização de nanofluido de alumínio em água como meio de absorção em um coletor solar de absorção direta (CSAD) e comparou os resultados com um típico coletor solar de placa plana. Foi adotado um modelo de transferência de calor bidimensional que considerava a radiação solar incidindo sobre uma fina camada de nanofluido em escoamento. Parâmetros de concentração volumétrica e tamanho de nanopartículas foram variados para compreender sua influência na eficiência do coletor. Os resultados foram obtidos numericamente e apontam para um aumento em mais de nove vezes na absorção da radiação incidente pelos nanofluidos quando comparados com à água pura e um incremento de até 10 pontos percentuais na eficiência do CSAD quando comparado ao coletor de placa plana. A eficiência dos coletores foi afetada significativamente pela adição de nanopartículas (Φ_v variando de 0,1% a 5%) nas concentrações mais baixas (Φ_v menor que 0,3%) e sofreu um discreto acréscimo com o aumento do tamanho das nanopartículas (Φ_v fixado em 0,8% nessa etapa).

Otanicar et al.(2010) apresentou resultados experimentais para a utilização de nanofluidos de grafite, nanotubos de carbono e prata como meio de absorção direta em um microcoletor térmico solar (dimensões 3 x 5cm) e os comparou ao modelo numérico concebido para as condições de teste utilizadas. Observou-se um aumento da eficiência com o aumento da concentração volumétrica até certo ponto e uma estabilização para concentrações superiores a 0,5%, como pode ser observado na Fig.2.1. Foram avaliados dois tamanhos de nanopartículas de prata, 20 e 40nm, sendo a eficiência do primeiro 6% maior que a obtida

pelo segundo. Os melhores valores de eficiência foram obtidos pelo nanofluido de prata (20 nm), sendo 5% superiores a uma superfície absorvedora plana.

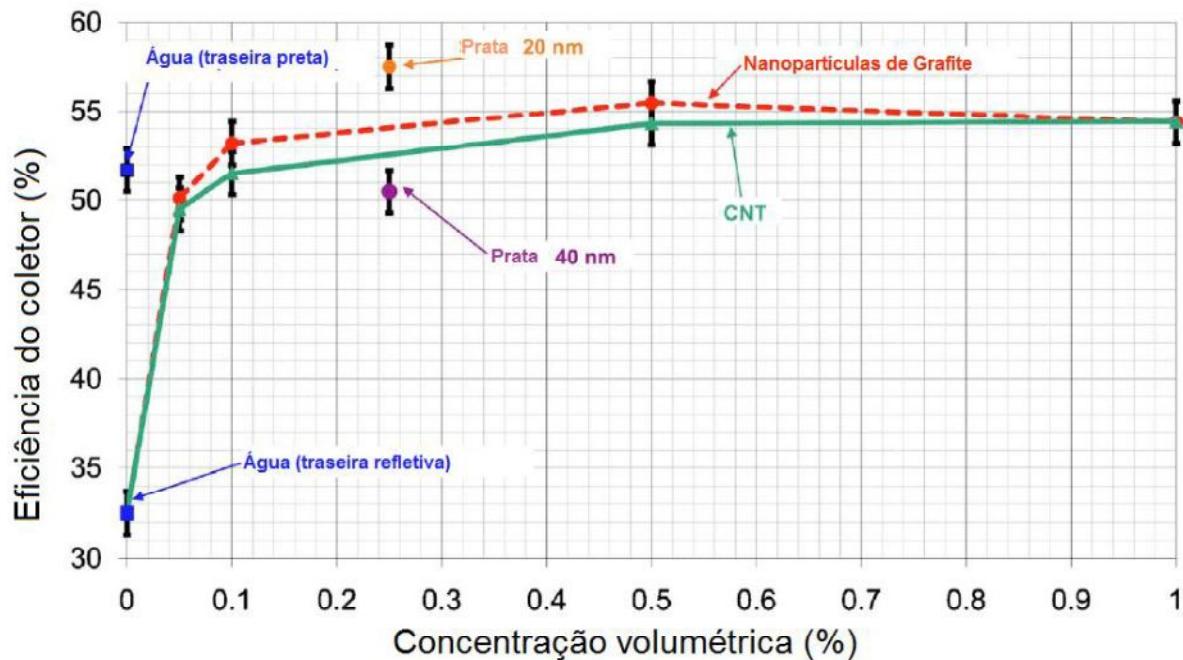


Figura 2.1 – Resultados experimentais para eficiência em regime permanente dos testes no microcoletor térmico solar. Fonte: Otanicar et al.(2010).

Khullar e Tyagi (2010) investigaram teoricamente o uso de nanofluido de alumínio em água como fluido de trabalho em coletores solares parabólicos. Foi analisada a influência de diferentes parâmetros como concentração volumétrica, velocidade de escoamento, comprimento do receptor, e razão de concentração. Observou-se que o aumento da quantidade de nanopartículas resulta em maiores temperaturas médias de saída, bem como eficiências térmica e óptica superiores para concentrações menores que 0,004%, se tornando constantes para valores superiores a esse, como mostrado nas Figs. 2.2 e 2.3, respectivamente. Maiores velocidades de escoamento e menores comprimentos do coletor geram menores temperaturas de saída, no entanto, também diminuem as perdas convectivas, o que aumenta a eficiência do sistema. Além disso, a temperatura média de saída varia linearmente com a razão de concentração solar.

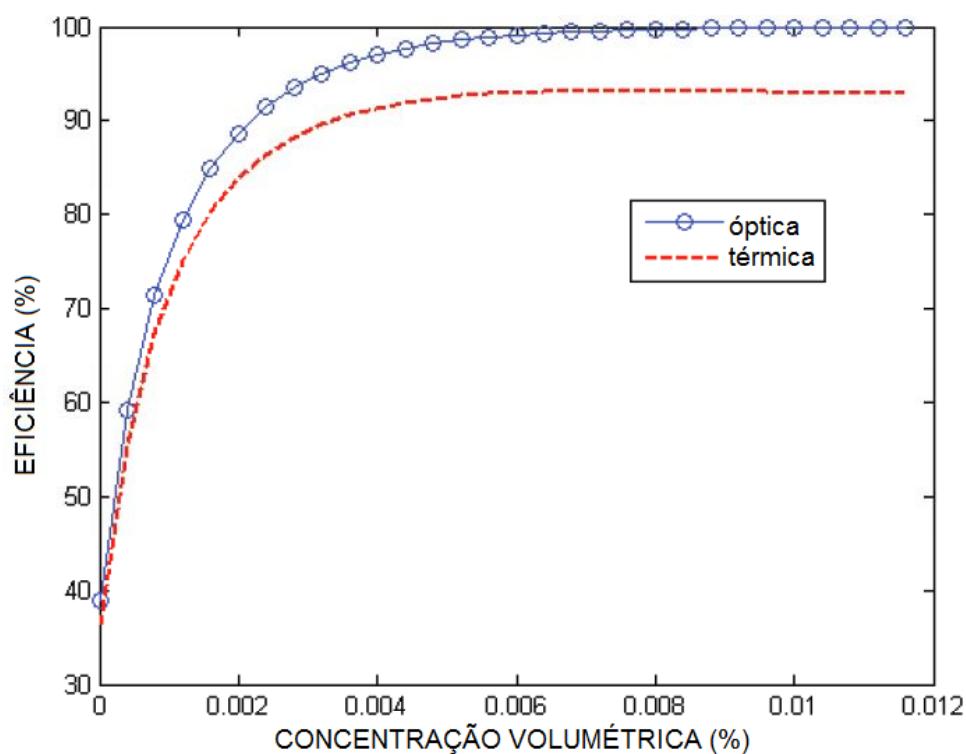


Figura 2.2 – Variação da eficiência óptica e térmica com a concentração volumétrica. Fonte: Khullar e Tyagi (2010).

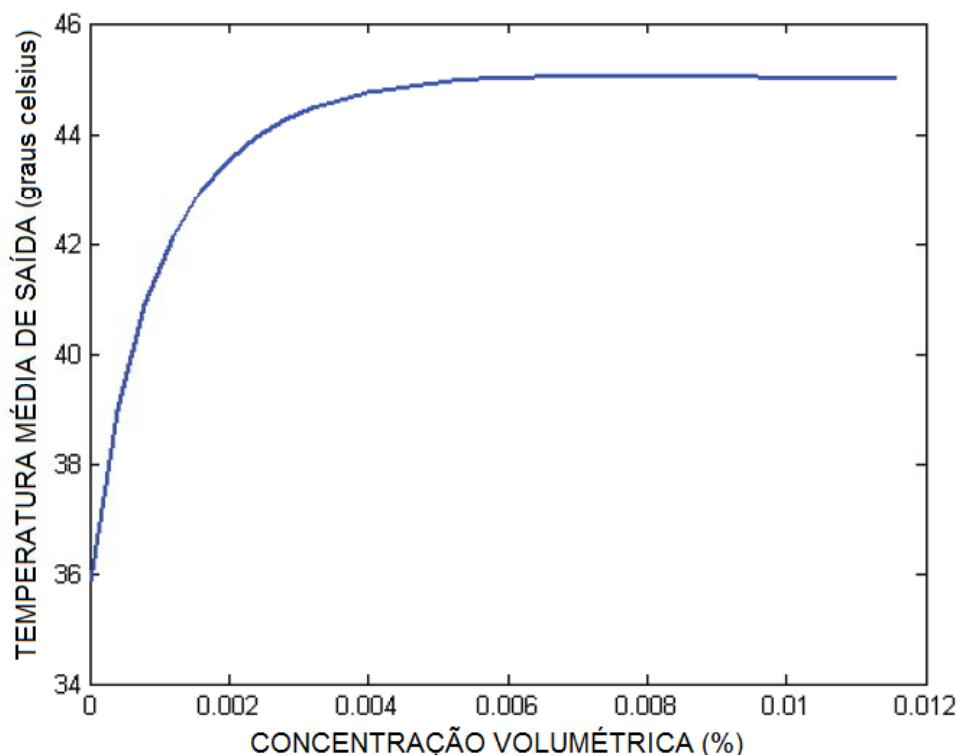


Figura 2.3 – Variação da temperatura média de saída com a concentração volumétrica. Fonte: Khullar e Tyagi (2010).

Em 2012, Khullar et al. apresentaram um novo estudo envolvendo coletores solares parabólicos utilizando, dessa vez, nanofluidos de alumínio em Therminol VP-1 ($\Phi_v=0,05\%$) como fluido de trabalho. Foram realizados testes experimentais com um sistema tradicional e analisada a possibilidade de aumento na eficiência do mesmo. Foram analisados os parâmetros de insolação, ângulo de incidência e coeficiente de transferência de calor, tendo sido concluído que, sob as mesmas condições de teste, a utilização de nanofluidos pode aumentar de 5 a 10% a eficiência de coletores parabólicos tradicionais.

Taylor et al.(2010) destacou em seu estudo vantagens da utilização de nanofluidos como receptores de energia solar concentrada:

- redução das resistências térmicas do processo: nanofluidos absorvem energia diretamente, eliminando etapas intermediárias de transferência de calor dos sistemas tradicionais;
- característica semelhante a de uma superfície seletiva: a dispersão de nanopartículas em um fluido base confinado em uma estrutura de vidro pode conferir alta absorvidade nas frequências de luz visível e baixa emissividade na região de infravermelho;
- redução das restrições de projeto em termos de materiais utilizáveis: resultado de uma distribuição mais uniforme da temperatura no coletor;
- melhora na transferência de calor: associação de mecanismos de elevado movimento de partículas e condutividade térmica superior dos nanofluidos;
- melhora na eficiência de absorção de radiação: picos de absorção das nanopartículas são superiores aos dos metais sólidos.

Além disso, os autores propuseram dois modelos conceituais de coletor para altas temperaturas (200-400°C), conforme ilustrado na Fig. 2.4, que melhor aproveitariam as características dos nanofluidos sem um aumento excessivo da complexidade e custo da estrutura. Considerou-se no estudo a utilização de nanopartículas de ouro, prata, cobre e grafite, com diâmetro médio de 20nm e concentração volumétrica de 0,1% dispersas em Therminol VP-1. Os resultados obtidos indicaram um aumento da eficiência da ordem de 10% comparados à tecnologia convencional de receptores solares e um máximo de eficiência para uma concentração solar de 500 sóis.

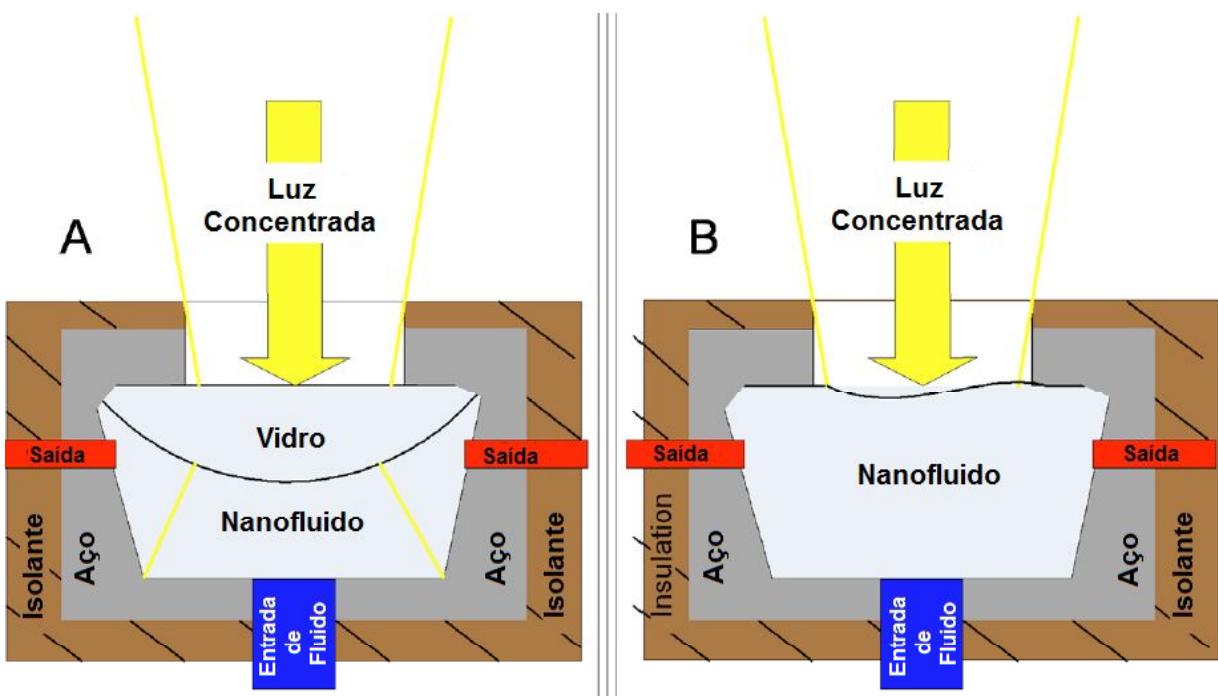


Figura 2.4 – Esquemas conceituais de coletores com radiação concentrada propostos (a) com vidro de revestimento para utilização independentemente da posição. (b) sem vidro de revestimento para utilização apenas na posição horizontal. Fonte: Taylor et al. (2010)

No ano seguinte, Taylor et al. (2011a) ampliaram o estudo teórico para o uso de nanofluidos em torres coletores de energia solar utilizando nanofluidos de alumínio, prata, cobre e grafite na análise comparativa. Concluiu-se haver, para cada configuração de parâmetros do sistema, uma concentração ideal de nanopartículas responsável por atingir a máxima eficiência. Destacou-se que, devido ao coeficiente de extinção¹ relativamente uniforme para diferentes comprimentos de onda, a eficiência ligeiramente superior em diferentes condições de operação e seu relativo baixo custo, as nanopartículas de grafite com concentrações volumétricas de 0,001% ou menores são as mais adequadas para a aplicação proposta. Foram também realizados testes experimentais em escala reduzida conforme mostra a Fig. 2.5 utilizando um prato refletor como concentrador e nanopartículas de grafite ($\Phi_v=0,125\%$ e $0,25\%$) dispersas em Therminol VP-1 como absorvedor para comparação com o modelo teórico. Os resultados experimentais mostraram-se discrepantes do modelo teórico para a concentração mais alta, comportamento atribuído à possível instabilidade do nanofluido ou à absorção limitada a camadas mais superficiais do receptor.

¹ Coeficiente de extinção: medida da atenuação na transmissão da luz incidente em um dado meio

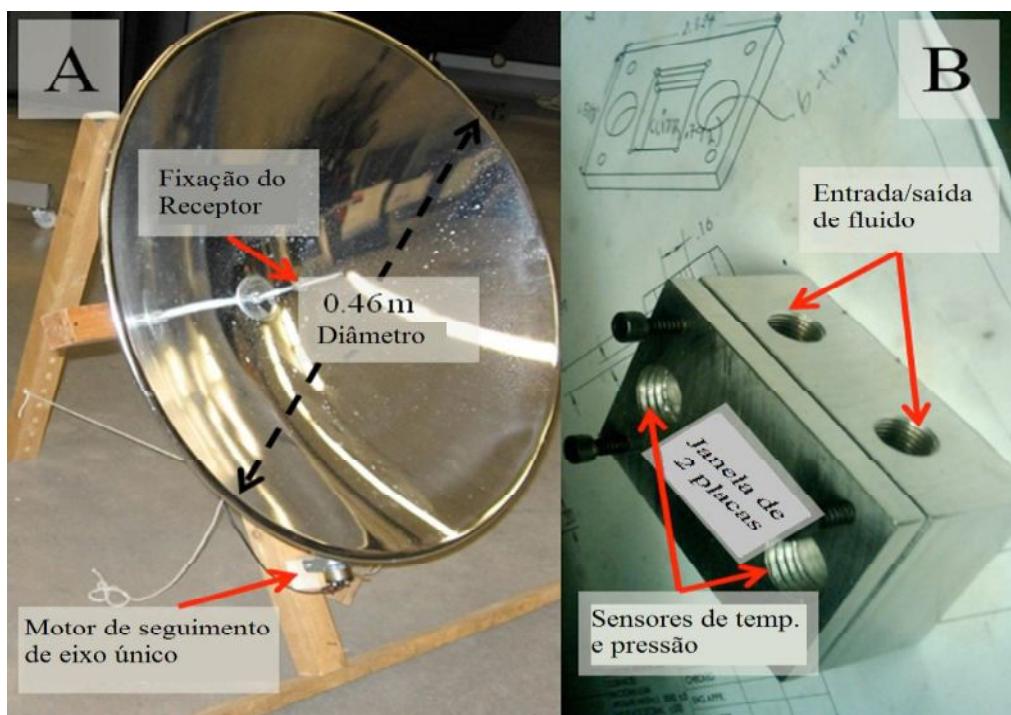


Figura 2.5 - Sistema utilizado por Taylor et al. (2011b) para condução da fase experimental do trabalho. (a) Prato refletor em escala reduzida com dispositivo seguidor de um eixo. (b) Receptor em alumínio com orifícios para instrumentação. Fonte: Taylor et al. (2011b).

Em outro estudo, Taylor et al. (2011b) realizaram uma análise com ênfase na comparação de valores teóricos e experimentais dos coeficientes de extinção apresentados por nanofluidos de alumínio, ouro, prata, grafite, cobre e óxido de titânio (TiO_2) dispersos em água e em Therminol VP-1. Os resultados experimentais demonstraram que, dentre os materiais e fluidos base analisados, os nanofluidos de grafite em água apresentam boa aproximação dos valores teóricos calculados, enquanto que para as nanopartículas metálicas e nanofluidos a base de óleo há uma discrepância maior no resultado. Concluiu-se, ainda, que os nanofluidos estudados são capazes de absorver até 95% da radiação incidente em uma espessura de fluido de 10cm utilizando-se concentrações volumétricas extremamente baixas (menores que 10 ppm).

He et al.(2011) estudaram experimentalmente o desempenho de nanofluidos de óxido de titânio(TiO_2) e nanotubos de carbono em água em um coletor solar com tubo evacuado. O estudo englobou a influência da quantidade de nanopartículas e do material da nanopartícula. Conclui-se que, dentre as três diferentes concentrações mássicas de nanofluido de nanotubos de carbono testadas ($\Phi_m=0,25, 0,5$ e 1%), a concentração intermediária foi a que atingiu melhores resultados, como pode ser visto na Fig. 2.6. O nanofluido de óxido de titânio ($\Phi_m=4,3\%$) apresentou resultados significantemente inferiores aos de nanotubos de carbono

($\Phi_m=0,5\%$), mostrando-se menos adequado a aplicações que utilizem esse tipo de coletor solar.

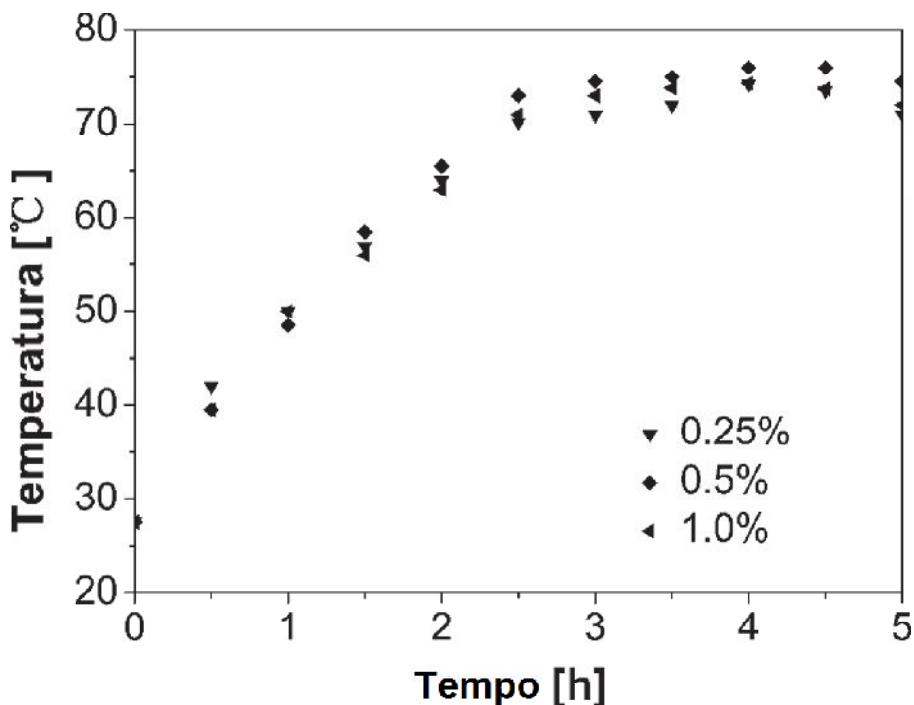


Figura 2.6 – Evolução da temperatura de nanofluidos de CNT/Água em diferentes concentrações mássicas. Fonte: He et al.(2011).

Lenert e Wang (2012) analisaram teórica e experimentalmente a eficiência de um receptor volumétrico solar utilizando nanofluidos de cobalto revestido de carbono dispersos em água em diferentes concentrações volumétricas (4,3 ppm, 2,1 ppm e 0,94 ppm) como meio receptor utilizando como fonte um simulador de radiação solar concentrada, como ilustrado pela Fig. 2.7. Variou-se a espessura ótica (função da concentração volumétrica de nanopartículas), a altura da camada de nanofluido e a concentração da radiação solar. Concluiu-se que a eficiência do receptor aumenta com o aumento da concentração de energia solar e com a altura da camada de nanofluido. Foi também observado que a espessura ótica afetava a eficiência positivamente até certo ponto e prejudicialmente a partir do valor de 1,7, o que indica haver uma concentração volumétrica ideal para o uso dos nanofluidos. Os valores teóricos e experimentais tiveram discrepâncias da ordem de 20% e a partir do estudo concluiu-se ser possível a construção de um sistema otimizado que atingiria eficiências maiores que 35 % para uma concentração solar maior que 100 sóis e uma altura de fluido maior que 5cm.

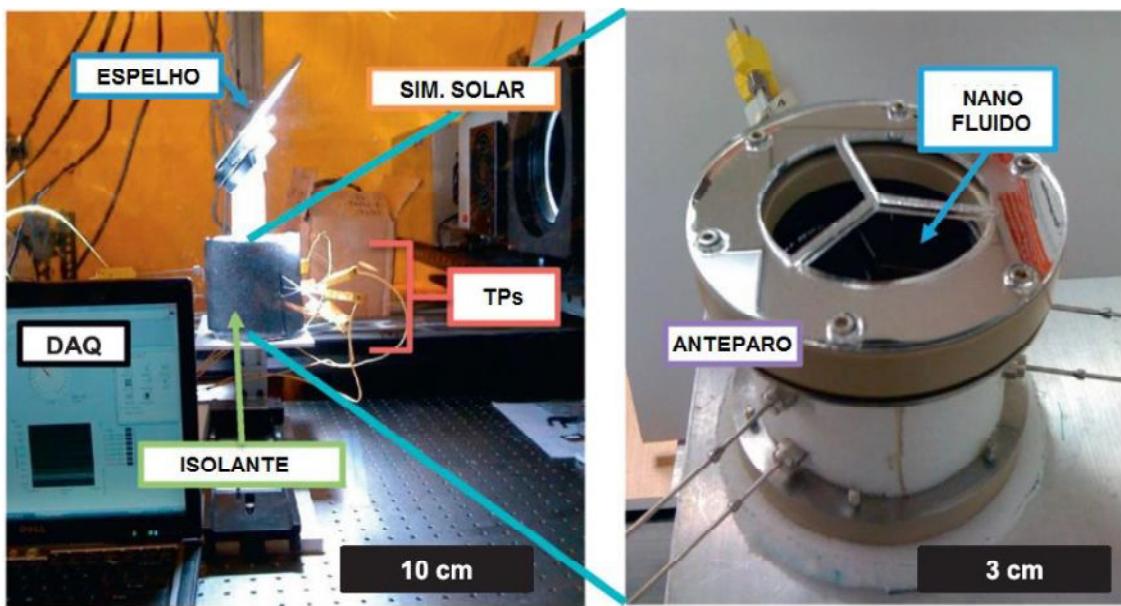
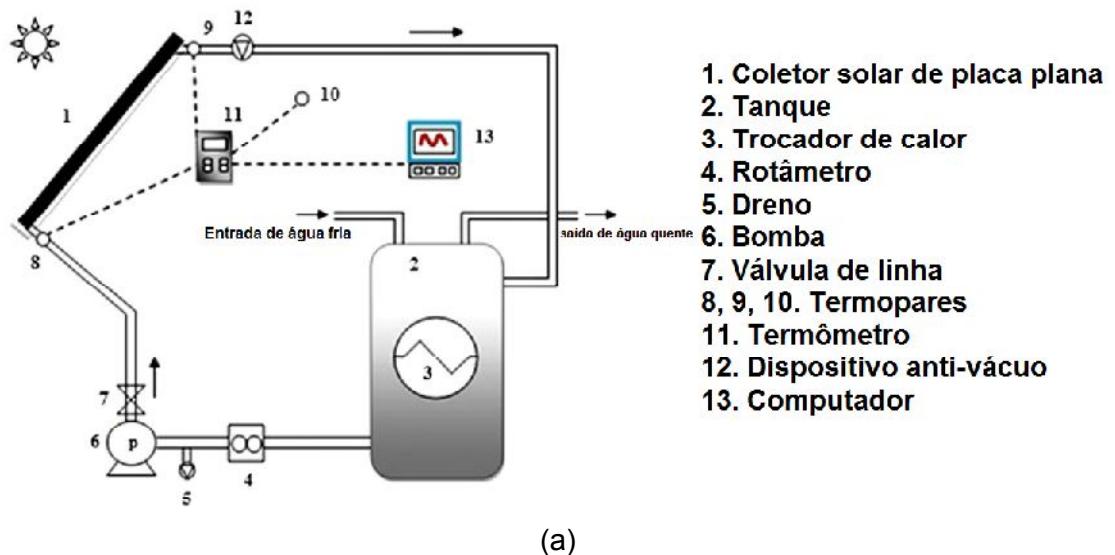


Figura 2.7 – Bancada Experimental utilizada por Lenert e Wang (2012). Fonte: Lenert e Wang (2012).

Yousefi et al. (2012a) investigou o efeito da utilização de nanofluidos de alumina (Al_2O_3) em água (concentrações mássicas de 0,2% e 0,4% e diâmetro de 15nm) na eficiência de um coletor solar de placas planas, conforme mostrado na Fig. 2.8. A vazão mássica de nanofluido através do coletor foi variada (1, 2 e 3L/min) e concluiu-se que para uma ampla gama de diferenças de temperatura (entre o fluido na entrada do coletor e o ambiente), a eficiência aumenta com o aumento da vazão. O nanofluido menos concentrado (0,2% em massa) foi o que apresentou melhores resultados comparados ao fluido base, gerando um aumento de 28,3% na eficiência do coletor. Além disso, a adição de surfactante ao nanofluido causou um efeito positivo no desempenho, aumentando a eficiência em 15,63%.





(b)

Figura 2.8 – Bancada Experimental utilizada por Yousefi et al.(2012a). (a) Desenho esquemático do sistema. (b) Foto do coletor utilizado. Fonte: Yousefi et al.(2012a).

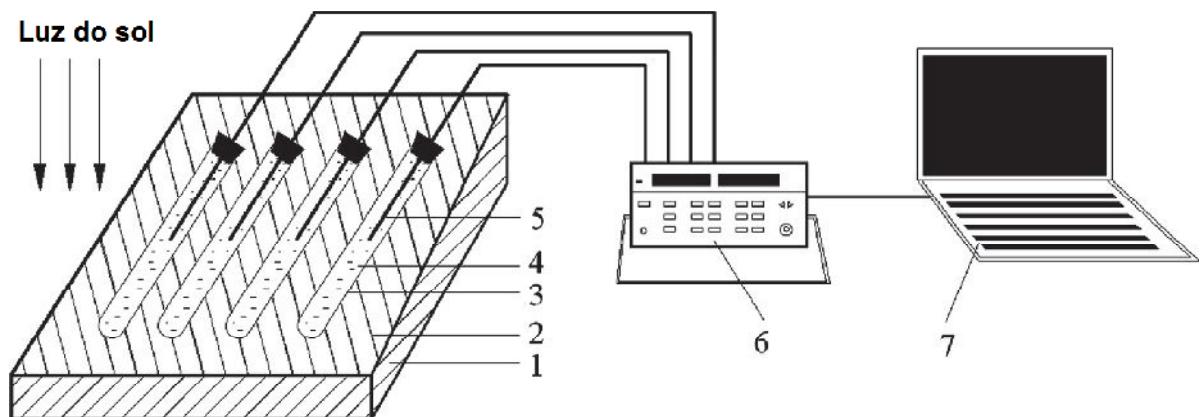
Utilizando a mesma bancada do estudo anterior e variando os mesmos parâmetros, Yousefi et al. (2012b) realizaram testes com nanofluidos de nanotubos de carbono de paredes múltiplas em água com concentrações mássicas de 0,2% e 0,4%. Os resultados apresentados foram semelhantes aos obtidos para a alumina, em que o aumento da vazão causou um acréscimo na eficiência. A variação na concentração de nanopartículas, no entanto, gerou resultados diferentes do estudo anterior, nesse caso, o nanofluido menos concentrado apresentou resultados para a eficiência inferiores aos da água, enquanto o mais concentrado aumentou a eficiência do coletor. A adição de surfactante teve um papel positivo nas baixas diferenças de temperatura, aumentando a eficiência do coletor.

Ainda no mesmo ano, Yousefi et al. (2012c) estudaram experimentalmente a influência da variação do pH (3,5; 6,5 e 9,5) em um nanofluido de nanotubos de carbono de paredes múltiplas (concentração mássica de 0,2%) na eficiência de coletores solares de placas planas. Foram analisados os parâmetros de energia absorvida e removida e verificado que quanto mais afastados o pH se encontrava do ponto isoelétrico (pH=7,4 para o caso específico do nanofluido estudado), maior era a eficiência do coletor solar, quando comparado ao que utilizava a água como fluido de trabalho.

Ladjevardi et al. (2013) analisaram teoricamente o uso de nanofluidos de grafite em água como receptor em um coletor solar volumétrico, variando a concentração volumétrica

(0,00001% a 0,0025%) e o diâmetro (50 e 300nm) das nanopartículas. Concluiu-se que utilizando um nanofluido com concentração volumétrica de 0,0001% é possível absorver cerca de 90% da radiação incidente e que o acréscimo de nanopartículas e o aumento do diâmetro ocasionam um aumento no coeficiente de extinção para determinados comprimentos de onda (faixa de radiação UV-visível no caso da variação na concentração e comprimentos de onda menores que 1,25 μ m para o diâmetro), o que implica em maior energia absorvida. Além disso, uma análise econômica e dos parâmetros de temperatura de saída do coletor e de perdas convectivas indicou a existência de uma concentração ideal de nanopartículas, próxima de 0,00025%, que conferiria ao sistema um interessante custo-benefício.

He et al. (2013) investigaram propriedades foto-térmicas de nanofluidos de cobre em água como a transmitância em todo o espectro solar e o coeficiente de extinção dos nanofluidos considerando como variáveis o tamanho da partícula (25 e 50nm), a fração mássica (Φ_m variando entre 0,01% e 0,2%), espessura da camada de fluido (5 e 10mm) e pH (variando entre 2 e 10). Os autores concluíram que os nanofluidos apresentam transmitância substancialmente menor que a da água (fluido base) e que essa decresce com o aumento do tamanho da partícula, da fração mássica e da espessura da camada de fluido. Foram também feitos testes em condições reais de exposição solar utilizando-se a bancada mostrada na Fig. 2.9 para acompanhamento do perfil de temperatura das amostras ao longo do tempo.



1-Caixa de isolamento térmico, 2-Material isolante, 3-Tubo de ensaio, 4-Nanofluido, 5-Termopar, 6-Placa de aquisição de dados, 7-Computador

Figura 2.9 – Diagrama esquemático do sistema de medição de propriedade foto-térmicas. Fonte: He et al. (2013).

No trabalho foi destacado que a capacidade de conversão foto-térmica aumenta constantemente até a concentração mássica de 0,1%, na qual o nanofluido apresentou uma temperatura máxima 25,3% maior que a da água destilada, com o acréscimo de maiores

quantidades de nanopartículas ocorreu queda no desempenho dos nanofluidos, como pode ser observado através da Fig. 2.10. Notou-se também que as nanopartículas de menor diâmetro e com pH igual a 8 foram as com melhor desempenho nos testes.

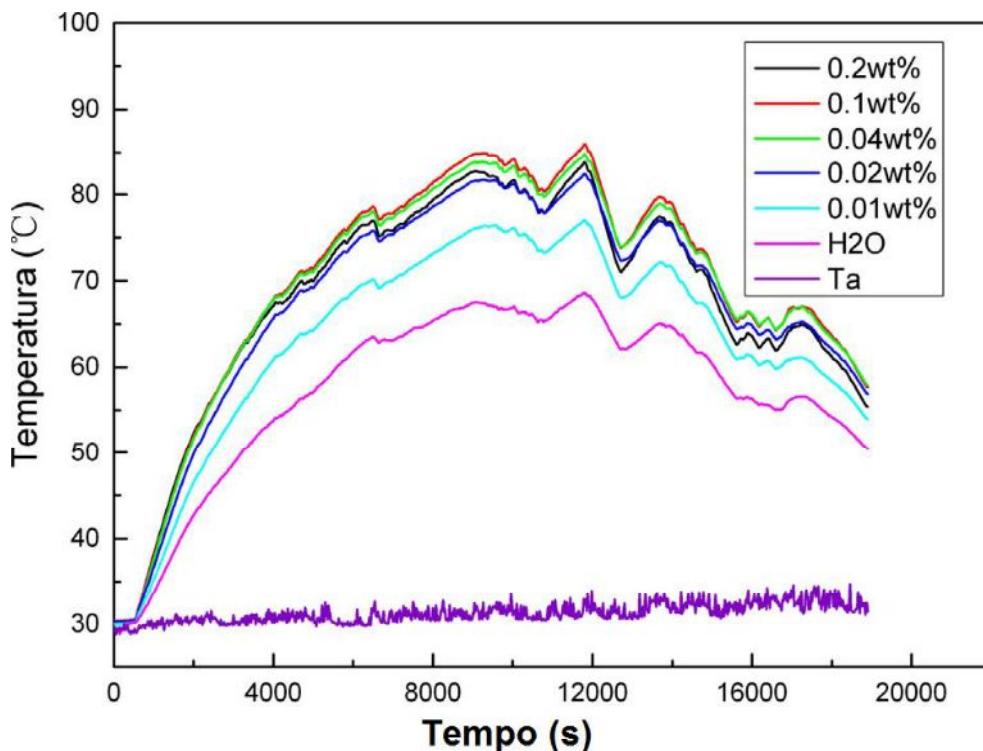
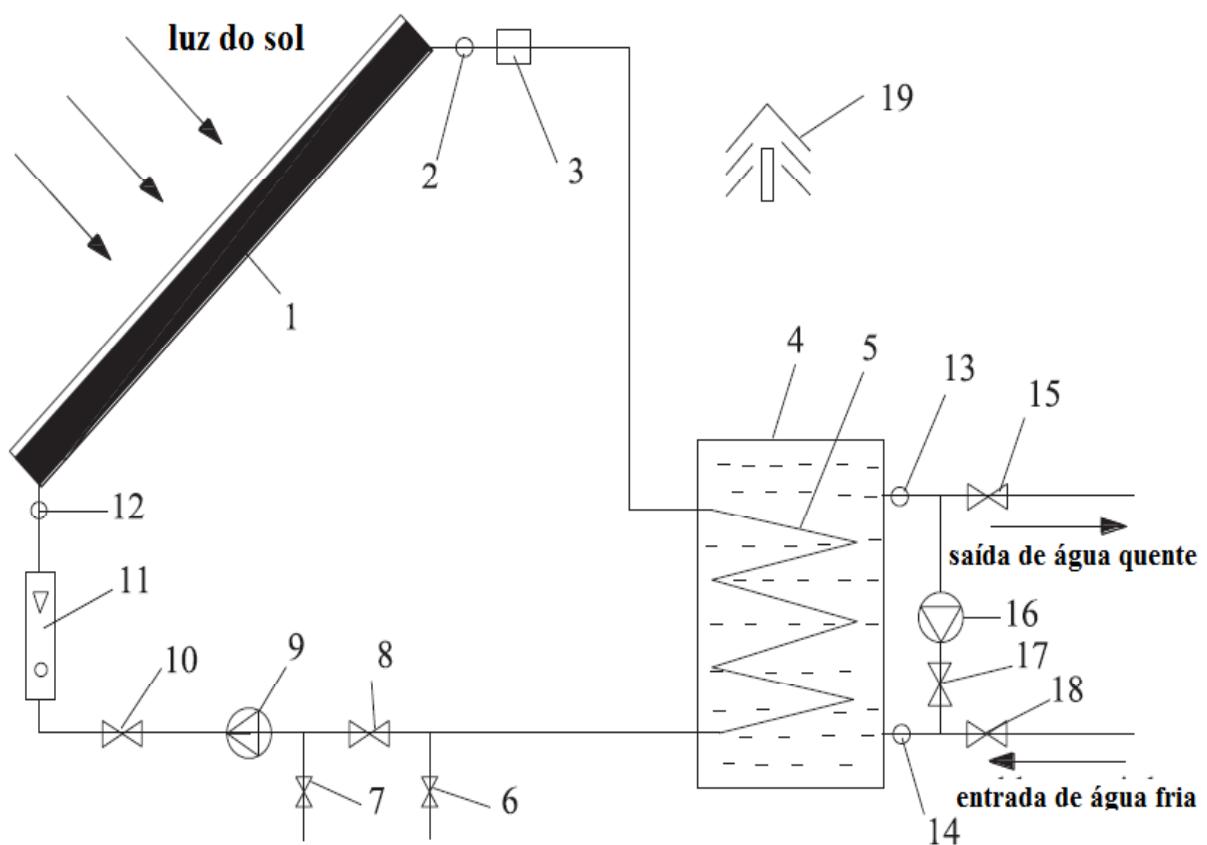


Figura 2.10 – Curva de temperatura de nanofluidos Cu-H₂O com diferentes concentrações mássicas.(Cu:50nm, Ta:temperatura do ar ambiente.) Fonte: He et al. (2013).

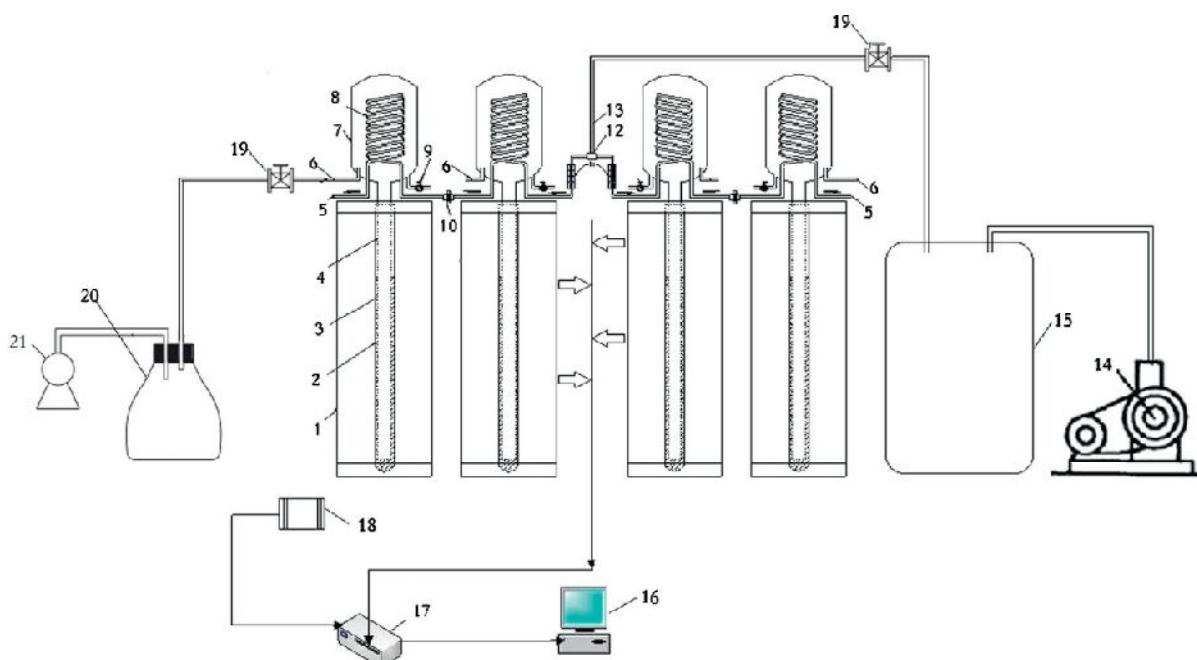
Em um outro estudo, He et al. (2014) analisaram experimentalmente o uso de nanofluidos de cobre em água (concentrações mássicas de 0,1 e 0,2% e tamanhos de nanopartículas de 25 e 50nm) como meio absorvedor em coletores solares de placa plana conforme mostrado na Fig 2.11. Concluíram que o uso de nanofluidos como fluido absorvedor resultou em eficiência superior comparado com a água pura. Em relação aos parâmetros de tamanho de nanopartícula e concentração mássica, notaram que as nanopartículas de 50nm apresentam eficiência menor que as de 25nm e que o nanofluido com concentração de 0,1% apresentou aumento de até 23,83% na eficiência em relação à água, resultado esse que se mostrou até 5,97% superior ao obtido pelo nanofluido de maior concentração. A temperatura máxima alcançada e o máximo ganho de calor apresentado pela água a ser aquecida apresentou valores 12,24% e 24,52% superiores no sistema que utilizava nanofluido ($\Phi_m = 0,1\%$).



1-Coletor solar de placa plana; 2/12/13/14-Termopares; 3-Purgador; 4-Reservatório de água 5-Trocador de calor; 6/7/8/10/15/17/18-Válvulas; 11-Medidor de vazão; 9/16-Bomba d'água 19-Termômetro de resistência de platina

Figura 2.11 – Diagrama esquemático do sistema de medição de energia térmica solar. Fonte: He et al. (2014).

Liu et al. (2013) construíram um sistema de aquecimento de ar baseado na utilização de nanofluidos como fluido de trabalho para conversão fototérmica e um concentrador parabólico composto (CPC), como mostra a Fig. 2.12. Para a obtenção de resultados comparativos haviam dois sistemas idênticos sendo utilizada água destilada em um deles e nanofluido de óxido de cobre em água no outro. A concentração mássica dos nanofluidos foi variada de 0,8% a 1,5% e os resultados experimentais mostraram um desempenho térmico superior dos nanofluidos em relação à água destilada, sendo que o nanofluido com concentração de 1,2% apresentou o maior coeficiente de transferência de calor dentre os fluidos estudados. Além disso, o valor máximo e médio da eficiência do coletor utilizando nanofluido foi 6,6% e 12,4% maior que o que utilizava água, respectivamente.



1-CPC simplificado; 2-Tubo de vidro evacuado; 3-Material condutor de calor; 4-Tubo evaporador; 5-saída de ar; 6-Tubo de exaustão; 7-caixa de vapor; 8-Serpentina; 9-Válvula 10-Junção; 11-Medidor de vazão; 12-Válvula de 3 vias; 13-Entrada de ar; 14-Compressor; 15-Tanque pressurizado; 16-Computador; 17-Sistema de aquisição de dados; 18- Medidor de radiação solar; 19-Válvula; 20-Caixa reguladora; 21-Bomba de vácuo

Figura 2.12 – Diagrama esquemático da bancada experimental utilizada por Liu et al. (2013).

Fonte: Liu et al. (2013).

Jamal-Abad et al. (2013) analisaram a utilização de nanofluidos de cobre em água em concentrações mássicas de 0,05 e 0,1% em coletores solares de placa plana e os comparou ao que utilizava água destilada na mesma tarefa. A eficiência do coletor foi analisada em horários simétricos em torno do meio dia solar e na comparação com o fluido base foi constatado um aumento na eficiência em torno de 19% e 29% para os sistemas que operavam com nanofluidos com concentrações de 0,05 e 0,1%, respectivamente.

Bandarra Filho et al. (2014) estudaram características de conversão fototérmica de nanofluidos de prata em água em diferentes concentrações volumétricas (entre 1,6 ppm e 650 ppm) em testes de longa duração (cerca de 10 horas) sob condições de radiação solar natural. Observaram um aumento substancial da temperatura dos nanofluidos em relação à água pura, mesmo para baixas concentrações (1,6 ppm e 6,5 ppm), como apresentado pela Fig. 2.13. Concluíram ser possível atingir um aumento de 144% na energia armazenada na concentração de 6,5 ppm e obter uma taxa de absorção específica inicial aproximadamente constante ($SAR \sim 0,6 \text{ kW/g}$) para os nanofluidos até esta concentração, ocorrendo um decaimento exponencial para as concentrações mais altas.

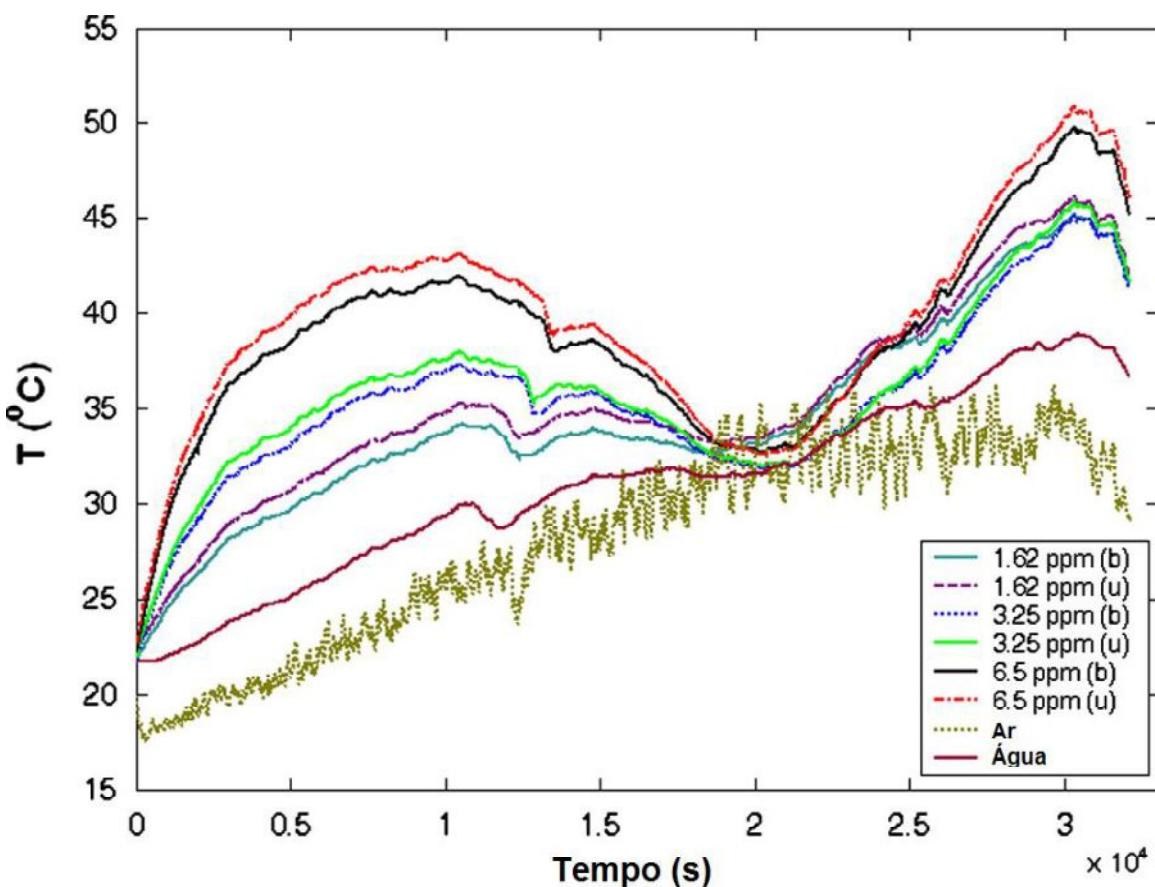


Figura 2.13 – Exemplo de perfil de temperatura de um dos dias de teste do estudo de Bandarra Filho et al. (2014) (onde “b” e “u” se referem às posições mais baixa e alta dos termopares imersos nos fluidos, respectivamente). Fonte: Bandarra Filho et al. (2014).

Karami et al. (2014) utilizaram nanotubos de carbono funcionalizados dispersos em água como fluido de trabalho em coletores solares de absorção direta de baixa temperatura. Foi investigado o coeficiente de extinção e a condutividade térmica para concentrações entre 5 e 150 ppm, obtendo-se um aumento no coeficiente de extinção de $4,1\text{cm}^{-1}$ e de 32,2% na condutividade a 25°C , ambos os valores referentes ao nanofluido mais concentrado comparado ao fluido base.

Hordy et al. (2014) produziram nanofluidos de nanotubos de carbono de paredes múltiplas (MWCNTs) em diferentes fluidos base (água, etilenoglicol, therminol VP1 e propilenoglicol), com concentrações entre 5,6 e 53 mg/L. Foram avaliadas propriedades óticas e também as frações de energia armazenada em função da distância de penetração para os nanofluidos em um coletor solar. Os autores observaram que os MWCNTs apresentam potencial de absorção de quase 100% da radiação incidente, mesmo em baixas concentrações de nanopartículas. Os resultados obtidos nesse estudo para os nanofluidos MWCNT/água estão apresentados na Fig. 2.14.

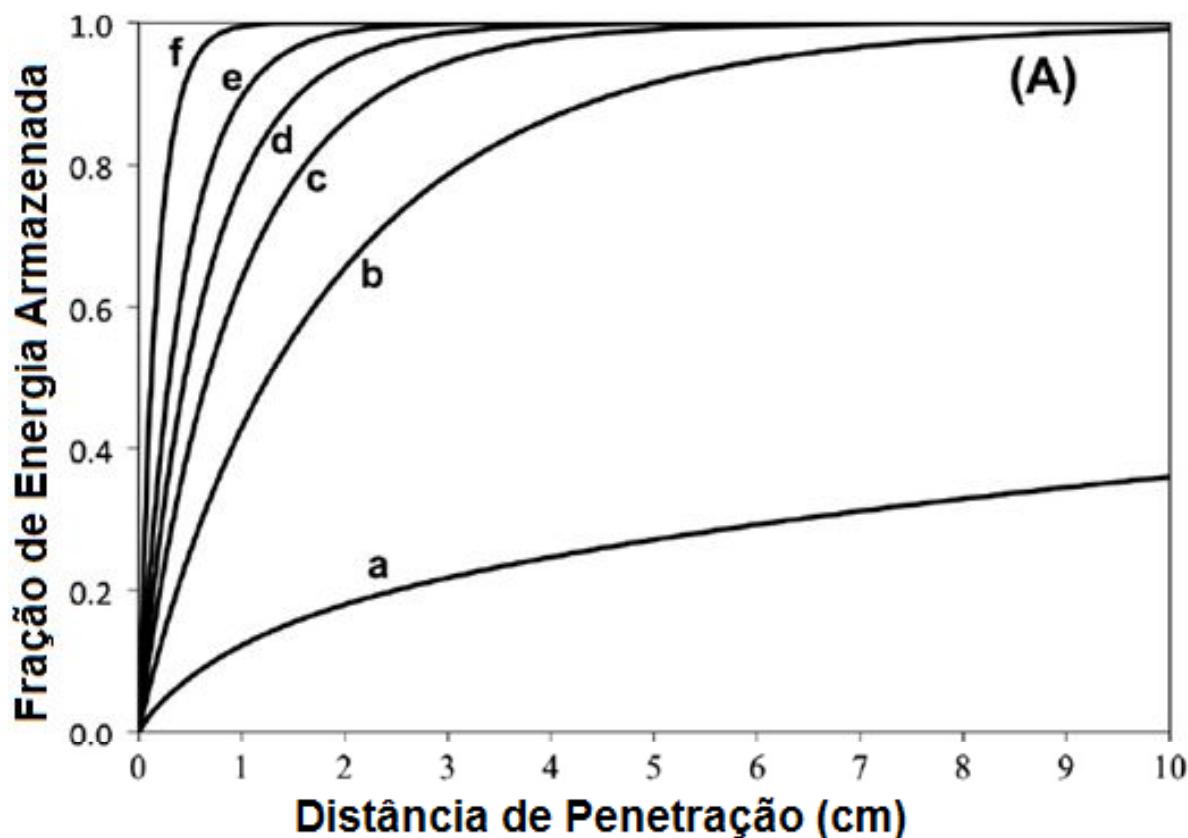


Figura 2.14 – Resultados experimentais para a fração de energia armazenada de nanofluidos MWCNT/água. a: água pura; b: MWCNT 5,6mg/L; c: MWCNT 11mg/L; d: MWCNT 17 mg/L e: MWCNT 27 mg/L f: 53 mg/L. Fonte: Hordy et al. (2014).

Tong et al. (2015) construíram um coletor solar do tipo tubo evacuado em U, e avaliaram o desempenho em diversas condições de operação. Foram utilizados nanofluidos de nanotubos de carbono de paredes múltiplas (MWCNT) como fluido de trabalho, em concentrações variando entre 0,06 e 0,24% em volume. A Fig. 2.15 ilustra o esquema do aparato experimental utilizado pelos autores para avaliação da eficiência do coletor. Os resultados indicaram que os coeficientes de transferência de calor para os nanofluidos foram superiores ao da água pura e o desempenho aumentou com a concentração de nanopartículas. Para a concentração 0,24% foi obtido um aumento de 8% na transferência de calor.



Figura 2.15 – Esquema do aparato experimental utilizado por Tong et al. (2015). Fonte: Tong et al. (2015).

Sabiha et al. (2015) avaliaram experimentalmente a eficiência térmica de um coletor solar evacuado utilizando nanofluidos de nanotubos de carbono de paredes simples (SWCNT) em água, em concentrações entre 0,05 e 0,2% em volume. A vazão mássica no coletor variou entre 0,008 e 0,025kg/s, para o fluido base e nanofluidos. Além disso, foram medidas a condutividade térmica e calor específico dos nanofluidos. A condutividade térmica dos nanofluidos obtida foi significativamente superior à da água, enquanto o calor específico foi menor. Os resultados obtidos nos testes com coletor solar mostraram que a eficiência do coletor aumentou em até 93% ao utilizar nanofluidos, em comparação com a água pura. Além disso, a eficiência aumentou com a concentração de nanopartículas. O aparato experimental utilizado nos testes é ilustrado na Fig. 2.16.



Figura 2.16 – Foto do equipamento experimental utilizado por Sabiha et al. (2015). Fonte: Sabiha et al. (2015).

Karami et al. (2015) analisaram experimentalmente o desempenho de nanofluidos compostos por nanopartículas de CuO disperas em uma mistura de água (70%) e etilenoglicol (30%) em um coletor solar de absorção direta, ilustrado na Fig. 2.17. A concentração volumétrica dos nanofluidos produzidos (por meio de agitação e sonicação) variou entre 25 e 100 ppm, e os testes experimentais foram realizados com vazões entre 54 e 90 L/h. A eficiência do coletor foi crescente com a concentração volumétrica de nanopartículas, e também crescente com a vazão de líquido no coletor. O aumento da eficiência utilizando nanofluidos variou entre 9 e 17%, relativo ao fluido base.



Figura 2.17 – Coletor de absorção direta utilizado por Karami et al. (2015). Fonte: Karami et al. (2015)

Gupta et al. (2015) analisaram o desempenho térmico de nanofluidos em um coletor de absorção direta de 1,4m². Nanofluidos de alumina em água foram produzidos em concentrações entre 0,001% e 0,05%, e proporcionaram melhora na eficiência do coletor analisado. Porém o desempenho não foi crescente com a concentração volumétrica de nanopartículas. Na concentração 0,005% foi observado o melhor desempenho, 39,6% superior à do fluido base, o que indica a existência de uma concentração ótima, próxima à esta, com relação ao desempenho do nanofluido. O aparato experimental utilizado nos testes é ilustrado na Fig. 2.18.

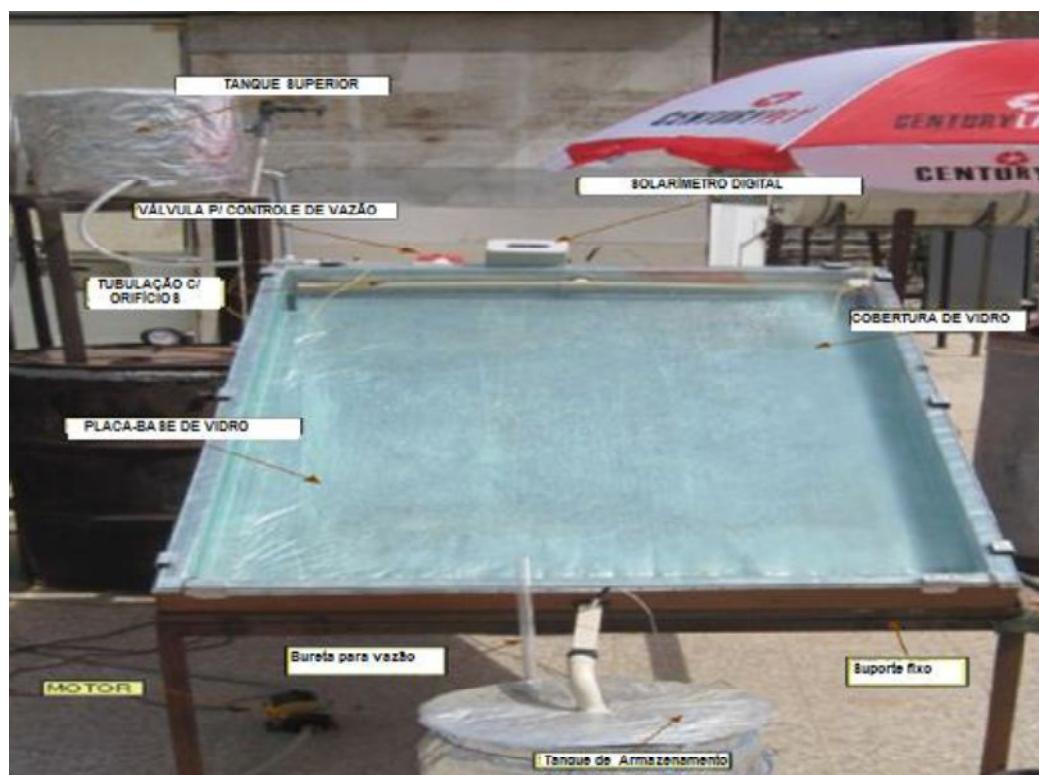


Figura 2.18 – Foto do equipamento experimental utilizado por Gupta et al. (2015). Fonte: Gupta et al. (2015).

Salavati Meibodi et al. (2015) avaliaram o desempenho de nanofluidos SiO₂ em uma mistura de água e etilenoglicol, em concentrações volumétricas de até 1%. A eficiência e o desempenho foram avaliadas para vazões mássicas entre 0,018 e 0,045 kg/s. Os resultados obtidos indicaram potencial desse tipo de nanofluido, apesar da baixa condutividade do SiO₂ comparado com outras nanopartículas usuais. A eficiência do coletor observada foi crescente com a concentração de nanopartículas e também com a vazão de líquido e o incremento máximo relativo ao fluido base foi 8% neste parâmetro. Um esquema do aparato experimental utilizado é apresentado na Fig. 2.19.

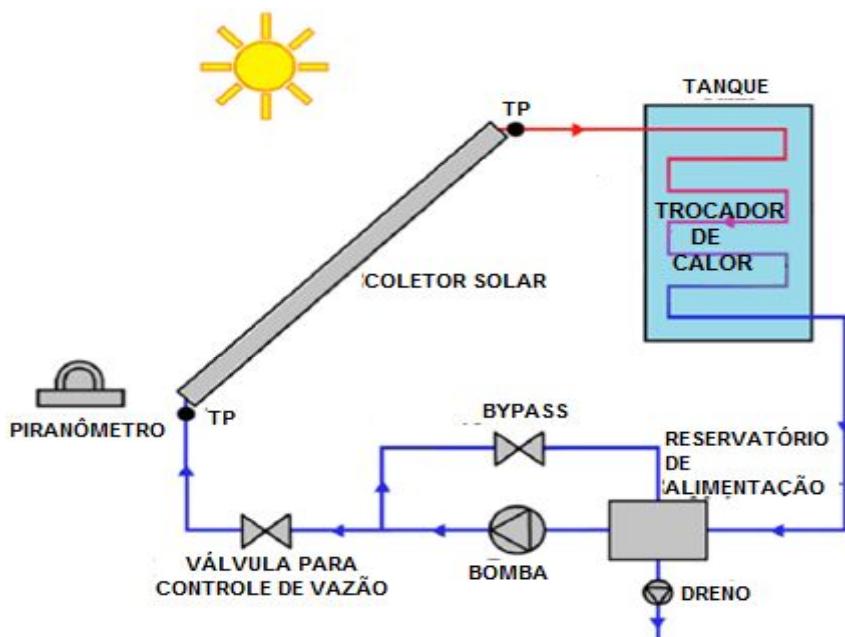


Figura 2.19 – Esquema do equipamento experimental utilizado por Salavati Meibodi et al. (2015). Fonte: Salavati Meibodi et al. (2015).

Amjad et al. (2015) estudaram experimentalmente a absorção de radiação solar simulada e as características foto-térmicas de nanofluidos híbridos compostos por nanofluido de óxido de titânio e nanofluido de ouro misturados em duas proporções distintas. Ambos os nanofluidos produzidos para a mistura possuíam concentrações de 40 mg/L e foram misturados nas proporções de 85-15% e 70-30% de nanofluido de óxido de titânio e nanofluido de ouro, respectivamente. Concluíram que o nanofluido híbrido comparado ao de óxido de titânio puro apresenta melhor absorção de radiação e que a adição do nanofluido de ouro nas proporções de 15 e 30% aumentou a eficiência da conversão foto-térmica em 36,9% e 46,3%, respectivamente.

Chen et al. (2015) utilizaram um equipamento com simulação de radiação solar, como mostrado na Fig. 2.20, para avaliar experimentalmente a capacidade e eficiência de conversão fototérmica de nanofluidos de ouro, prata e óxido de titânio em água em diferentes concentrações. Observaram que o gradiente de temperatura para os três nanofluidos foi superior ao do fluido base e que as nanopartículas de ouro e prata propiciaram resultados semelhantes entre si e superiores quando comparados ao óxido de titânio, o que foi explicado pelo efeito da Ressonância de Plasmon de Superfície Localizada (RPSL²), manifesto nas partículas de metais nobres em escala nanométrica. Na análise da influência da variação na

² Ressonância de Plasmon de Superfície Localizada: fenômeno de transferência ressonante de energia de uma onda de luz incidente para os elétrons livres presentes na superfície de metais; no caso de metais nobres, esse fenômeno ocorre nas frequências de luz visível.

quantidade de nanopartículas, notou-se a existência de uma concentração ótima, na qual ocorre a saturação da capacidade de absorção da radiação incidente.

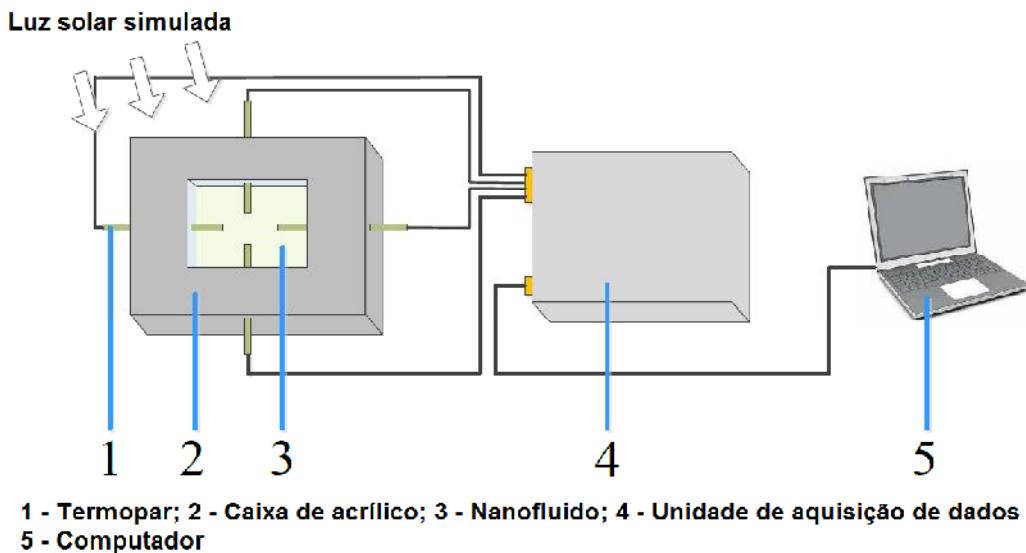


Figura 2.20 – Esquema do equipamento experimental utilizado por Chen et al. (2015). Fonte: Chen et al. (2015).

Delfani et al. (2016) avaliaram numericamente e experimentalmente a utilização de nanofluidos em um coletor solar residencial de absorção direta. Nanofluidos compostos por MWCNT e água/etenoglicol (na proporção 70/30%) foram produzidos por agitação e submetidos à avaliação no coletor. A concentração dos nanofluidos produzidos foi de 20 a 100 ppm, e a vazão volumétrica no coletor foi variada entre 54 e 90 L/min. A condutividade térmica dos nanofluidos foi medida, e foram encontrados valores superiores ao fluido base entre 3,6% (à 25°C) e 21% (à 60°C). Tanto a condutividade térmica quanto o desempenho dos nanofluidos no coletor solar foram crescentes com a concentração de nanopartículas. O nanofluido 100 ppm apresentou uma eficiência máxima 89,3%, contra 60,3% do fluido base nas mesmas condições.

Verma et al. (2016) avaliaram experimentalmente a eficiência de um coletor solar sob incidência de radiação artificial utilizando nanofluidos de MgO em água, com concentrações variando entre 0,25% e 1,5% em volume e com vazões volumétricas entre 0,5 e 2,5 L/min. Foi observado um aumento de 9,3% na eficiência para o nanofluido de concentração 0,75%, à uma vazão 1,5 L/min. Por outro lado, a potência de bombeamento necessária aumentou em até 6,8%. Aumentos adicionais na concentração acarretaram em perda de eficiência, o que evidenciou a existência de uma concentração ótima de nanopartículas a ser utilizada no nanofluido a fim de aumentar a eficiência do coletor. O equipamento experimental utilizado nesses testes é ilustrado na Fig. 2.21.



Figura 2.21 – Foto do equipamento experimental utilizado por Verma et al. (2016). Fonte: Verma et al. (2016).

Kim et al. (2016) avaliaram teoricamente a eficiência de um coletor solar do tipo tubo em U. O fluido base utilizado foi uma mistura composta por 20% propilenoglicol e 80% água. Foram calculadas as eficiências para nanofluidos compostos por Al_2O_3 , CuO , SiO_2 e TiO_2 . A maior eficiência estimada foi para o nanofluido de MWCNT com concentração 0,2%, na condição em que a queda de temperatura se aproxima de zero. Essa eficiência foi 10,5% superior à do fluido base.

Vakili et al. (2016) avaliaram experimentalmente o desempenho de nanofluidos de grafeno em água em um coletor solar de absorção direta. A concentração volumétrica de nanopartículas dos nanofluidos analisados variou entre 0,005 e 0,5%, enquanto a vazão mássica esteve entre 0,0075 e 0,225 kg/s. Os resultados indicaram que a eficiência do coletor aumenta com a concentração volumétrica de nanopartículas. A maior eficiência obtida para o coletor foi 93,2%, contra 70% do fluido base. Por outro lado, a vazão de 0,15 kg/s foi a que proporcionou melhor desempenho tanto para o fluido base quanto para os nanofluidos.

Vincely e Natarajan (2016) realizaram um estudo experimental em coletor solar de placa plana utilizando nanofluidos de óxido de grafeno em água em três concentrações mássicas ($\Phi_m=0,005$, 0,01 e 0,02%) e compararam os resultados aos do fluido base. Os experimentos foram realizados com a circulação forçada dos fluidos através de coletores de placa plana de área de 2m^2 e posterior troca térmica com o fluido secundário (água) em um trocador de calor do tipo tubo concêntrico, sendo o escoamento caracterizado como laminar para as condições de teste adotadas. Concluiu-se que a eficiência do coletor aumentava com a concentração mássica e com a vazão, alcançando aumentos de até 7,3% para $\Phi_m= 0,02\%$ e vazão de 0,0167 kg/s. O coeficiente de transferência de calor foi calculado para cada situação e obteve-se aumentos de 8,03%, 10,93% e 11,5% para as concentrações de 0,005%, 0,01% e 0,02%, respectivamente.

2.4. Resumo das referências utilizadas

Tabela 2.1 – Relação dos trabalhos revisados.

Autores	Nanofluido	Tema do estudo	Tipo de estudo	Comentários
Choi (1995)	-	-	Teórico	-
Liz-Marzan (2004)	-	Síntese	Teórico	-
Trisaksri et al. (2007)	-	Revisão - Caracterização	Teórico	-
Li et al. (2009)		Revisão – síntese e caracterização	Teórico	-
Pereira (2009)	Au /Água	RPSL	Teórico - Experimental	-
Natarajan e Sathish (2009)	-	Revisão – Aplicação solar	Teórico	Aumento da eficiência com uso de nanofluido
Tyagi et al. (2009)	Al /água	Aplicação em coletor solar de absorção direta	Teórico	Nanofluidos absorvem até nove vezes mais radiação que a água pura Aumento de 10% na eficiência com uso do CSAD
Otanicar et al. (2010)	Grafite, CNT, Prata /Água	Aplicação em microcoletor térmico solar	Experimental	Aumento significativo da eficiência para $\phi v < 0,1\%$ Ag(20 nm)/água propiciou a melhor eficiência do coletor(57,5%)
Khullar e Tyagi (2010)	Al /água	Aplicação em coletor solar parabólico	Teórico	Aumento significativo da eficiência para $\phi v < 0,004\%$
Lee et al. (2010)	-	Propriedades	Teórico	-

Taylor et al. (2010)	Au, Ag, Cu, Grafite /Therminol VP1	Aplicação como receptor de energia solar concentrada	Teórico	Proposição de modelos de coletor para altas temperaturas Aumento na eficiência da ordem de 10%
Fan e Wang (2011)	-	Revisão – condução de calor	Experimental	-
Ghadimi et al. (2011)	-	Revisão - Caracterização	Teórico	-
Taylor et al. (2011a)	Al, Ag, Cu, Grafite /Therminol VP1	Propriedades óticas/ Aplicação em coletor solar parabólico	Teórico - Experimental	Máxima eficiência do sistema atingida através de uma concentração ideal de nanopartículas (<10 ppm p/ Grafite)
Taylor et al. (2011b)	Al, Au, Ag, grafite, Cu, TiO ₂ /água, Therminol VP1	Propriedades óticas	Teórico - Experimental	Nanofluidos absorvem até 95% da radiação incidente p/ $\phi v < 0,004\%$ e espessura de fluido de 10 cm.
He et al. (2011)	TiO ₂ , MWCNT /água	Aplicação em coletor solar de tubo evacuado	Experimental	Concentração intermediária ($\phi m = 0,5\%$) atingiu melhores resultados. Resultados TiO ₂ inferiores ao MWCNT
Khanafer e Vafai (2011)	-	Propriedades	Teórico	-
Ramesh e Prabu (2011)	-	Revisão - Propriedades	Teórico	-
Lenert e Wang (2012)	Co-carbono /Therminol VP1	Aplicação em coletor solar com concentração	Teórico - Experimental	Sistema otimizado (concentração solar > 100 e altura de fluido > 5cm) utilizando nanofluidos atingiria eficiências maiores que 35%.

Yousefi et al. (2012a)	Al ₂ O ₃ /água	Aplicação em coletor solar de placa plana	Experimental	Nanofluido menos concentrado ($\phi_m=0,2\%$) gerou aumento de 28,3% na eficiência do coletor
Yousefi et al. (2012b)	MWCNT /água	Aplicação em coletor solar de placa plana	Experimental	Nanofluido mais concentrado ($\phi_m=0,4\%$) aumentou a eficiência do coletor e o menos concentrado ($\phi_m=0,2\%$) diminuiu
Yousefi et al. (2012c)	MWCNT /água	Aplicação em coletor solar de placa plana	Experimental	Quanto mais afastados do ponto isoelétrico o pH dos nanofluidos, maior a eficiência do coletor
Khullar et al. (2012)	Al /Therminol VP1	Aplicação em coletor solar parabólico	Experimental	Aumento de 5 a 10% na eficiência de coletores parabólicos tradicionais
Vajjha e Das (2012)	-	Revisão - Propriedades	Teórico	-
He et al. (2013)	Cu /água	Propriedades Fototérmicas	Experimental	Capacidade de conversão fototérmica aumenta até $\phi_m=0,1\%$ (resultado 25,3% superior ao da água)
Jamal-Abad et al. (2013)	Cu /água	Aplicação em coletor solar de placa plana	Experimental	Nanofluidos proporcionaram aumento de até 29% na eficiência do coletor
Ladjevardi et al. (2013)	Grafite /água	Aplicação em coletor solar volumétrico	Teórico	Nanofluido $\phi_v=0,0001\%$ absorve até 90% da radiação incidente Nanofluido $\phi_v=0,0025\%$ apresentou melhor custo-benefício
Liu et al. (2013)	CuO/água	Aplicação em coletor solar com CPC	Experimental	Nanofluidos aumentaram em até 12,4% a eficiência do coletor Nanofluido $\phi_m=1,2\%$ apresentou maior coeficiente de transferência de calor
He et al (2014)	Cu /água	Aplicação em coletor solar de placa plana	Experimental	Nanopartícula de menor diâmetro (25 nm) e $\phi_m=0,1\%$ proporcionou aumento de 23,83% na eficiência do coletor

Hordy et al. (2014)	MWCNT /água, etilenoglicol, Therminol VP1, propilenoglicol	Aplicação em coletor solar	Experimental	Nanofluidos apresentaram potencial de absorção de quase 100% da radiação incidente mesmo em baixas concentrações
Bandarra Filho et al. (2014)	Ag /água	Eficiência de conversão fototérmica	Experimental	Nanofluidos proporcionaram aumento de até 144% na energia armazenada ($\phi v=6,5$ ppm)
Karami et al. (2014)	CNT /água	Propriedades fototérmicas	Experimental	Nanofluido mais concentrado ($\phi v=150$ ppm) apresentou aumento de $4,1\text{cm}^{-1}$ no coeficiente de extinção e de 32,2% na condutividade térmica
Amjad et al. (2015)	TiO ₂ -Au /água	Eficiência de conversão fototérmica	Experimental	A adição de nanofluido de ouro ao nanofluido de TiO ₂ /água proporcionou aumento de até 46,3% na eficiência de conversão fototérmica
Chen et al. (2015)	Au, Ag, TiO ₂ /água	Eficiência de conversão fototérmica	Experimental	Nanofluidos de ouro e prata apresentaram resultados semelhantes entre si e superiores ao do nanofluido de TiO ₂ . Todos os nanofluidos apresentaram gradiente de temperatura superior ao da água
Gupta et al. (2015)	AL ₂ O ₃ /água	Aplicação em coletor solar de absorção direta	Experimental	Nanofluido de concentração intermediária ($\phi v=0,005\%$) proporcionou desempenho 39,6% superior ao do fluido base
Karami et al. (2015)	CuO /água- etilenoglicol	Aplicação em coletor solar de absorção direta	Experimental	Eficiência do coletor aumentou em até 17% utilizando nanofluidos ($\phi v=100$ ppm)
Sabiha et al. (2015)	SWCNT /água	Aplicação em coletor solar evacuado	Experimental	Eficiência do coletor aumentou até 93% ao utilizar nanofluidos ($\phi v=0,2\%$)

Salavati Meibodi et al. (2015)	SiO_2 /água-etenoglicol	Aplicação em coletor solar de placa plana	Experimental	Utilização de nanofluidos proporcionou aumento de até 8% na eficiência do coletor
Tong et al. (2015)	MWCNT /água	Aplicação em coletor solar tubo em U	Experimental	Nanofluido ($\phi v=0,24\%$) proporcionou aumento de até 8% na transferência de calor
Delfani et al. (2016)	MWCNT /água-etenoglicol	Aplicação em coletor solar de absorção direta	Experimental	Nanofluido $\phi v=100$ ppm apresentou eficiência máxima do coletor de 89,3% contra 60,3% do fluido base
Kim et al. (2016)	Al_2O_3 , CuO , SiO_2 , TiO_2 /água-propilenoglicol	Aplicação em coletor solar tubo em U	Teórico	Nanofluido $\phi v=0,2\%$ proporcionou eficiência do coletor 10,5% superior ao do fluido base
Vakili et al. (2016)	Grafeno /água	Aplicação em coletor solar de absorção direta	Experimental	Nanofluido $\phi v=0,5\%$ apresentou eficiência máxima do coletor de 93,2% contra 70% do fluido base
Verma et al. (2016)	MgO /água	Aplicação em coletor solar de placa plana	Experimental	Nanofluido de concentração intermediária ($\phi v=0,75\%$) proporcionou aumento de até 9,3% na eficiência do coletor
Vincely e Natarajan (2016)	Óxido de grafeno /água	Aplicação em coletor solar de placa plana	Experimental	Nanofluido $\phi m=0,02\%$ proporcionou aumento de até 7,3% na eficiência do coletor e de 11,5% no coeficiente de transferência de calor
Presente trabalho (2016)	MWCNT, Au /água	Eficiência de conversão fototérmica	Experimental	Nanofluido de ouro ($\phi v=0,004\%$) e de MWCNT ($\phi v=0,001\%$) apresentaram melhores desempenhos e indicaram existência de concentração ótima para aplicações

CAPÍTULO III

MATERIAIS E MÉTODOS

A análise da conversão fototérmica dos nanofluidos de ouro e nanotubos de carbono em água foi realizada após uma sequência de etapas prévias aos testes experimentais que contemplaram a construção da bancada de testes, a produção dos nanofluidos, o desenvolvimento da interface do sistema de aquisição de dados e a preparação dos sensores de temperatura. Assim sendo, cada fase desse desenvolvimento será detalhada nesse capítulo.

3.1. Bancada experimental

Para o desenvolvimento deste trabalho foi construído um aparato experimental que possibilitasse a exposição solar das amostras de nanofluidos e de seu fluido base (água destilada) e a aquisição de dados de temperatura dos fluidos testados ao longo do dia. A bancada era composta dos seguintes elementos:

- estrutura de base em alumínio com as áreas de contato com as células de teste isoladas termicamente e com espaço para até 12 recipientes;
- recipientes acrílicos de dimensões 140x120x20mm, com 10 mm de espessura livre, como apresentado na Fig. 3.1, para exposição dos fluidos estudados ao sol;
- hastes com alça confeccionadas em acrílico de dimensões 80x10x5mm com ranhuras centrais para auxiliar no posicionamento e fixação dos sensores de temperatura quando imersos nos fluidos testados;
- sensores de temperatura: termopares do tipo T devidamente calibrados para as condições do experimento;
- chassi NI cDAQ-9178 e módulo de aquisição NI 9213 da National Instruments – conforme Fig. 3.2 para aquisição dos sinais provenientes dos termopares;
- computador para armazenamento e análise dos dados coletados.

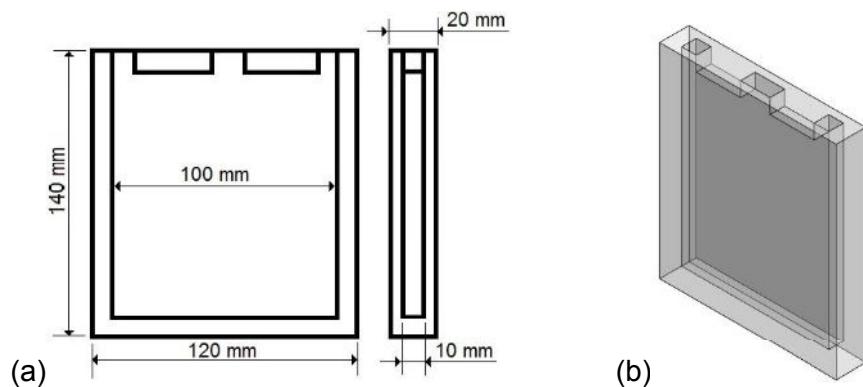


Figura 3.1 – Esquema dos recipientes acrílicos utilizados nos testes. (a)Vistas cotadas. (b)Vista tridimensional.



Figura 3.2 – Sistema de aquisição de dados; (a) Chassi NI cDAQ-9178, (b) módulo de aquisição NI 9213. Fonte: Site oficial da National Instruments Disponível em: <<http://www.ni.com/data-acquisition/compactdaq/pt/>> Acesso em: 20/08/2015

A Fig 3.3 ilustra uma visão esquemática simplificada da configuração da bancada de testes e a Fig. 3.4 apresenta uma imagem real de parte da bancada em um dos dias de teste.

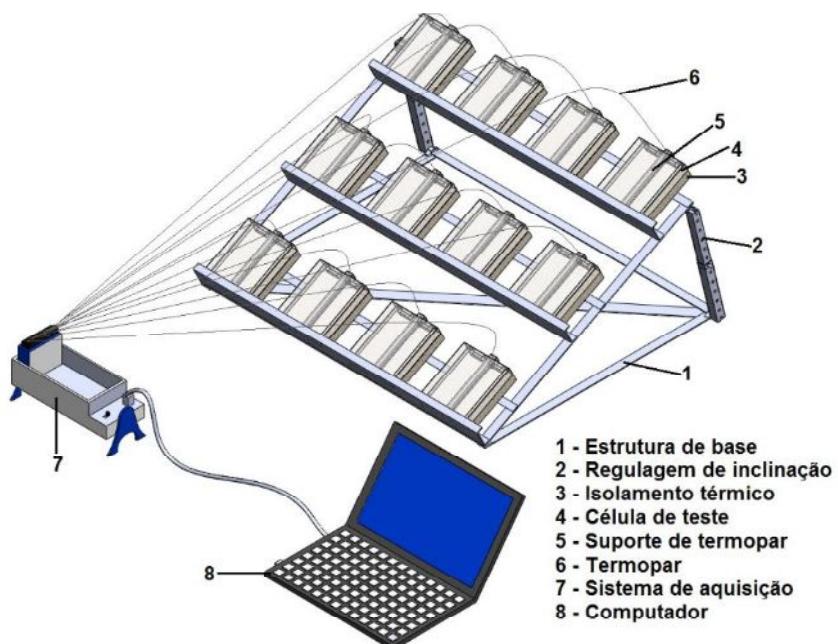


Figura 3.3 – Representação esquemática da bancada de testes.



Figura 3.4 – Foto da vista frontal da bancada em um dos dias de teste.

3.2. Software de aquisição de dados

Além dos equipamentos previamente citados foi necessário o desenvolvimento de uma interface em ambiente LabView® para a aquisição e armazenamento dos dados de temperatura no computador. Por meio do programa desenvolvido configurou-se a frequência de aquisição dos termopares em 1Hz e acompanhou-se os valores instantâneos de temperatura e uma prévia gráfica do comportamento temporal dos mesmos, como ilustra a Fig. 3.5.

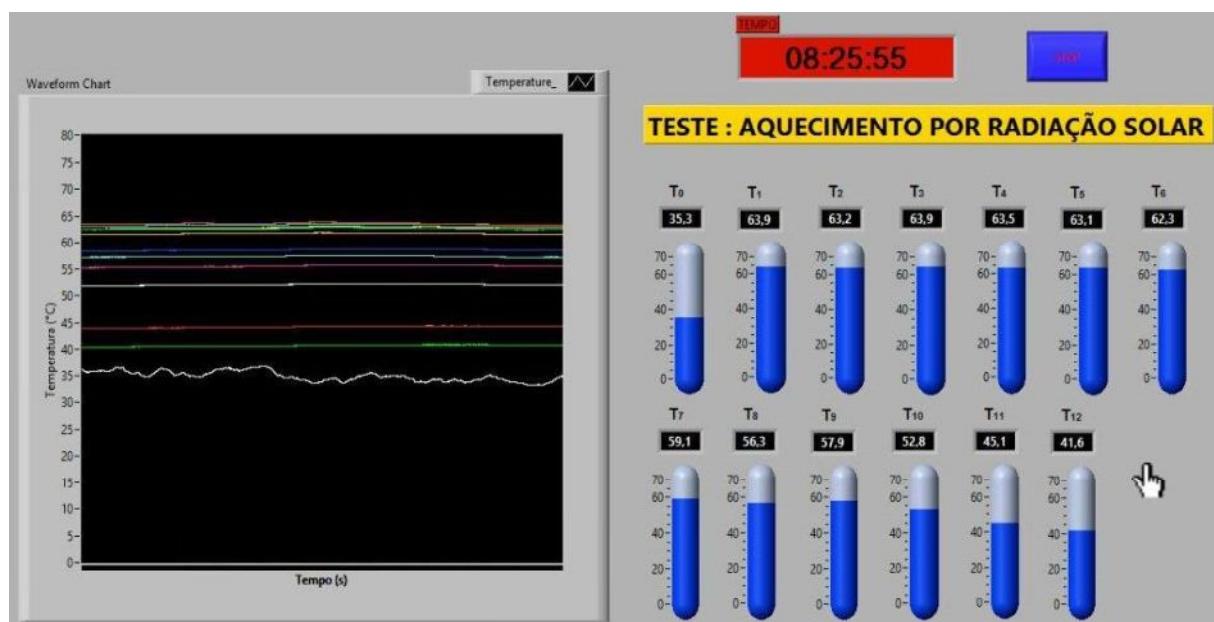


Figura 3.5 – Interface criada em ambiente Labview para os testes.

3.3. Calibração dos termopares e incerteza associada às medições

Os treze termopares utilizados nos testes foram calibrados na faixa de 15 a 65°C em intervalos de 5°C. Nessa etapa foi utilizado o banho termocriostático apresentado na Fig. 3.6 para variação controlada da temperatura e termômetros padrão de bulbo de mercúrio para comparação.



Figura 3.6 – Foto do banho termocriostático modelo MQBMP-01/Microquímica utilizado na calibração dos termopares.

Cada ponto de temperatura da faixa de calibração foi repetido seis vezes e as curvas finais obtidas são apresentadas no Apêndice A. A partir das equações obtidas na calibração de cada termopar calculou-se a incerteza de medição conforme procedimento exposto no Apêndice B. A Tab. 3.1 apresenta os valores de incerteza para cada um dos treze termopares calibrados.

Tabela 3.1 – Incerteza de medição associada a cada termopar utilizado no trabalho.

Termopar	Incerteza de Medição (°C)
T0	0,128
T1	0,113
T2	0,107
T3	0,100
T4	0,097
T5	0,095
T6	0,095
T7	0,094
T8	0,089
T9	0,093
T10	0,092
T11	0,092
T12	0,090

3.4. Preparação dos nanofluidos

Neste trabalho foram produzidos nanofluidos de dois materiais: ouro e nanotubos de carbono de paredes múltiplas. Nessa etapa, diferentes concentrações foram obtidas a partir de um processo de diluição com água destilada de amostras mais concentradas e homogeneização durante trinta minutos por meio do uso do sonicador de potência 700W apresentado na Fig. 3.7.



Figura 3.7 – Foto do sonicador utilizado na preparação das amostras de nanofluido.

Para a síntese de nanofluidos em diferentes concentrações foram utilizadas inicialmente amostras de alta concentração, sendo a de nanotubos de carbono comprada da empresa NanoAmor® e a de ouro cedida pela University of Leeds. O resumo das características dessas amostras iniciais pode ser observado na Tab. 3.2, onde ϕ_m corresponde à concentração mássica do nanofluido, ϕ_v à concentração volumétrica e ρ_{np} à densidade do material de cada nanopartícula.

Tabela 3.2 – Características dos nanofluidos adquiridos para o presente trabalho.

Tipo de nanopartícula	Formato da nanopartícula	ρ_{np} (g/cm ³)	Tamanho da nanopartícula	Fluido base	ϕ_m (%)	ϕ_v (%)	Volume total (ml)
Ouro	Esférico	19,3	Diâmetro 20-60 nm	Água	0,2896	0,015	200
Nanotubos de Carbono	Tubular com paredes múltiplas	2,1	Diâmetro > 50 nm Comprimento 10-20 µm	Água	9	4,485	1000

As proporções de cada diluição foram previamente determinadas após uma sequência de cálculos realizados através da implementação das equações (1) a (9) no software EES®.

$$\phi_{v_inicial} = 100 \times V_{np} / (V_{np} + V_{água}) \quad (1)$$

$$\phi_{m_inicial} = 100 \times M_{np} / (M_{np} + M_{água}) \quad (2)$$

$$\rho_{np} = M_{np} / V_{np} \quad (3)$$

$$\rho_{água} = M_{água} / V_{água} \quad (4)$$

$$\phi_{v_final} = 100 \times V_{np} / (V_{np} + V_{água} + V_{água_add}) \quad (5)$$

$$\phi_{m_final} = 100 \times M_{np} / (M_{np} + M_{água} + M_{água_add}) \quad (6)$$

$$V_{inicial} = V_{np} + V_{água} \quad (7)$$

$$V_{água_add} = M_{água} / \rho_{água} \quad (8)$$

$$V_{final} = V_{np} + V_{água} + V_{água_add} \quad (9)$$

Onde:

- $\phi_{v_inicial}$: concentração volumétrica do nanofluido a ser diluído (%);
- $\phi_{m_inicial}$: concentração mássica do nanofluido a ser diluído (%);
- ρ_{np} : densidade da nanopartícula (g/cm³);
- $\rho_{água}$: densidade da água, 0,997 g/cm³;

- ϕ_{v_final} : concentração volumétrica do nanofluido após diluição (%);
- ϕ_{m_final} : concentração mássica do nanofluido após diluição (%);
- $V_{inicial}$: volume de nanofluido antes da diluição (ml);
- $V_{água_add}$: volume de água destilada adicionada para diluição (ml);
- V_{final} : volume de nanofluido após diluição (ml);
- M_{np} : massa de nanopartículas (g);
- $M_{água}$: massa de água (g);

Na resolução dessas equações os parâmetros de entrada no programa foram as densidades da nanopartícula e do fluido base, a concentração volumétrica da amostra a ser diluída e a concentração volumétrica e volume final esperados do nanofluido após a diluição, enquanto os parâmetros de saída foram as concentrações mássicas, o volume que deveria ser utilizado do nanofluido inicial e o volume de água destilada que deveria ser adicionado à ele. Cabe ressaltar que o volume final da amostra – e não o inicial - foi estipulado devido à necessidade de que ao fim do processo se obtivesse um volume aproximadamente igual de nanofluidos em cada uma das concentrações produzidas.

Os resultados obtidos através da implementação descrita podem ser observados nas Tabs. 3.3 e 3.4, nas quais são apresentadas as proporções de líquido e concentrações de cada amostra produzida de nanofluidos de ouro e nanotubos de carbono, respectivamente. Para medição dos volumes necessários ao processo de diluição foram utilizadas pipetas graduadas. Para o processo de sonicação, todo o conteúdo foi adicionado a um bêquer devidamente limpo e seco, evitando possíveis contaminações das amostras e aumentando a exatidão relativa à concentração volumétrica desejada.

Tabela 3.3 – Dados para a produção das diferentes amostras de nanofluido de ouro em água.

$\phi_{m_inicial}$ (%)	$\phi_{v_inicial}$ (%)	ϕ_{m_final} (%)	ϕ_{v_final} (%)	$V_{inicial}$ (ml)	$V_{água_add}$ (ml)	V_{final} (ml)
0,2896	0,015	0,07738	0,004	200	550	750
0,07738	0,004	0,05804	0,003	500	166,7	666,7
0,05804	0,003	0,0387	0,002	400	200	600
0,0387	0,002	0,01935	0,001	350	350	700
0,01935	0,001	0,01548	0,0008	450	112,5	562,5
0,01548	0,0008	0,009678	0,0005	300	180	480
0,009678	0,0005	0,005807	0,0003	200	133,3	333,3
0,005807	0,0003	0,001936	0,0001	85	170	255

Observa-se na Tab. 3.3 que a baixa concentração da primeira amostra de nanofluido de ouro possibilitou a obtenção de concentrações volumétricas variando entre 0,0001% e 0,004% e volumes finais de aproximadamente 250 ml. Por outro lado, na síntese dos nanofluidos de nanotubos de carbono não havia restrição associada à amostra inicial, portanto, optou-se por produzir amostras de 500 ml com concentrações volumétricas variando entre 0,0001% e 0,05%, como apresentado na Tab. 3.4. Ressalta-se ainda que, apesar da produção dos nanofluidos de nanotubos de carbono contemplarem doze concentrações diferentes, a mais concentrada delas não foi testada na bancada e foi produzida apenas para possibilitar diluições mais precisas.

Tabela 3.4 – Dados para a produção das diferentes amostras de nanofluido de nanotubos de carbono em água.

$\phi_{m_inicial}$ (%)	$\phi_{v_inicial}$ (%)	ϕ_{m_final} (%)	ϕ_{v_final} (%)	$V_{inicial}$ (ml)	$V_{água_add}$ (ml)	V_{final} (ml)
9	4,485	0,1053	0,05	47,35	4200	4247
0,1053	0,05	0,0632	0,03	300	200	500
0,1053	0,05	0,0211	0,01	100	400	500
0,1053	0,05	0,0105	0,005	50	450	500
0,1053	0,05	0,0084	0,004	40	460	500
0,1053	0,05	0,0063	0,003	30	470	500
0,1053	0,05	0,0042	0,002	20	480	500
0,1053	0,05	0,0021	0,001	10	490	500
0,1053	0,05	0,0017	0,0008	8	492	500
0,0105	0,005	0,0011	0,0005	50	450	500
0,0063	0,003	0,0006	0,0003	50	450	500
0,0021	0,001	0,0002	0,0001	50	450	500

3.5. Condições e cronograma de testes

Os testes foram realizados com condições pré-definidas de orientação da estrutura de base, volume das amostras, e posicionamento dos termopares, além disso, os dados meteorológicos para os dias de teste apresentados no Apêndice C foram obtidos através de consulta ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) que possui uma estação automática que coleta dados de hora em hora e situa-se no campus Santa Mônica da Universidade Federal de Uberlândia.

A bancada de testes foi posicionada no alto de um terraço, onde não havia ocorrência de sombra de estruturas ou edificações próximas, seguindo orientações da norma ABNT NBR 15569:2008 para maior eficiência do coletor, com face traseira isolada termicamente e face

frontal voltada para o norte com inclinação de 28° em relação ao solo – compensação da latitude da cidade de Uberlândia (18° 55' 07" Sul), onde foram realizados os testes, e favorecimento do inverno (adição de 10° ao valor da latitude) – como ilustrado na Fig. 3.8.

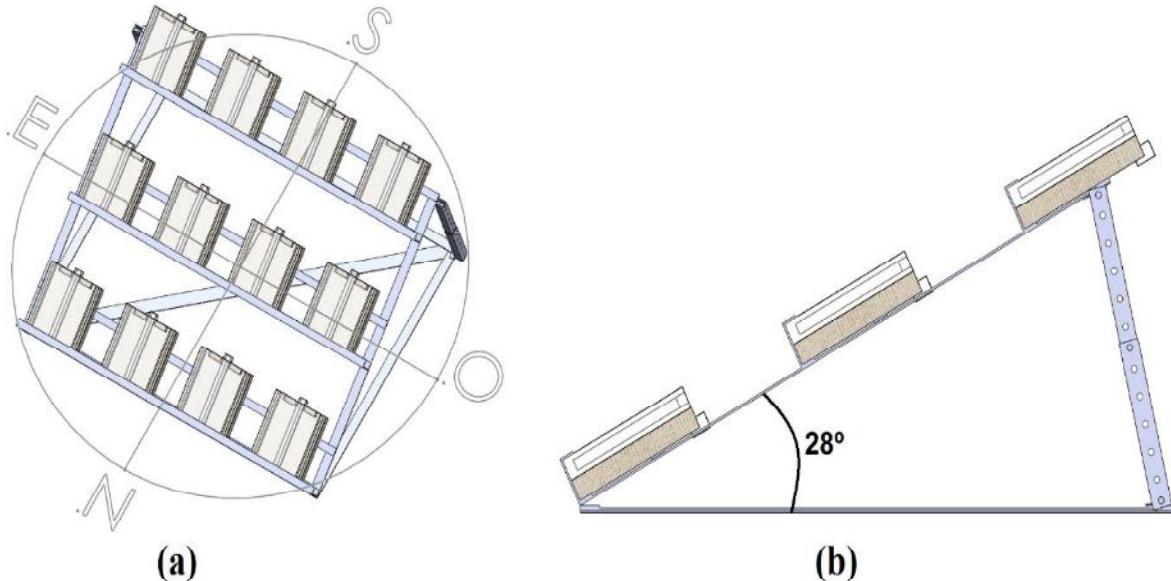


Figura 3.8 – Esquema da (a) orientação e (b) inclinação da bancada de testes.

Foram realizados cinco dias de teste para cada tipo de nanofluido com duração aproximada de nove horas iniciadas às 7:00 AM, sendo que os nanofluidos de ouro em água foram testados nos dias 6, 7, 8, 18 e 22 de maio e os nanofluidos de nanotubos de carbono em água nos dias 24, 25, 26, 28 e 30 de maio, todos no ano de 2016. Para os testes, cada um dos recipientes acrílicos foi preenchido no primeiro dia com 100ml de fluido - o que corresponde a, aproximadamente, 10cm de coluna de líquido - possuindo um termopar imerso em sua posição central – a 5cm do fundo e laterais e 5mm das faces frontal e traseira – tendo sido esvaziado e limpo apenas após o quinto dia de teste. Para o monitoramento da temperatura ambiente em tempo real foi também posicionado um dos sensores de temperatura na vizinhança da estrutura.

3.6. Cálculo da energia total armazenada na fase de aquecimento

O total de energia armazenada pelos fluidos estudados durante a fase de aquecimento - que compreende o início dos testes até aproximadamente o meio dia solar - é proporcional à máxima variação de temperatura experimentada por cada um durante o período de testes, sendo calculado conforme Eq. (10).

$$E_{\text{total}} = m_f c_f (T_{\text{máx}} - T_{\text{mín}}) \quad (10)$$

Onde:

- E_{Total} : energia total armazenada pelo fluido na fase de aquecimento (KJ);

- m: massa (g);
- c: calor específico (kJ/g°C);
- T: temperatura do fluido (°C).

E os subscritos representam:

- f: fluido;
- máx: máxima;
- mín: mínima.

Para o cálculo, o calor específico e a massa de todos os fluidos foram adotados como sendo os do fluido base em razão da baixa concentração de nanopartículas nos nanofluidos.

3.7. Cálculo da taxa de variação da temperatura

Um dos parâmetros calculados a partir dos dados de temperatura coletados durante os testes foi a taxa de variação da temperatura no tempo (dT/dt). Diante do grande volume de dados produzidos pela aquisição a 1 Hz, a variação temporal foi considerada em intervalos de 300 segundos durante os primeiros 15000 segundos de teste.

3.8. Cálculo da taxa de absorção específica - “SAR”

A eficiência de conversão foto-térmica das nanopartículas pode ser caracterizada através do cálculo da taxa de absorção específica “SAR” – do inglês Specific Absorption Rate – que representa a capacidade de absorção de energia das nanopartículas por unidade de massa e tempo e pode ser calculada conforme Eq. (11).

$$SAR = \frac{(m_{fb}c_{fb} + m_{np}c_{np})\Delta T_{nf} - m_{fb}c_{fb} \Delta T_{fb}}{1000m_{np}\Delta t} \quad (11)$$

Onde:

- SAR: taxa de absorção específica (kW/g);
- m: massa (g);
- c: calor específico (kJ/g°C);
- ΔT: variação na temperatura (°C);
- Δt: variação no tempo (s).

E os subscritos representam:

- fb: fluido base, no caso, água;
- np: nanopartícula;

- nf: nanofluido.

Sabe-se que o calor específico dos materiais das nanopartículas é inferior ao da água, além disso, as concentrações mássicas utilizadas no desenvolvimento desse trabalho (todas menores que 0,3%) são suficientemente pequenas para tornar a massa de nanopartículas irrisória diante da massa total das amostras, assim sendo, tem-se que $m_{fb}c_{fb} \gg m_{np}c_{np}$, o que reduz a Eq. (11) a:

$$SAR = \frac{m_{fb}c_{fb}}{1000m_{np}} \left(\frac{\Delta T_{nf}}{\Delta t} - \frac{\Delta T_{fb}}{\Delta t} \right) \quad (12)$$

Admitindo ainda que o calor específico da água não varia ao longo do tempo ($c_{água}=4,18\text{J/g}^{\circ}\text{C}$) e que a massa da amostra permanece constante durante todo o processo, conclui-se que o “SAR” varia proporcionalmente à diferença entre a taxa de variação da temperatura do nanofluido e da água.

3.9. Cálculo da razão de energia armazenada - “SER”

Outro parâmetro importante na análise do desempenho da conversão fototérmica em nanofluidos é denominado razão de energia armazenada e fornece dados acerca de quanta energia a mais o nanofluido foi capaz de armazenar na forma de calor devido à presença das nanopartículas. Assim sendo, o cálculo do “SER” é feito a partir da razão entre o calor armazenado pelo nanofluido e seu respectivo fluido base, como enunciado pela Eq. (13).

$$SER = \frac{Q_{nf}(t)}{Q_{fb}(t)} = \frac{(m_{fb}c_{fb} + m_{np}c_{np})(T_{nf}(t) - T_{nf}(0))}{m_{fb}c_{fb}(T_{fb}(t) - T_{fb}(0))} \quad (13)$$

Onde:

- SER: razão de energia armazenada;
- m: massa (g);
- c: calor específico (kJ/g[°]C);
- t: tempo (s);
- T(t): Temperatura do fluido em um instante de tempo t (°C).

E os subscritos representam:

- fb: fluido base, no caso, água;
- np: nanopartícula;
- nf: nanofluido.

Assim como destacado no cálculo do “SAR”, a massa de nanopartículas é irrisória e o calor específico menor que o do fluido base utilizado, o que reduz a equação apresentada anteriormente após as devidas simplificações a:

$$SER = \frac{T_{nf}(t) - T_{nf}(0)}{T_{fb}(t) - T_{fb}(0)} \quad (14)$$

Portanto, fica claro que o “SER” para as condições de teste apresentadas é representado pela razão entre as variações de temperatura do nanofluido e do fluido base.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, serão apresentados os resultados de temperatura coletados para os diferentes dias de ensaio, os parâmetros de desempenho de conversão fototérmica “SAR” e “SER” e a energia total armazenada pelos nanofluidos no período de aquecimento dos fluidos, para tal, foram construídos tabelas e gráficos através de rotinas desenvolvidas no software MatLab®. Ressalta-se que alguns resultados, no entanto, não foram apresentados nessa sessão por demonstrarem um padrão de similaridade em relação a outros resultados apresentados, tendo sido transferidos para o Apêndice D.

4.1. Nanofluidos resultantes do processo de diluições sucessivas

A partir dos cálculos realizados para determinar a diluição dos nanofluidos de ouro e de nanotubos de carbono, foram produzidos e utilizados nos testes experimentais oito nanofluidos de ouro em água e onze nanofluidos de nanotubos de carbono em água em diferentes concentrações. Assim sendo, os nanofluidos resultantes da etapa de diluições e suas principais características encontram-se expostos a seguir nas Tabs. 4.1 e 4.2, referentes aos nanofluidos de ouro em água e nanotubos de carbono em água, respectivamente.

Tabela 4.1 – Relação dos nanofluidos de ouro em água resultantes do processo de diluições sucessivas e suas características.

Amostra	ϕ_v		ϕ_m (%)	Volume total de nanopartículas (cm³)	Massa total de nanopartículas (g)
	(%)	(ppm)			
Au 1	0,004	40	0,07738	0,004	0,07738
Au 2	0,003	30	0,05804	0,003	0,05804
Au 3	0,002	20	0,0387	0,002	0,0387
Au 4	0,001	10	0,01935	0,001	0,01935
Au 5	0,0008	8	0,01548	0,0008	0,01548
Au 6	0,0005	5	0,009678	0,0005	0,009678
Au 7	0,0003	3	0,005807	0,0003	0,005807

Au 8	0,0001	1	0,001936	0,0001	0,001936
------	--------	---	----------	--------	----------

Tabela 4.2 – Relação dos nanofluidos de nanotubos de carbono em água resultantes do processo de diluições sucessivas e suas características.

Amostra	ϕ_v		ϕ_m (%)	Volume total de nanopartículas (cm ³)	Massa total de nanopartículas (g)
	(%)	(ppm)			
CNT 1	0,03	300	0,0632	0,03	0,0632
CNT 2	0,01	100	0,0211	0,01	0,0211
CNT 3	0,005	50	0,0105	0,005	0,0105
CNT 4	0,004	40	0,0084	0,004	0,0084
CNT 5	0,003	30	0,0063	0,003	0,0063
CNT 6	0,002	20	0,0042	0,002	0,0042
CNT 7	0,001	10	0,0021	0,001	0,0021
CNT 8	0,0008	8	0,0017	0,0008	0,0017
CNT 9	0,0005	5	0,0011	0,0005	0,0011
CNT 10	0,0003	3	0,0006	0,0003	0,0006
CNT 11	0,0001	1	0,0002	0,0001	0,0002

Nota-se que, para a síntese de nanofluidos de mesma concentração volumétrica, utiliza-se uma massa aproximadamente dez vezes maior de nanopartículas de ouro comparada à de nanotubos de carbono, o que implica em um custo maior para a produção dos nanofluidos de ouro em relação aos de nanotubos de carbono.

4.2. Perfis de temperatura

A primeira etapa de resultados dos testes de aquecimento solar consiste na exposição gráfica dos perfis comparativos de temperatura apresentados pelos nanofluidos e seu fluido base nos diferentes dias de teste. Os dados referentes aos nanofluidos foram categorizados segundo sua concentração volumétrica e apresentados juntamente aos do fluido base e da vizinhança (temperatura ambiente).

Nanofluidos de ouro em água

As Figs. 4.1 à 4.5 apresentam os perfis de temperatura dos dias de teste com nanofluidos de ouro em água. Nota-se que durante os primeiros 5000 segundos de cada teste, especialmente no último dia (Fig. 4.5), os perfis de temperatura se assemelham a uma curva exponencial, e posteriormente, a uma parábola. Os dois primeiros dias, ilustrados pelas Figs. 4.1 e 4.2, mostraram-se os mais promissores na comparação com o fluido base apresentando

aumentos significativos da temperatura para as concentrações até 0,001% e incrementos mais discretos para as concentrações entre 0,001% e 0,004%.

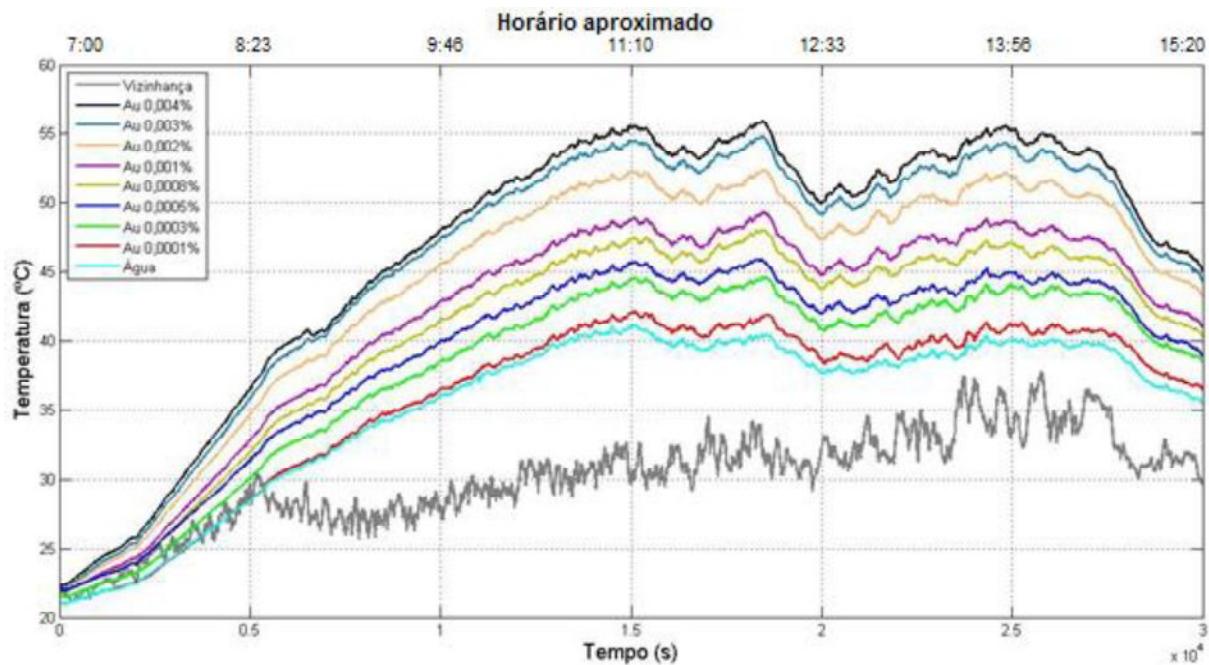


Figura 4.1 – Perfis de temperatura dos nanofluidos de ouro em água e do fluido base testados no dia 6/5/2016.

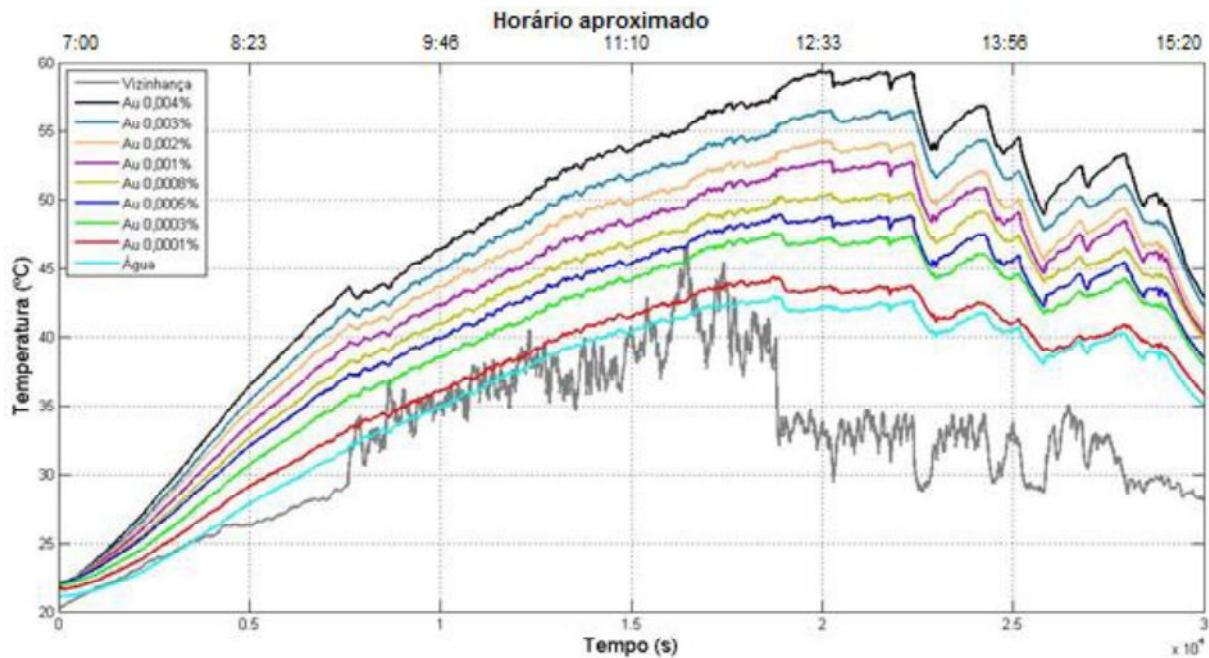


Figura 4.2 – Perfis de temperatura dos nanofluidos de ouro em água e do fluido base testados no dia 7/5/2016.

Nota-se que a partir do terceiro dia de testes, representado pela Fig. 4.3, as temperaturas experimentadas por cada um dos nanofluidos em diferentes concentrações

volumétricas apresentaram resultados diferentes do esperado, a exemplo das duas sobreposições evidenciadas no gráfico: entre os perfis do nanofluido menos concentrado ($\Phi_v=0,0001\%$) e da água e das concentrações 0,0003% e 0,0005%.

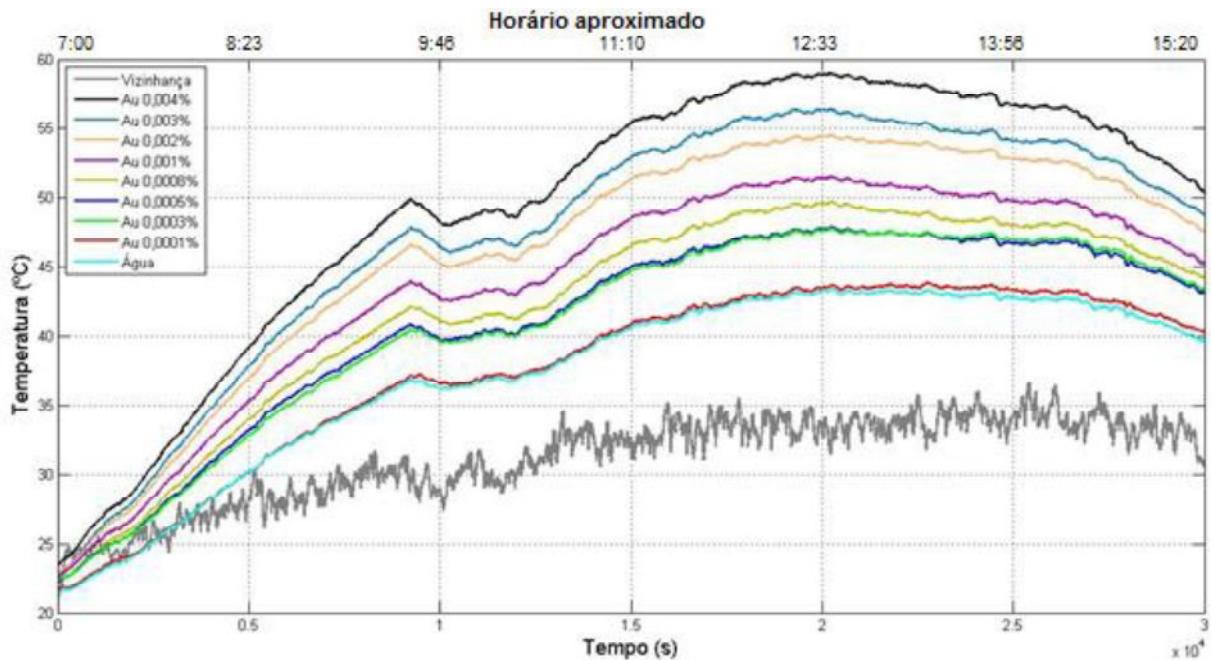


Figura 4.3 – Perfis de temperatura dos nanofluidos de ouro em água e do fluido base testados no dia 8/5/2016.

Nos resultados do quarto dia de teste, ilustrado pela Fig. 4.4, ocorreram novas sobreposições indicando aproximação entre o comportamento dos nanofluidos e da água, resultado da degradação das amostras que, como mencionado no capítulo III, não foram substituídas em nenhum dos cinco dias de teste.

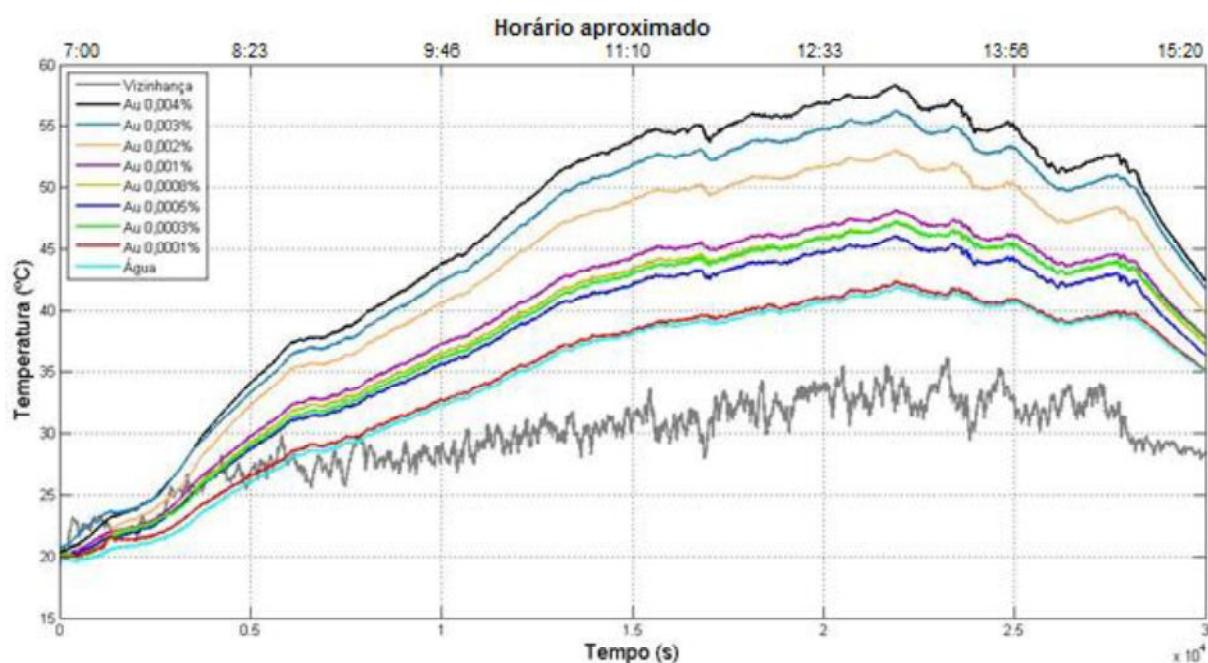


Figura 4.4 – Perfis de temperatura dos nanofluidos de ouro em água e do fluido base testados no dia 18/5/2016.

No último dia de teste com os nanofluidos de ouro, os resultados apresentados na Fig. 4.5 demonstram várias incoerências, entre elas, o resultado inferior da amostra de nanofluido de menor concentração ($\Phi_v = 0,0001\%$) em relação à água.

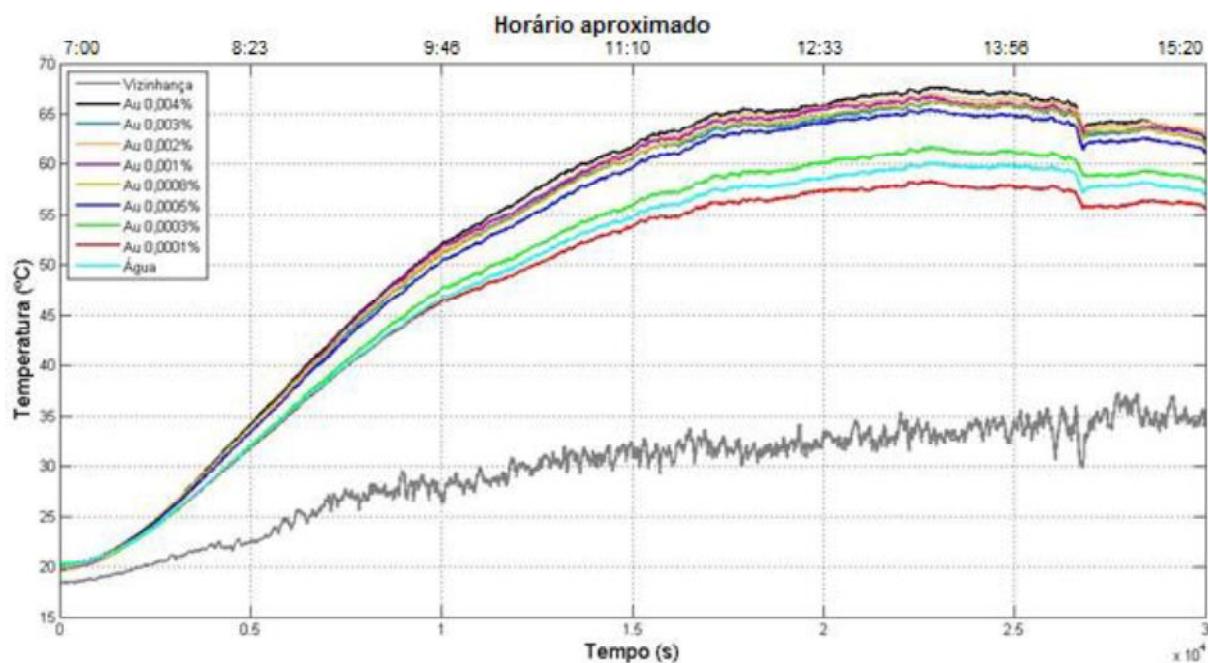


Figura 4.5 – Perfis de temperatura dos nanofluidos de ouro em água e do fluido base testados no dia 22/5/2016.

Ao final de cinco dias de teste foi possível identificar aglomerações no fundo e nas paredes dos recipientes e alterações na coloração das amostras como ilustram as Figs. 4.6 e 4.7, respectivamente. O agrupamento das partículas e a aderência delas às paredes foi fator preponderante sobre os resultados obtidos para os nanofluidos de ouro. O comportamento observado no perfil de temperatura do último dia de teste poderia ser explicado pela aderência das nanopartículas pois, tendo sido criada uma camada de partículas de ouro na superfície do acrílico, o fenômeno de conversão foto-térmica deixa de ser volumétrico e torna-se superficial, concentrado na camada mais externa, onde ocorre a maior perda de calor para o ambiente por meio da convecção.



Figura 4.6 – Fotos das aglomerações (a) no fundo e (b) nas paredes dos recipientes.

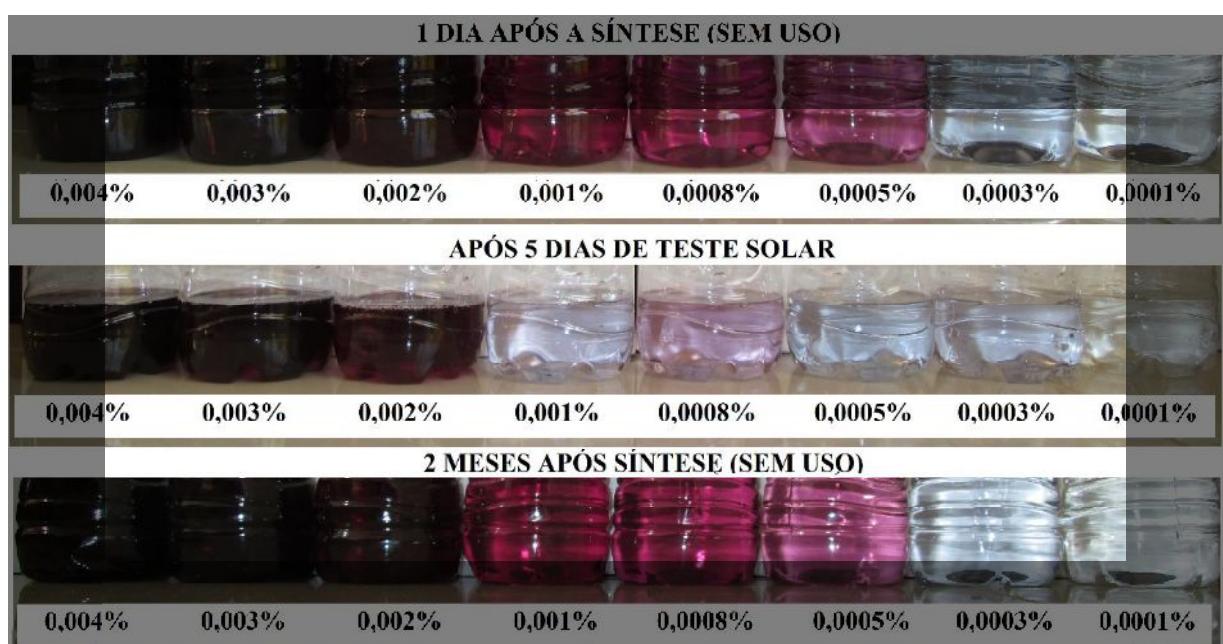


Figura 4.7 – Fotos comparativas das amostras sem uso, um dia e 2 meses após a síntese, e após cinco dias de teste.

Nanofluidos de nanotubos de carbono em água

Os cinco dias de teste com nanofluidos de nanotubos de carbono em água apresentaram resultados semelhantes, razão pela qual serão aqui apresentados apenas os gráficos do dia 28, sob condições de céu parcialmente nublado, e do dia 30, sob condições de céu claro, sendo os demais apresentados no Apêndice D. As Figs. 4.8 à 4.11 apresentam os perfis de temperatura desses dois dias de testes e, para uma melhor visualização dos dados, cada dia de teste foi separado em duas faixas de concentração volumétrica, uma variando de 0,0001% a 0,002% e outra de 0,002% a 0,03%.

As Figs. 4.8 e 4.9 ilustram os resultados para um dia de teste com céu parcialmente nublado. Nota-se que a adição de nanopartículas ao fluido base produz efeitos de aumento da temperatura máxima alcançada e taxa de aquecimento para os nanofluidos estudados, no entanto, a tendência de aumento diretamente proporcional à concentração se mantém até 0,001%, não sofrendo variação significativa para as concentrações de 0,002% e superiores.

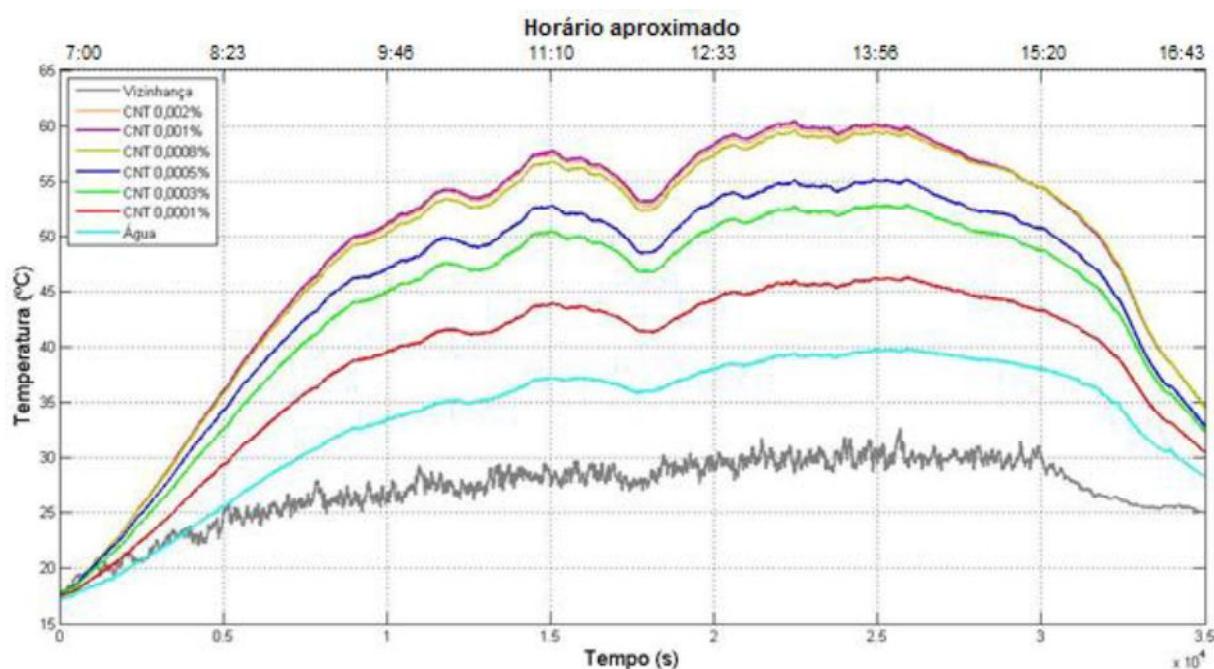


Figura 4.8 – Perfis de temperatura dos nanofluidos de nanotubos de carbono em água (0,0001% a 0,002%) e do fluido base testados no dia 28/5/2016.

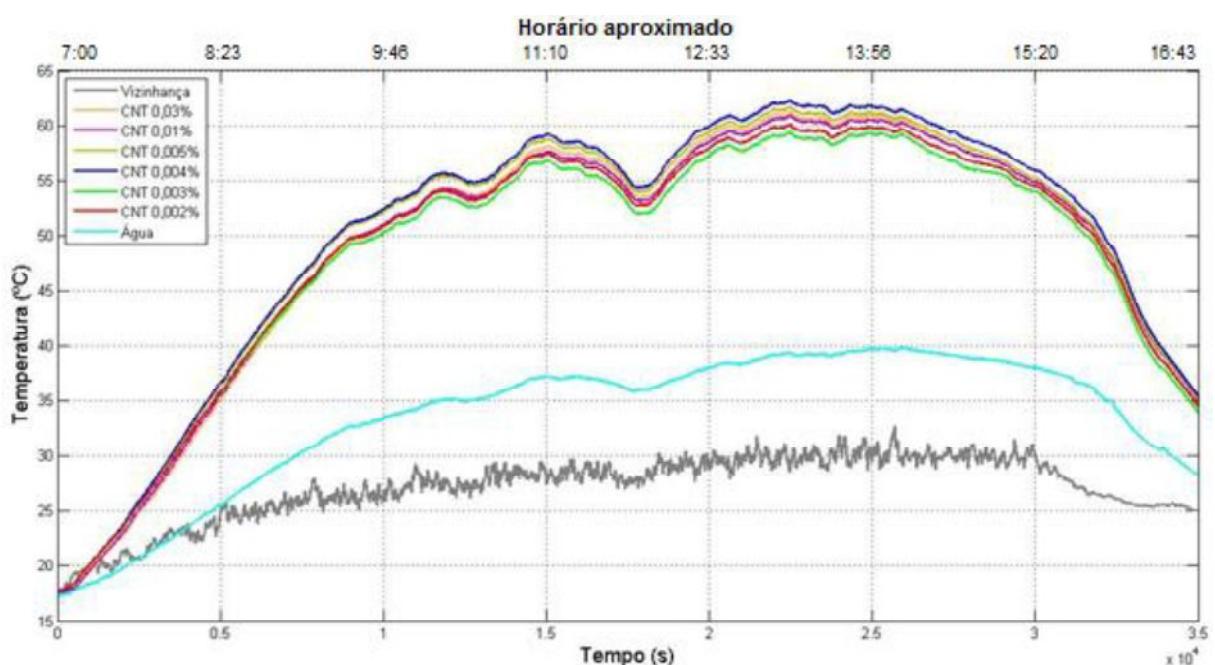


Figura 4.9 – Perfis de temperatura dos nanofluidos de nanotubos de carbono em água (0,002% a 0,03%) e do fluido base testados no dia 28/5/2016.

O comportamento praticamente indistinto apresentado pelas altas concentrações (0,002% a 0,03%) na Fig 4.9 sugere que a adição de nanopartículas à água possui um limite, uma concentração a partir da qual não se nota ganhos significativos na conversão foto-térmica e que torna anti-econômico a aplicação de concentrações superiores.

A seguir, os resultados ilustrados pelas Figs. 4.10 e 4.11 para um dia de céu claro se assemelham à tendência apresentada anteriormente pelos nanofluidos de nanotubos de carbono em água sob condições climáticas distintas. No entanto, a ausência de nuvens nesse dia de teste conferiu aos perfis de temperatura aumentos mais estáveis, sem declínios intermediários e com uma temperatura máxima ligeiramente superior ao do dia com presença de nuvens. Nota-se a partir da análise visual dos perfis de temperatura que, assim como no caso dos nanofluidos de ouro em água os primeiros 5000 segundos de teste são marcados pela semelhança a uma curva exponencial e posteriormente a uma parábola. Os gráficos demonstram novamente a existência de uma concentração limite, sendo possível inferir que, para o nanofluido em questão, a concentração volumétrica limite seria em torno de 0,001%.

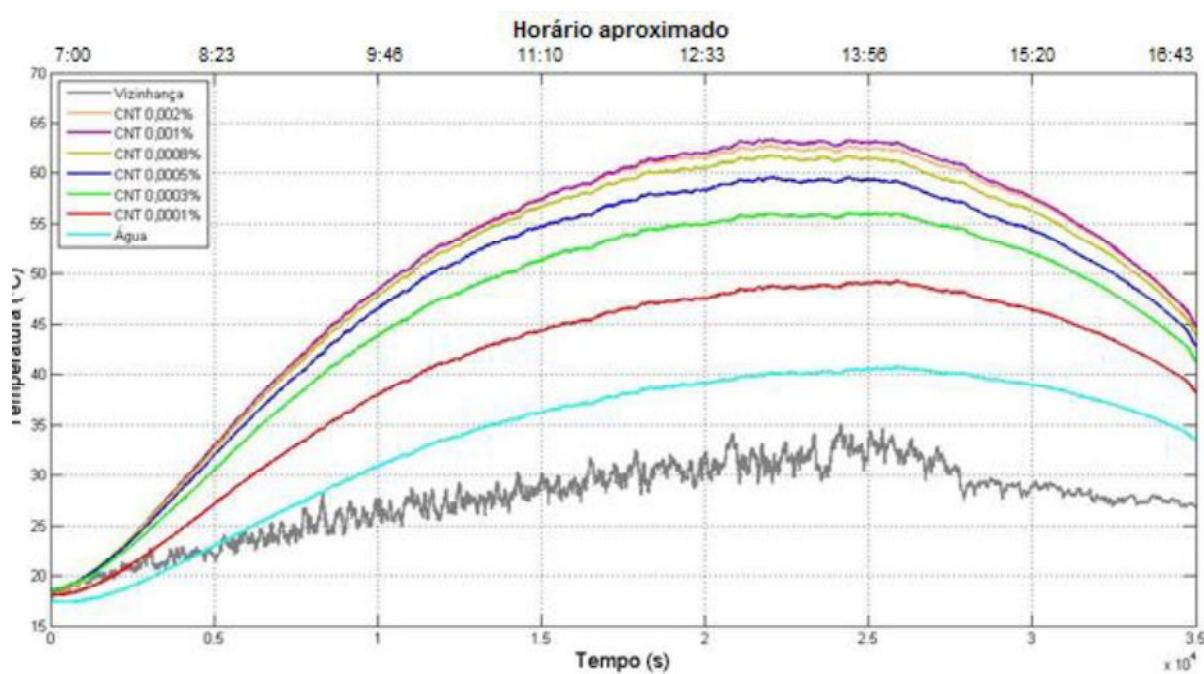


Figura 4.10 – Perfis de temperatura dos nanofluidos de nanotubos de carbono em água (0,0001% a 0,002%) e do fluido base testados no dia 30/5/2016.

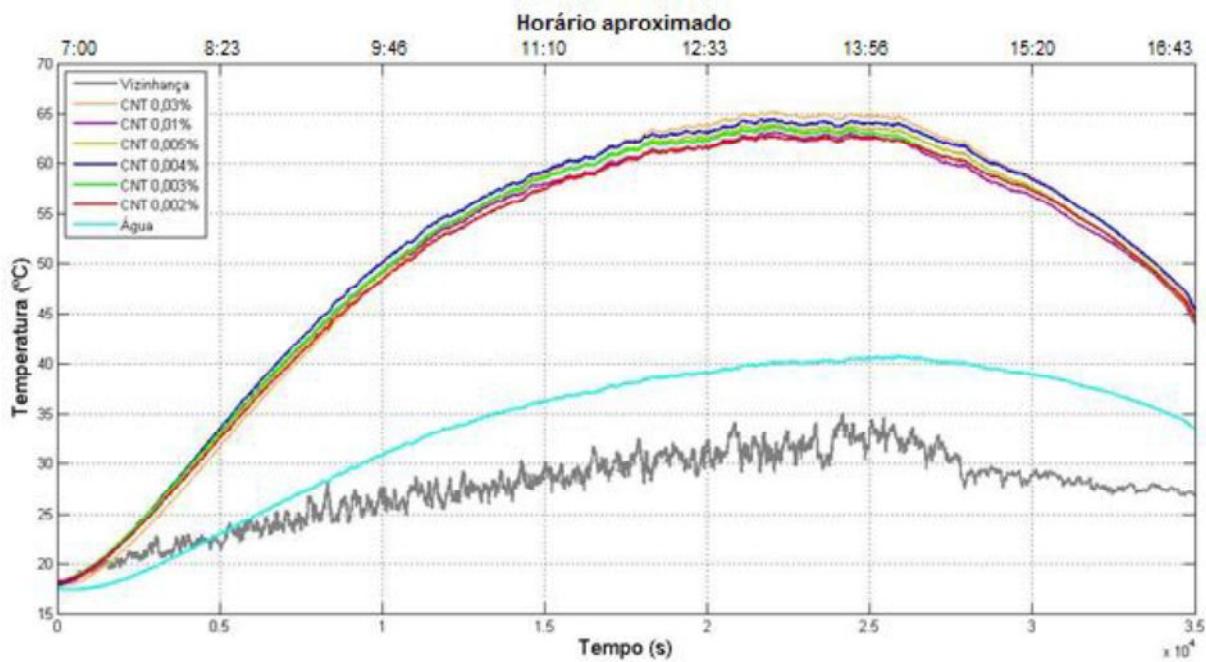


Figura 4.11 – Perfis de temperatura dos nanofluidos de nanotubos de carbono em água (0,002% a 0,03%) e do fluido base testados no dia 30/5/2016.

4.3. Energia total armazenada na fase de aquecimento

Para o cálculo da energia total armazenada na fase de aquecimento foram determinados os pontos de máxima e mínima temperatura, calculadas as máximas variações de

temperatura e, em seguida, o calor referente a essas variações. Os resultados apresentados nesta seção correspondem aos dois dias mais promissores de teste com nanofluidos de ouro (dias 6 e 7 /5) e aos dois dias de teste com nanofluidos de nanotubos de carbono cujos perfis de temperatura foram apresentados na seção anterior (dias 28 e 30/5).

Nanofluidos de ouro em água

A Tab. 4.3 apresenta os valores de temperatura mínima (T_{\min}) e máxima (T_{\max}) experimentada por cada um dos fluidos testados no primeiro dia de testes com nanofluidos de ouro, a máxima variação de temperatura (ΔT_{\max}) e o calor referente a essa variação (Q_{Total}). Observa-se que o aumento na quantidade de nanopartículas proporciona um ganho maior de calor ao longo do período de aquecimento, tendo a concentração volumétrica de 0,004% apresentado o melhor resultado, cerca de 65% maior que o obtido pelo fluido base, e a concentração de 0,0001% o ganho menos expressivo, apenas 4% maior que o da água.

Tabela 4.3 – Relação de temperaturas máxima e mínima, máxima variação de temperatura e energia total armazenada para os nanofluidos de ouro no dia 6/5/2016.

ϕ_v (%)	T_{\min} (°C)	T_{\max} (°C)	ΔT_{\max} (°C)	Q_{Total} (kJ)
0,004	22,3	55,4	33,1	13,844
0,003	22,0	54,4	32,4	13,525
0,002	22,0	52,1	30,2	12,611
0,001	21,8	48,8	27,0	11,272
0,0008	21,9	47,3	25,4	10,614
0,0005	21,9	45,5	23,6	9,862
0,0003	21,5	44,3	22,8	9,548
0,0001	21,0	42,0	20,9	8,752
0 (Água)	21,0	41,1	20,0	8,380

A Fig. 4.12 apresenta de forma gráfica os valores para o calor armazenado durante a fase de aquecimento dos fluidos estudados em função da concentração volumétrica de nanopartículas presente em cada um, sendo o ponto de coordenada zero referente à água. Nota-se um comportamento aproximadamente parabólico para essa relação, sendo quase linear nas concentrações até 0,0001%.

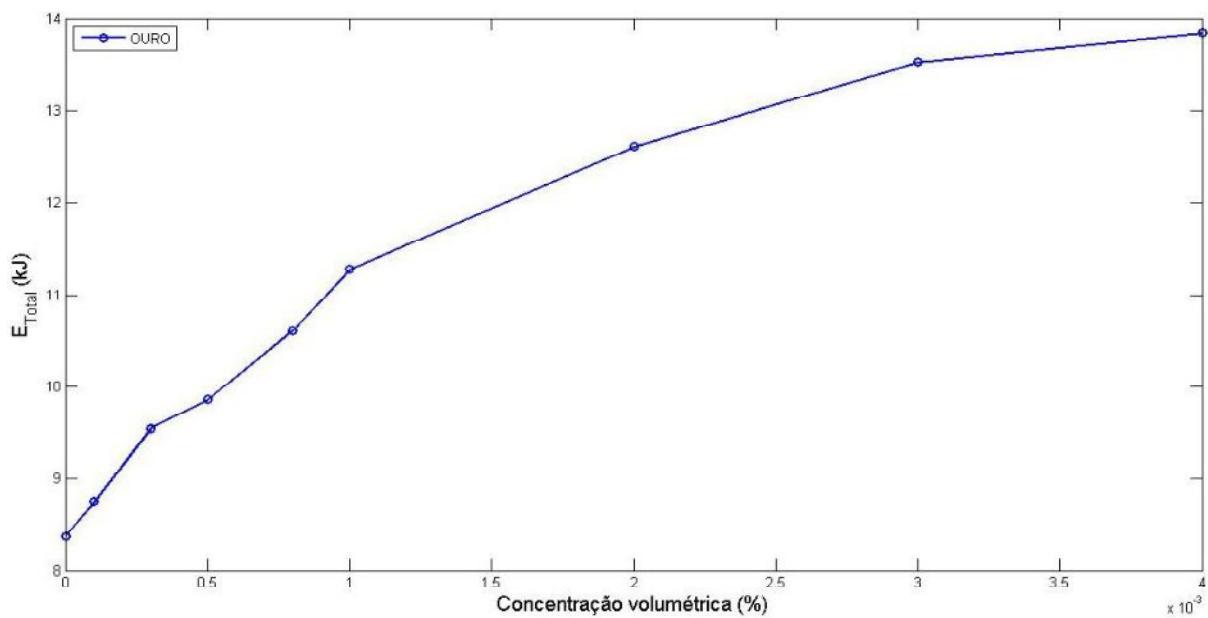


Figura 4.12 – Resultados da energia total armazenada na fase de aquecimento em função da concentração volumétrica de nanopartículas de ouro presente no fluido base para o dia 6/5/2016.

A Tab. 4.4 apresenta os resultados do segundo dia de testes com nanofluidos de ouro para os mesmos parâmetros da Tab. 4.3. Observa-se que o comportamento de ganho maior de calor ao longo do período de aquecimento proporcional ao aumento na quantidade de nanopartículas se manteve e, uma vez mais, a concentração volumétrica de 0,004% apresentou o melhor resultado, cerca de 75% maior que o obtido pelo fluido base, enquanto o nanofluido menos concentrado, apenas 4% maior que o da água.

Tabela 4.4 – Relação de temperaturas máxima e mínima, máxima variação de temperatura e energia total armazenada para os nanofluidos de ouro no dia 7/5/2016.

ϕ_v (%)	T_{\min} (°C)	T_{\max} (°C)	ΔT_{\max} (°C)	Q_{Total} (kJ)
0,004	20,9	59,4	38,5	16,078
0,003	21,3	56,5	35,2	14,715
0,002	21,4	54,3	32,8	13,723
0,001	21,7	52,9	31,1	13,016
0,0008	22,0	50,5	28,5	11,931
0,0005	21,9	48,9	27,0	11,283
0,0003	21,9	47,6	25,8	10,773
0,0001	21,6	44,4	22,8	9,547
0 (Água)	21,1	43,0	21,9	9,167

Na representação gráfica dos dados de energia total armazenada em função da concentração volumétrica de nanopartículas para o dia 7/5/2016, Fig. 4.13, nota-se um

comportamento diferente do primeiro dia de testes, o que poderia indicar que a concentração das amostras havia sofrido alteração. No entanto, ainda era possível identificar a concentração de 0,001% como um ponto de mudança de comportamento da curva.

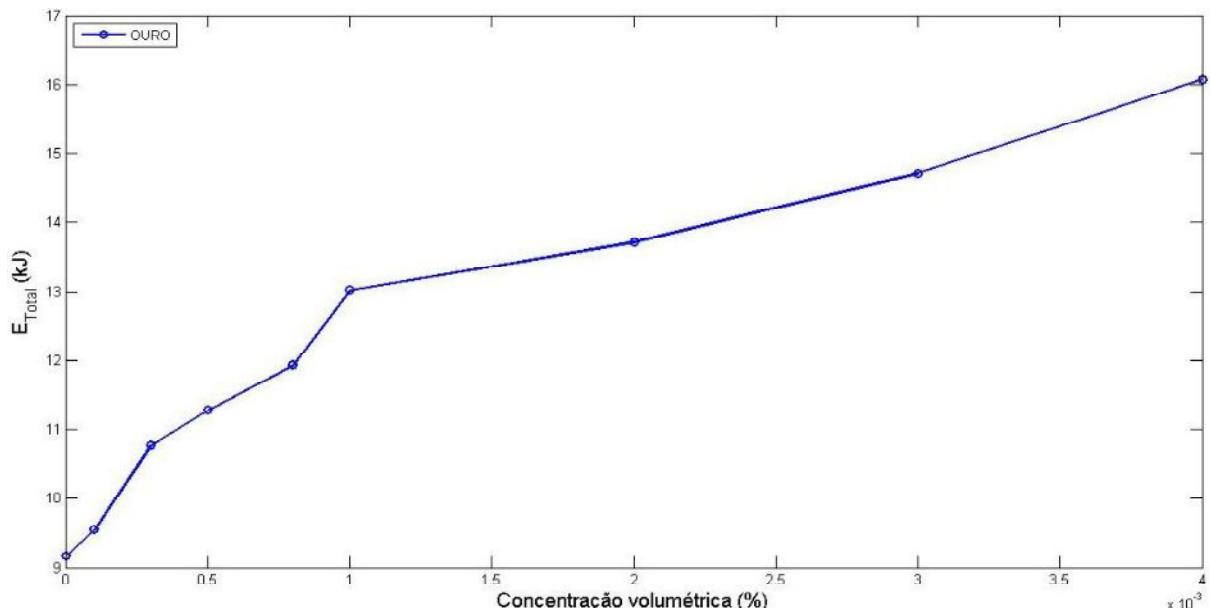


Figura 4.13 – Resultados da energia total armazenada na fase de aquecimento em função da concentração volumétrica de nanopartículas de ouro presente no fluido base para o dia 7/5/2016.

Nanofluidos de nanotubos de carbono em água

A Tab. 4.5 apresenta os valores de temperatura mínima ($T_{\text{mín}}$) e máxima ($T_{\text{máx}}$), máxima variação de temperatura ($\Delta T_{\text{máx}}$) e o calor referente a essa variação (Q_{Total}) para os nanofluidos de nanotubos de carbono em água e seu fluido base em um dia de céu parcialmente nublado. Observa-se que todos os nanofluidos apresentaram desempenho superior ao da água. O menor incremento foi observado na concentração de 0,0001%, com um resultado 27% superior ao do fluido base. Para a concentração 0,001% obteve-se um ganho 92% superior ao da água e a de 0,004% apresentou-se como a de melhor resultado com um ganho de calor 100% superior ao obtido pelo fluido base.

Tabela 4.5 – Relação de temperaturas máxima e mínima, máxima variação de temperatura e energia total armazenada para os nanofluidos de nanotubos de carbono no dia 28/5/2016, sob condições de céu parcialmente nublado.

ϕ_v (%)	$T_{\text{mín}}$ (°C)	$T_{\text{máx}}$ (°C)	$\Delta T_{\text{máx}}$ (°C)	Q_{Total} (kJ)
0,03	17,5	61,0	43,5	18,187

0,01	17,6	60,6	43,0	17,981
0,005	17,7	61,4	43,7	18,275
0,004	17,7	62,0	44,4	18,543
0,003	17,8	59,1	41,4	17,292
0,002	17,8	59,9	42,1	17,583
0,001	17,8	60,2	42,4	17,714
0,0008	17,9	59,3	41,5	17,335
0,0005	17,9	54,8	36,9	15,437
0,0003	17,9	52,5	34,6	14,463
0,0001	17,6	45,8	28,1	11,761
0(Água)	17,2	39,3	22,0	9,209

Observa-se através da Fig. 4.14 que para as concentrações até 0,001% o aumento do volume de nanopartículas causa um incremento aproximadamente linear na energia total armazenada, havendo decréscimos e uma estabilização a partir da concentração de 0,002%. Nota-se ainda que, apesar do ponto de máximo ganho ocorrer na concentração de 0,004%, a diferença entre o melhor resultado e o obtido pela concentração de 0,001% é pequena (cerca de 4%) e o gasto de nanopartículas é muito superior (quatro vezes maior), o que não justificaria o emprego de concentrações acima de 0,001%.

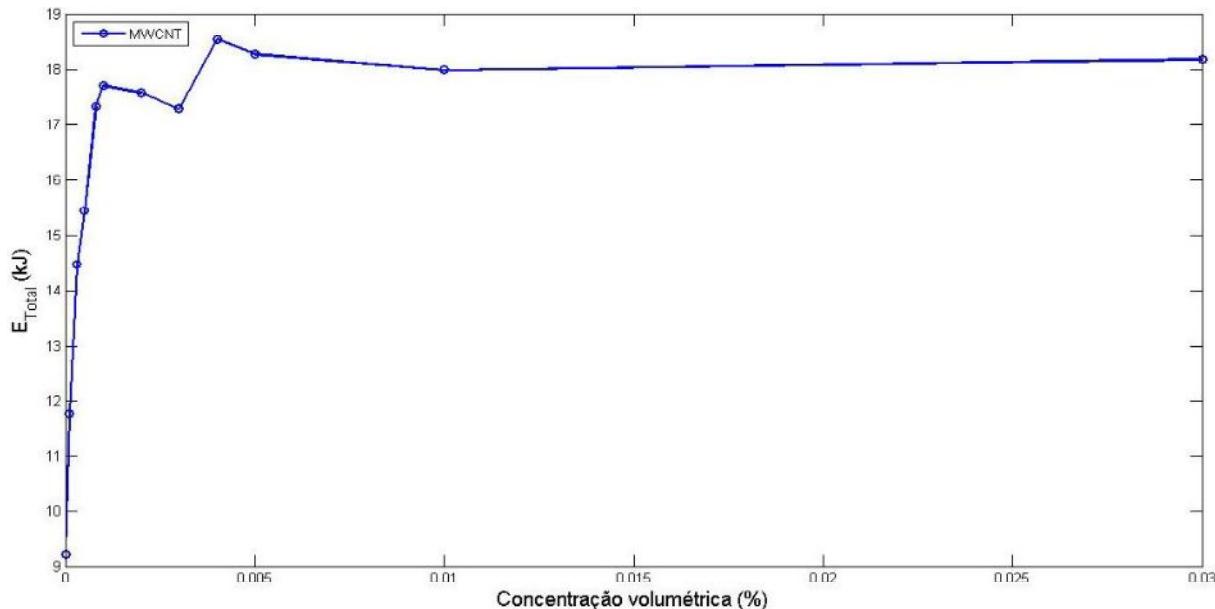


Figura 4.14 – Resultados da energia total armazenada na fase de aquecimento em função da concentração volumétrica de nanopartículas de nanotubos de carbono presente no fluido base para o dia 28/5/2016, sob condições de céu parcialmente nublado.

A Tab. 4.6 apresenta os mesmos parâmetros apresentados na Tab. 4.5, sendo os resultados obtidos pelos nanofluidos de nanotubos de carbono em água e seu fluido base sob condições de céu claro. A Fig. 4.15 ilustra esses dados e confirma a tendência apresentada anteriormente pelo dia com condições de céu parcialmente nublado, onde a concentração de

0,001% apresentou resultado bem superior ao do fluido base (97% de incremento) e mais vantajoso em termos de gastos com nanopartículas que as concentrações superiores.

Tabela 4.6 – Relação de temperaturas máxima e mínima, máxima variação de temperatura e energia total armazenada para os nanofluidos de nanotubos de carbono no dia 30/5/2016, sob condições de céu claro.

ϕ_v (%)	T_{\min} (°C)	T_{\max} (°C)	ΔT_{\max} (°C)	Q_{Total} (kJ)
0,03	17,7	65,2	47,6	19,886
0,01	17,9	63,2	45,3	18,931
0,005	18,0	64,0	46,0	19,211
0,004	17,8	64,4	46,6	19,488
0,003	18,1	63,7	45,6	19,069
0,002	18,1	62,8	44,7	18,664
0,001	18,2	63,3	45,1	18,857
0,0008	18,3	61,8	43,5	18,168
0,0005	18,4	59,6	41,2	17,202
0,0003	18,4	56,0	37,6	15,721
0,0001	18,1	48,8	30,7	12,851
0(Água)	17,4	40,2	22,8	9,527

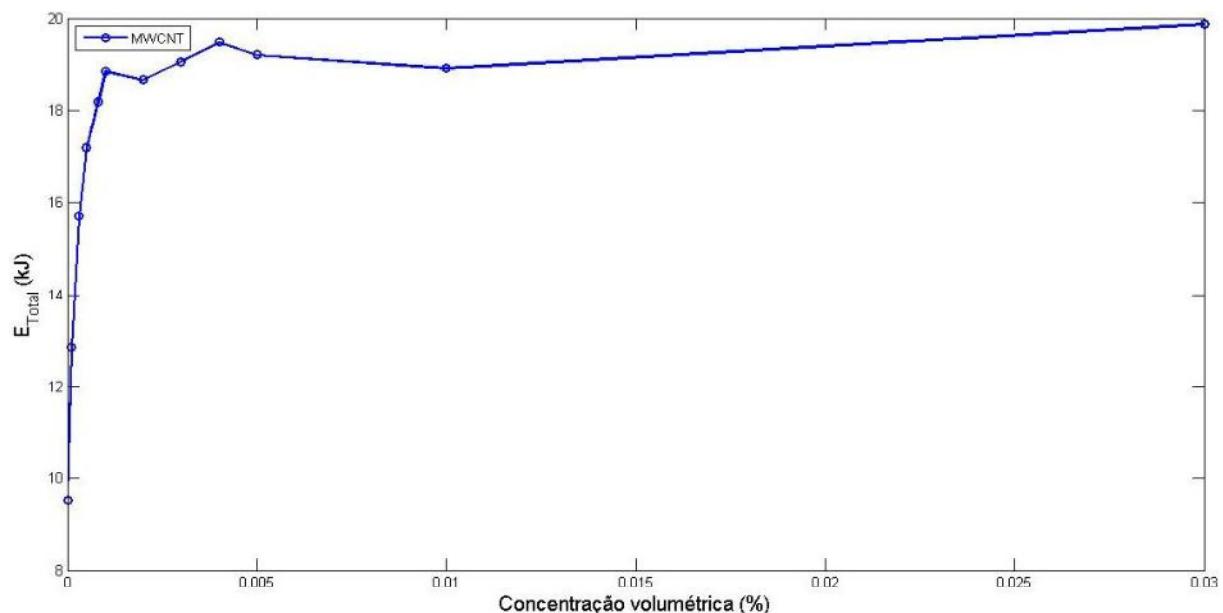


Figura 4.15 – Resultados da energia total armazenada na fase de aquecimento em função da concentração volumétrica de nanopartículas de nanotubos de carbono presente no fluido base para o dia 30/5/2016, sob condições de céu claro.

4.4. Cálculo da taxa de variação da temperatura

Conforme mencionado no capítulo anterior, a taxa de variação da temperatura foi calculada em intervalos de 300 segundos para os primeiros 15000 segundos de teste, período

que comprehende apenas a fase de aquecimento dos fluidos. Os resultados apresentados nesta seção correspondem aos dois dias mais promissores de teste com nanofluidos de ouro (dias 6 e 7/5) e aos dois dias de teste com nanofluidos de nanotubos de carbono selecionados anteriormente sob diferentes condições climáticas (dias 28 e 30/5).

Nanofluidos de ouro em água

A Fig. 4.16 apresenta os resultados da taxa de variação da temperatura ao longo do tempo para diferentes concentrações de nanofluidos de ouro em água obtidos para o teste do dia 6/5/2016 e a Fig. 4.17 para o teste do dia 7/5/2016. Nota-se que os resultados apresentados pelas diferentes concentrações de nanofluido são superiores aos da água e que esses aumentam com o acréscimo de nanopartículas ao fluido base. Observa-se ainda que as taxas de variação da temperatura dos fluidos aumentam até certo ponto e depois sofrem um decréscimo, o que corrobora o indício visual apresentado pelos perfis de temperatura de que há uma mudança do formato da curva que inicialmente se assemelha a um crescimento exponencial e, posteriormente, ao de uma parábola. Em alguns pontos o nanofluido mais concentrado (0,004% em volume) apresentou resultados de taxa de variação duas vezes maior que os do fluido base e o de concentração 0,001% cerca de 65% superior ao da água.

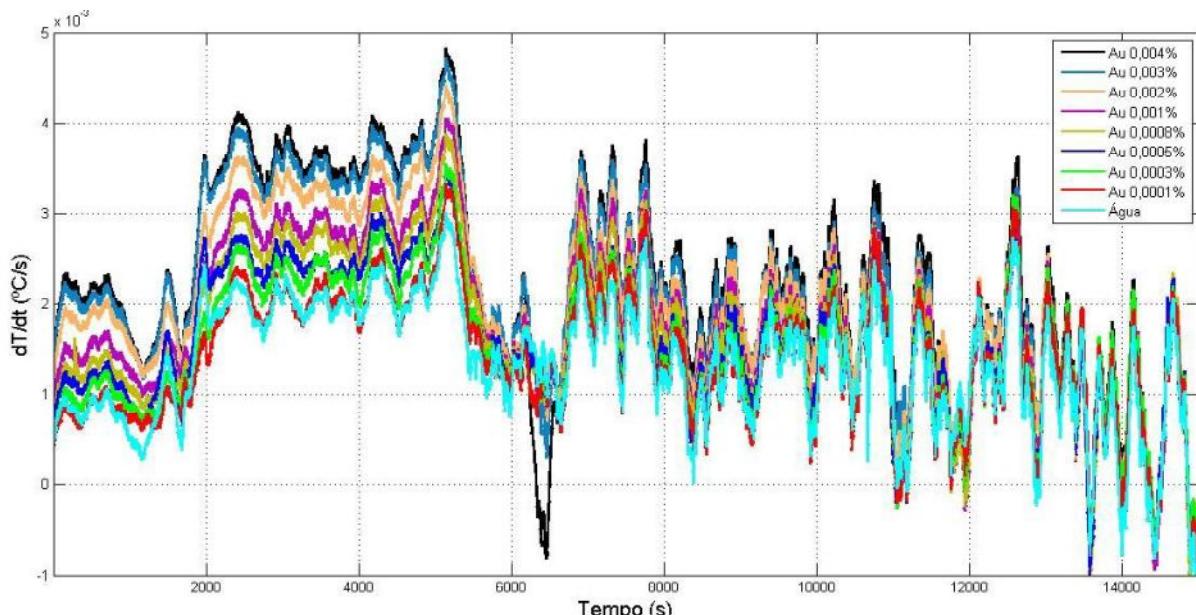


Figura 4.16 - Taxa de variação da temperatura para as diferentes concentrações de nanofluido de ouro em água e do fluido base testados no dia 6/5/2016.

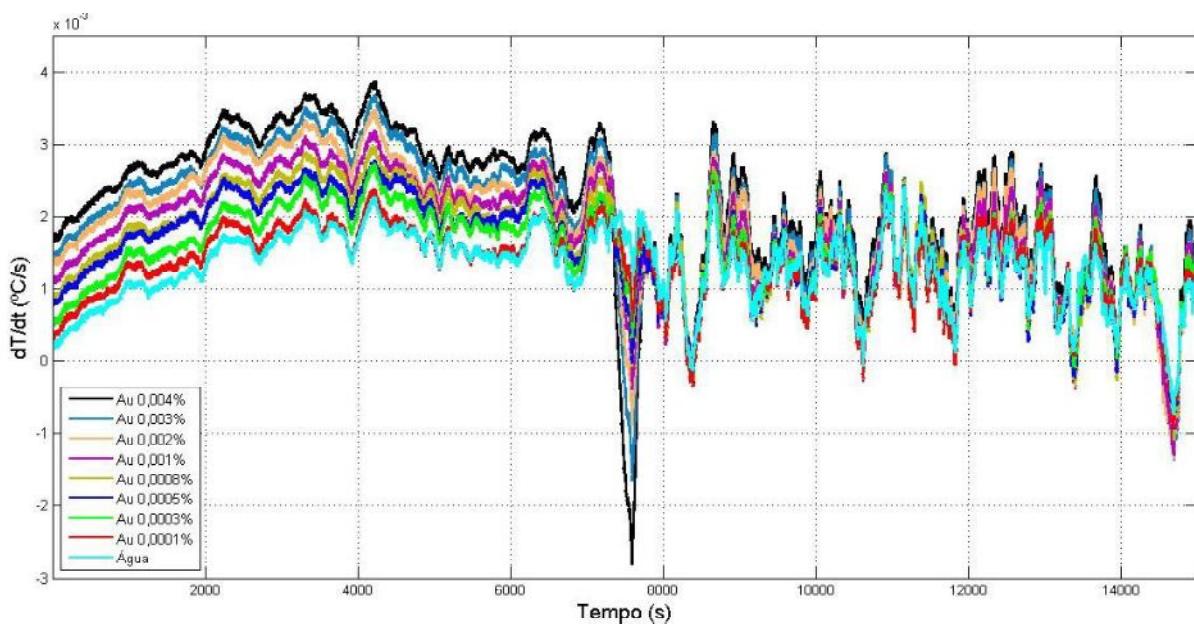


Figura 4.17 - Taxa de variação da temperatura para as diferentes concentrações de nanofluido de ouro em água e do fluido base testados no dia 7/5/2016.

Nanofluidos de nanotubos de carbono em água

Os resultados do cálculo da taxa de variação da temperatura dos fluidos nos dias de teste com nanofluidos de nanotubos de carbono em água foram subdivididos em faixas de concentração para melhor visualização dos dados e suas tendências. Assim sendo, as Figs. 4.18 e 4.19 apresentam os dados referentes ao dia 28/5/2016, sob condições de céu parcialmente nublado, para os nanofluidos de menor (0,0001% a 0,002%) e maior (0,002% a 0,03%) concentração, respectivamente. Nota-se que a taxa de variação da temperatura é superior à da água para todas as concentrações analisadas, estabelecendo-se uma tendência de aumento com o acréscimo de nanopartículas apenas até a concentração de 0,001% que obteve resultados entre duas até seis vezes superior ao do fluido base, não havendo mudanças significativas para as concentrações mais altas. Observa-se novamente um ponto de máxima taxa de variação por volta dos 5000 segundos de teste e um decréscimo posterior, resultado da mudança no comportamento dos perfis de temperatura apresentados pelos fluidos testados.

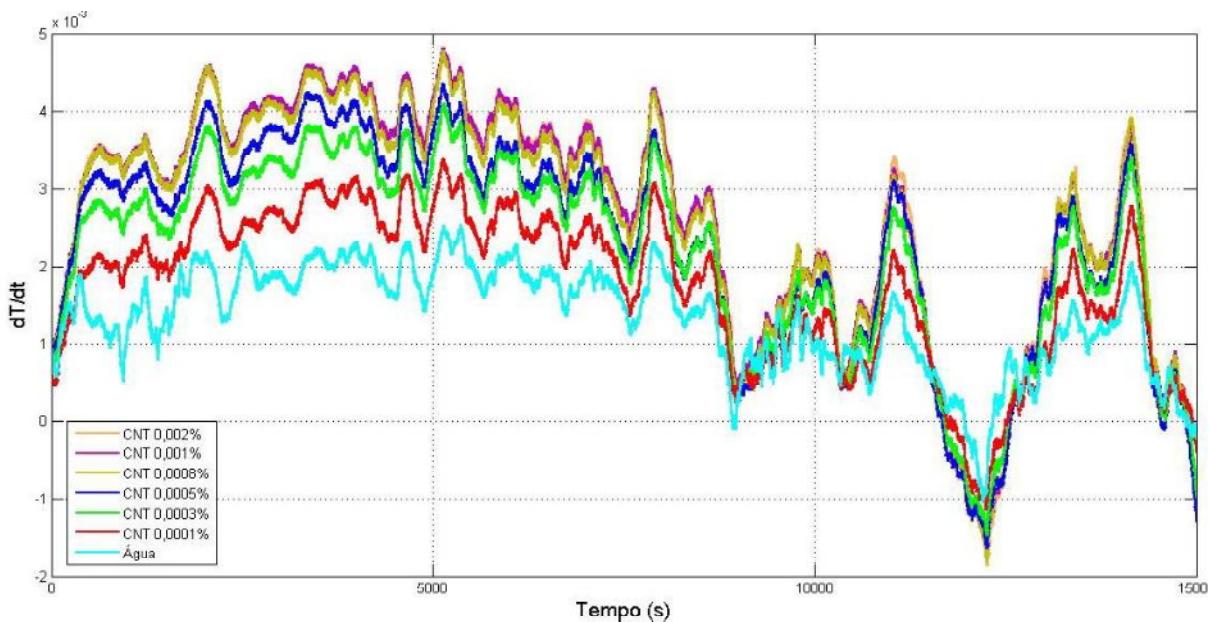


Figura 4.18 - Taxa de variação da temperatura para os nanofluidos de nanotubos de carbono em água (0,0001% a 0,002%) e do fluido base testados no dia 28/5/2016.

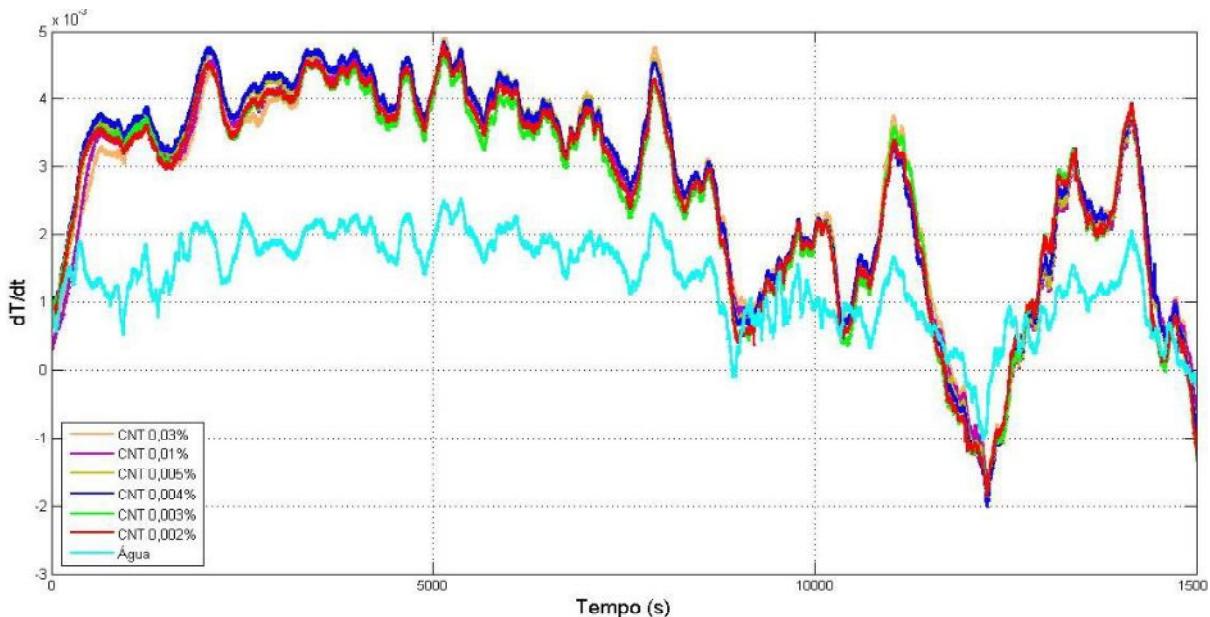


Figura 4.19 - Taxa de variação da temperatura para os nanofluidos de nanotubos de carbono em água (0,002% a 0,03%) e do fluido base testados no dia 28/5/2016.

A seguir, as Figs. 4.20 e 4.21 apresentam os dados referentes ao dia 30/5/2016 sob condições de céu claro para os nanofluidos de menor (0,0001% a 0,002%) e maior (0,002% a 0,03%) concentração, respectivamente. A taxa de variação da temperatura foi superior à da água para todas as concentrações analisadas, mantendo-se a tendência de aumento com o acréscimo de nanopartículas até 0,001%. Apesar das condições de céu claro a taxa de

variação da temperatura teve pontos de máximo inferiores ao do dia com nuvens, o que poderia ser explicado pelas condições de vento e temperatura ambiente em cada dia de teste.

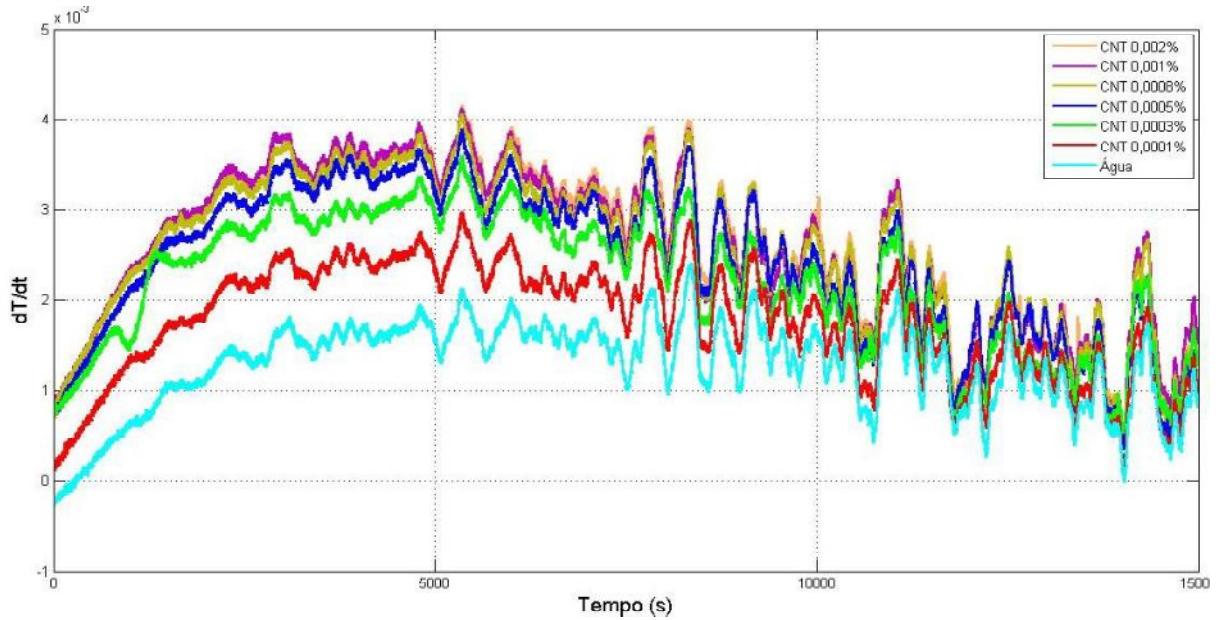


Figura 4.20 - Taxa de variação da temperatura para os nanofluidos de nanotubos de carbono em água (0,0001% a 0,002%) e do fluido base testados no dia 30/5/2016.

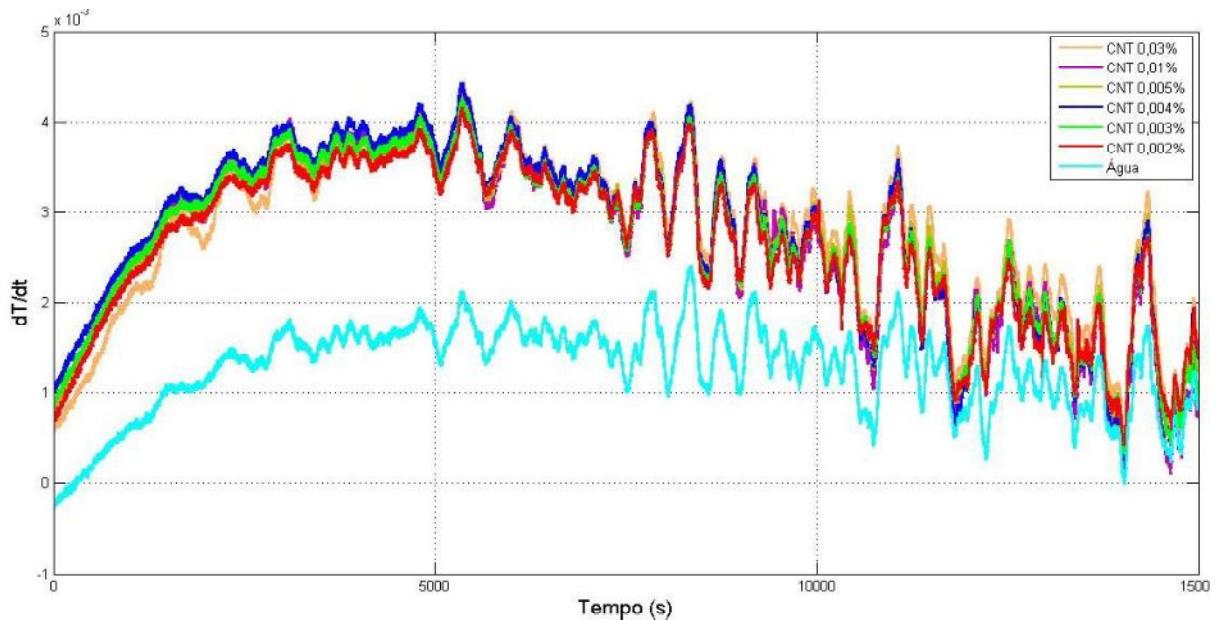


Figura 4.21 - Taxa de variação da temperatura para os nanofluidos de nanotubos de carbono em água (0,002% a 0,03%) e do fluido base testados no dia 30/5/2016.

4.5. Taxa de absorção específica “SAR”

Os resultados obtidos para o cálculo da taxa de absorção específica (“SAR”) dos nanofluidos para os diferentes dias ensaiados foi realizado tendo por base os dados previamente calculados de taxa de variação da temperatura dos primeiros 15000 segundos de teste. Os resultados apresentados nesta seção representam os dois dias mais promissores de teste com nanofluidos de ouro (dias 6 e 7/5) e os dois dias de teste com nanofluidos de nanotubos de carbono, selecionados anteriormente sob diferentes condições climáticas (dias 28 e 30/5).

Nanofluidos de ouro em água

As Figs. 4.22 e 4.23 apresentam os valores do “SAR” para os nanofluidos de ouro em água para as diferentes concentrações volumétricas testadas nos dias 6 e 7/5/2016. Nota-se que o nanofluido de menor concentração (0,0001% em volume) apresentou os maiores valores de “SAR” e o de concentração mais alta (0,004% em volume) o menor resultado.

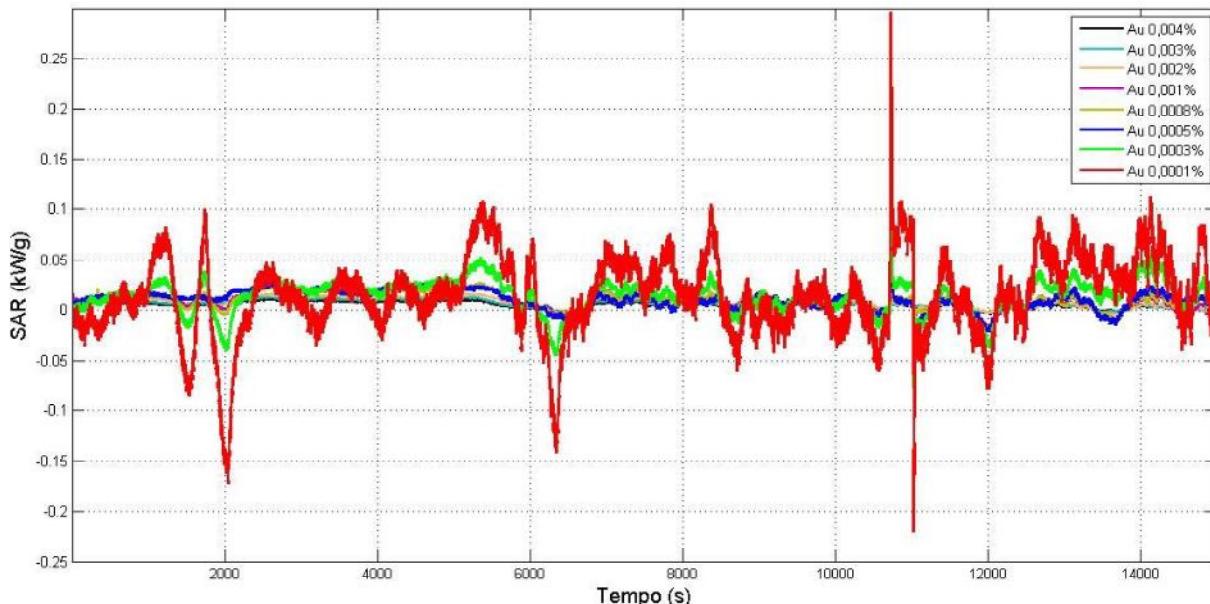


Figura 4.22 - Taxa de absorção específica (“SAR”) para os nanofluidos de ouro em água testados no dia 6/5/2016.

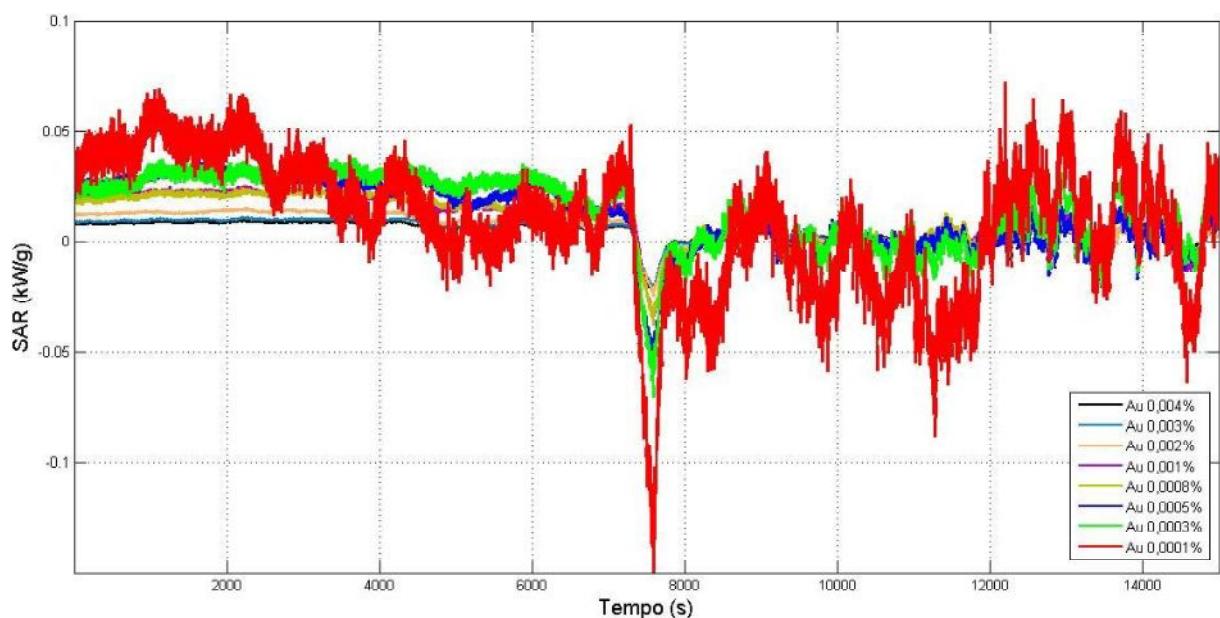


Figura 4.23 - Taxa de absorção específica (“SAR”) para os nanofluidos de ouro em água testados no dia 7/5/2016.

Conforme exposto anteriormente, o “SAR” é diretamente proporcional à diferença das taxas de variação da temperatura da água e do nanofluido e inversamente proporcional à massa de nanopartículas presentes no fluido ensaiado. Foi observado anteriormente que a taxa de variação da temperatura aumentava com a quantidade de nanopartículas, no entanto, esse aumento não ocorria na mesma proporção para as duas variáveis. Assim, o comportamento observado nos gráficos do “SAR” é uma consequência matemática da razão entre essas proporções. No entanto, ao se observar a ampliação de alguns instantes dos dias de teste, como o destacado na Fig. 4.24, nota-se um comportamento interessante dos nanofluidos com concentração 0,0005%, 0,0008% e 0,001%, que apresentaram resultados muito semelhantes para o parâmetro “SAR”, um indício de que, nessa faixa, a proporção de aumento da taxa de variação da temperatura equiparou-se ao do aumento na massa de nanopartículas.

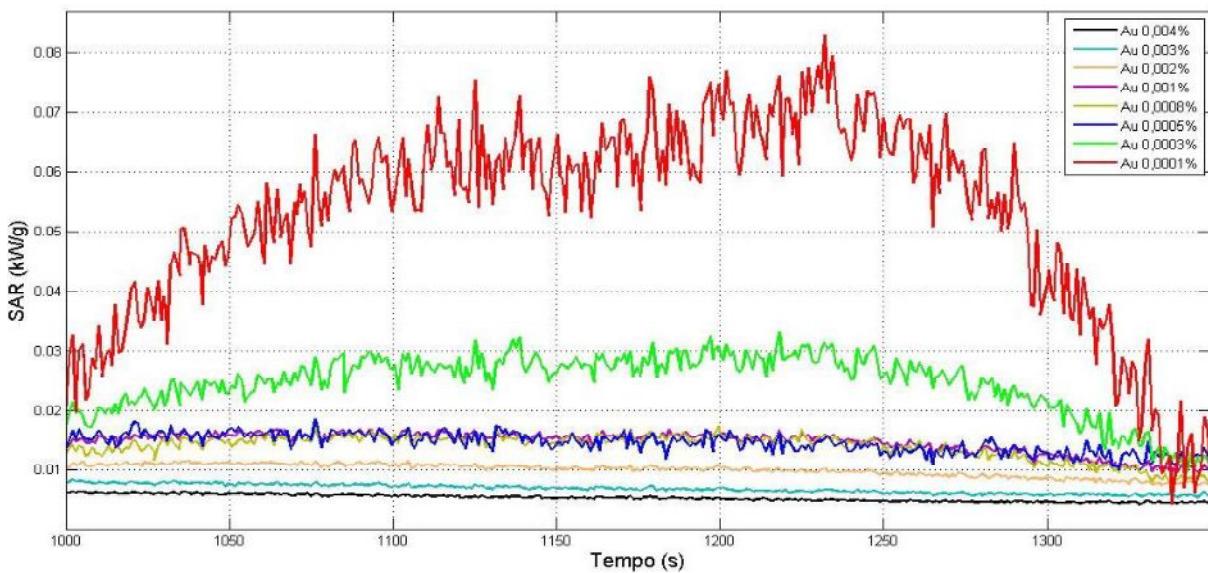


Figura 4.24 – Ampliação do gráfico da taxa de absorção específica (“SAR”) para os nanofluidos de ouro em água testados no dia 6/5/2016 no trecho de 1000 a 1350 segundos.

Uma maneira de visualizar a redução na eficiência de conversão fototérmica com o aumento do volume de nanopartículas dispersas no fluido base é obter os pontos de “SAR” máximo para cada amostra ao longo do período de testes e relacioná-los graficamente à concentração volumétrica de nanopartículas, como apresentado nas Figs. 4.25 e 4.26. Observa-se que com o aumento da concentração de nanopartículas há um decaimento exponencial no valor de “SAR”, que tende a uma estabilização para concentrações acima de 0,001%.

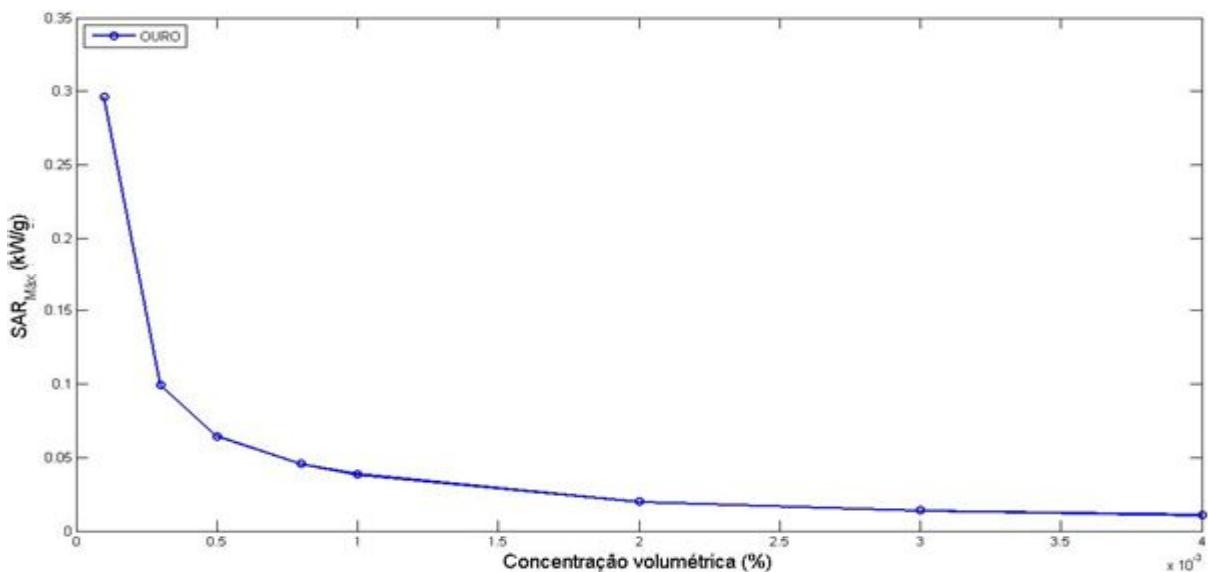


Figura 4.25 - Taxa de absorção específica (“SAR”) máxima em função da concentração volumétrica de nanopartículas de ouro no fluido base para os nanofluidos testados no dia 6/5/2016.

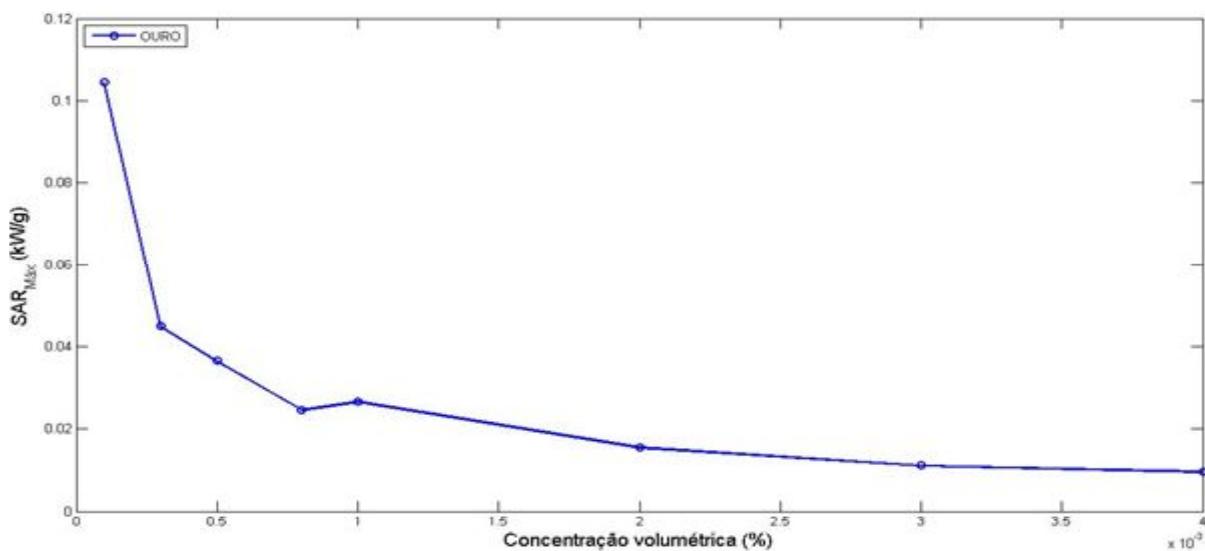


Figura 4.26 - Taxa de absorção específica (“SAR”) máxima em função da concentração volumétrica de nanopartículas de ouro no fluido base para os nanofluidos testados no dia 7/5/2016.

Nanofluidos de nanotubos de carbono em água

As Figs. 4.27 e 4.28 apresentam os valores do “SAR” para os nanofluidos de nanotubos de carbono em água para as diferentes concentrações volumétricas testadas nos dias 28 e 30/5/2016, sob condições de céu parcialmente nublado e céu claro, respectivamente. Nota-se que o nanofluido de menor concentração (0,0001% em volume) apresentou os maiores valores de “SAR” e o de concentração mais alta (0,03% em volume) os menores resultados.

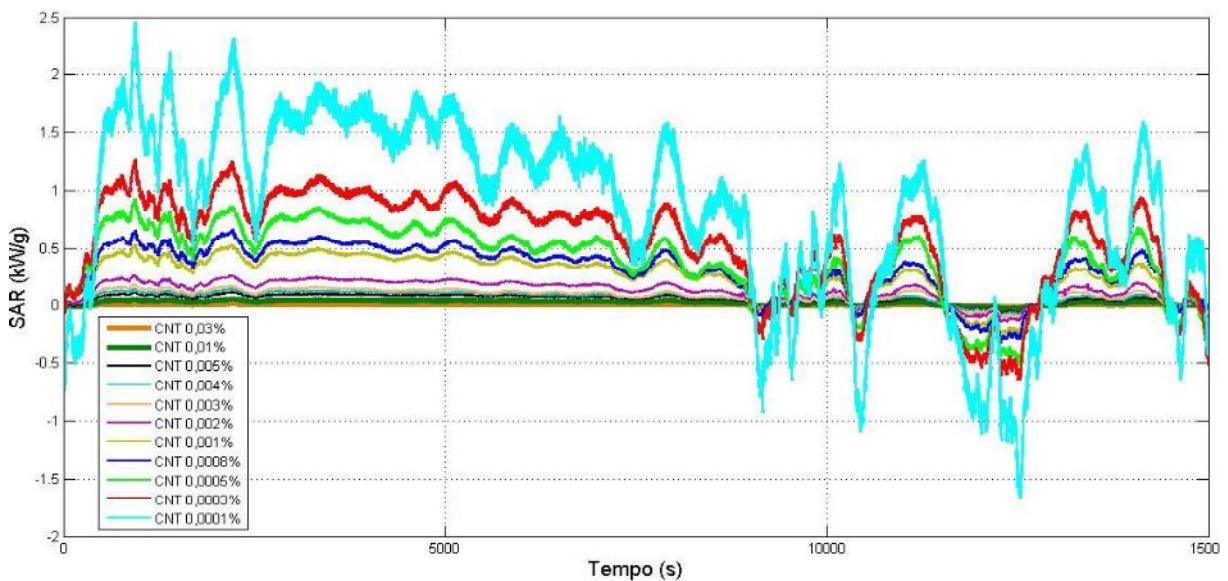


Figura 4.27 - Taxa de absorção específica (“SAR”) para os nanofluidos de nanotubos de carbono em água testados no dia 28/5/2016, sob condições de céu parcialmente nublado.

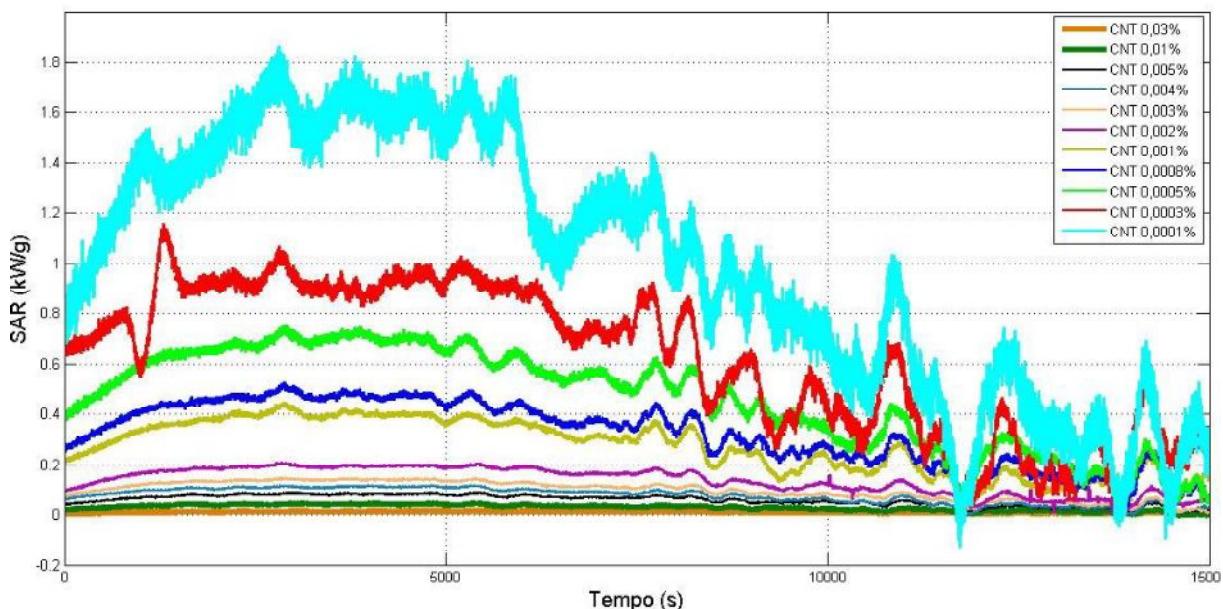


Figura 4.28 - Taxa de absorção específica (“SAR”) para os nanofluidos de nanotubos de carbono em água testados no dia 30/5/2016, sob condições de céu claro.

Observa-se que, assim como para os nanofluidos de ouro, o valor de “SAR” diminui com o aumento da concentração de nanopartículas. Essa tendência de redução em função da concentração volumétrica de nanopartículas pode ser observada através das Figs. 4.29 e 4.30. No entanto, comparando os resultados dessa relação aos obtidos pelas nanopartículas de ouro nota-se que a redução atinge uma estabilização após uma concentração mais alta, para valores superiores a 0,002% em volume.

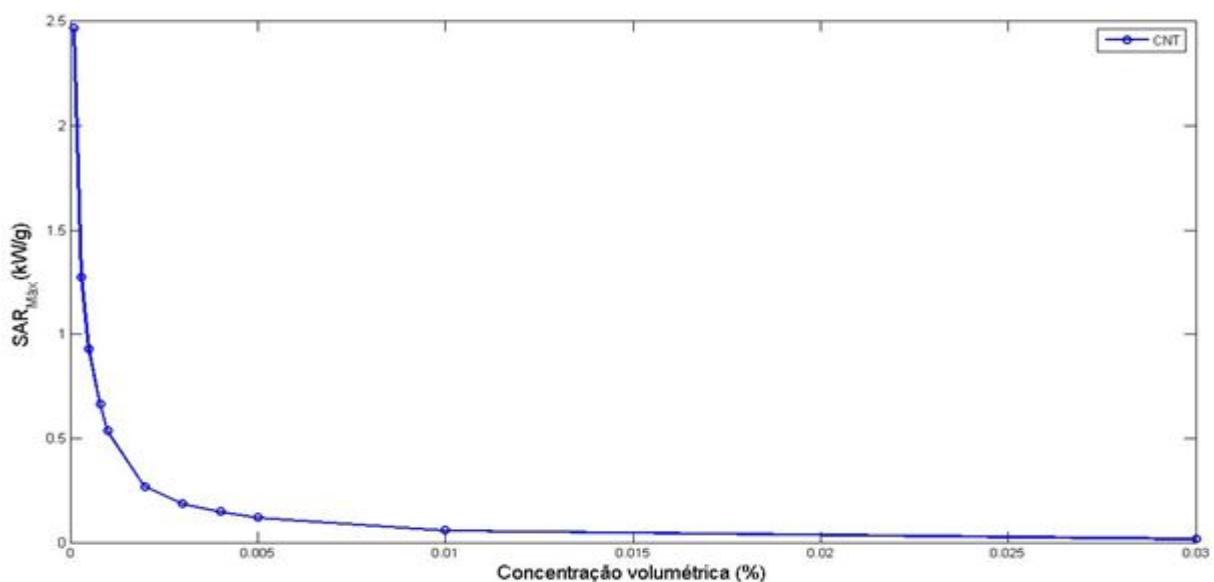


Figura 4.29 - Taxa de absorção específica (“SAR”) máxima em função da concentração volumétrica de nanotubos de carbono no fluido base para os nanofluidos testados no dia 28/5/2016, sob condições de céu parcialmente nublado.

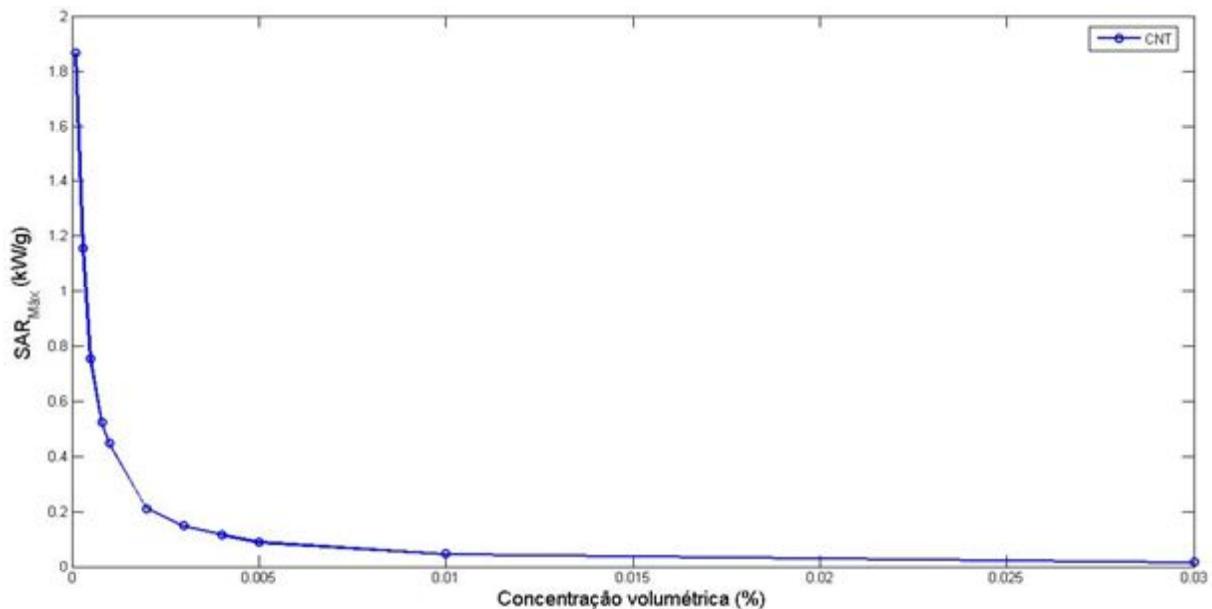


Figura 4.30 - Taxa de absorção específica (“SAR”) máxima em função da concentração volumétrica de nanotubos de carbono no fluido base para os nanofluidos testados no dia 30/5/2016, sob condições de céu claro.

O comportamento observado de diminuição do “SAR” com o aumento da concentração de nanopartículas no fluido base poderia ser explicado de duas maneiras. A primeira delas trata da possível formação de aglomerações, que causam um aumento apenas virtual na quantidade de partículas no fluido, considerando-se, ainda, que os aglomerados não se comportam de forma igual às nanopartículas isoladas e possuem área superficial reduzida. A segunda baseia-se na deposição de material nas paredes do coletor, que causaria uma diminuição na intensidade de radiação incidente no fluido e um aumento das perdas de calor, pois o fenômeno, antes volumétrico, passa a ocorrer primordialmente na superfície do acrílico, onde ocorre o maior volume de perdas para o ambiente.

4.6. Razão de energia armazenada “SER”

Os valores para a razão de energia armazenada (“SER”) foram calculados para os primeiros 25000 segundos de teste. Os resultados apresentados correspondem aos dois primeiros dias de teste com nanofluidos de ouro (dias 6 e 7 /5) e aos dois dias de teste com nanofluidos de nanotubos de carbono sob diferentes condições climáticas (dias 28 e 30/5).

Nanofluidos de ouro em água

As Figs. 4.31 e 4.32 apresentam os valores do “SER” para os nanofluidos de ouro em água para as diferentes concentrações volumétricas testadas nos dias 6 e 7/5/2016. Observa-se que o “SER” aumentou com o acréscimo de nanopartículas ao fluido base, tendo a concentração mais alta (0,004% em volume) apresentado os maiores resultados e a menor concentração (0,0001%) os resultados menos expressivos, com uma energia armazenada muito próxima à da água (“SER” próximo de 1). Nota-se ainda que os pontos de máximo “SER” ocorrem nos primeiros instantes de teste quando os nanofluidos possuem as maiores taxas de variação da temperatura e, para um mesmo instante de tempo, apresentam temperaturas substancialmente superiores à da água, consequentemente, uma energia armazenada proporcionalmente maior. A concentração de 0,001%, apontada anteriormente como um ponto de “SAR” limite, apresentou valores para a energia armazenada entre 1,8 e 3 vezes superior à da água nos pontos máximos de cada um dos dois dias, enquanto o nanofluido mais concentrado (0,004%) apresentou valores entre 2,6 e 5 vezes superior ao do fluido base.

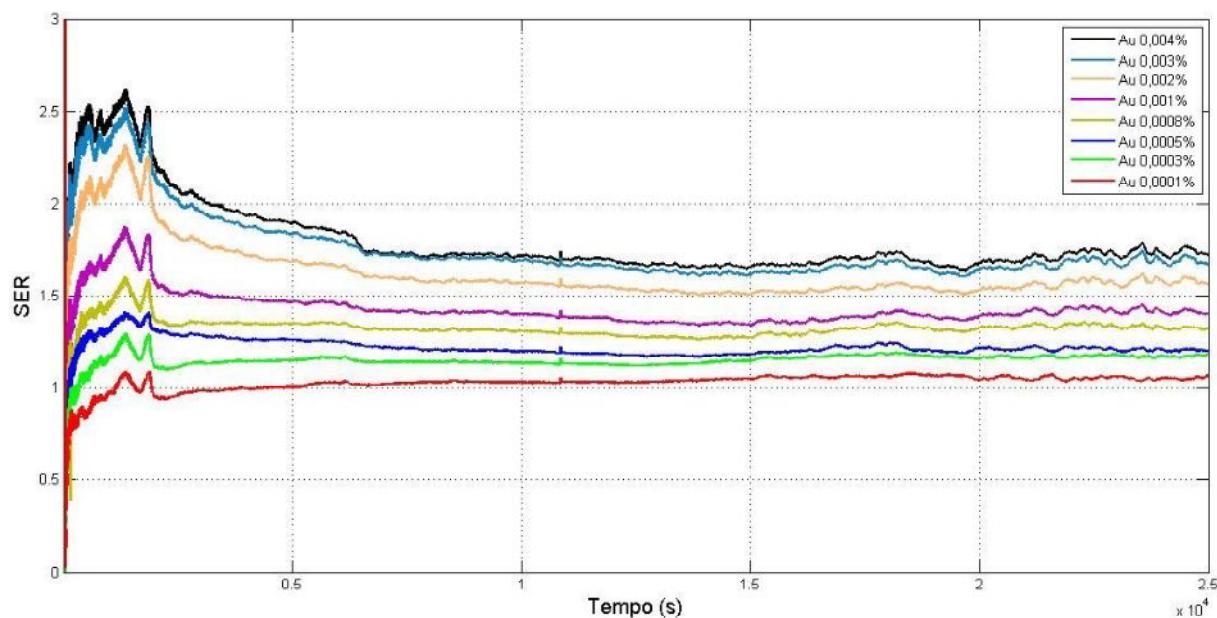


Figura 4.31 – Razão de Energia armazenada (“SER”) para os nanofluidos de ouro em água testados no dia 6/5/2016

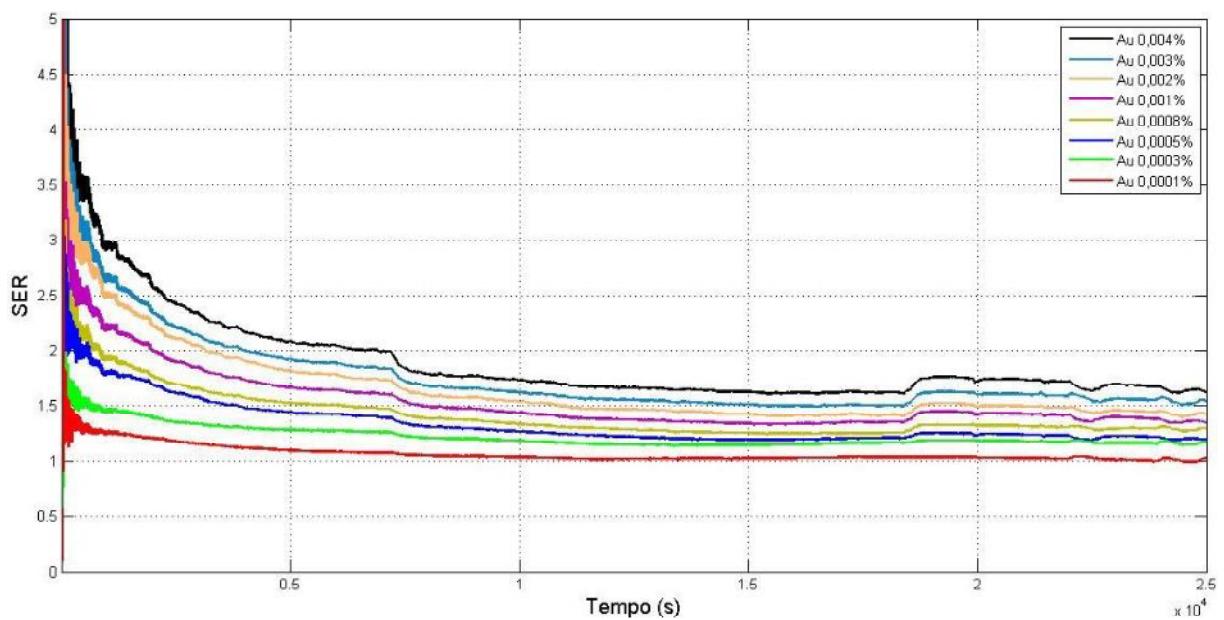


Figura 4.32 – Razão de Energia armazenada (“SER”) para os nanofluidos de ouro em água testados no dia 7/5/2016

Nanofluidos de nanotubos de carbono em água

Os resultados para os nanofluidos de nanotubos de carbono foram novamente separados em duas faixas de concentração (0,0001% a 0,002% e 0,002% a 0,03%) para melhor visualização dos resultados. Os resultados para o dia sob condições de céu parcialmente nublado (28/5/2016) foram apresentadas nas Figs. 4.33 e 4.34 e os sob condições de céu claro (30/5/2016) nas Figs. 4.35 e 4.36. Observa-se que o “SER” aumenta com o acréscimo de nanopartículas até a concentração de 0,001%, não apresentando uma tendência específica para concentrações superiores. Nota-se que, diferentemente do observado nos nanofluidos de ouro de menor concentração (0,0001% em volume), o valor calculado para o “SER” do nanofluido de nanotubos de carbono menos concentrado apresentou valores de energia armazenada bem mais expressivos, entre 1,4 e 2,5 vezes maiores que a da água. A concentração 0,002%, apontada anteriormente como um ponto de “SAR” limite, apresentou resultados muito semelhantes ao de concentração 0,001%, o que indica que não há justificativa para o emprego de concentrações mais altas, visto que a adição de nanopartículas não propiciou um aumento da energia armazenada pelo fluido. Comparando-se os resultados dos dois dias sob condições distintas nota-se que a ausência de nuvens no segundo (30/5/2016) causou um aumento da razão de energia armazenada para todas as concentrações.

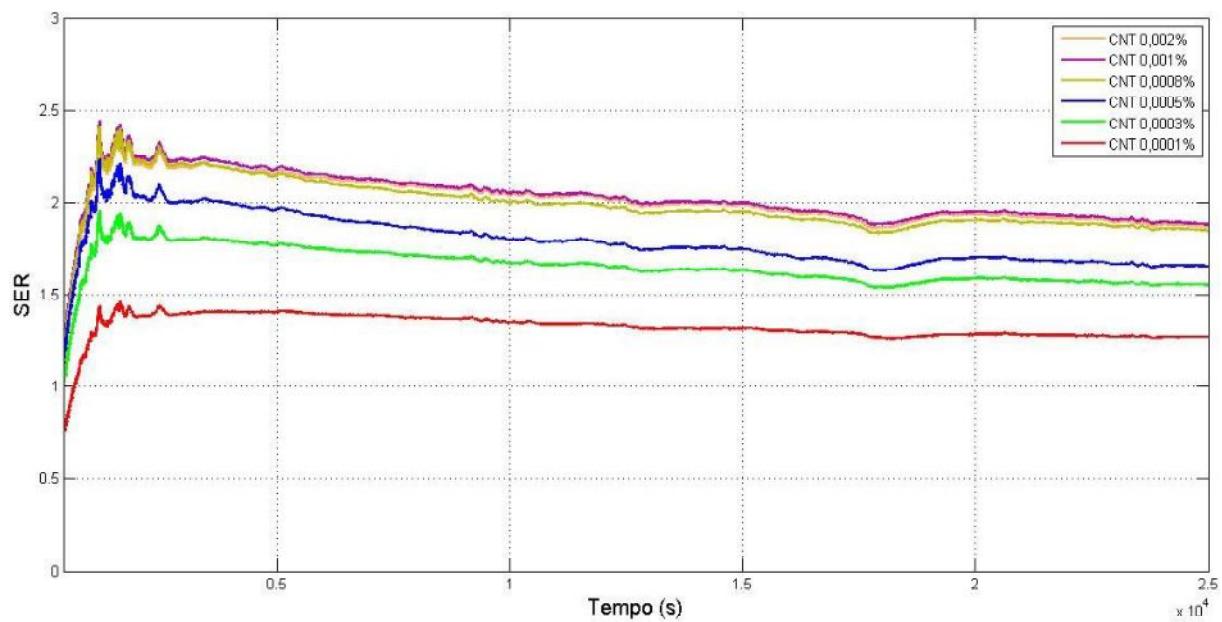


Figura 4.33 – Razão de Energia armazenada (“SER”) para os nanofluidos de nanotubos de carbono em água (0,0001% a 0,002%) em água testados no dia 28/5/2016, sob condições de céu parcialmente nublado.

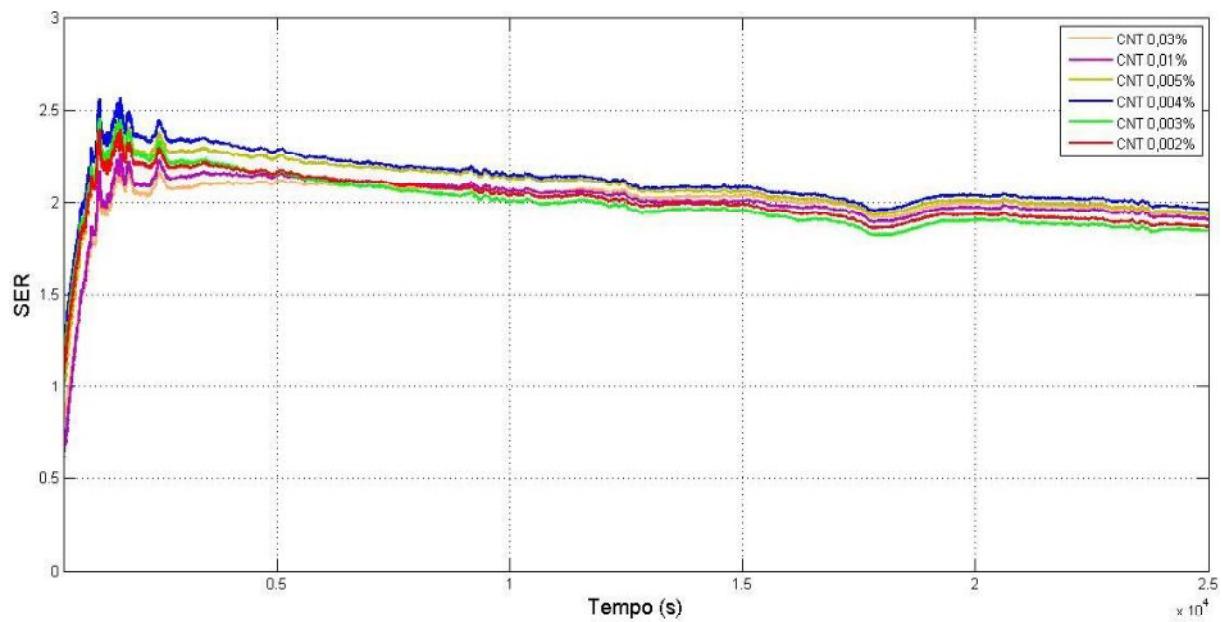


Figura 4.34 – Razão de Energia armazenada (“SER”) para os nanofluidos de nanotubos de carbono em água (0,002% a 0,03%) em água testados no dia 28/5/2016, sob condições de céu parcialmente nublado.

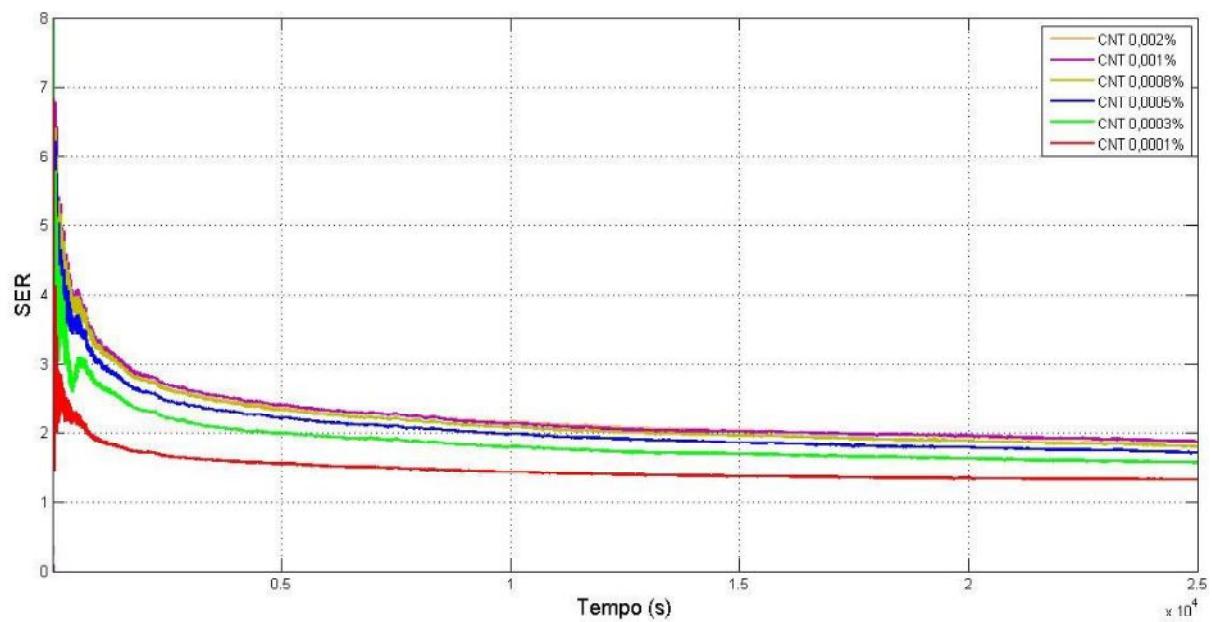


Figura 4.35 – Razão de Energia armazenada (“SER”) para os nanofluidos de nanotubos de carbono em água (0,0001% a 0,002%) em água testados no dia 30/5/2016, sob condições de céu claro.

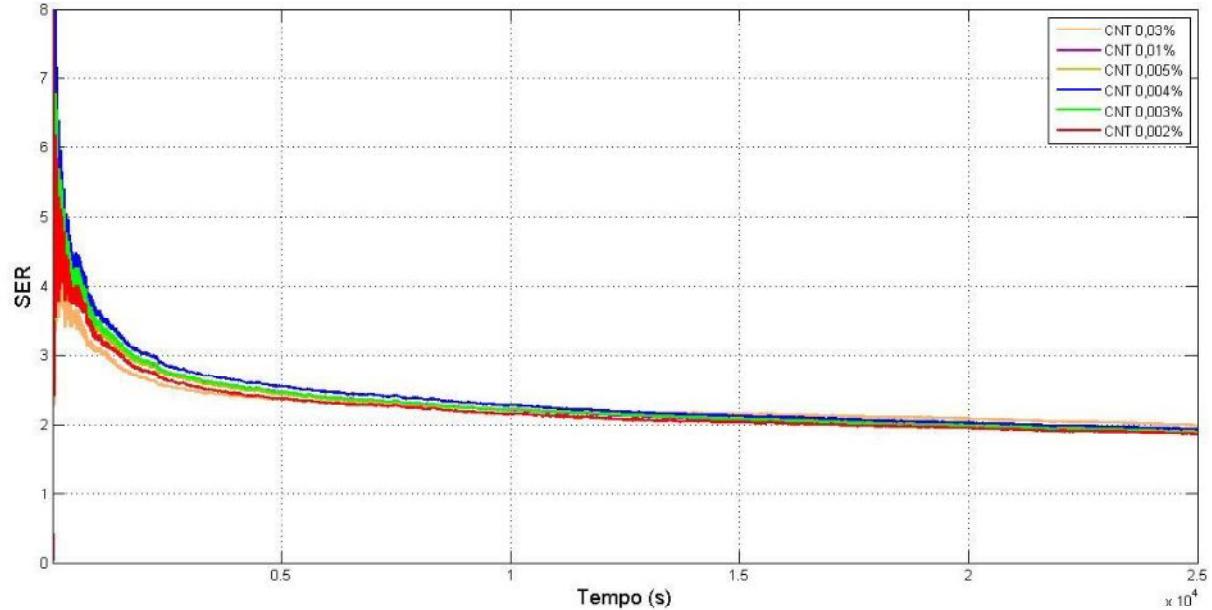


Figura 4.36 – Razão de Energia armazenada (“SER”) para os nanofluidos de nanotubos de carbono em água (0,002% a 0,03%) em água testados no dia 30/5/2016, sob condições de céu claro.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

5.1. Conclusões

Este trabalho contribuiu com o conhecimento sobre a utilização de nanofluidos como fluido de conversão fototérmica em coletores solares. Diversos ensaios foram realizados em coletores solares de absorção direta utilizando nanofluidos de ouro e nanotubos de carbono em água em diferentes concentrações. As conclusões obtidas a partir dos resultados encontrados são apresentadas a seguir.

A adição de nanopartículas ao fluido base causou aumento na energia total armazenada pelos fluidos durante o período de aquecimento. A relação estabelecida entre a energia e o volume de nanopartículas foi aproximadamente linear para as concentrações entre 0,0001% e 0,001% de ambos nanofluidos. No caso dos nanofluidos de nanotubos de carbono, o nanofluido de concentração 0,001% obteve resultados superiores ao de 0,002% e muito próximos aos de concentrações superiores, além disso, a presença de nuvens em um dos dias de teste resultou em valores inferiores de energia total armazenada para todas as concentrações comparados ao do dia sob condição de céu claro.

A taxa de aquecimento apresentou aumento proporcional ao acréscimo de nanopartículas ao fluido base para todas as concentrações de nanofluidos de ouro e para as baixas concentrações (0,0001% a 0,001%) dos nanofluidos de nanotubos de carbono em água. A adição de nanotubos de carbono em concentração 0,002% ou superior obteve resultados semelhantes ao nanofluido de concentração 0,001%. Houve, ainda, a formação de pontos de máxima taxa de variação da temperatura por volta de 5000 segundos de teste, com posterior diminuição, o que comprovou o indício visual de mudança no comportamento de aquecimento dos fluidos, que nos primeiros instantes de teste apresentavam perfis de temperatura com crescimento semelhante a uma curva exponencial e, posteriormente, se assemelhavam a uma parábola.

A taxa de absorção específica (“SAR”), que representa a taxa de transferência de calor por unidade de massa das nanopartículas, apresentou uma clara tendência de diminuição com o aumento da concentração das amostras. O “SAR” como função da concentração volumétrica de nanopartículas apresentou um decaimento exponencial, ocorrendo a estabilização dos valores a partir das concentrações de 0,001% e 0,002% para os nanofluidos de ouro e de nanotubos de carbono, respectivamente. Supõe-se que tal comportamento seja resultado da formação de aglomerações e deposição de nanopartículas na superfície do coletor com o aumento da quantidade de nanopartículas no fluido base. O comportamento semelhante apresentado pelos valores de “SAR” dos nanofluidos de ouro nas concentrações 0,0005%, 0,0008% e 0,001% indicam que, nessas concentrações, o aumento relativo da taxa de aquecimento do nanofluido ocorreu na mesma proporção do acréscimo de nanopartículas ao fluido base.

A razão de energia armazenada (“SER”), que fornece informações acerca de quanta energia a mais foi possível armazenar através da adição de nanopartículas ao fluido base, apresentou os valores máximos nos primeiros instantes de teste conforme esperado, visto que nesses primeiros momentos a diferença na taxa de variação da temperatura dos nanofluidos e da água são maiores. Observou-se que esse parâmetro aumenta proporcionalmente com a adição de nanopartículas para todas as concentrações de nanofluidos de ouro (atingindo o máximo na concentração de 0,004%) e, no caso dos nanofluidos de nanotubos de carbono, para as concentrações entre 0,0001% e 0,001%, não sofrendo variações significativas em concentrações superiores.

Através da análise conjunta dos resultados de energia total armazenada no período de aquecimento, taxa de variação da temperatura, taxa de absorção específica (“SAR”) e a razão de energia armazenada (“SER”) foi possível corroborar dados da literatura que afirmam existir para os nanofluidos uma concentração volumétrica considerada “ótima”, acima da qual torna-se indiferente ou inviável a adição de nanopartículas. Determinou-se através dos testes realizados que a concentração volumétrica ideal para aplicações com as nanopartículas estudadas é de 0,004% para as nanopartículas de ouro e 0,001% para os nanotubos de carbono.

Concluiu-se ainda que, apesar das expectativas iniciais de resultados superiores dos nanofluidos de ouro em função do fenômeno RPSL, como sugerido por Chen et al.(2015), os fatores econômicos e práticos associados ao seu uso, como o alto custo de produção de nanopartículas de ouro e a visível degradação das amostras após exposição prolongada à radiação solar, indicam que a dispersão de nanotubos de carbono de carbono em água seriam mais viáveis para aplicações de conversão fototérmica se consideradas condições iguais às utilizadas nesse trabalho.

5.2. Trabalhos futuros

Destacam-se alguns estudos adequados ao seguimento dessa pesquisa, entre eles:

- Avaliação experimental da conversão fototérmica de nanofluidos de diferentes naturezas, como por exemplo, com nanopartículas de alumina, grafeno e prata e diferentes fluidos base, como mistura água-etilenoglicol em diferentes proporções e óleos.
- Avaliação da influência da dimensão dos coletores;
- Avaliação qualitativa da estabilidade dos nanofluidos em função do tempo de exposição das amostras à radiação solar
- Determinação dos coeficientes de extinção de diferentes nanofluidos;
- Construção de um trocador de calor que permita aquecimento de água a partir da conversão fototérmica realizada por nanofluidos em um coletoresolar de absorção direta.

CAPÍTULO VII

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMJAD, M., ZEINY, A., RAZA, G., BAI, L., HU, Z., WEN, D., Photothermal Conversion Characteristics of Direction Solar Absorption Nanofluids, Crossroads of Particle Science and Technology - Joint Conference of 5th UK-China and 13th UK Particle Technology Forum (2015).

BANDARRA FILHO, E. P., MENDOZA. O. S. H., BEICKER, C. L. L., MENEZES, A., WEN, D., Experimental investigation of a silver nanoparticle-based direct absorption solar thermal system, Energy Conversion and Management 84: 261–267 (2014).

CHEN, M., LI, H., WANG, X., HE, Y., Enhanced Solar Energy Absorption of the Plasmonic Silver Nanofluid Based on the Flat Plate Collector, Crossroads of Particle Science and Technology - Joint Conference of 5th UK-China and 13th UK Particle Technology Forum (2015).

CHOI, U.S., Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles, ASMEFED 231: 99-103 (1995).

DELFANI, S., KARAMI, M., AKHAVAN- BEHABADI, M.A., Performance characteristics of a residential-type direct absorption solar collector using MWCNT nanofluid, Renewable Energy 87: 754-764 (2016).

FAN, J., WANG, L., Review of heat conduction in nanofluids, ASME J. Heat Transfer 133, id 040801 (2011).

GHADIMI, A., SAIDUR, R., METSELAAR, H.S.C., A review of nanofluid stability properties and characterization in stationary conditions, International Journal of Heat and Mass Transfer 54: 4051–4068 (2011).

GUPTA, H.K., AGRAWAL, G.D., MATHUR, J., An experimental investigation of a low temperature Al₂O₃-H₂O nanofluid based direct absorption solar collector, Solar Energy 118: 390-396 (2015).

HE, Q., WANG, S., ZENG, S., ZHENG, Z., Experimental investigation on photothermal properties of nanofluids for direct absorption solar thermal energy systems, *Energy Conversion and Management* 73: 150–157 (2013).

HE, Q., ZHENG, S., WANG, S., Experimental investigation on the efficiency of flat-plate solar collectors with nanofluids, *Applied Thermal Engineering* 88: 165–171 (2014).

HE, Y., WANG, S., MA, J., TIAN, F., REN, Y., Experimental study on the light-heat conversion characteristics of nanofluids, *Nanoscience and Nanotechnology Letters* 3: 494–496 (2011).

HORDY, N., RABILLOUD, D., MEUNIER, J.L., COULOMBE, S., High temperature and long-term stability of carbon nanotube nanofluids for direct absorption solar thermal collectors, *Solar Energy* 105-82–90 (2014).

JAMAL-ABAD, M.T., ZAMZAMIAN, A., IMANI, E., MANSOURI, M., Experimental Study of the Performance of a Flat-Plate Collector Using Cu–Water Nanofluid, *Journal of Thermophysics and Heat Transfer* 27-4: 756-760 (2013).

KARAMI, M., AKHAVAN BAHABADI, M.A., DELFANI, S., GHOZATLOO, A., A new application of carbon nanotubes nanofluid as working fluid of low-temperature direct absorption solar collector, *Solar Energy Materials & Solar Cells* 121: 114–118 (2014).

KARAMI, M., AKHAVAN-BAHABADI, M.A., DELFANI, S., RAISEE, M., Experimental investigation of CuO nanofluid based direct absorption solar collector for residential applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 52: 793-801 (2015).

KHANAFER, K., VAFAI, K., A critical synthesis of thermophysical characteristics of nanofluids, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 54: 4410–4428 (2011).

KHULLAR, V., TYAGI, H., Application of nanofluids as the working fluid in concentrating parabolic solar collectors, In: *Proceedings of the 37th National and 4th International Conference on Fluid Mechanics and Fluid Power*, 2010. Madras, Chennai, India. FMFP10 - BN – 06: 1-9 (2010).

KHULLAR, V., TYAGI, H., PHELAN, P.E., OTANICAR, T.P., SINGH, H., TAYLOR, R.A., Solar energy harvesting using nanofluids-based concentrating solar collector, In: *International Conference on Micro/Nanoscale Heat and Mass Transfer*, 3., 2012. Atlanta, Georgia, USA. ASME Proceedings - MNHMT2012: 259-267 (2012).

KIM, H., HAM, J., PARK, C., CHO, H., Theoretical investigation of the efficiency of a U-tube solar collector using various nanofluids, *Energy* 94: 497-507 (2016).

LADJEVARDI, S.M., ASNAGHI, A., IZADKHAST, P.S., KASHANI, A.H., Applicability of graphite nanofluids in direct solar energy absorption, *Solar Energy* 94: 327–334 (2013).

LEE, J.H., LEE, S.H., CHOI, C.J., JANG, S.P., CHOI, S.U.S., A review of thermal conductivity data, mechanics and models for nanofluids, *International Journal of Micro–Nano Scale Transport* 1: 269–322 (2010).

LENERT, A., WANG, E. N. - Optimization of nanofluid volumetric receivers for solar thermal energy conversion, *Solar Energy* 86: 253–265 (2012).

LI, Y., ZHOU, J., TUNG, S., SCHNEIDER, E., XI, S., A review on development of nanofluid preparation and characterization, *Powder Technology* 196:89-101 (2009).

LIU, Z., HUA, R., LU, L., ZHAO, F., XIAO, H., Thermal performance of an open thermosyphon using nanofluid for evacuated tubular high temperature air solar collector, *Energy Conversion and Management* 73: 135–143 (2013).

LIZ-MARZÁN, L. M., Nanometals formation and color, *Materials Today* 7: 26-31 (2004).

NATARAJAN E., SATHISH R., Role of nanofluids in solar water heater. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, July (2009).

OTANICAR, T., PHELAN, P.E., PRASHER, R.S., ROSENGARTEN, G., TAYLOR, R.A., Nanofluid-based direct absorption solar collector. *Journal of Renewable Sustainable Energy* 2, id 033102 (2010).

PEREIRA, M.K., Ressonância de plasmon de superfície localizado e espalhamento raman em soluções coloidais de ouro, 2009.108 p. Dissertação – Instituto de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre (2009).

RAMESH, G., PRABHU, N.K., Review of thermo-physical properties, wetting and heat transfer characteristics of nanofluids and their applicability in industrial quench heat treatment, *Nanoscale Res. Lett.* 6: 334 (2011).

SABIHA, M.A., SAIDUR, R., HASSANI, S., SAID, Z., MEKHILEF, S., Energy performance of an evacuated tube solar collector using single walled carbon nanotubes nanofluids, *Energy Conversion and Management* 105: 1377-1388 (2015).

SALAVATI MEIBODI, S., NIAZMAND , H., MAHIAN, O., WONGWISES, S., Experimental investigation on the thermal efficiency and performance characteristics of a flat plate solar collector using SiO₂/EG– water nanofluids, *International Communications in Heat and Mass Transfer* 65: 71-75 (2015) .

TAYLOR, R. A., PHELAN, P. E., OTANICAR, T. P., TYAGI, H., TRIMBLE, S., Applicability Of Nanofluids In Concentrated Solar Energy Harvesting, *Proceedings of the*

ASME 2010 4th International Conference on Energy Sustainability, Phoenix, Arizona, USA. 2010.

TAYLOR, R.A., PHELAN, P.E., OTANICAR, T.P., WALKER, C.A., NGUYEN, M., TRIMBLE, S., PRASHER, R., Applicability of nanofluids in high flux solar collectors, *Journal of Renewable and Sustainable Energy* 3 023104 (2011).

TAYLOR, R.A., PHELAN, P.E., OTANICAR, T.P., ADRIAN, R., PRASHER, R., Nanofluid optical property characterization: towards efficient direct absorption solar collectors, *Nanoscale Research Letters* 6: 225 (2011).

TONG, Y., KIM, J., CHO, H., Effects of thermal performance of enclosed-type evacuated U-tube solar collector with multi-walled carbon nanotube/water nanofluid, *Renewable Energy* 83: 463-473 (2015).

TRISAKSRI, V., WONGWISES, S., Critical review of heat transfer characteristics of nanofluids, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 11: 512–523 (2007).

TYAGI H, PHELAN P, PRASHER R., Predicted efficiency of a low-temperature nanofluid based direct absorption solar collector, *Journal Solar Energy Engineering* (2009).

VAJJHA, R.S., DAS, D.K., A review and analysis on influence of temperature and concentration of nanofluids on thermophysical properties, heat transfer and pumping power, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 55: 4063–4078 (2012).

VAKILI, M., HOSSEINALIPOUR, S.M., DELFANI, S., KHOSROJERDI, S., KARAMI, M., Experimental investigation of graphene nanoplatelets nanofluid-based volumetric solar collector for domestic hot water systems, *Solar Energy* 131: 119-130 (2016).

VERMA, S.K., TIWARI, A.K., CHAUHAN, D.S., Performance augmentation in flat plate solar collector using MgO/water nanofluid, *Energy Conversion and Management* 124: 607-617 (2016).

VINCELY, D. A., NATARAJAN, E., Experimental investigation of the solar FPC performance using graphene oxide nanofluid under forced circulation, *Energy Conversion and Management* 117: 1–11 (2016).

YOUSEFI, T., SHOJAEIZADEH, E., VEYSI, F., ZINADINI, S., An experimental investigation on the effect of pH variation of MWCNT–H₂O nanofluid on the efficiency of a flat-plate solar collector, *Solar Energy* 86: 771–779 (2012).

YOUSEFI, T., VEYSI, F., SHOJAEIZADEH, E., ZINADINI, S., An experimental investigation on the effect of Al₂O₃-H₂O nanofluid on the efficiency of flat-plate solar collectors, *Renewable Energy* 39: 293-298 (2012).

YOUSEFI, T., VEYSI, F., SHOJAEIZADEH, E., ZINADINI, S., An experimental investigation on the effect of MWCNT–H₂O nanofluid on the efficiency of flat-plate solar collector, *Experimental Thermal and Fluid Science* 39: 207–212 (2012).

Apêndice A – Curvas de calibração dos termopares

Figura A.1 a Fig. A.13 apresentam as curvas de calibração obtidas para cada termopar.

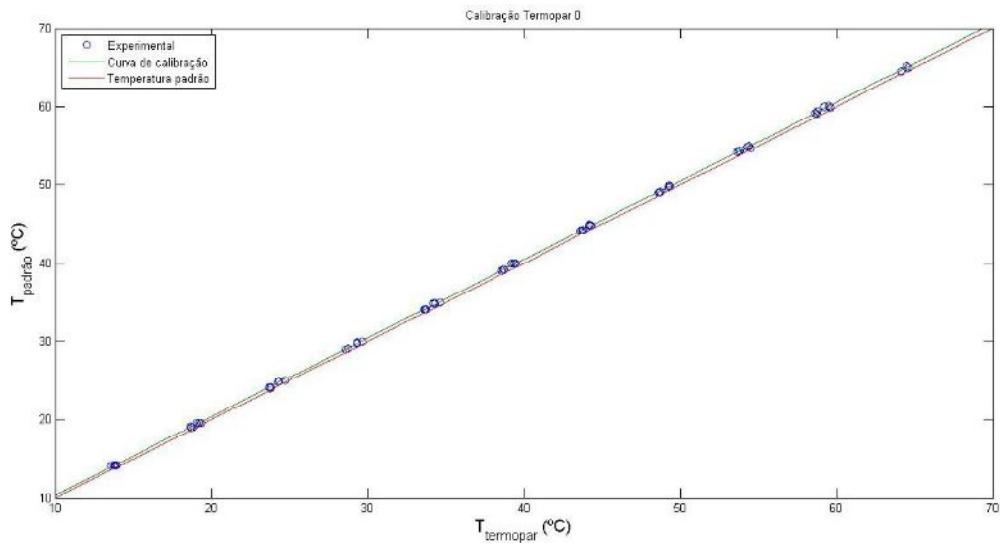


Figura A.1 – Curva de calibração do termopar 0.

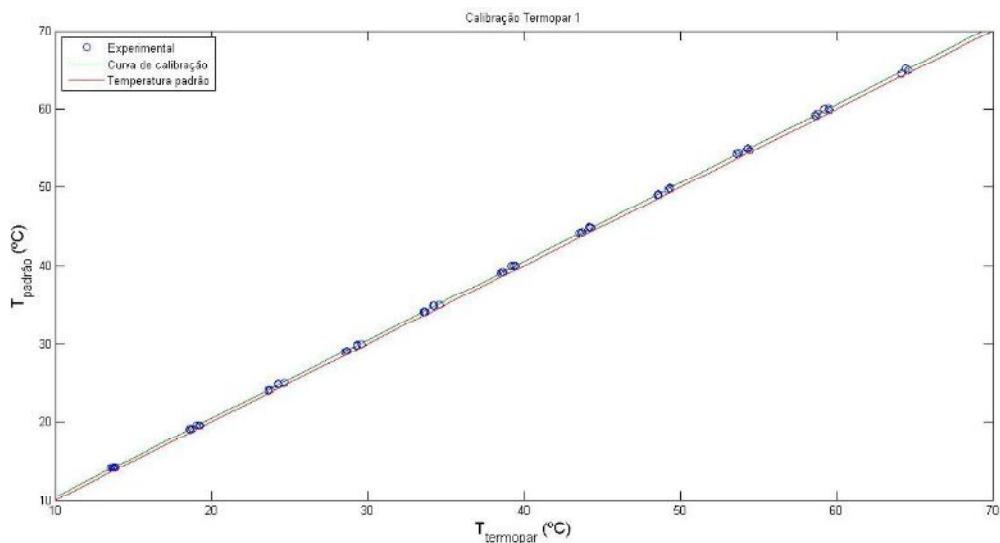


Figura A.2 – Curva de calibração do termopar 1.

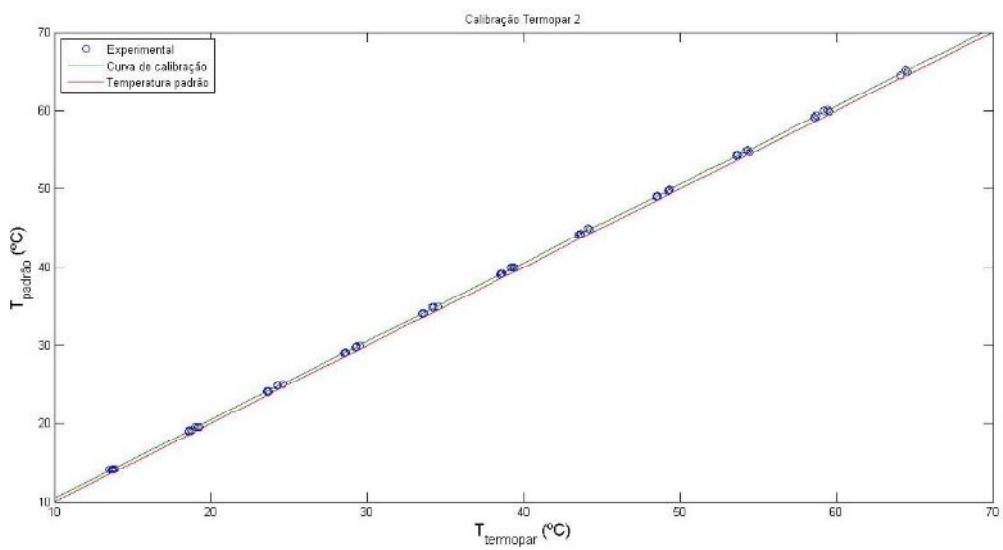


Figura A.3 – Curva de calibração do termopar 2.

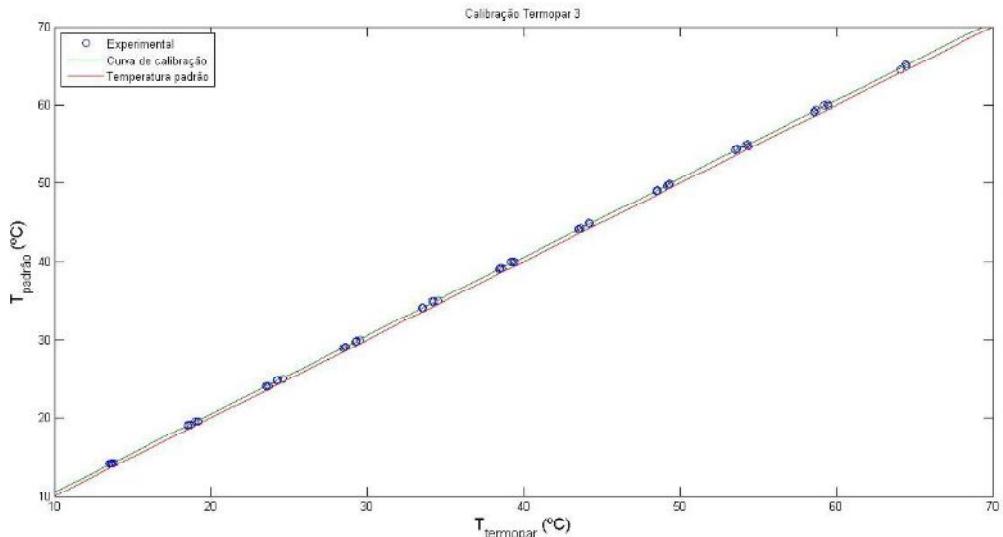


Figura A.4 – Curva de calibração do termopar 3.

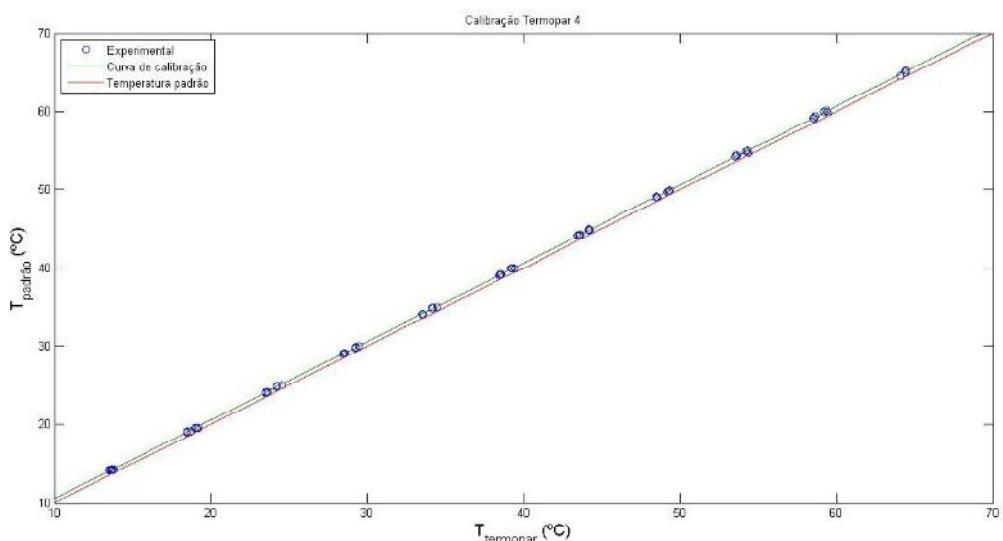


Figura A.5 – Curva de calibração do termopar 4.

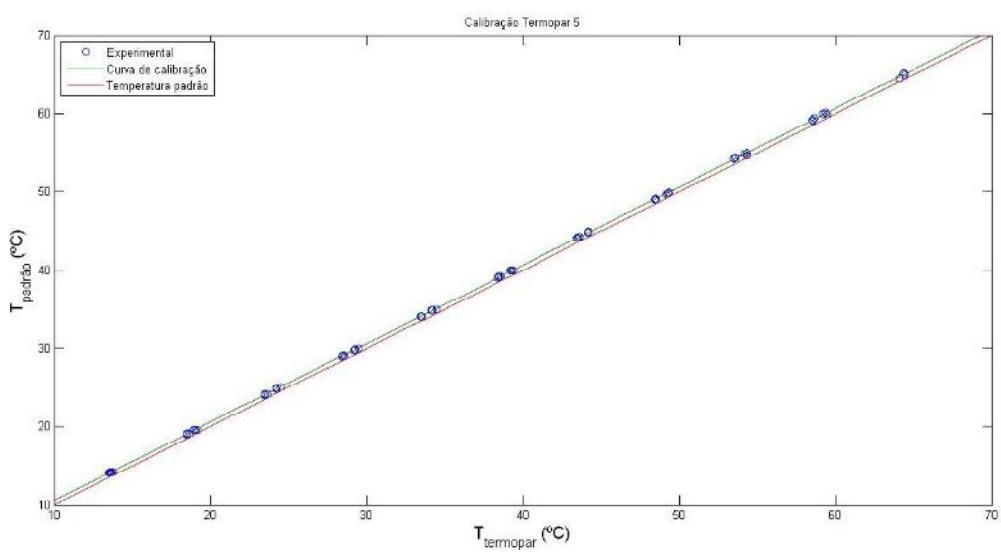


Figura A.6 – Curva de calibração do termopar 5.

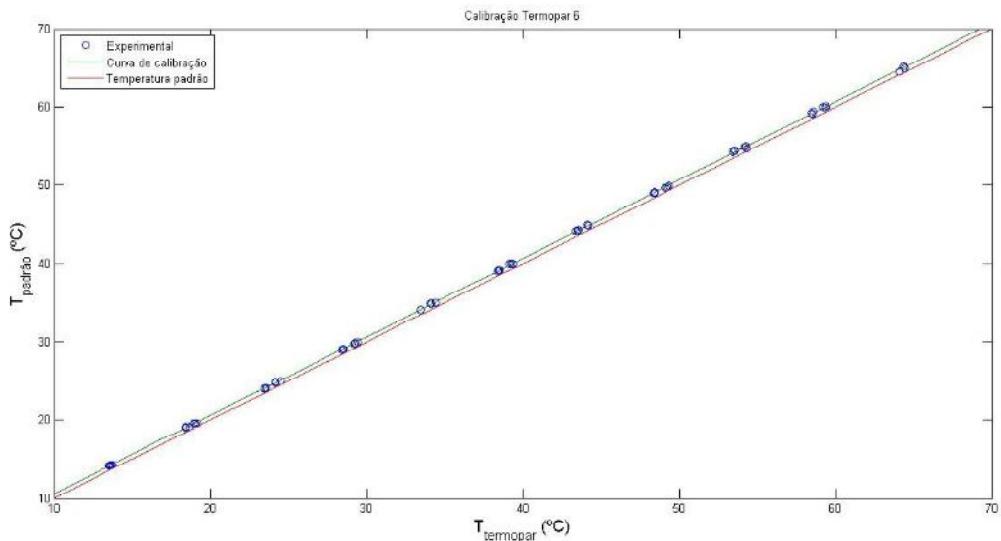


Figura A.7 – Curva de calibração do termopar 6.

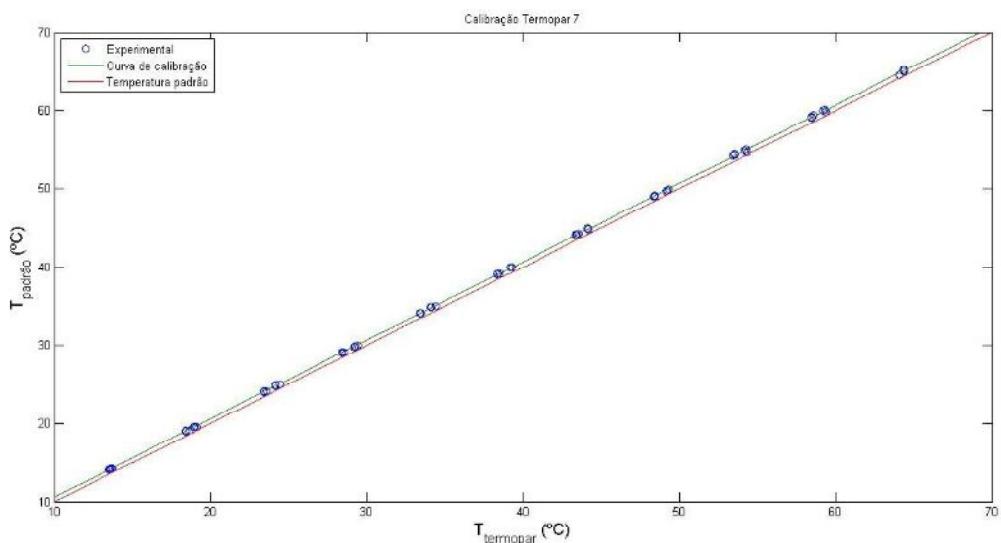


Figura A.8 – Curva de calibração do termopar 7.

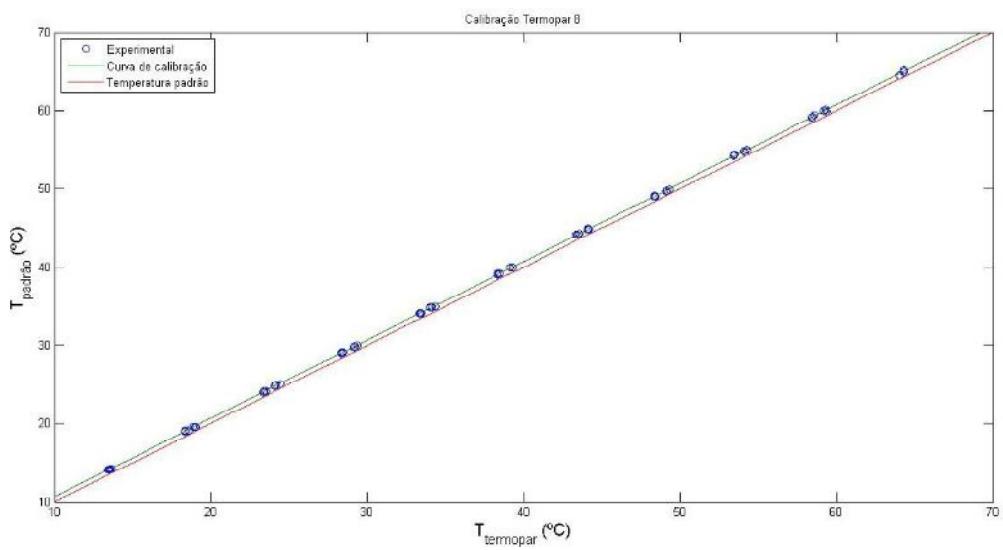


Figura A.9 – Curva de calibração do termopar 8.

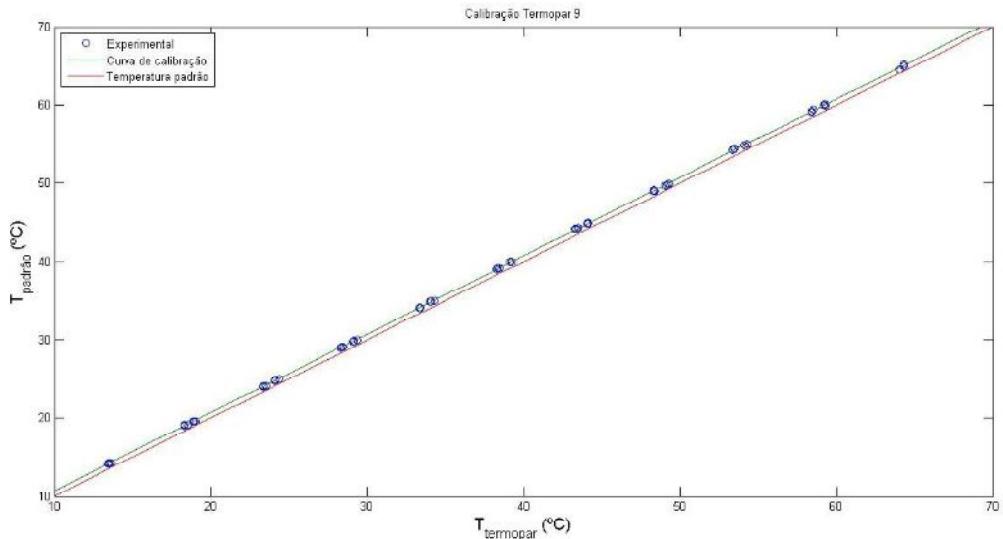


Figura A.10 – Curva de calibração do termopar 9.

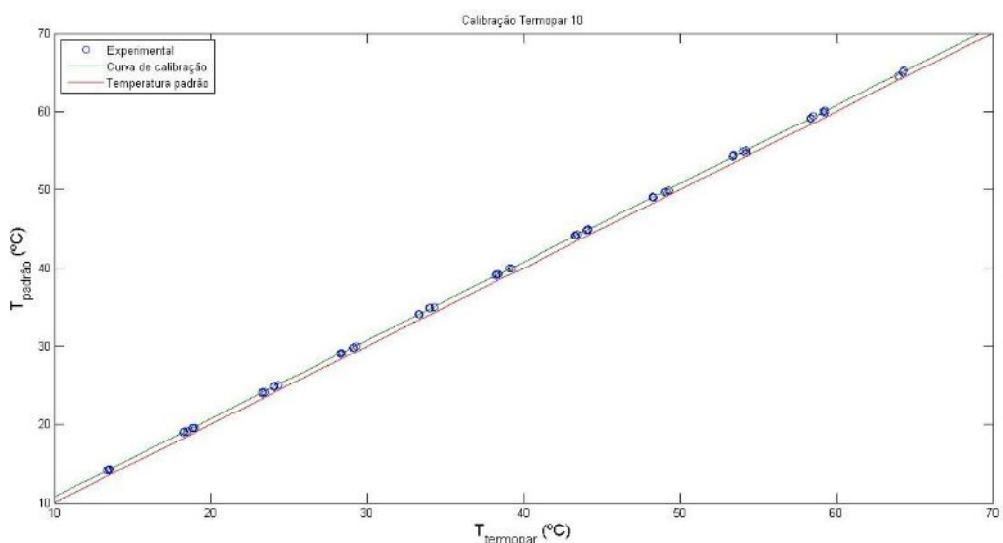


Figura A.11 – Curva de calibração do termopar 10.

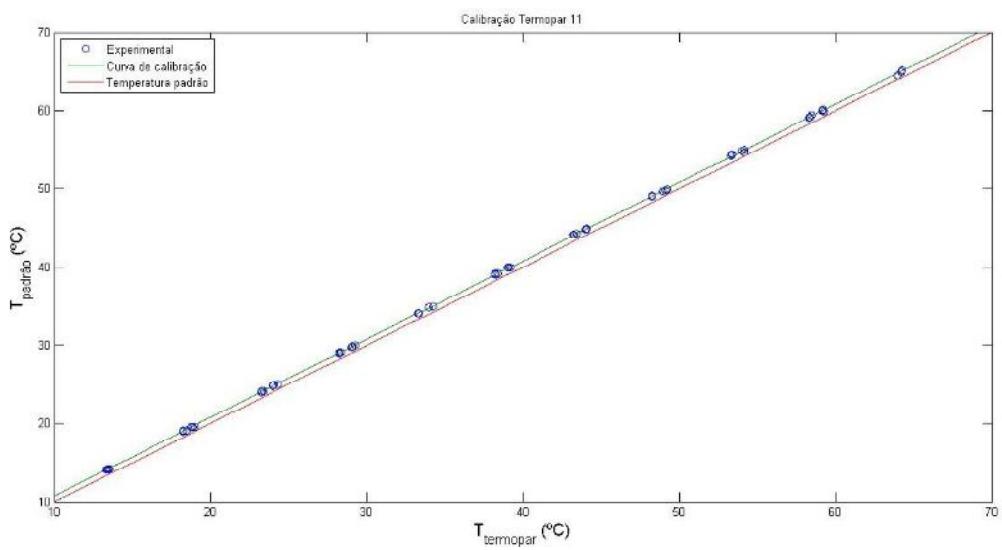


Figura A.12 – Curva de calibração do termopar 11.

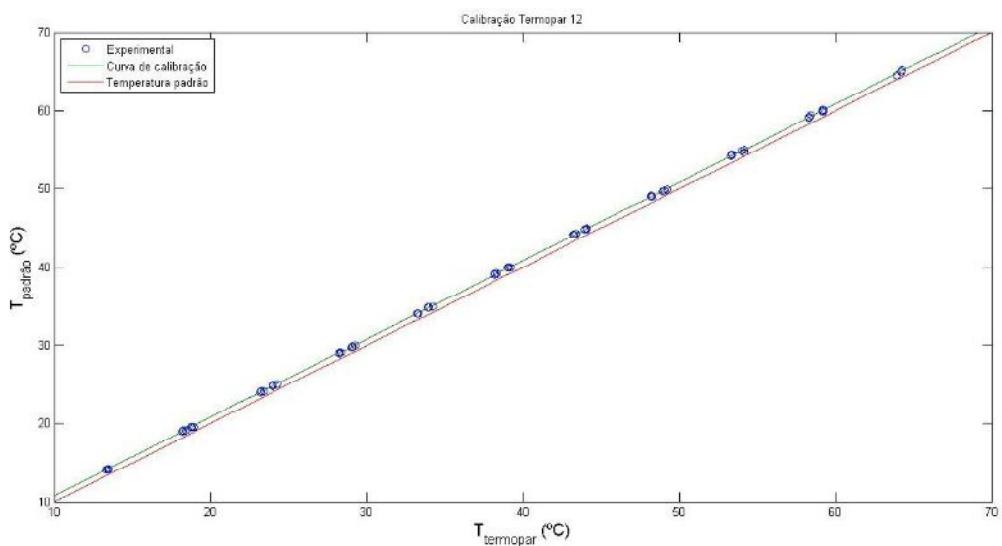


Figura A.13 – Curva de calibração do termopar 12.

Apêndice B – Cálculo das incertezas de medição

A incerteza de medição de cada termopar foi calculada através do erro de precisão das medidas de temperatura durante a calibração. O erro de precisão incorpora todas as influências aleatórias no sistema de medição, assumindo que o sinal medido é estável e sem flutuações. Este erro é subdividido em erro aleatório e erro de calibração.

O erro aleatório é o erro devido a variações aleatórias com respeito a calibração, ou seja, é um erro associado à discrepância entre várias medições de uma mesma temperatura. Como a medição desejada é a média de N medições, o erro de precisão da média de uma única medição devido a variações aleatórias é:

$$S_{rnd;meas} = \frac{\sigma}{\sqrt{N-1}} \quad (15)$$

Onde $S_{rnd;meas}$ é o erro aleatório de uma medição e σ representa o desvio padrão das N medições.

Como k rodadas em condições estáveis foram realizadas (k rodadas com N medições em cada), a variação aleatória total deve ser estimada pela raiz quadrada média (RMS):

$$S_{rnd;total} = \sqrt{\frac{\sum (S_{rnd;meas})^2}{k}} \quad (16)$$

Onde o número de graus de liberdade é $k(N-1)$.

O erro de calibração serve para determinar o quanto boa é a curva de calibração obtida. A forma mais direta de obter este erro é calcular o erro RMS entre os dados de referência utilizados para obter a curva de calibração e a própria curva obtida. Sendo $f(x_i)$ a função obtida para a temperatura e Y_i a temperatura padrão, o erro de calibração incorpora a diferença entre estes dois parâmetros para cada medição, segundo a equação:

$$S_{cal} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k [f(x_i) - Y_i]^2}{k}} \quad (17)$$

O erro total (S_{total}) para o termopar é calculada usando a raiz quadrada da soma dos quadrados dos erros calculados (erro aleatório e erro de calibração):

$$S_{total} = \sqrt{S_{rnd}^2 + S_{cal}^2} \quad (18)$$

Para a obtenção de uma calibração com erro reduzido, foram obtidas 30 amostras independentes para cada sensor.

A incerteza total do sensor pode ser determinada através da equação:

$$U_{total} = B_{total} + t_{95} \cdot S_{total} \quad (19)$$

Onde U_{total} representa a incerteza total de cada medição do termopar, B_{total} representa o erro sistemático total e t_{95} é o valor da distribuição t de student com 95% de confiança para o número de graus de liberdade da calibração.

Apêndice C – Dados Meteorológicos para os dias de teste

Data	Hora	Temperatura (°C)				Umidade (%)				Pressão (hPa)			Vento (m/s)		Radiação (kJ/m²)
		UTC	Inst.	Máx.	Mín.	Inst.	Máx.	Mín.	Inst.	Máx.	Mín.	Vel.	Dir.	Raj.	
06/05/2016	10	18,5	18,6	18,2	61	62	59	919	919	919	1,6	73°	3,1	17,78	
06/05/2016	11	20,7	20,8	18,5	58	62	57	920	920	919	1,3	48°	3,6	458,2	
06/05/2016	12	24,3	24,4	20,7	47	58	47	921	921	920	1,7	44°	4,3	1245	
06/05/2016	13	25,7	25,9	24,3	44	48	43	921	921	921	2,7	21°	6,6	1862	
06/05/2016	14	26,9	27,7	25,4	42	46	41	921	921	921	3,6	11°	7	2503	
06/05/2016	15	28,7	28,9	26,9	36	42	36	920	921	920	2,8	29°	7,5	2899	
06/05/2016	16	27,8	28,7	27,1	34	38	32	919	920	919	2,8	27°	6,4	2339	
06/05/2016	17	28,6	28,7	27,5	32	34	31	919	919	919	2,4	5°	6,1	2107	
06/05/2016	18	28,2	29,2	28	31	32	29	918	919	918	2,1	27°	6,5	2038	
06/05/2016	19	28,6	28,7	28	31	32	31	918	918	918	1,9	13°	5,9	1168	
06/05/2016	20	27,6	28,9	27,6	33	33	30	918	918	918	2,3	37°	5,1	872,3	
06/05/2016	21	27	28,4	27	34	35	32	918	918	918	1,2	28°	4,3	308,9	

Data	Hora	Temperatura (°C)				Umidade (%)				Pressão (hPa)			Vento (m/s)		Radiação (kJ/m²)
		UTC	Inst.	Máx.	Mín.	Inst.	Máx.	Mín.	Inst.	Máx.	Mín.	Vel.	Dir.	Raj.	
07/05/2016	10	19,1	19,1	18,8	64	64	63	919	919	919	1,6	74°	3,6	7,274	
07/05/2016	11	21,6	21,6	19,1	59	64	59	920	920	919	0,6	48°	3,2	410	
07/05/2016	12	24,3	24,7	21,6	51	59	50	921	921	920	2,5	53°	7,1	1210	
07/05/2016	13	25,1	25,4	24	49	52	48	921	921	921	3,3	33°	7,1	1932	
07/05/2016	14	27	27	25	45	50	44	920	921	920	2,9	24°	8	2458	
07/05/2016	15	28,1	28,3	26,6	40	45	39	920	921	920	2,5	14°	8,1	2759	
07/05/2016	16	28,6	29,3	28,1	35	41	33	919	920	919	2,7	42°	7,1	2813	
07/05/2016	17	29,8	29,8	28,6	31	35	31	918	919	918	1,8	318°	5,9	2794	
07/05/2016	18	28,5	30,3	28,4	32	34	30	918	918	918	1	70°	4,9	1516	
07/05/2016	19	28,5	29,9	28,4	34	34	31	918	918	917	1,3	103°	4	1036	
07/05/2016	20	27,7	28,5	27,6	36	38	34	918	918	917	1,6	69°	3,4	228,6	
07/05/2016	21	26,8	28,1	26,8	40	40	35	918	918	918	1,7	77°	3,7	183,9	

Data	Hora	Temperatura (°C)				Umidade (%)				Pressão (hPa)			Vento (m/s)		Radiação (kJ/m²)
		UTC	Inst.	Máx.	Mín.	Inst.	Máx.	Mín.	Inst.	Máx.	Mín.	Vel.	Dir.	Raj.	
08/05/2016	10	19,5	20	19,5	65	65	63	919	919	918	0,7	62°	3	11,87	
08/05/2016	11	21,1	21,1	19,5	61	65	61	919	919	919	1,7	60°	3,4	334,7	
08/05/2016	12	24,5	24,6	21,1	48	61	47	919	919	919	3,1	53°	7,9	1159	
08/05/2016	13	25,7	25,8	24,3	47	49	46	920	920	919	3,6	45°	8,2	1893	

08/05/2016	14	26,6	26,7	25,5	43	48	43	920	920	920	3,6	55°	7,8	1998
08/05/2016	15	28,5	28,6	26,5	37	44	36	919	920	919	2,9	12°	7,5	2683
08/05/2016	16	28,7	29,3	27,9	32	37	30	918	919	918	2,8	13°	8,3	2785
08/05/2016	17	29,1	29,8	28,6	31	33	30	917	918	917	2,3	49°	7,3	2655
08/05/2016	18	29,5	30,3	28,6	31	32	30	917	917	917	2,8	53°	6,3	2209
08/05/2016	19	29	29,9	29	31	32	30	916	917	916	2,6	75°	6,3	1600
08/05/2016	20	28,5	29,5	28,5	32	33	31	916	916	916	2,1	32°	5,2	852,1
08/05/2016	21	27,3	28,5	27,3	35	35	31	917	917	916	1,5	31°	4,2	117,6

Data	Hora	Temperatura (°C)				Umidade (%)				Pressão (hPa)				Vento (m/s)		Radiação (kJ/m²)
		UTC	Inst.	Máx.	Mín.	Inst.	Máx.	Mín.	Inst.	Máx.	Mín.	Vel.	Dir.	Raj.		
18/05/2016	10	17,7	17,9	17,3	94	95	93	918	918	917	0,3	90°	1,6	10,31		
18/05/2016	11	20,4	20,4	17,6	85	94	84	919	919	918	0	203°	1,4	347,2		
18/05/2016	12	23,3	23,3	20,4	72	85	72	920	920	919	0,1	297°	1,4	1141		
18/05/2016	13	23,7	24,2	23,3	63	72	61	920	920	920	1,4	248°	3,2	1322		
18/05/2016	14	25,4	25,7	23,7	63	66	58	920	920	920	2	247°	4,7	2240		
18/05/2016	15	26,5	26,9	25,2	52	63	51	919	920	919	1,6	208°	4,9	2571		
18/05/2016	16	27,5	27,6	26,5	47	53	46	918	919	918	1,4	289°	5,1	2571		
18/05/2016	17	28	28,5	27,4	45	48	41	917	918	917	2,2	291°	4,8	2427		
18/05/2016	18	28,3	28,7	27,3	45	48	43	917	917	917	2,2	278°	6,4	1784		
18/05/2016	19	27,3	28,5	27,3	46	48	44	917	917	917	1,9	216°	5	1022		
18/05/2016	20	26,7	28	26,7	50	50	44	917	917	917	2,3	220°	5,2	655,5		
18/05/2016	21	25,3	26,7	25,3	55	55	49	917	917	917	0,5	181°	4,7	111		

Data	Hora	Temperatura (°C)				Umidade (%)				Pressão (hPa)				Vento (m/s)		Radiação (kJ/m²)
		UTC	Inst.	Máx.	Mín.	Inst.	Máx.	Mín.	Inst.	Máx.	Mín.	Vel.	Dir.	Raj.		
22/05/2016	10	19,4	20	19,4	78	78	75	920	920	920	2,4	79°	4,9	1,474		
22/05/2016	11	20,8	20,8	19,4	72	78	72	921	921	920	2,2	64°	4,8	275,7		
22/05/2016	12	23,4	23,4	20,8	59	72	59	922	922	921	1,9	61°	5,5	1108		
22/05/2016	13	25	25	23,2	56	61	56	922	922	922	2,8	34°	6,7	1811		
22/05/2016	14	25,6	26,2	24,8	52	57	51	922	922	922	3,5	25°	7,5	2354		
22/05/2016	15	27,1	27,4	25,7	47	53	47	921	922	921	2,4	20°	7,4	2668		
22/05/2016	16	27,9	28,3	26,8	43	49	41	920	921	920	2,6	1°	7,2	2753		
22/05/2016	17	28,7	29,3	27,8	39	45	38	919	920	919	2,2	346°	6,8	2595		
22/05/2016	18	29,1	29,3	28,2	38	41	37	919	919	919	2	349°	6,7	2179		
22/05/2016	19	28,3	29,8	28,1	39	41	33	918	919	918	1,7	309°	5,7	1360		
22/05/2016	20	28,5	29,4	28,3	37	40	31	918	918	918	1,7	349°	4,6	945,8		
22/05/2016	21	27,2	28,8	27,1	40	40	36	919	919	918	0,9	298°	4,5	198,3		

Data	Hora	Temperatura (°C)				Umidade (%)				Pressão (hPa)			Vento (m/s)			Radiação (kJ/m²)
		UTC	Inst.	Máx.	Mín.	Inst.	Máx.	Mín.	Inst.	Máx.	Mín.	Vel.	Dir.	Raj.		
24/05/2016	10	12,8	12,8	12,6	92	93	92	922	922	922	0,4	217°	2,5	3,178		
24/05/2016	11	14,8	15,1	12,7	81	92	81	923	923	922	1,4	120°	3,6	272,3		
24/05/2016	12	17,3	17,5	14,8	72	82	72	923	923	923	1,7	87°	3,6	1111		
24/05/2016	13	19,1	19,5	17,3	66	73	64	924	924	923	2,1	60°	4	1829		
24/05/2016	14	20,9	21,1	18,7	55	69	55	924	924	924	1,7	78°	3,8	2353		
24/05/2016	15	22,7	23	20,8	49	57	49	923	924	923	1,3	112°	3,4	2666		
24/05/2016	16	24,4	25,2	22,6	45	50	43	923	923	923	1,1	207°	2,9	2726		
24/05/2016	17	25,6	25,7	24	43	47	43	922	923	922	1,5	238°	3,9	2564		
24/05/2016	18	26,2	26,4	25,2	42	45	40	921	922	921	0,9	208°	4,6	2176		
24/05/2016	19	26,2	26,8	25,9	43	44	40	921	921	921	2,2	215°	5	1612		
24/05/2016	20	25,2	26,4	25,2	44	45	41	921	921	921	2,6	197°	6,2	911,8		
24/05/2016	21	22,8	25,2	22,8	51	51	44	922	922	921	2,7	209°	6,8	197,1		

Data	Hora	Temperatura (°C)				Umidade (%)				Pressão (hPa)			Vento (m/s)			Radiação (kJ/m²)
		UTC	Inst.	Máx.	Mín.	Inst.	Máx.	Mín.	Inst.	Máx.	Mín.	Vel.	Dir.	Raj.		
25/05/2016	10	16,2	16,5	16,2	88	88	87	922	922	922	3,9	87°	7,9	2,03		
25/05/2016	11	17,3	17,4	16,2	84	88	84	923	923	922	4,2	88°	9	267,4		
25/05/2016	12	18,9	18,9	17,3	77	84	77	923	923	923	4,2	81°	8,6	1100		
25/05/2016	13	21,1	21,2	18,9	70	77	70	924	924	923	4	72°	8,1	1794		
25/05/2016	14	22,3	22,8	21	68	71	66	924	924	924	3,7	52°	8,5	2332		
25/05/2016	15	23,8	23,9	22,3	64	70	64	923	924	923	3,2	47°	8,8	2652		
25/05/2016	16	25,4	25,4	23,3	58	66	57	922	923	922	2,8	54°	7,3	2732		
25/05/2016	17	26	26,3	24,9	54	58	52	921	922	921	2,9	58°	6,5	2613		
25/05/2016	18	25,6	26,5	25,4	50	54	49	920	921	920	2,2	61°	6,3	1897		
25/05/2016	19	25,5	25,5	25	51	54	50	920	920	920	2,4	73°	5,3	538,4		
25/05/2016	20	25,7	26,5	25,5	49	51	46	920	920	920	2,5	78°	5,5	873,1		
25/05/2016	21	24,3	25,8	24,3	56	56	49	920	920	920	1,9	70°	4,8	187,9		

Data	Hora	Temperatura (°C)				Umidade (%)				Pressão (hPa)			Vento (m/s)			Radiação (kJ/m²)
		UTC	Inst.	Máx.	Mín.	Inst.	Máx.	Mín.	Inst.	Máx.	Mín.	Vel.	Dir.	Raj.		
26/05/2016	10	17,8	18,2	17,7	83	84	82	921	921	921	3,4	79°	5,6	2,846		
26/05/2016	11	18,8	18,9	17,7	79	83	79	922	922	921	3,1	71°	5,8	264,3		
26/05/2016	12	20,5	20,5	18,8	71	79	71	922	922	922	3,6	60°	7,4	1063		
26/05/2016	13	21,7	21,7	20,3	66	71	66	922	923	922	3,9	48°	8	1764		
26/05/2016	14	23,7	23,7	21,7	58	66	57	922	923	922	2,6	33°	7,3	2302		
26/05/2016	15	25,2	25,4	23,3	52	58	51	922	922	922	1,9	33°	6,1	2475		
26/05/2016	16	25,7	25,9	24,7	47	53	45	921	922	921	1,7	40°	4,9	2716		
26/05/2016	17	26,8	27	25,4	38	48	38	920	921	920	1	342°	4,5	2440		

26/05/2016	18	27,4	27,6	25,9	35	40	33	919	920	919	1,4	168°	4,3	1580
26/05/2016	19	26,2	27,7	26,1	36	36	31	918	919	918	1,3	185°	5,2	1231
26/05/2016	20	26,4	27,2	25,9	34	36	32	919	919	918	1,4	169°	4	755
26/05/2016	21	23,8	26,4	23,8	48	48	34	919	919	919	0,2	11°	3,1	123,1

Data	Hora	Temperatura (°C)				Umidade (%)				Pressão (hPa)				Vento (m/s)			Radiação (kJ/m²)
		UTC	Inst.	Máx.	Mín.	Inst.	Máx.	Mín.	Inst.	Máx.	Mín.	Vel.	Dir.	Raj.			
28/05/2016	10	18,3	18,4	18,2	67	68	66	921	921	921	2,7	79°	5,7	1,54			
28/05/2016	11	19,1	19,1	18	64	69	64	922	922	921	2,7	75°	6,8	225,2			
28/05/2016	12	21,5	21,5	19,1	52	64	52	922	922	922	3,7	85°	7,3	1065			
28/05/2016	13	24	24	21,5	46	53	46	923	923	922	3,9	83°	7,5	1932			
28/05/2016	14	25,3	25,3	23,7	44	47	44	922	923	922	3,3	71°	7,7	2242			
28/05/2016	15	25,6	26,5	24,9	41	44	40	922	922	922	3,2	39°	7,9	2522			
28/05/2016	16	26,3	26,6	25,4	41	43	38	921	922	921	2,8	55°	6,7	2435			
28/05/2016	17	26,7	26,9	25,6	38	44	37	920	921	920	2,5	64°	7,2	2378			
28/05/2016	18	26,8	27,1	26,2	36	40	35	919	920	919	2,8	60°	7,3	2156			
28/05/2016	19	26,6	27,4	26,5	35	37	32	920	920	919	1,9	49°	6,2	1601			
28/05/2016	20	26,3	27,1	26	37	38	33	919	920	919	1,4	66°	5,4	724,6			
28/05/2016	21	25	26,5	25	41	41	36	919	919	919	2,1	84°	4,7	203,4			

Data	Hora	Temperatura (°C)				Umidade (%)				Pressão (hPa)				Vento (m/s)			Radiação (kJ/m²)
		UTC	Inst.	Máx.	Mín.	Inst.	Máx.	Mín.	Inst.	Máx.	Mín.	Vel.	Dir.	Raj.			
30/05/2016	10	16,5	16,5	16,3	76	77	72	918	918	918	2,7	76°	5,6	1,471			
30/05/2016	11	18,3	18,3	16,4	70	77	70	918	918	918	3	54°	6,5	249,4			
30/05/2016	12	20,2	20,2	18,3	64	70	63	918	918	918	3,4	52°	8,2	1058			
30/05/2016	13	22,3	22,4	20,2	57	64	57	918	918	918	3,5	44°	7,9	1765			
30/05/2016	14	24,4	24,4	22,3	50	58	49	918	918	918	3,6	38°	8,7	2300			
30/05/2016	15	25,2	25,3	24,3	43	51	43	917	918	917	3,8	22°	8	2629			
30/05/2016	16	26,4	26,6	24,9	43	46	40	917	918	917	3	3°	8	2712			
30/05/2016	17	26,9	27,7	26,1	41	43	39	917	917	917	2,1	350°	8,2	2546			
30/05/2016	18	27,9	28,1	26,8	37	42	34	916	917	916	2,4	347°	7	2146			
30/05/2016	19	27,8	28,3	27,3	37	39	35	916	916	916	2	341°	6,2	1563			
30/05/2016	20	27,3	27,8	27	39	39	36	916	916	916	1,5	317°	5,3	866,5			
30/05/2016	21	25,7	27,3	25,7	44	44	38	916	916	916	1,1	321°	3,6	173,9			

Apêndice D – Resultados dos demais dias de teste

Perfis de temperatura

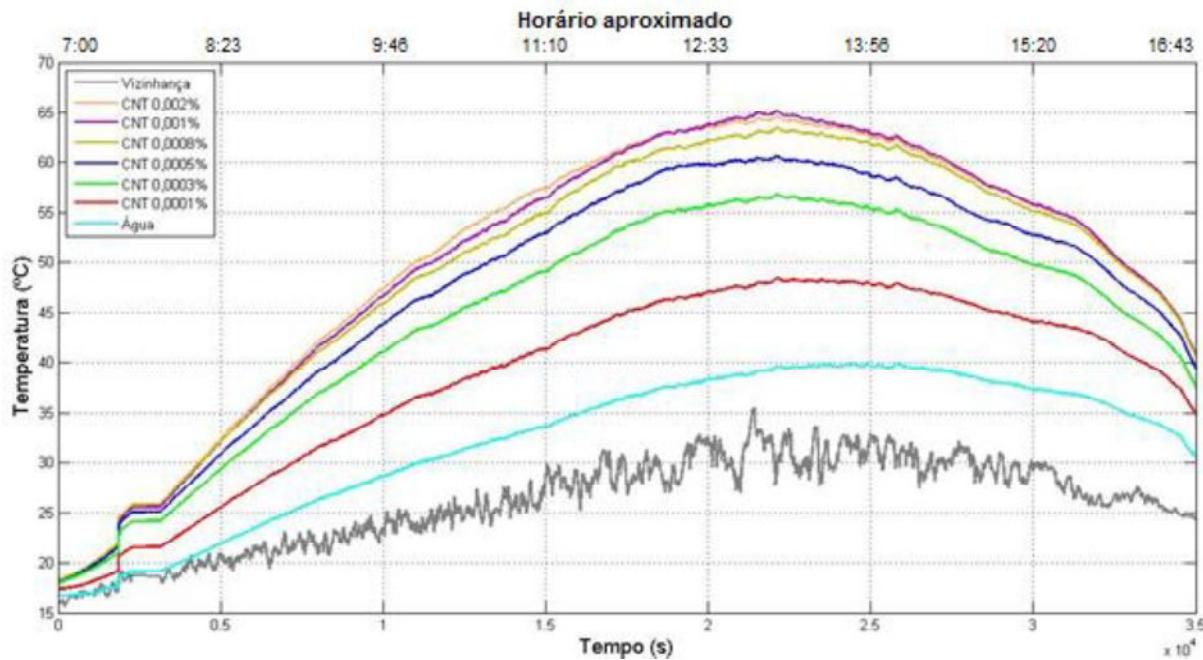


Figura D.1 – Perfis de temperatura dos nanofluidos de nanotubos de carbono em água (0,0001% a 0,002%) e do fluido base testados no dia 24/5/2016.

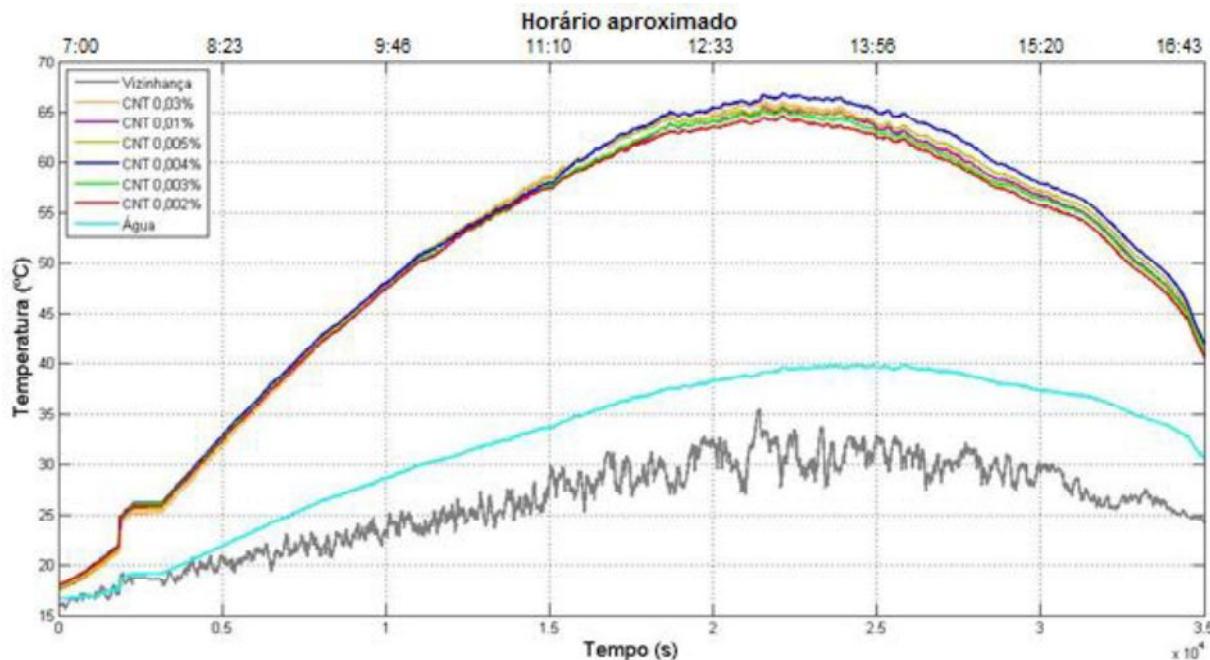


Figura D.2 – Perfis de temperatura dos nanofluidos de nanotubos de carbono em água (0,002% a 0,03%) e do fluido base testados no dia 24/5/2016.

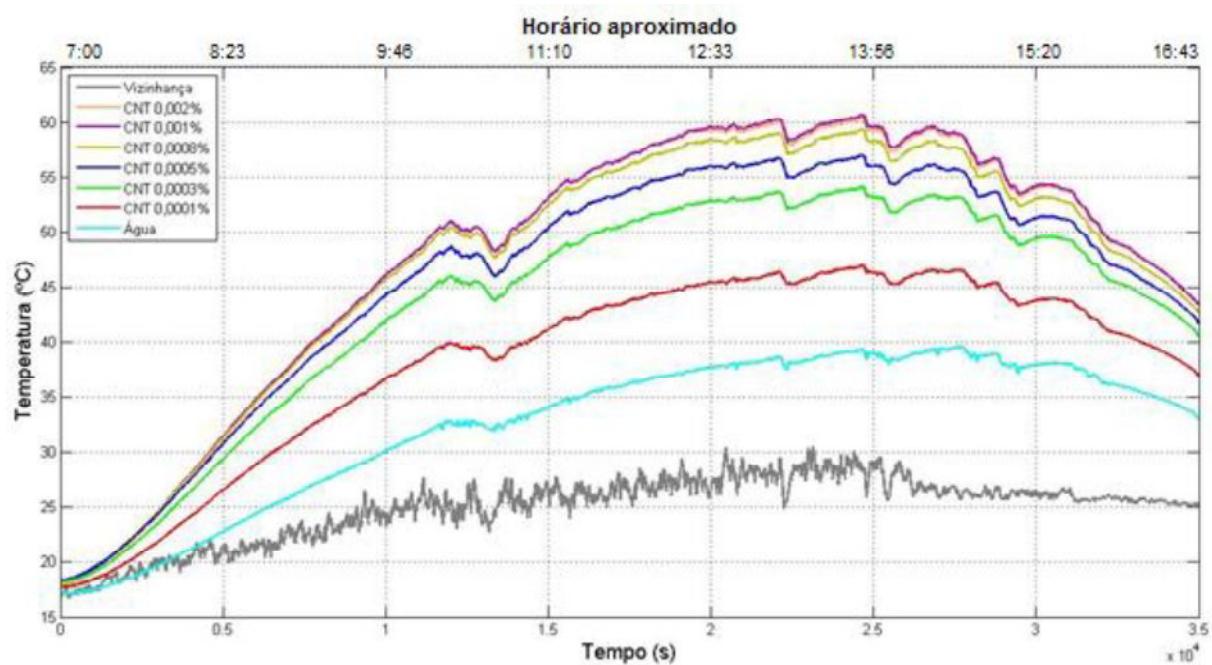


Figura D.3 – Perfis de temperatura dos nanofluidos de nanotubos de carbono em água (0,0001% a 0,002%) e do fluido base testados no dia 25/5/2016.

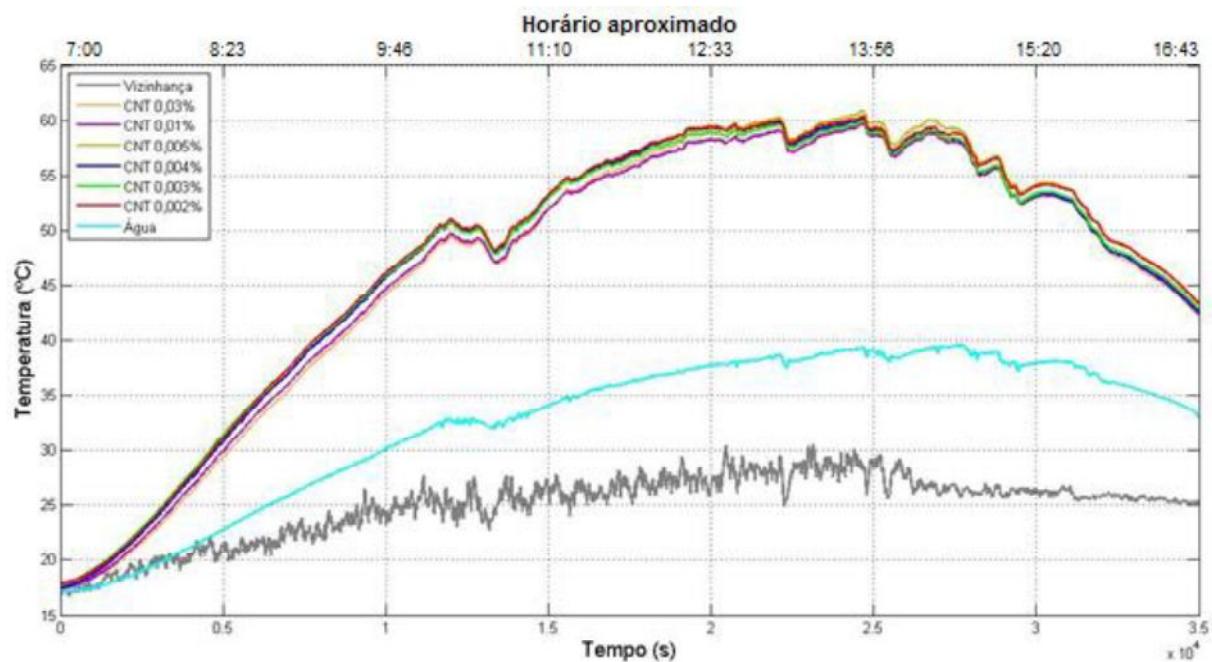


Figura D.4 – Perfis de temperatura dos nanofluidos de nanotubos de carbono em água (0,002% a 0,03%) e do fluido base testados no dia 25/5/2016.

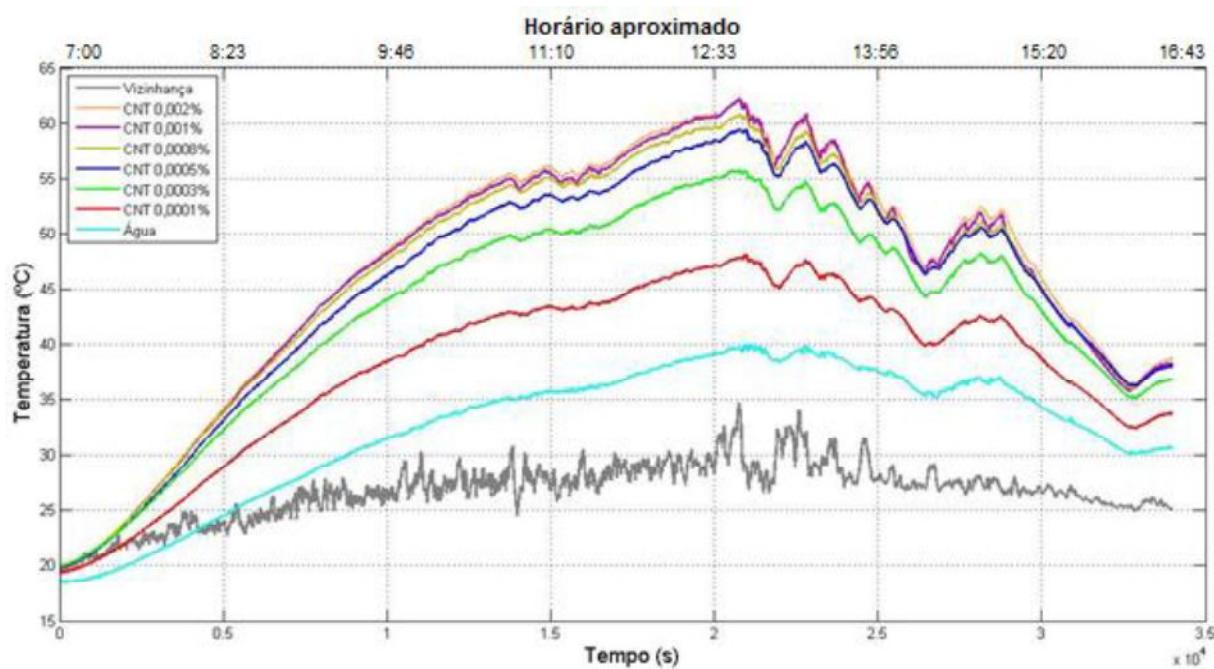


Figura D.5 – Perfis de temperatura dos nanofluidos de nanotubos de carbono em água (0,0001% a 0,002%) e do fluido base testados no dia 26/5/2016.

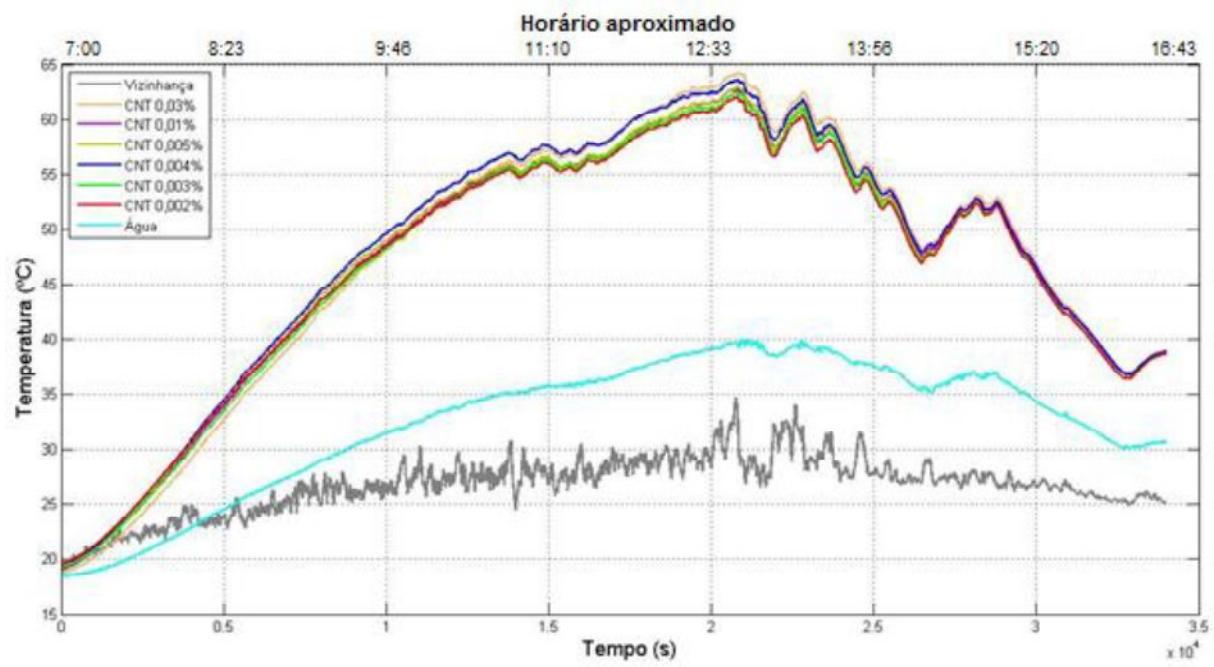


Figura D.6 – Perfis de temperatura dos nanofluidos de nanotubos de carbono em água (0,002% a 0,03%) e do fluido base testados no dia 26/5/2016.

Energia total armazenada na fase de aquecimento

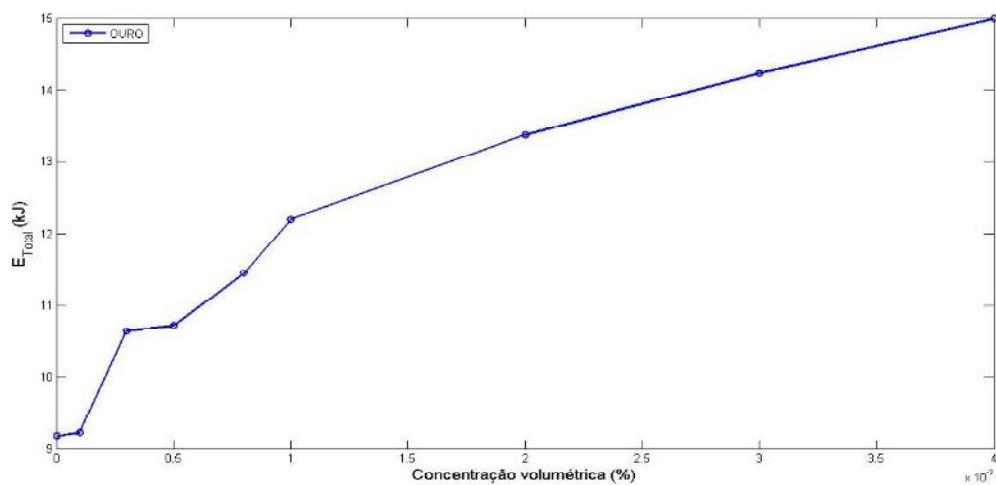


Figura D.7 – Resultados da energia total armazenada na fase de aquecimento em função da concentração volumétrica de nanopartículas de ouro para o dia 8/5/2016.

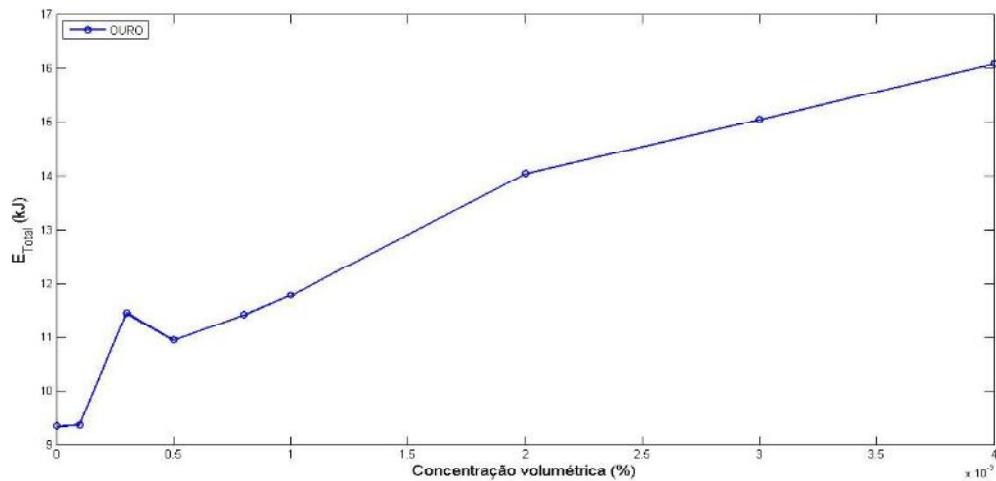


Figura D.8 – Resultados da energia total armazenada na fase de aquecimento em função da concentração volumétrica de nanopartículas de ouro para o dia 18/5/2016.

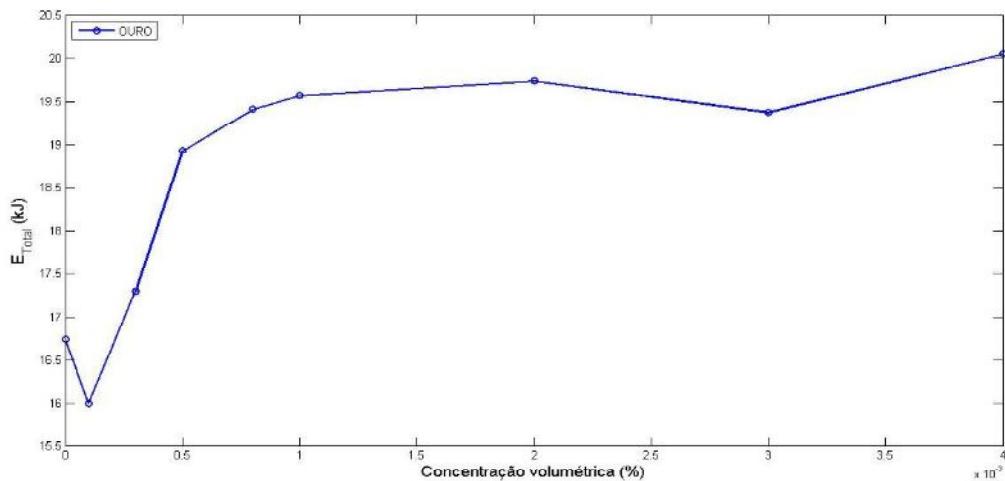


Figura D.9 – Resultados da energia total armazenada na fase de aquecimento em função da concentração volumétrica de nanopartículas de ouro para o dia 22/5/2016.

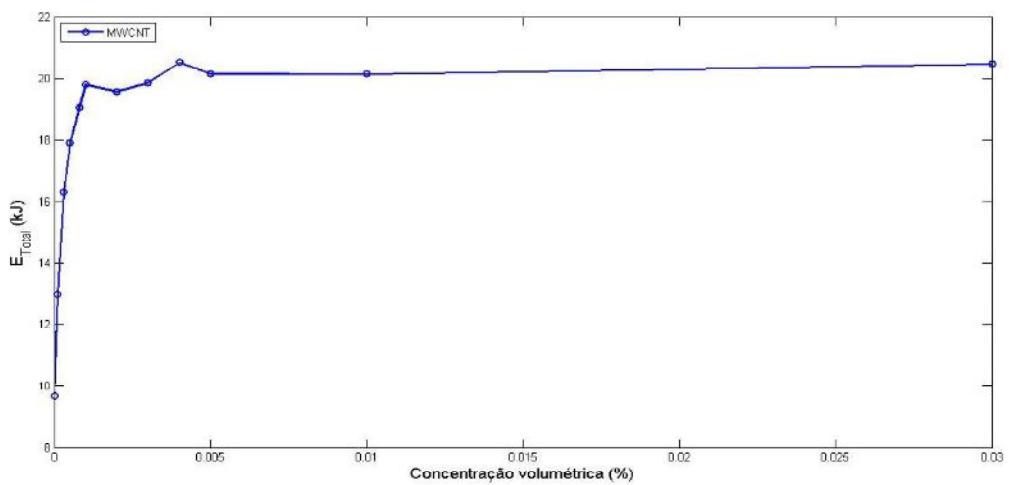


Figura D.10 – Resultados da energia total armazenada na fase de aquecimento em função da concentração volumétrica de nanotubos de carbono para o dia 24/5/2016.

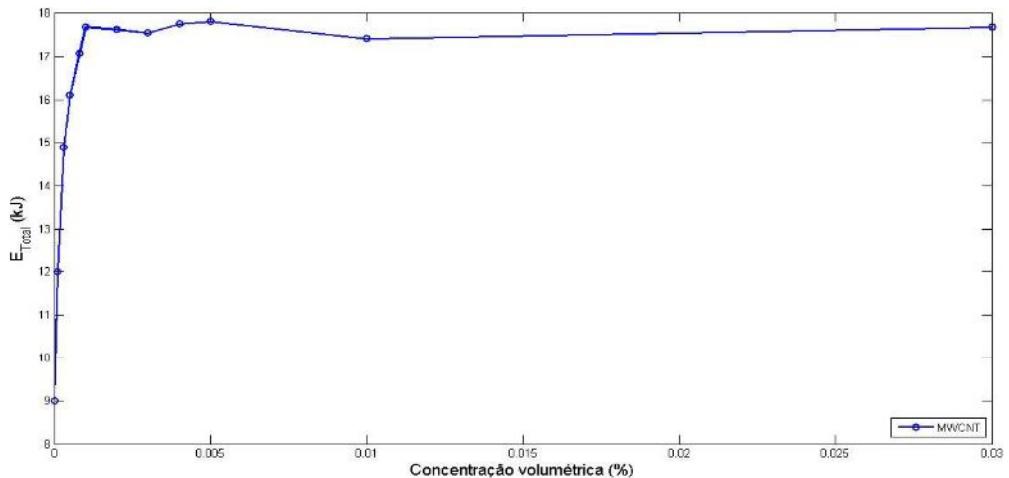


Figura D.11 – Resultados da energia total armazenada na fase de aquecimento em função da concentração volumétrica de nanotubos de carbono para o dia 25/5/2016.

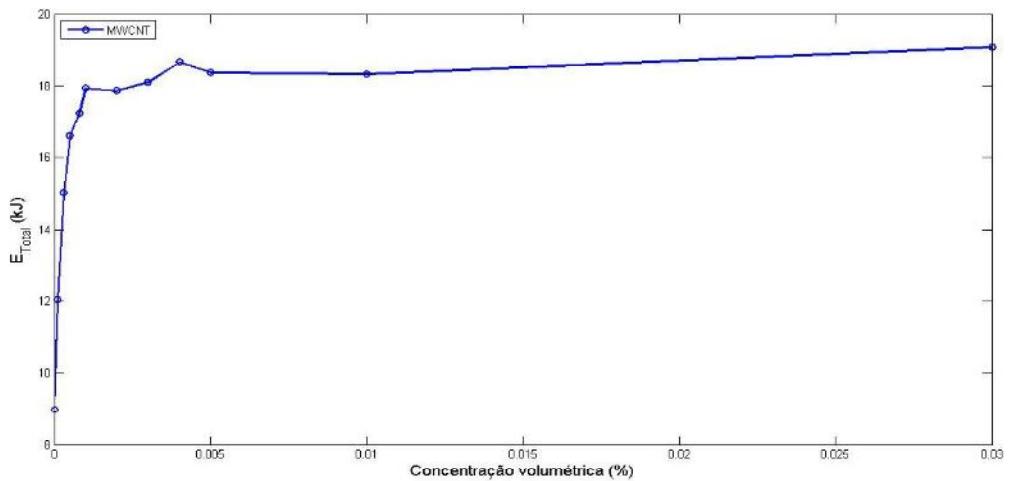


Figura D.12 – Resultados da energia total armazenada na fase de aquecimento em função da concentração volumétrica de nanotubos de carbono para o dia 26/5/2016.

Taxa de Variação da temperatura

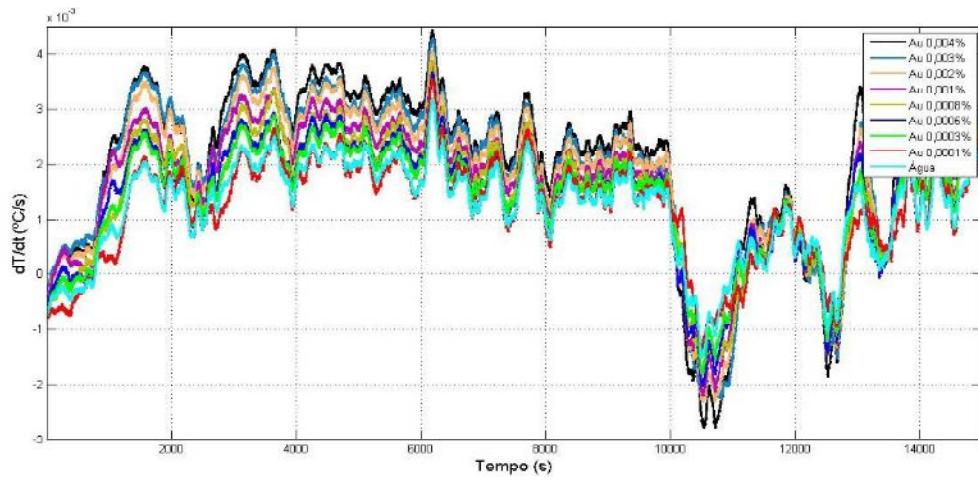


Figura D.13 - Taxa de variação da temperatura para as diferentes concentrações de nanofluido de ouro em água e do fluido base testados no dia 8/5/2016.

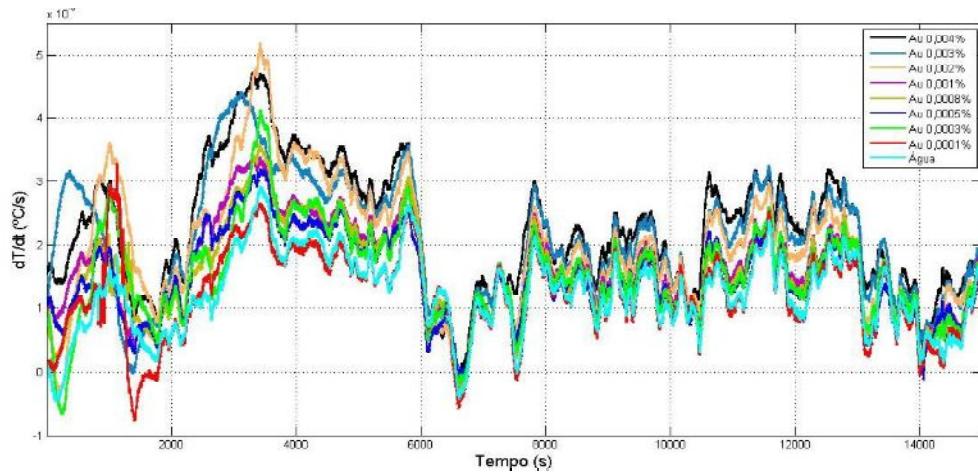


Figura D.14 - Taxa de variação da temperatura para as diferentes concentrações de nanofluido de ouro em água e do fluido base testados no dia 18/5/2016.

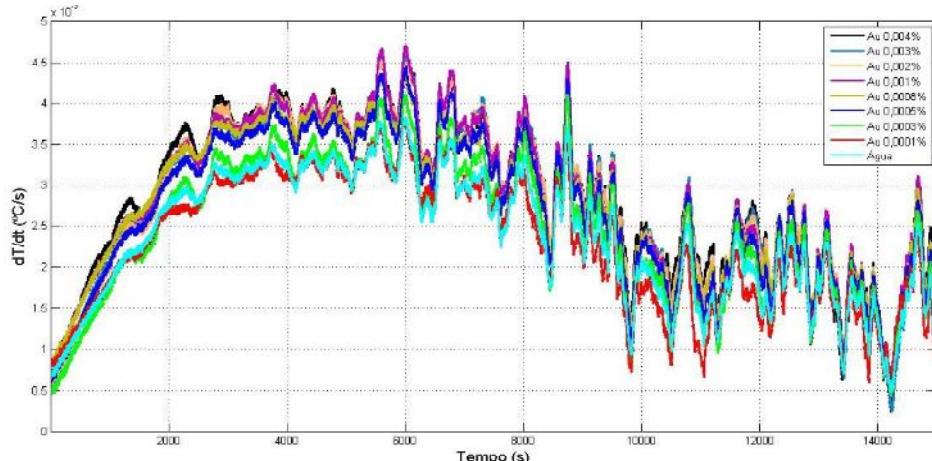


Figura D.15 - Taxa de variação da temperatura para as diferentes concentrações de nanofluido de ouro em água e do fluido base testados no dia 22/5/2016.

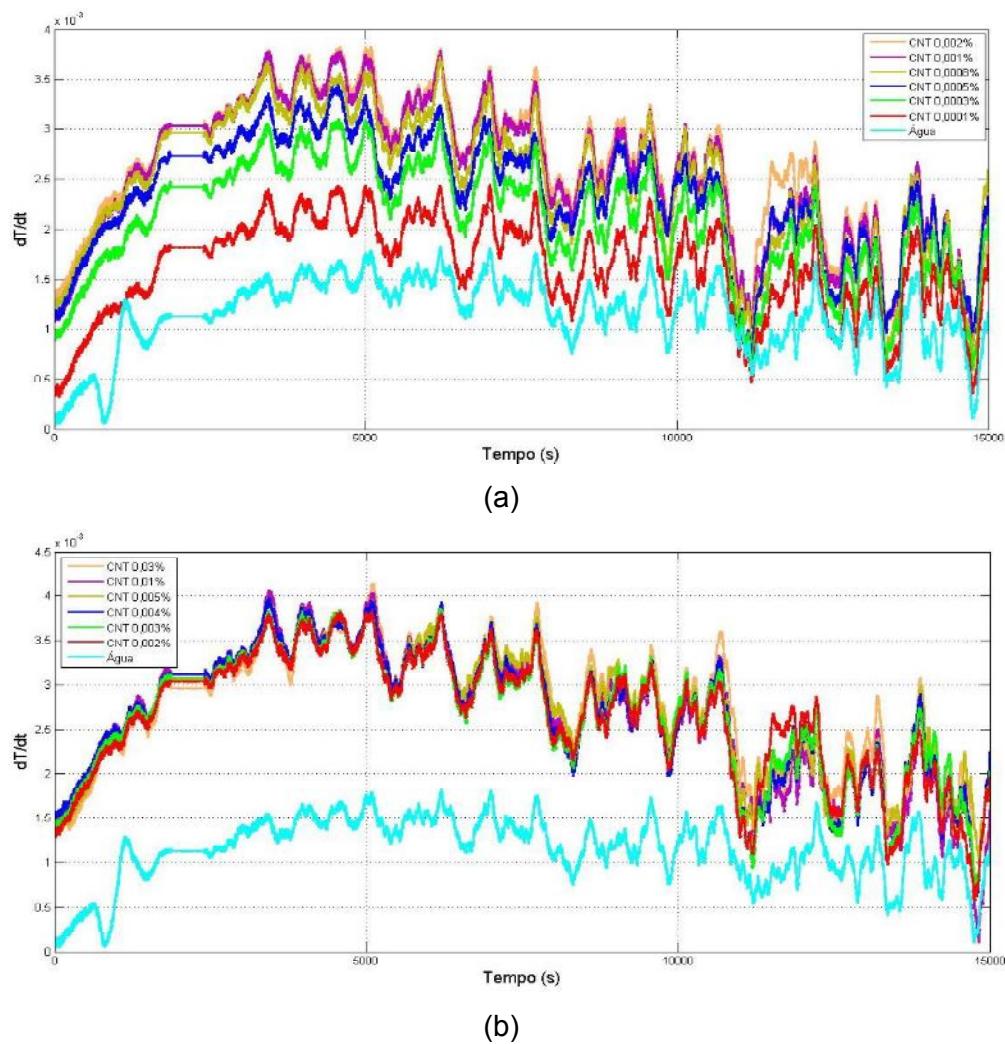


Figura D.16 - Taxa de variação da temperatura para as diferentes concentrações de nanofluido de nanotubos de carbono em água (a) 0,0001% a 0,002%, (b) 0,002% a 0,03%, e do fluido base testados no dia 24/5/2016.

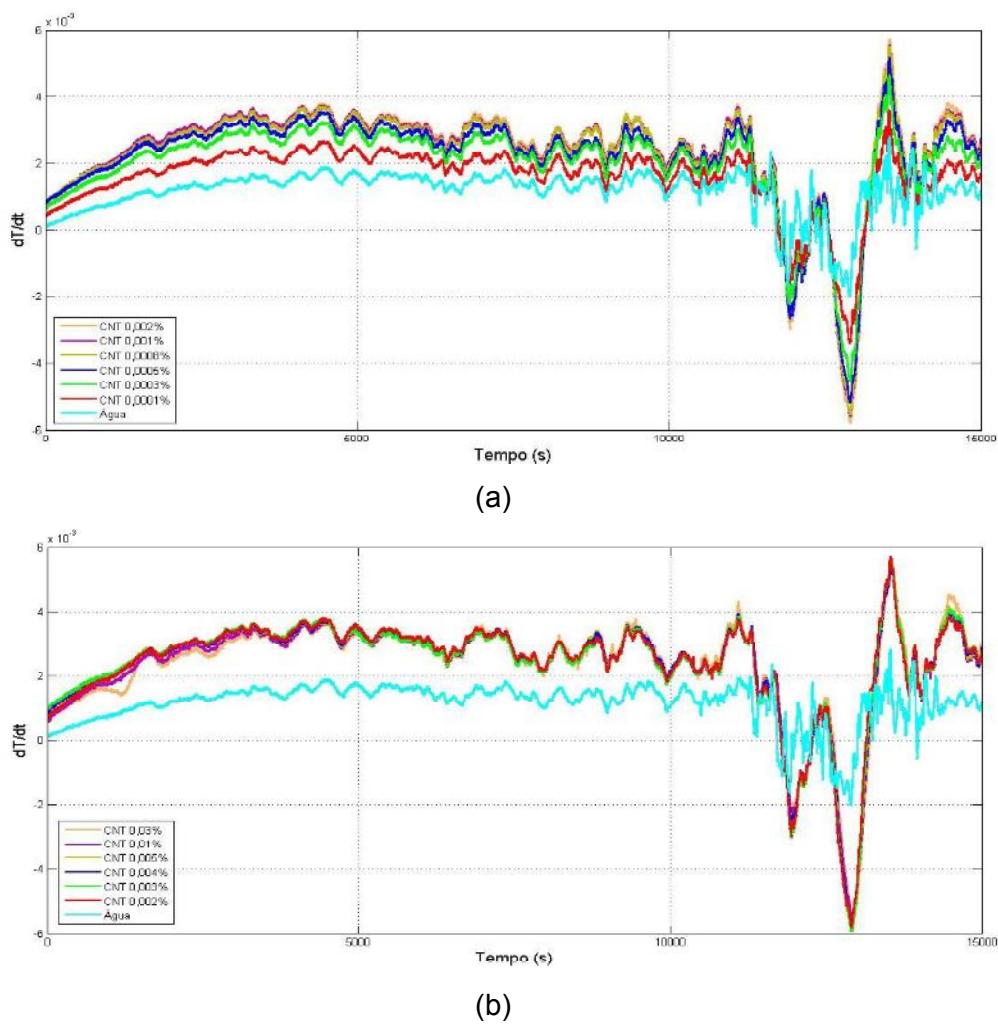


Figura D.17 - Taxa de variação da temperatura para as diferentes concentrações de nanofluido de nanotubos de carbono em água (a) 0,0001% a 0,002%, (b) 0,002% a 0,03%, e do fluido base testados no dia 25/5/2016.

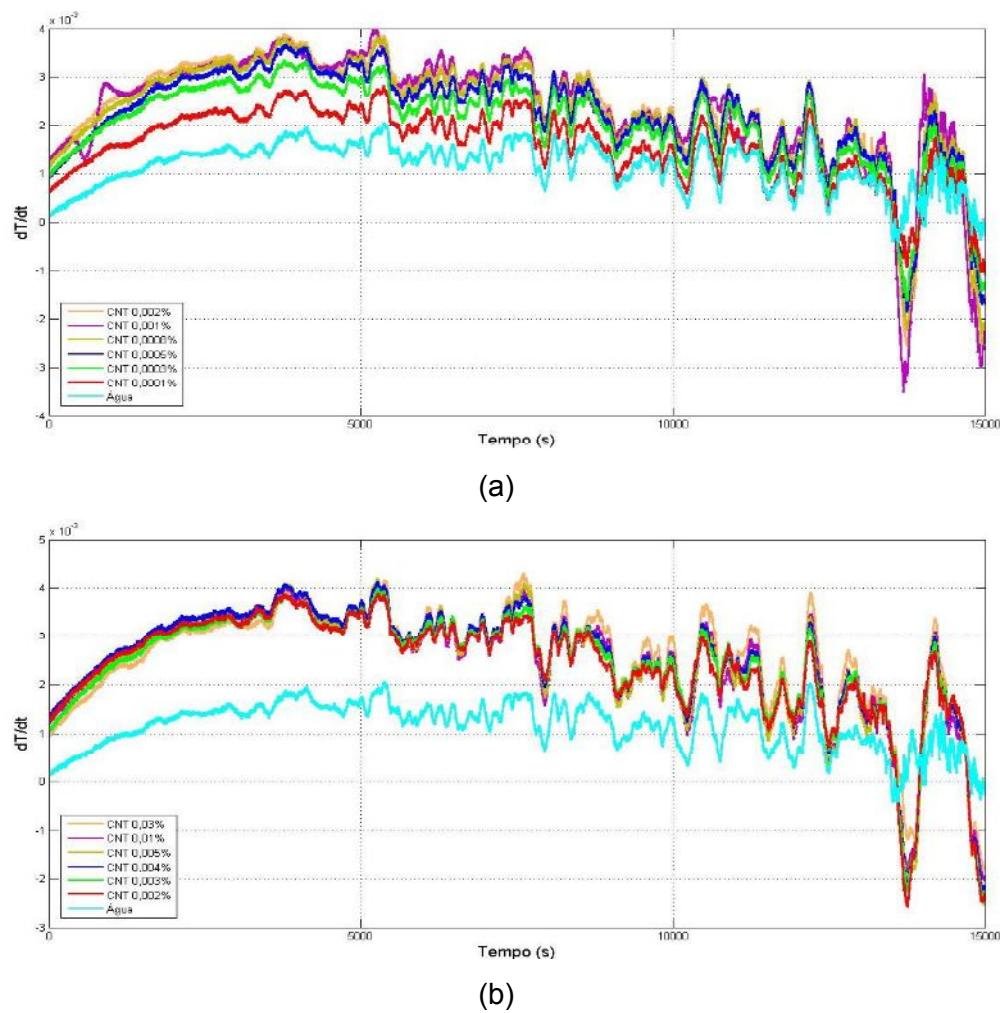


Figura D.18 - Taxa de variação da temperatura para as diferentes concentrações de nanofluido de nanotubos de carbono em água (a) 0,0001% a 0,002%, (b) 0,002% a 0,03%, e do fluido base testados no dia 26/5/2016.

Taxa de absorção específica (“SAR”)

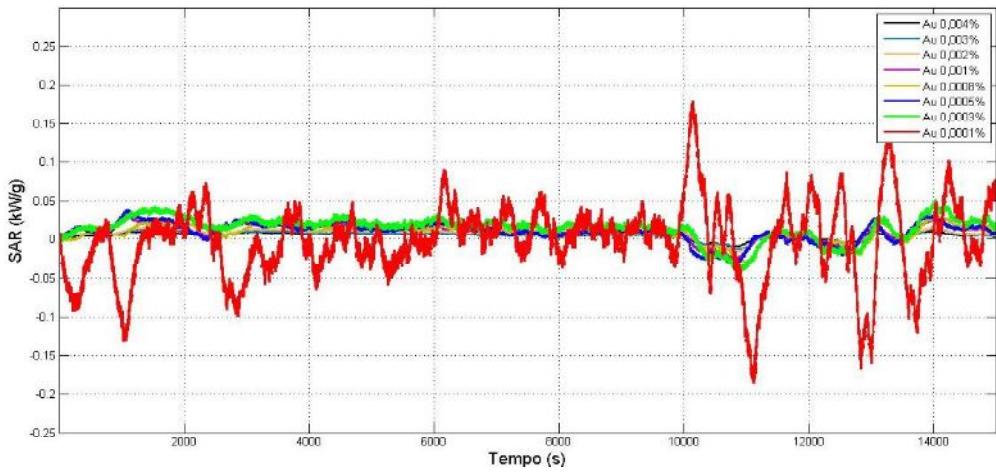


Figura D.19 - Taxa de absorção específica (“SAR”) para os nanofluidos de ouro em água testados no dia 8/5/2016.

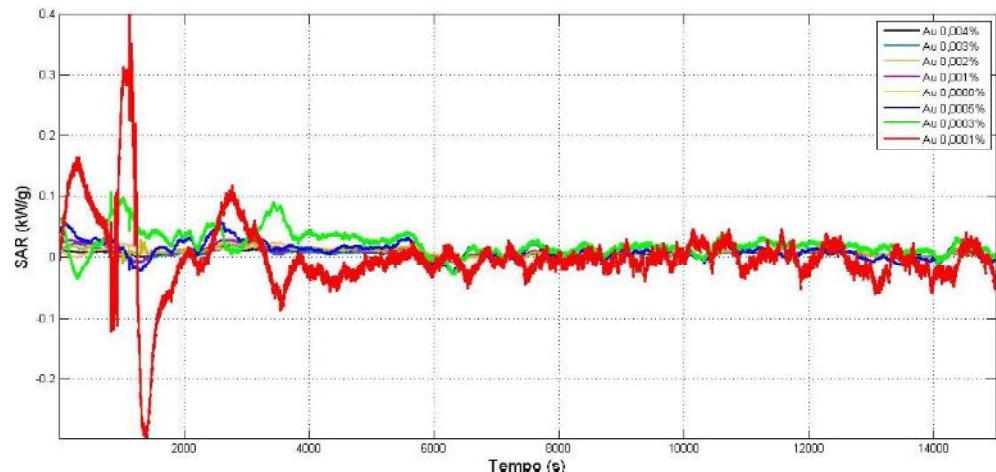


Figura D.20 - Taxa de absorção específica (“SAR”) para os nanofluidos de ouro em água testados no dia 18/5/2016.

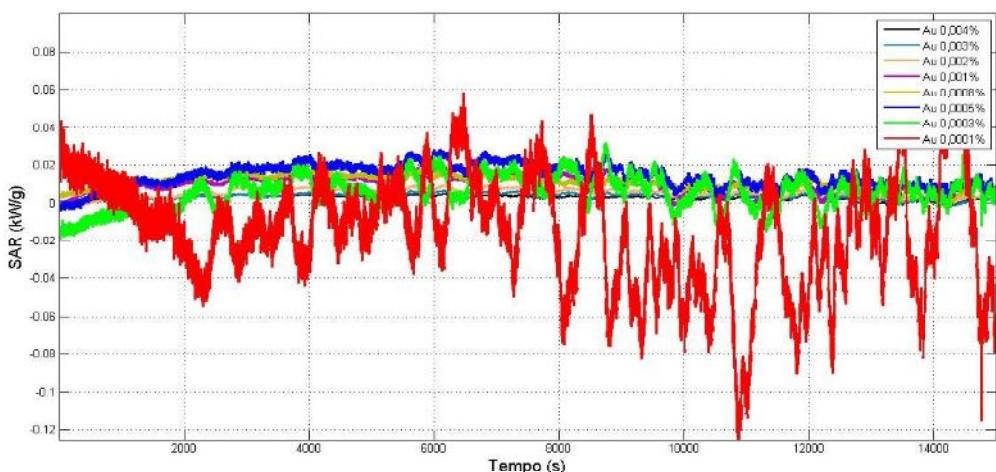


Figura D.21 - Taxa de absorção específica (“SAR”) para os nanofluidos de ouro em água testados no dia 22/5/2016.

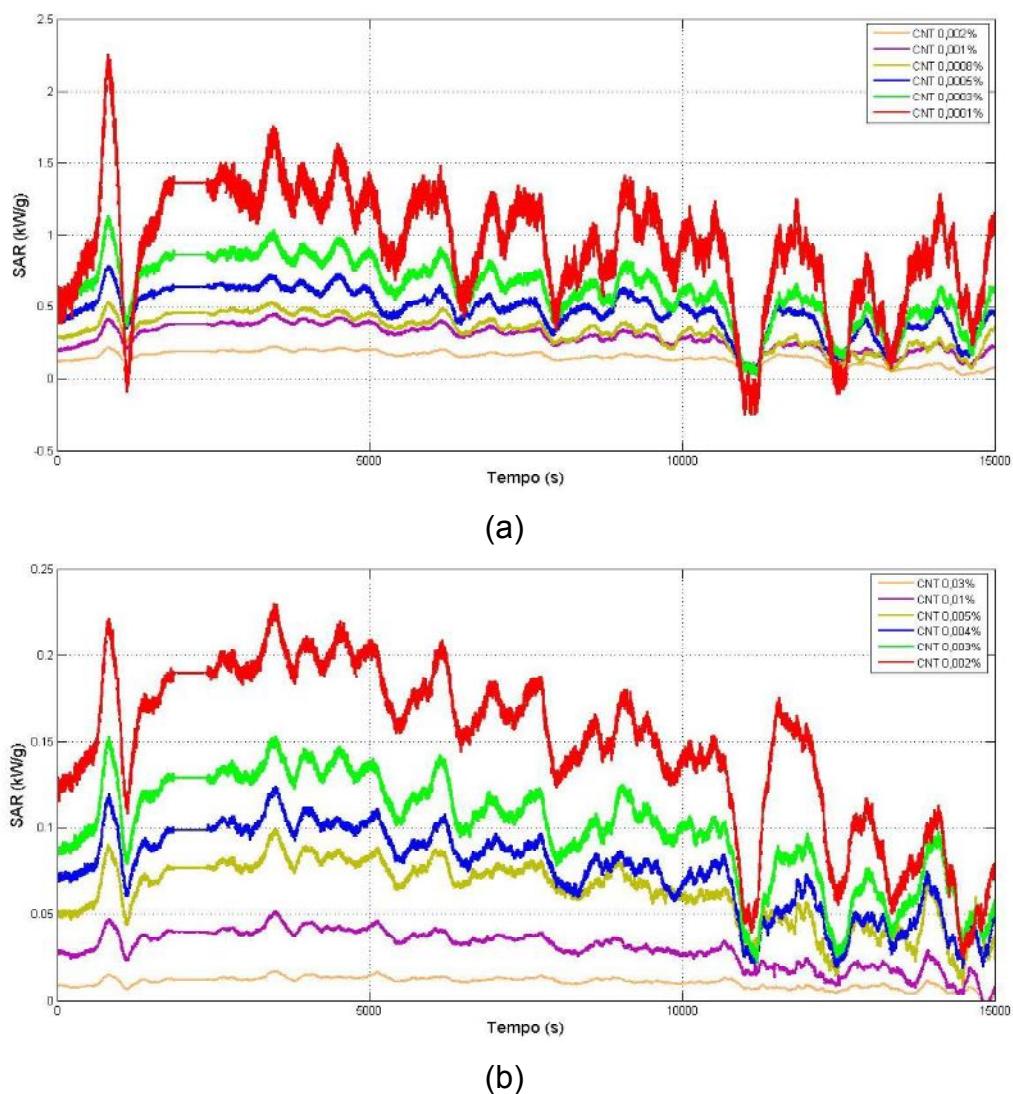


Figura D.22 - Taxa de absorção específica (“SAR”) para os nanofluidos de nanotubos de carbono em água (a) 0,0001% a 0,002%, (b) 0,002% a 0,03%, testados no dia 24/5/2016.

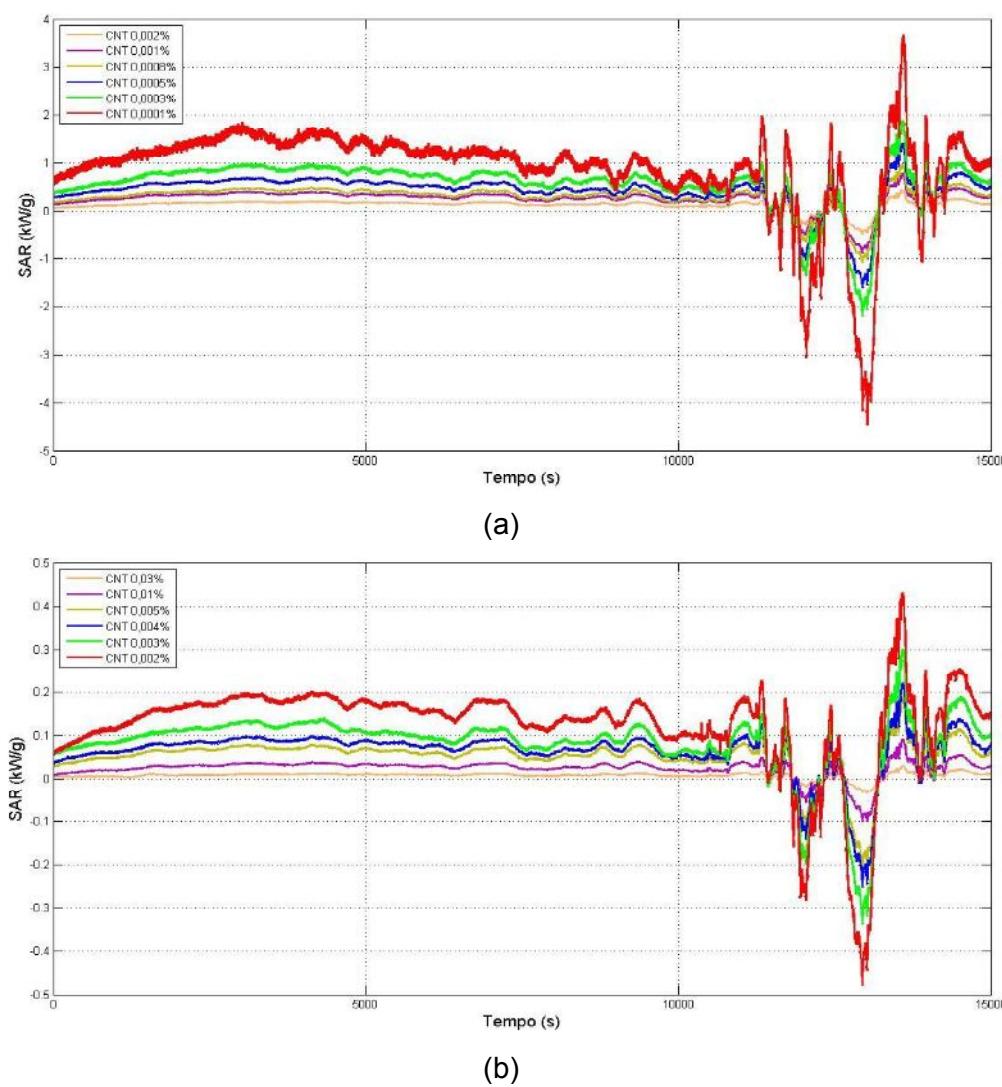
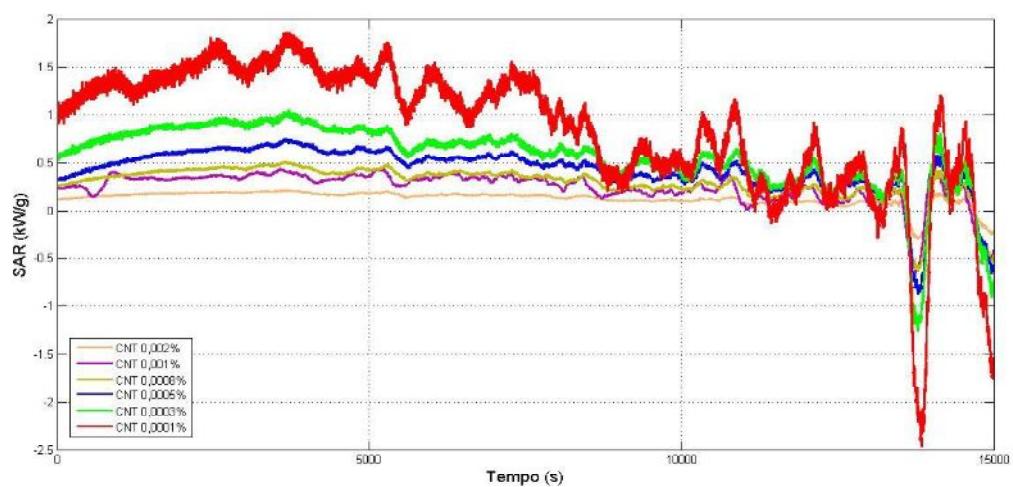
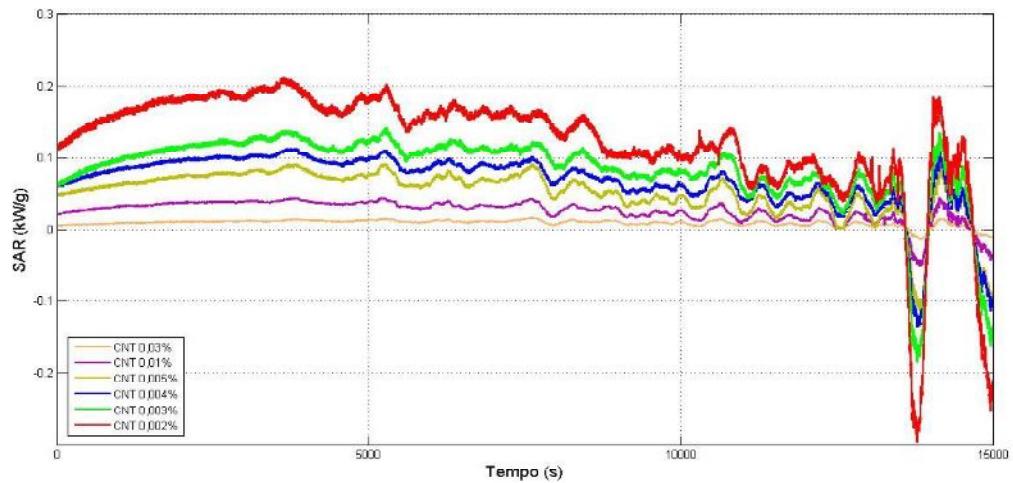


Figura D.23 - Taxa de absorção específica (“SAR”) para os nanofluidos de nanotubos de carbono em água (a) 0,0001% a 0,002%, (b) 0,002% a 0,03%, testados no dia 25/5/2016.



(a)



(b)

Figura D.24 - Taxa de absorção específica (“SAR”) para os nanofluidos de nanotubos de carbono em água (a) 0,0001% a 0,002%, (b) 0,002% a 0,03%, testados no dia 26/5/2016.