

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA
BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

GABRIEL MANCEBO RUSSO

**INFLUÊNCIA DO FLUIDO DE TRABALHO NO
DESEMPENHO TÉRMICO DE TERMOSSIFÕES**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PONTA GROSSA

2017

GABRIEL MANCEBO RUSSO

**INFLUÊNCIA DA FLUIDO DE TRABALHO NO
DESEMPENHO TÉRMICO DE TERMOSSIFÕES**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, do Departamento Acadêmico de Mecânica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador:

Prof. Dr. *Thiago Antonini Alves*

Coorientador:

M.E. *Felipe Baptista Nishida*

PONTA GROSSA

2017



TERMO DE APROVAÇÃO

INFLUÊNCIA DO FLUIDO DE TRABALHO NO DESEMPENHO TÉRMICO DE TERMOSSIFÕES

por

GABRIEL MANCEBO RUSSO

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 11 de dezembro de 2017 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Thiago Antonini Alves
Orientador

Prof. Me. Gilberto Zammar
Membro Titular

Prof. Dr. Luiz Eduardo Melo Lima
Membro Titular

Prof. Dr. Marcos Eduardo Soares
Responsável pelos TCC

**Prof. Dr. Marcelo Vasconcelos de
Carvalho**
Coordenador do Curso

Dedico este Trabalho aos meus pais, *Eliana* e *José*, meu irmão, *Henrique*, e aos não mais presentes, *Nilson* e *Rosa*.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente meu agradecimento a aqueles que sem a presença e o apoio nada disso seria possível, meus pais, *José* e *Eliana*. Todo o suporte nos momentos de necessidade e todos os sorrisos nos momentos de vitórias, meus sonhos se tornaram nossos sonhos e todas as minhas conquistas são suas conquistas.

Ao meu orientador, Prof. Dr. *Thiago Antonini Alves*, meus mais sinceros agradecimentos pela paciência e disponibilidade, além de todo o apoio dentro e fora do desenvolvimento desse trabalho.

Ao coorientador *Felipe Baptista Nishida*, por todo o auxílio na preparação e execução dos testes e pela amizade durante a faculdade.

A todos que de alguma forma contribuíram para minha formação e que me auxiliaram nessa difícil jornada.

A Universidade Tecnológica Federal do Paraná por fornecer toda a estrutura e conhecimento necessário para meu desenvolvimento profissional e pessoal.

A minha família, por todo o suporte mesmo longe vocês são a parte mais importante de tudo que faço, em especial a aqueles que não estão mais presentes entre nós, Vó e Tio, aonde quer que vocês estejam essa conquista é de vocês, queria vocês aqui para comemorarem comigo.

Ninguém baterá tão forte quanto a vida. Porém, não se trata de quão forte pode bater, se trata de quão forte pode ser atingido e continuar seguindo em frente. É assim que a vitória é conquistada.

Rocky Balboa

RESUMO

RUSSO, Gabriel Mancebo. **Influência do Fluido de Trabalho no Desempenho Térmico de Termossifões**. 2017. 46 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2017.

Os termossifões são dispositivos passivos de transferência de calor que utilizam o calor latente de vaporização para realizar a troca térmica com uma pequena diferença de temperatura. É constituído por um tubo metálico evacuado em seu interior que pode ser preenchido por diferentes fluidos de trabalho, cada um desses fluidos possui características que definem a operacionalidade do termossifão. Neste trabalho foi executada uma investigação experimental do desempenho térmico de diferentes fluidos de trabalho em termossifões que podem ser utilizados no controle térmico de equipamentos eletroeletrônicos. Os fluidos de trabalhos considerados foram acetona, água, etanol e metanol. Os termossifões foram fabricados de cobre com um diâmetro externo de 9,45 mm, diâmetro interno de 7,75 mm e comprimento total de 200 mm, com um evaporador de 80 mm de comprimento, uma seção adiabática de 20 mm de comprimento e um condensador de 100 mm de comprimento. Os termossifões foram carregados com 1,39 mL de fluido de trabalho, correspondendo a uma razão de preenchimento de 40% do volume do evaporador. Os testes experimentais foram executados na posição vertical considerando cargas térmicas de 5 W e 25 W em um ambiente com temperatura controlada a 20 °C dentro do Laboratório de Controle Térmico (LabCT) do Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) *Câmpus* Ponta Grossa. Os termossifões operaram satisfatoriamente em todos os testes. A distribuição da temperatura de operação em função do tempo e o comportamento da resistência térmica em função da potência dissipada foram apresentados para cada fluido de trabalho analisado. Os resultados obtidos indicaram que a acetona é o fluido de trabalho que apresenta o melhor desempenho térmico.

Palavras-chave: Termossifão. Fluido de Trabalho. Desempenho Térmico. Estudo Experimental.

ABSTRACT

RUSSO, Gabriel Mancebo. **Influence of Working Fluid on Thermal Performance of Thermosyphons**. 2017. 46 p. Final Course Assignment (Bachelor's Degree in Mechanical Engineering) – Federal University of Technology – Paraná. Ponta Grossa, 2017.

Thermosyphons are passive devices that use latent heat to perform heat exchange with a small temperature difference. It is composed of a metallic tube evacuated and filled by diverse working fluids, each of these fluids have characteristics that define the operability of the thermosyphon. In this research, an experimental investigation was performed of the thermal performance of different working fluids in thermosyphons that can be used in thermal control of electronic equipment. The working fluids were considered acetone, water, ethanol, and methanol. The thermosyphons are manufactured of copper with an outer diameter of 9.45 mm, an inner diameter of 7.75 mm, a total length of 200 mm, whereas an evaporator of 80 mm length, an adiabatic region of 20 mm in length and a condenser of 100 mm in length. They were loaded with 1.39 mL of the working fluid, corresponding to a filling ratio of 40% of the evaporator volume. Experimental tests were performed in a vertical position considering thermal loads from 5 W and 25 W in an environment with temperature controlled at 20 °C inside the Laboratory of Thermal Control (LabCT) of the Academic Department of Mechanics (DAMEC) of the Federal University of Technology - Paraná (UTFPR) Ponta Grossa Campus. The thermosyphons operated satisfactorily in all the tests. The operating temperature distribution as a function of time and the heat resistance behavior as a function of power dissipation have been presented for each analyzed working fluid. The results obtained indicated that acetone is the working fluid that has the best thermal performance.

Keywords: Thermosyphon. Working Fluid. Thermal Performance. Experimental.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Princípio de funcionamento de um termossifão	11
Figura 2 - Aquecedor de <i>Perkins</i>	14
Figura 3 - Forno de <i>Perkins</i>	15
Figura 4 - Termelétrica	16
Figura 5 - Coletor solar com auxílio de termossifão	17
Figura 6 - Silos de secagem.....	17
Figura 7 - Tubos de calor utilizados para evitar congelamento de estradas.	18
Figura 8 - Seleção de fluido de trabalho em função da faixa de temperatura de operação em °C	20
Figura 9 - Figura de Mérito	23
Figura 10 - Posição dos termopares	33
Figura 11- Comportamento da temperatura em função do tempo para a acetona....	36
Figura 12 - Comportamento da temperatura em função do tempo para a água.....	37
Figura 13 - Comportamento da temperatura em função do tempo para o etanol.....	37
Figura 14 - Comportamento da temperatura em função do tempo para o metanol...	38
Figura 15 - Comportamento resistência x potência aplicada.....	39

LISTA DE FOTOGRAFIAS

Fotografia 1 - Elementos do tubo	Erro! Indicador não definido.
Fotografia 2 - Banho ultrassônico.....	Erro! Indicador não definido.
Fotografia 3 - Soldagem das tampas e do capilar	29
Fotografia 4 - Termossifão soldado	29
Fotografia 5 - Bomba de vácuo e termossifão	30
Fotografia 6 - Estação de preenchimento	31
Fotografia 7 - Configuração do teste	32
Fotografia 8 - Posição do resistor elétrico	33
Fotografia 9 - Montagem final do termossifão para o experimento	34

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Compatibilidade dos fluidos de trabalho.....	19
Tabela 2 - Faixa de operação dos fluidos de trabalho.....	21
Tabela 3 - Características dos termossifões	26
Tabela 4 - Propriedades dos fluidos de trabalho	27
Tabela 5 - Resistências térmicas	39

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
1.1 MOTIVAÇÃO	12
1.2 OBJETIVOS.....	12
1.2.1 Objetivo geral.....	12
1.2.2 Objetivos específicos	12
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO	12
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
2.1 HISTÓRIA E APLICAÇÕES.....	14
2.2 COMPONENTES FUNDAMENTAIS DE UM TERMOSSIFÃO	18
2.2.1 O Invólucro	18
2.2.2 Fluido de Trabalho	19
2.2.2.1 Figura de Mérito	22
2.3 REVISÃO DA LITERATURA.....	23
3 METODOLOGIA	25
3.1 CONSTRUÇÃO DOS TERMOSSIFÕES	25
3.1.1 Características dos Termossifões.....	25
3.1.2 Características dos Fluidos de trabalho.....	26
3.1.1 Limpeza dos Termossifões	27
3.1.4 Montagem dos Termossifões.....	28
3.1.5 Teste de Estanqueidade	29
3.1.6 Procedimento de Evacuação	30
3.1.7 Preenchimento dos Termossifões com o Fluido de Trabalho	31
3.2 TESTES EXPERIMENTAIS.....	32
3.2.1 Equipamentos.....	32
3.2.2 Procedimento Experimental.....	34
3.3 RESISTÊNCIA TÉRMICA.....	35
3.4 ANÁLISE DE INCERTEZAS	35
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	36
4.1 RESULTADOS EXPERIMENTAIS	36
4.2 RESISTÊNCIAS TÉRMICAS	38
5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	40
REFERÊNCIAS	41
APÊNDICE A – ANÁLISE DAS INCERTEZAS	44
APÊNDICE B – ARTIGOS PUBLICADOS	47

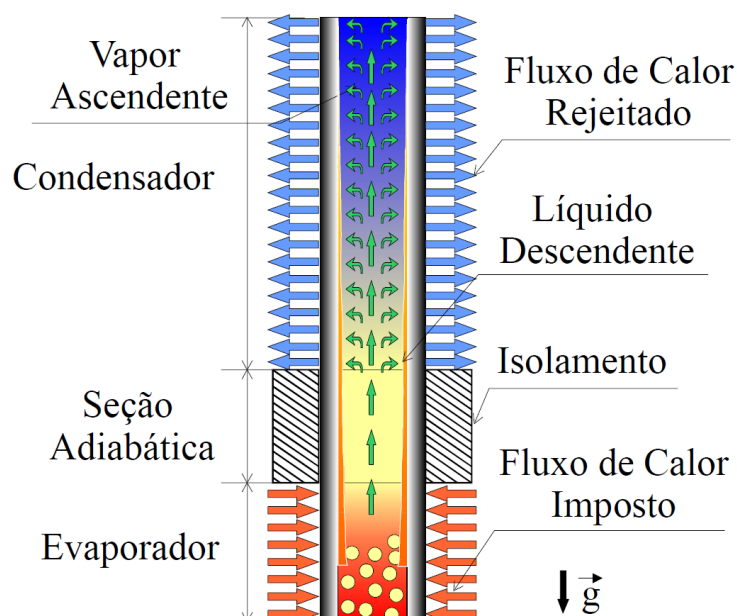
1. INTRODUÇÃO

Os termossifões são dispositivos passivos de transferência de calor altamente eficientes que utilizam o calor latente de vaporização em um sistema bifásico para, através de gradientes pequenos de temperatura, transferir energia em forma de calor. O fluido de trabalho, dentro do invólucro hermeticamente selado e evacuado, sofre mudanças de fases que transferem o calor.

Por se tratar de um sistema que opera com a pressão de trabalho igual a pressão de saturação do fluido escolhido na temperatura de operação, o limite dessa pressão de saturação define a faixa de temperatura em que ele pode trabalhar.

O termossifão possui três regiões distintas, como mostrado na Figura 1, condensador, evaporador e seção adiabática, essa última é uma região isolada termicamente do sistema, ou seja, não há transferência de calor nessa área do tubo para com o ambiente, portanto ela pode existir ou não dependendo da aplicação (MANTELLI, 2009).

Figura 1 - Princípio de funcionamento de um termossifão



Fonte: Mantelli (2009).

1.1 MOTIVAÇÃO

O termossifão possui uma grande capacidade de transferência de calor em uma seção transversal reduzida, isso potencializa suas aplicações. Podendo operar desde regiões com variação de temperatura mínimas até em faixas elevadas de temperatura. Um dos grandes responsáveis por esse grande leque de aplicações é o fluido de trabalho escolhido, por isso a escolha desse parâmetro operacional deve ser bem crítica e detalhada, para que a eficiência e as aplicações sejam maximizadas dentro dos dispositivos em que forem utilizados.

1.2 OBJETIVOS

Nesta seção serão apresentados os objetivos do desenvolvimento desse trabalho.

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo deste Trabalho é investigar experimentalmente a influência do fluido de trabalho no comportamento térmico de termossifões.

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos são:

- i) Construir termossifões com diferentes fluidos de trabalho.
- ii) Testar experimentalmente os termossifões sob diversas cargas térmicas e diferentes fluidos de trabalho.
- iii) Comparar o desempenho térmico dos termossifões com diferentes fluidos de trabalho.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

No Capítulo 1, são apresentadas uma breve explicação do funcionamento de termossifões e as motivações que levaram ao desenvolvimento desse Trabalho assim

como os objetivos dele. No Capítulo 2, são apresentados um breve histórico, um desenvolvimento sobre os componentes fundamentais e uma breve revisão da literatura já existente sobre esse tema. No Capítulo 3, é apresentada a metodologia, todo o procedimento de construção, descrevendo suas características, todos os procedimentos de preparação e montagem dos experimentos. No Capítulo 4, são apresentados os resultados obtidos nos testes experimentais e a discussão sobre a comparação entre eles, no Capítulo 5, são apresentadas as conclusões obtidas e sugestões de trabalhos futuros referentes a esse tema. Finalmente, são apresentados as referências utilizadas e os apêndices: uma análise das incertezas experimentais (Apêndice A) e o artigo intitulado “*Thermal Performance of Thermosyphon for Different Working Fluids*” (RUSSO *et al.*, 2016) publicado no periódico Engenharia Térmica (*Thermal Engineering*) disponível no Apêndice B.

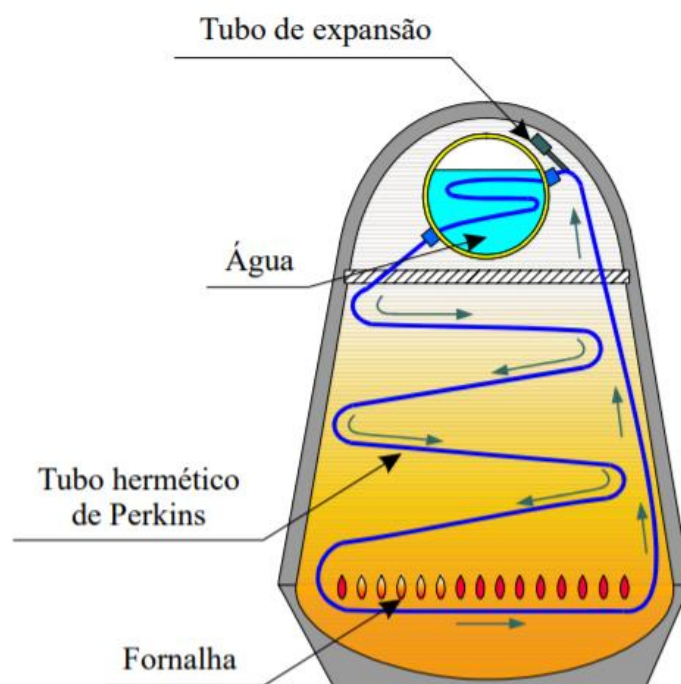
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, são apresentadas uma breve história da origem dos termosifões, uma descrição dos componentes fundamentais dos termosifões e uma breve revisão da literatura sobre o tema.

2.1 HISTÓRIA E APLICAÇÕES

Angier Marco Perkins e Ludlow Patton Perkins foram os pioneiros a utilizar um sistema de aquecimento de água com auxílio de um tubo de aço de pequeno diâmetro, como mostrado na Figura 2. O sistema desenvolvido por eles foi composto basicamente de um tubo hermético com água como fluido de trabalho, que conecta uma fornalha ao tanque, aquecendo indiretamente da água no tanque, através da corrente de água quente que passa dentro do tubo.

Figura 2 - Aquecedor de Perkins

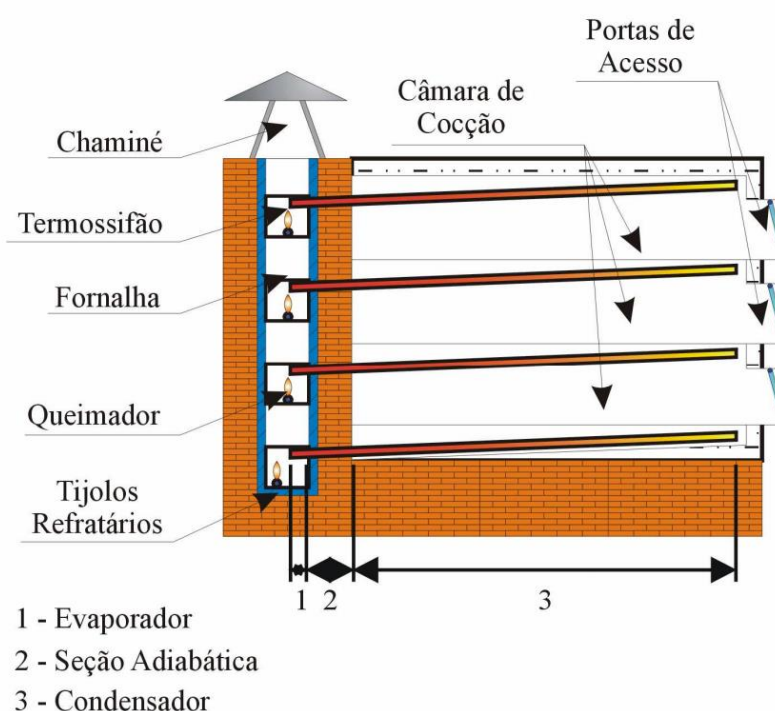


Fonte: Mantelli (2009).

A principal aplicação desses tubos foi em uma outra patente de *Perkins* denominada de “Forno de *Perkins*”, mostrado na Figura 3, aplicada como um forno de cocção de pães, sendo que estes tipos de fornos são utilizados até a atualidade. Nesse

forno, o calor das chamas aquece a água, atingindo a evaporação, o vapor se desloca até a extremidade do tubo onde sofre a condensação, onde o calor era passado para a câmara de cozimento, este circuito possui uma alta eficiência e economia, isso explica porque ainda é usado atualmente. Outra característica deste tipo de forno é o comprimento do evaporador, muito pequeno se comparado com o condensador.

Figura 3 - Forno de Perkins



Fonte: Mantelli (2009).

As aplicações dos termossifões são as mais diversas devido a algumas vantagens que ele possui, entre elas: ausência de partes móveis, dispensando motores e gastos com estas manutenções; não apresenta problemas de vedação entre as correntes de ar e de gases de combustão, evitando a contaminação do ar por mistura com os gases sendo expelidos; sua construção é relativamente simples e robusta, minimizando problemas com corrosão pelos gases de combustão (AGUIAR, 2016).

Trocadores de calor assistidos por termossifões são aplicáveis em quaisquer operações de médio ou grande porte onde se deseja aproveitar calor de uma corrente quente gasosa, onde normalmente iria ser liberado para a atmosfera sem recuperação de energia, ou onde se deseja aquecer um fluido a partir de gases de combustão.

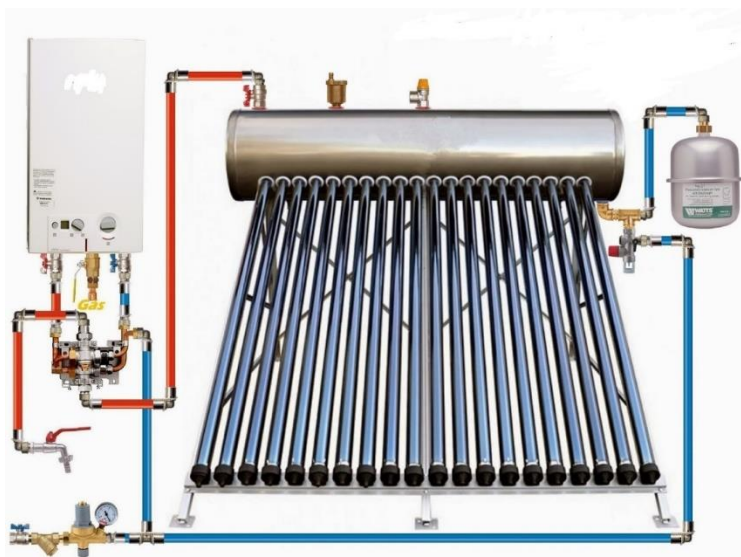
Uma vez que os termosifões podem ser aplicado em quaisquer operação de médio ou grande porte e ter uma vasta gama de aplicações são utilizados em pré-aquecimento de turbinas a gás, fornos e caldeiras em usinas termelétricas, Figura 4. Assim como refinarias de petróleo, e outras indústrias do gênero. Os termosifões também são utilizados em coletores solares à vácuo, Figura 5, que são altamente eficazes e aplicáveis para aquecimento de água para uso diário, ambientes e também piscinas. Outro ramo de aplicação é a secagem e desidratação de produtos alimentícios, Figura 6, e secagem de tecidos. Comumente é aplicado no resfriamento de eletroeletrônicos e na indústria civil para evitar congelamento de estradas, Figura 7, e vidros de janelas em regiões muito frias.

Figura 4 - Termelétrica



Fonte: Prime Engenharia

Figura 5 - Coletor solar com auxílio de termossifão



Fonte: Prime Engenharia

Figura 6 - Silos de secagem



Fonte: Prime Engenharia

Figura 7 - Tubos de calor utilizados para evitar congelamento de estradas



Fonte: Santo (2017).

2.2 COMPONENTES FUNDAMENTAIS DE UM TERMOSSIFÃO

O termossifão é constituído principalmente por dois componentes: o invólucro e o fluido de trabalho.

2.2.1 O Invólucro

O material do invólucro no qual o termossifão será construído deve considerar os fatores do fluido de trabalho, além de também considerar a pressão interna à qual será submetido, uma vez que Peterson (1994) diz que o termossifão deve ser comparado, dentro das devidas proporções, a um vaso de pressão.

Como os termossifões são tubos metálicos fechados hermeticamente e evacuados, resistentes mecanicamente a pressão interna, eles devem ser feitos de material compatível com as resistências mecânicas necessárias para trabalhar na faixa de operação para cada aplicação, por exemplo, pode ser feito de alumínio, aço inoxidável ou cobre, como é o caso dos termossifões tratados neste trabalho, para altas temperaturas e em meios corrosivos pode se usar plástico revestido com fibra de vidro ou fibra de carbono.

A compatibilidade química entre os fluidos de trabalho e os materiais deve ser analisada com atenção, pois assim como as propriedades termofísicas do fluido de trabalho, as

possíveis reações químicas que ocorrem entre o fluido e o material do invólucro, uma vez que esta reação pode comprometer o funcionamento de duas formas. A corrosão do tubo devido a incompatibilidade química ou também a formação de gases não condensáveis como produto da reação química, com a segunda podendo causar a falha e a diminuição da eficiência de funcionamento do termossifão. Peterson (1994) realizou um estudo sobre a compatibilidade cujos os resultados são apresentados na Tabela 1. sendo que: RU: recomendado pelo uso; RL: recomendado pela literatura; PC: provavelmente compatível; NR: não recomendado; NU: não utilizado; SD: sem dados; GQT: geração de vapor a qualquer temperatura; GET: geração de vapor em temperaturas elevadas.

Tabela 1 - Compatibilidade dos fluidos de trabalho

Fluidos de Trabalho	Cobre	Alumínio	Aço Inoxidável	Níquel
Água	RU	GQT	GET	PC
Acetona	RU	RL	PC	PC
Amônia	NU	RU	RU	RU
Metanol	RU	NR	GET	RL
Dow - A	RU	SD	RU	RU
Dow - E	RU	NR	RU	RL
Freon - 11	RU	RU	RU	SD
Freon - 113	RU	RU	RU	SD

Fonte: Peterson (1994)

Ainda na Tabela 1, pode ser percebido que alguns fluidos de trabalho dependem da temperatura para serem ou não compatíveis com certos materiais, por exemplo os casos de GQT e de GET.

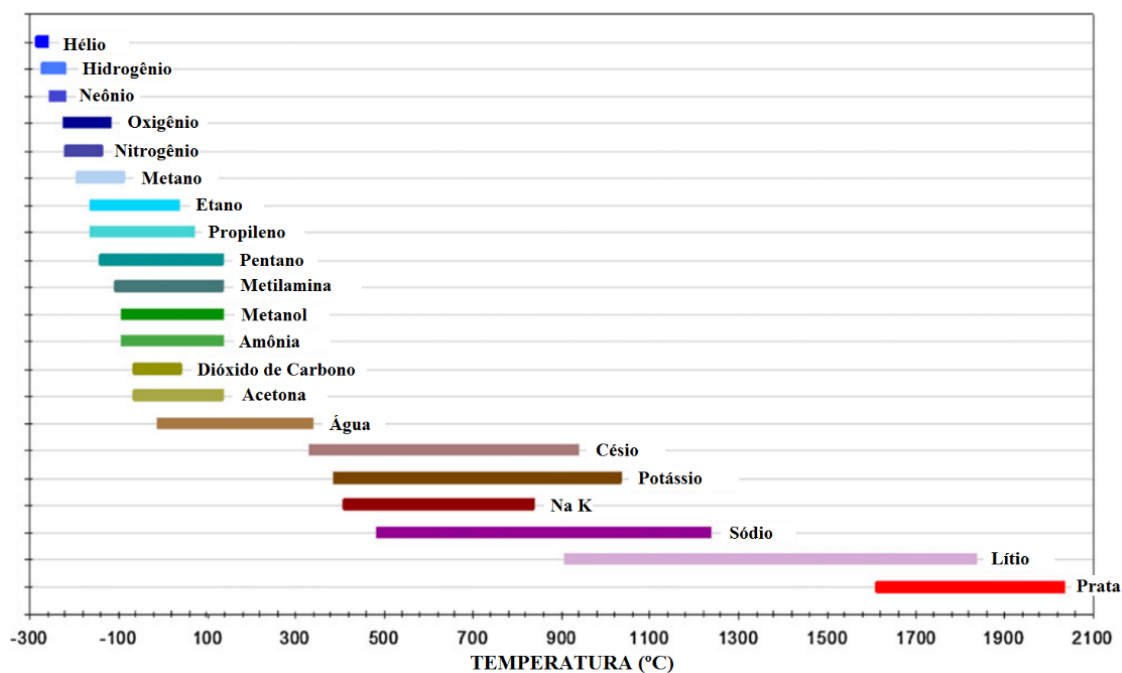
2.2.2 Fluido de Trabalho

O fluido de trabalho tem uma importância vital para a operação de um termossifão, que influencia diretamente na funcionalidade e eficiência do sistema. Existem alguns fatores que se sobressaem e devem ser considerados com uma atenção maior, dentre eles, temperatura de operação, compatibilidade com o material do invólucro do tubo, pressão de vapor e condutividade térmica.

Para selecionar os fluidos de trabalho, primeiramente deve ser considerada a temperatura de operação, isso se deve ao fato de que as temperaturas interferem

diretamente nas propriedades termodinâmicas do fluido de trabalho dentro do invólucro. As faixas de temperatura de operação de diversos fluidos de trabalho utilizados em termossifões podem ser observadas na Figura 8.

Figura 8 - Seleção de fluido de trabalho em função da faixa de temperatura de operação em °C



Fonte: Nishida (2016).

Na Tabela 2, que foi adaptada de Reay *et al.* (2014), pode ser observada a faixa de operação de alguns tipos de fluidos de trabalho.

Tabela 2 - Faixa de operação dos fluidos de trabalho

Fluido de Trabalho	Ponto de fusão [°C]	Ponto de ebulição [°C]	Faixa de operação [°C]
Hélio	-271	-261	-271 a -269
Nitrogênio	-210	-196	-203 a -160
Amônia	-78	-33	-60 a 100
Pentano	-130	28	-20 a 120
Acetona	-95	57	0 a 120
Metanol	-98	64	10 a 130
Etanol	-556	78	0 a 130
Heptano	-90	98	0 a 150
Água	0	100	30 a 200
Tolueno	-95	110	50 a 200
Mercúrio	-39	361	250 a 650
Césio	29	670	450 a 900
Potássio	62	774	500 a 1000
Sódio	98	892	600 a 1200
Lítio	179	1340	1000 a 1800
Prata	960	2212	1800 a 2300

Fonte: Reay e kew (2006).

Destes valores apresentados na Tabela 2, pode ser definido qual fluido de trabalho utilizar nos termossifões, mas esta análise para a seleção deve se considerar mais propriedades. Segundo Reay *et al.* (2014), estas são as características que devem ser consideradas:

1. Compatibilidade com o material do invólucro do tubo.
2. Estabilidade térmica.
3. Valores de pressão de vapor na temperatura de operação.
4. Alto calor latente de vaporização.
5. Alta condutividade térmica.
6. Baixa viscosidade (vapor e líquido).
7. Alta tensão superficial.

As impurezas presentes no fluido de trabalho afetam diretamente o desempenho térmico dos termossifões, as mais comuns que ocorrem são os gases não condensáveis, gerados da reação química entre o fluido de trabalho e os materiais do invólucro, que durante a operação são deslocados para a extremidade do condensador e podem bloquear a transferência de calor no condensador, comprometendo de forma significativa a transferência de calor, diminuindo o desempenho térmico do termossifão.

2.2.2.1 Figura de Mérito

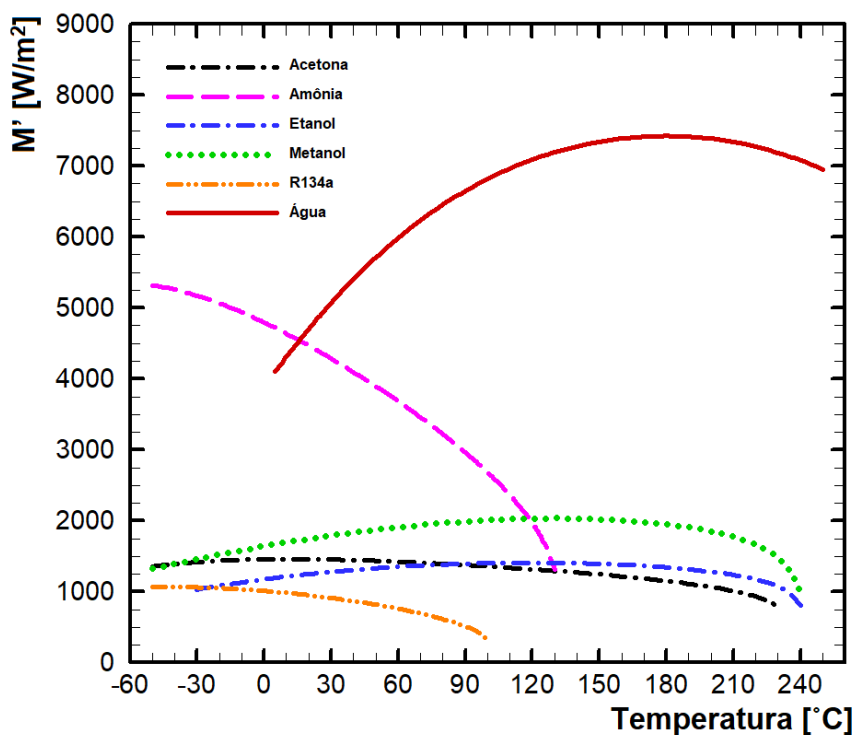
A Figura de Mérito, M' , é uma variável importante dada pelas propriedades que mais interferem, por parte do fluido de trabalho, na transferência de calor de um termossifão. Desta forma, quanto maior for seu valor a dada temperatura, maior será a taxa de transferência de calor do termossifão, segundo Reay et al. (2014) ela é expressa por:

$$M' = \left(\frac{h_{lv} \sigma \rho_l}{\mu_l} \right) \quad (1)$$

Sendo que, h_{lv} é o calor latente de vaporização do fluido de trabalho, σ é a tensão superficial, ρ_l é a massa específica da fase líquida do fluido de trabalho e μ_l é a viscosidade dinâmica da fase líquida do fluido de trabalho. Esta equação é válida para uma variedade de fluidos de trabalho, com ponto de vaporização entre -60 °C a 300 °C.

Da definição da Figura de Mérito pode ser concluído que um fluido de trabalho deve apresentar elevado calor latente de vaporização, elevada tensão superficial, elevada massa específica e baixa viscosidade dinâmica quando líquido. O comportamento da Figura de Mérito para diferentes fluidos é mostrado na Figura 9.

Figura 9 - Figura de Mérito



Fonte: Autoria própria

2.3 REVISÃO DA LITERATURA

Nesta seção, são apresentados alguns trabalhos encontrados na literatura consultada sobre a utilização de diferentes fluidos de trabalho em termossifões.

Klinbun e Terdtoon (2017) realizaram experimentos com termossifões utilizando a água pura e outros com um nanofluido de razão de 10ppm, 30ppm e 50 ppm de cobre, os termossifões foram submetidos a temperaturas de 60 °C, 70 °C e 80 °C. E suas avaliações experimentais mostraram que o nanofluido com 50 ppm de cobre apresentou uma resistência térmica menor, proporcional a concentração das nanopartículas e um desempenho térmico melhor que o da água pura.

Hrabovský, Nemeč e Malcho (2015) testaram quatro diferentes fluidos de trabalho: acetona, álcool etílico, água destilada e um fluido refrigerante de flúor inerte (FC-72), com um 50% de preenchimento. Nesses casos, os termossifões foram submetidos a potências começando em 80 W e aumentado gradativamente até a temperatura limite de 100 °C. O resultado mostrou que a acetona possui a melhor transferência de calor para o ambiente e a pior nesse quesito foi a água, dessa forma

foi concluído que o rendimento depende da temperatura de ebulição e do calor específico.

Jouhara e Robinson (2015) realizaram testes experimentais com quatro diferentes fluidos de trabalho, três deles de flúor inerte (FC-84, FC-77 e FC-2383) e água, utilizando dois diferentes volumes de preenchimento 0,6 mL e 1,8 mL para água e no caso dos outros fluidos de trabalho só foi utilizado o volume máximo. Todos os termossifões analisados tinham 6 mm de diâmetro interno. Para os testes, a montagem experimental permitiu que fossem testadas potências variando de 30 W a 40 W. Foi concluído que em potências baixas, 30W a 40W, apenas o fluido de trabalho com menor temperatura de ebulição (FC-84) funcionou satisfatoriamente e acima dessa potência foi percebido a interferência do limite de arrasto no desempenho dos fluidos FC.

Ghadage e Mutalikdesai (2016) testaram experimentalmente como fluidos de trabalho misturas de etanol e metanol em diferentes proporções (50%-50%, 60%-40%, 70%-30%) preenchidos em 60% do volume do termossifão, e com variação de inclinações de 0°, 30° e 60°, diferente dos outros testes mencionados anteriormente, a potência manteve-se estável e o que foi variado foi o escoamento de água no sistema de resfriamento do condensador. Como resultado, foi obtido um melhor desempenho no termossifão com a proporção de 60%-40% na inclinação de 30°.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo, são apresentados o procedimento de montagem dos termossifões, mostrando os equipamentos e os valores de parâmetros utilizados nos testes, além da parte experimental. Para esses experimentos foram construídos termossifões com diferentes fluidos de trabalho e testados sob as mesmas condições operacionais, para a obtenção dos parâmetros de comparação entre eles.

3.1 CONSTRUÇÃO DOS TERMOSSIFÕES

A construção dos termossifões foi realizada no Laboratório de Controle Térmico (LabCT) do Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), *Câmpus* Ponta Grossa.

A metodologia utilizada na construção dos termossifões (limpeza, montagem, teste de estanqueidade, procedimento de evacuação e preenchimento com fluido de trabalho), na montagem do aparato experimental e nos procedimentos experimentais foi baseada em Nishida (2016), Krambeck (2016) e Santo (2017).

3.1.1 Características dos Termossifões

Para esses experimentos foram utilizados tubos de cobre ASTM B75 Liga 122 de 200 mm de comprimento, seus diâmetros externos e internos são de 9,45 mm e 7,75 mm, respectivamente. Para selar os tubos foram usinadas duas tampas de mesmo material e com a mesma dimensão do diâmetro externo do tubo, em uma delas realizado um furo de diâmetro de 2,38 mm para a inserção de um tubo capilar também de mesmo material de diâmetro externo de 1,07mm, esses componentes podem ser vistos na Fotografia 1.

Fotografia 1 - Elementos do tubo



Fonte: Autoria própria.

Os termossifões possuem um comprimento de evaporador de 80 mm e um condensador de 100 mm e uma seção adiabática de 20 mm. O fluido de trabalho foi colocado com o volume de 1,39 mL, com razão de preenchimento de 40% do volume do evaporador, e os fluidos utilizados foram acetona, água, etanol e metanol. As características dos termossifões estão sintetizadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Características dos termossifões

Características dos Termossifões	Dimensão			
Diâmetro interno [mm]	7,75			
Diâmetro externo [mm]	9,45			
Comprimento do evaporador [mm]	80,0			
Comprimento da região adiabática [mm]	20,0			
Comprimento do condensador [mm]	100			
Fluidos de trabalho	Acetona	Água	Etanol	Metanol
Razão de Preenchimento [%]	40			
Volume de fluido [mL]	1,39			

Fonte: Autoria própria.

3.1.2 Características dos Fluidos de trabalho

Os fluidos de trabalho utilizados foram analisados quanto as suas propriedades, conforme apresentado na Tabela 4. As informações foram obtidas através do programa *EESTM* (*Engineering Equation SolverTM*).

Tabela 4 - Propriedades dos fluidos de trabalho

Propriedades (em 20°C e 1 atm)	Fluido de Trabalho			
	Acetona	Água	Etanol	Metanol
Fórmula Química	C ₃ H ₆ O	H ₂ O	C ₂ H ₆ O	CH ₄ O
Massa Molar [kg/kmol]	58,08	18,02	46,07	32,04
Calor Específico [J/kgK]	2.131	4.183	2.396	2.505
Calor Latente de Vaporização [J/kg]	0,539.10 ⁶	2,453.10 ⁶	0,928.10 ⁶	1,178.10 ⁶
Condutividade Térmica [W/mK]	0,1630	0,5861	0,1708	0,1987
Massa Específica [kg/m ³]	790,3	998,2	789,4	791,0
Temperatura de Ebulição [°C]	56,2	99,7	78,4	65,0
Pressão Crítica [Pa]	4,70.10 ⁶	22,06.10 ⁶	6,27.10 ⁶	8,10.10 ⁶
Temperatura Crítica [°C]	235,0	374,0	241,6	240,2
Temperatura de Ponto Triplo [°C]	-94,65	0,01	-114,1	-97,54
Tensão Superficial [N/m]	0,02334	0,07273	0,02273	0,02267
Viscosidade Dinâmica [Pa.s]	0,0003324	0,001002	0,001162	0,000586

Fonte: Autoria própria.

3.1.1 Limpeza dos Termossifões

A limpeza dos componentes dos termossifões é importante para evitar que os fluidos de trabalho tenham sujidade e influenciem em suas propriedades (KRAMBECK, 2016). Para isso, os componentes foram submetidos a um banho ultrassônico *Kondentech*TM permanecendo mergulhados por 15 (quinze) minutos em acetona, conforme mostra a Fotografia 2, na sequência, as extremidades do invólucro, as tampas e o capilar, foram submetidas a uma submersão em uma solução 10% de ácido sulfúrico e somente após esses procedimentos o termossifão estava pronto para montagem.

Fotografia 2 - Banho ultrassônico



Fonte: Aatoria própria

3.1.4 Montagem dos Termossifões

Depois do procedimento de limpeza, a montagem dos termossifões foi realizada através da soldagem por abrasão das tampas e do capilar nas extremidades do termossifão. Para isso foi utilizado um ferro de solda, nesse caso o *Hikari™ Power 300*, e uma liga de estanho como metal de adição, conforme Fotografia 3. O termossifão soldado pode ser visto na Fotografia 4.

Fotografia 3 - Soldagem das tampas e do capilar



Fonte: Autoria própria.

Fotografia 4 - Termossifão soldado



Fonte: Autoria própria.

3.1.5 Teste de Estanqueidade

O teste de estanqueidade deve ser realizado para garantir a confiabilidade do processo de solda, uma vez que se houver vazamentos não será possível a execução de vácuo dentro do tubo soldado. Para realização desse teste, o tubo capilar foi colocado em uma bomba manual de deslocamento positivo por uma mangueira de polímero, e o termossifão mergulhado em um recipiente com água, a bomba é acionada e o ar bombeado para dentro do termossifão. Se houver vazamento surgiram

bolhas nos pontos de solda, e se isso ocorrer o termossifão deve ser desmontado, limpo novamente, solda refeita e montado de forma a não ter mais vazamento.

3.1.6 Procedimento de Evacuação

Após garantido a confiança da soldagem, o procedimento de vácuo nos termossifões deve ser realizado, para tal, foi utilizada uma bomba de vácuo *EOS Value™ modelo i260SV*, mostrada na Fotografia 5. O termossifão foi acoplado com uma mangueira de polímero na mangueira da bomba e, para garantir o processo sem vazamentos, é colocado graxa alto vácuo *Dow Corning™* nas conexões.

O tempo de evacuação do termossifão é de no mínimo 6 (seis) horas e após esse processo atingiu-se o valor de pressão interna de aproximadamente 90 mbar (9 kPa), sendo que para esta pressão a temperatura de saturação da água é de 43,74°C.

Fotografia 5 - Bomba de vácuo e termossifão

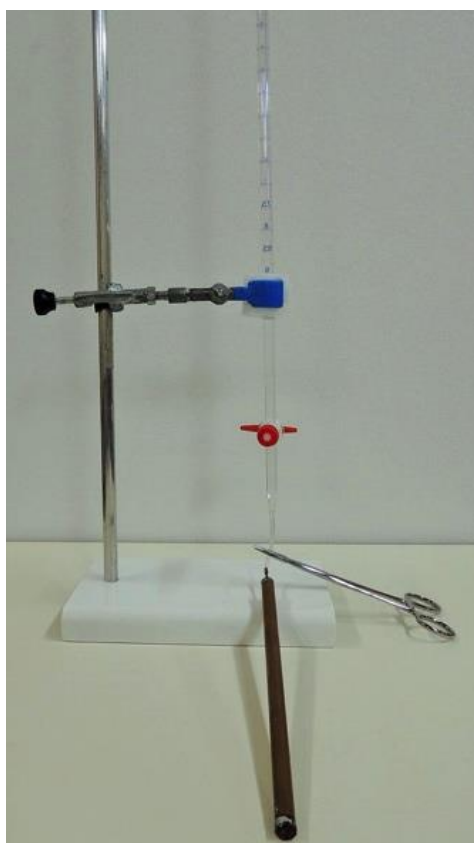


Fonte: Autoria própria.

3.1.7 Preenchimento dos Termossifões com o Fluido de Trabalho

O próximo processo foi o de inserir o fluido de trabalho dentro do termossifão evacuado, para isso foram necessárias uma bureta, uma seringa, um *fórceps* e um suporte universal com garra. A estação de preenchimento pode ser vista na Fotografia 6.

Fotografia 6 - Estação de preenchimento



Fonte: Autoria própria.

Ao posicionar o termossifão na estação de preenchimento foi utilizado o *fórceps* para vedar a entrada de ar dentro do termossifão. Além disso, ao acoplar o termossifão na estação, a mangueira polimérica foi preenchida com o fluido de trabalho para garantir que não exista bolha de ar no sistema, com o fluido dentro da bureta foi aberta cuidadosamente a válvula para não ocorrer formação de bolhas de ar e o *fórceps* foi aberto para que o termossifão fosse preenchido com o volume de 1,39 mL do fluido de trabalho desejado. Após esse preenchimento, o *fórceps* foi fechado novamente, sendo utilizado um alicate de pressão para conformar o capilar e selar o termossifão para a entrada de ar, além disso, o capilar foi preenchido com a liga de estanho

selando completamente o tubo. Ressalta-se que para garantir o processo sem vazamentos é colocado graxa alto vácuo *Dow Corning™* nas mangueiras e conexões.

Esta etapa é muito crítica na confecção do termossifão, uma vez que se existir ar no sistema, as propriedades termodinâmicas dentro do termossifão serão alteradas, e se o volume do fluido for incorreto pode causar o secamento do termossifão, comprometendo, em ambos os casos, seu desempenho térmico.

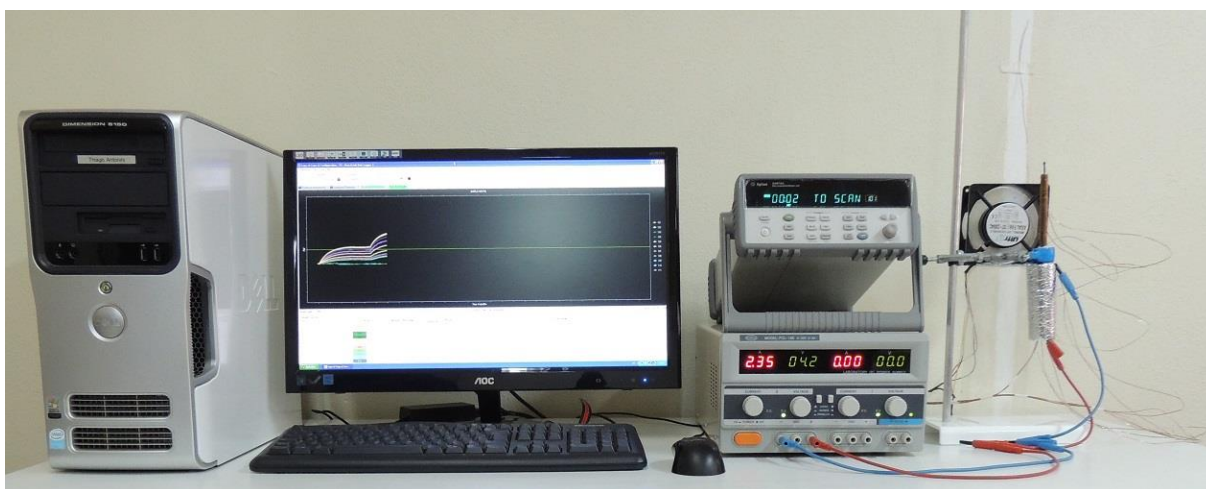
3.2 TESTES EXPERIMENTAIS

Na sequência, são apresentados os equipamentos utilizados, a montagem e o procedimento experimental.

3.2.1 Equipamentos

Os equipamentos, assim como a montagem dos testes experimentais, podem ser vistos na Fotografia 7: uma fonte de alimentação *Politem™* 16E, um sistema de aquisição de dados *Agilent™* 34970A com um multiplexador de 20 canais, um computador Desktop *Dell™*, um ventilador *Ultrar™* DF1203HBL2 e um suporte universal com garra.

Fotografia 7 - Configuração do teste

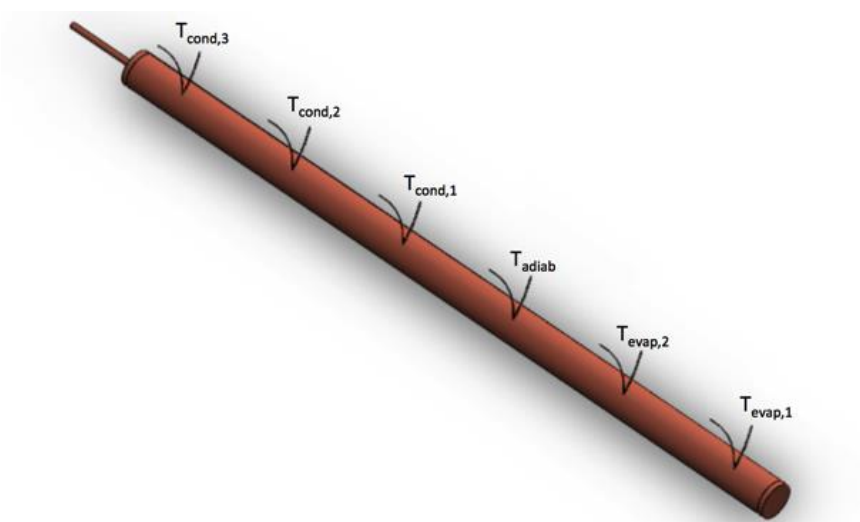


Fonte: Autoria própria.

Para a análise das temperaturas nos termosifões foi necessário a utilização de termopares, nesse caso foram utilizados termopares da marca *Omega™* do tipo K. A fixação foi feita através de uma fita termosensível *Kapton™*, sendo que o uso desse tipo específico de adesivo se faz necessário para reduzir a interferência no valor medido pelo termopar.

O posicionamento dos termopares pode ser visto na Figura 10. Foram utilizados dois no evaporador ($T_{\text{evap},1}$ e $T_{\text{evap},2}$), um na região adiabática (T_{adiab}) e três na região do condensador ($T_{\text{cond},1}$, $T_{\text{cond},2}$ e $T_{\text{cond},3}$).

Figura 10 - Posição dos termopares



Fonte: Autoria própria.

Para aquecer o evaporador foi usado uma resistência térmica de níquel-cromo posicionada de acordo com a Fotografia 8 e presa pela fita termosensível.

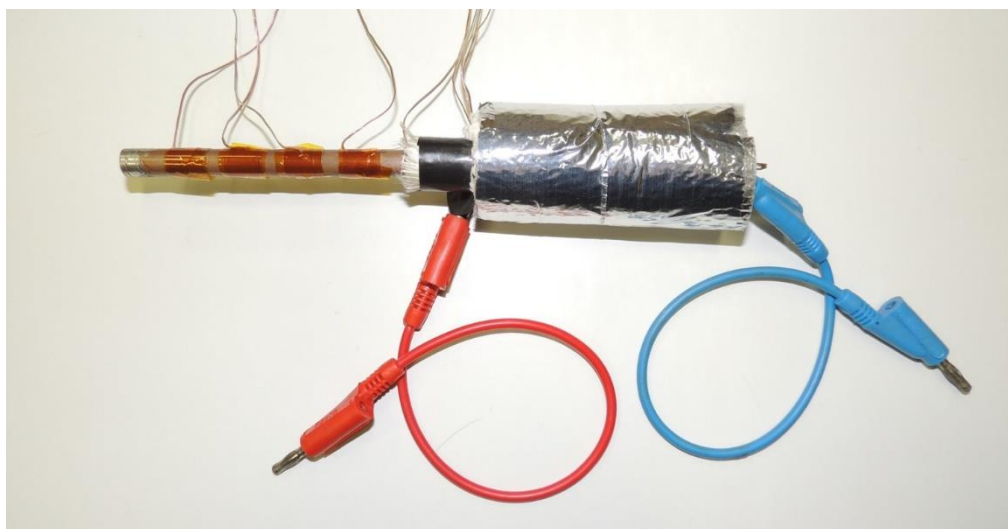
Fotografia 8 - Posição do resistor elétrico



Fonte: Autoria própria.

Para isolar termicamente a região do evaporador e garantir que todo o calor gerado por efeito *Joule* fosse transferido ao termossifão, foi utilizado um isolamento térmico aeronáutico e uma camada de poliuretano – Fotografia 9. A região adiabática foi protegida por uma fita de fibra de vidro. Com esses procedimentos as influências ambientais foram reduzidas, aumentando a precisão dos resultados encontrados.

Fotografia 9 - Montagem final do termossifão para o experimento



Fonte: Autoria própria.

3.2.2 Procedimento Experimental

O ambiente do experimento permaneceu com sua temperatura controlada, através de um sistema de ar condicionado *York™*, em $20^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C}$. O termossifão foi preso pela região adiabática na garra de suporte universal. Foi ajustado na posição vertical com o ventilador posicionado para que o escoamento de ar escoasse pelo condensador do termossifão, a uma velocidade controlada de $5 \text{ m/s} \pm 0,2 \text{ m/s}$, medido por um anemômetro digital portátil *Itan™ 720*.

Os termossifões foram testados 3 vezes cada um (garantindo assim a repetitividade dos resultados, aumentando a confiabilidade), variando a potência dissipada, iniciando em 5 W e, a cada 30 minutos, subindo a potência em mais 5 W, até a potência de 25 W ou que se atingisse a temperatura limite de segurança, 120°C . Este tempo se deve ao fato de espera para que o sistema entre em regime permanente.

Os dados foram coletados pelos termopares (com precisão de 1,41°C) a cada 5 segundos pelo sistema de aquisição de dados e armazenados pelo programa *Agilent™ Benchlink Data Logger 3*. Após a coleta dos dados os mesmos foram tratados posteriormente para avaliar o desempenho térmico dos termosifões.

3.3 RESISTÊNCIA TÉRMICA

De acordo com Bergman *et al.* (2014), a resistência térmica é um fator que mensura a capacidade do material em conduzir energia térmica. Para termosifões, ela é medida pela diferença de temperatura entre a região quente, evaporador, e a região fria, condensador, e pode ser expressa por:

$$R_t = \frac{\Delta T}{q} = \frac{T_{evap} - T_{cond}}{q} \quad (2)$$

sendo que, T_{evap} é a temperatura média do evaporador, T_{cond} é a temperatura média do condensador e q representa a carga aplicada ao sistema.

3.4 ANÁLISE DE INCERTEZAS

Todos os instrumentos de leitura possuem uma incerteza intrínseca de seu funcionamento e as incertezas experimentais avaliadas neste foram as incertezas dos sensores de temperatura (termopares do Tipo K), do sistema de aquisição de dados e da fonte de potência.

O método de propagação de incerteza descrito por Holman (2011) foi utilizado para a determinação da incerteza da medição de potência elétrica, obtida a partir dos resistores elétricos. As incertezas dos dados mensurados são estimadas para as temperaturas dos termopares e da potência de entrada, considerando a precisão dos termopares de $\pm 1,27$ °C e a incerteza da fonte de potência de $\pm 1\%$. O Apêndice A apresenta estes cálculos de incertezas.

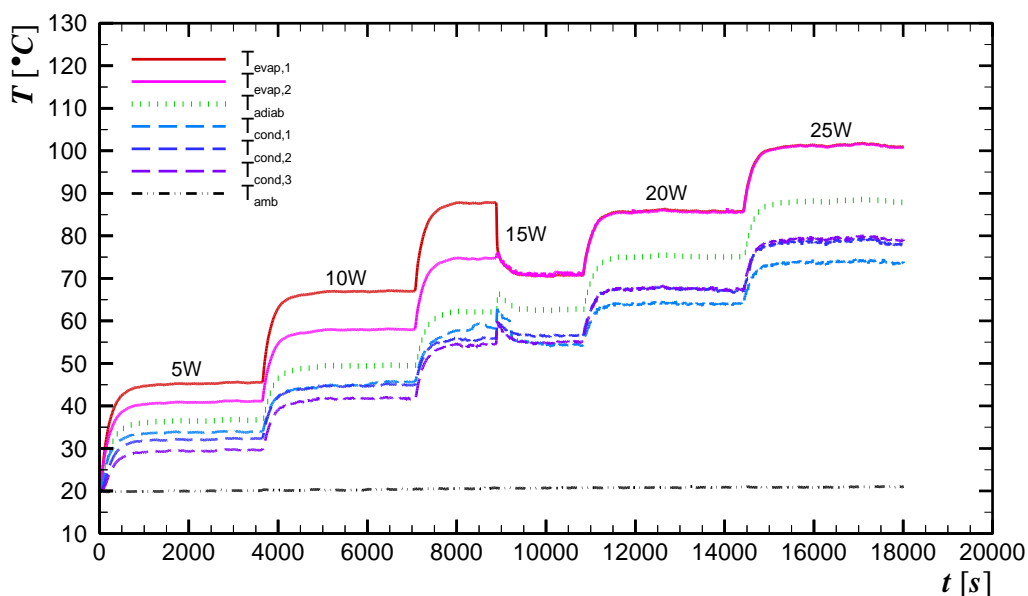
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

No presente capítulo, são mostrados os resultados experimentais do desempenho térmico dos termossifões com diferentes fluidos de trabalho realizando uma comparação entre eles.

4.1 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

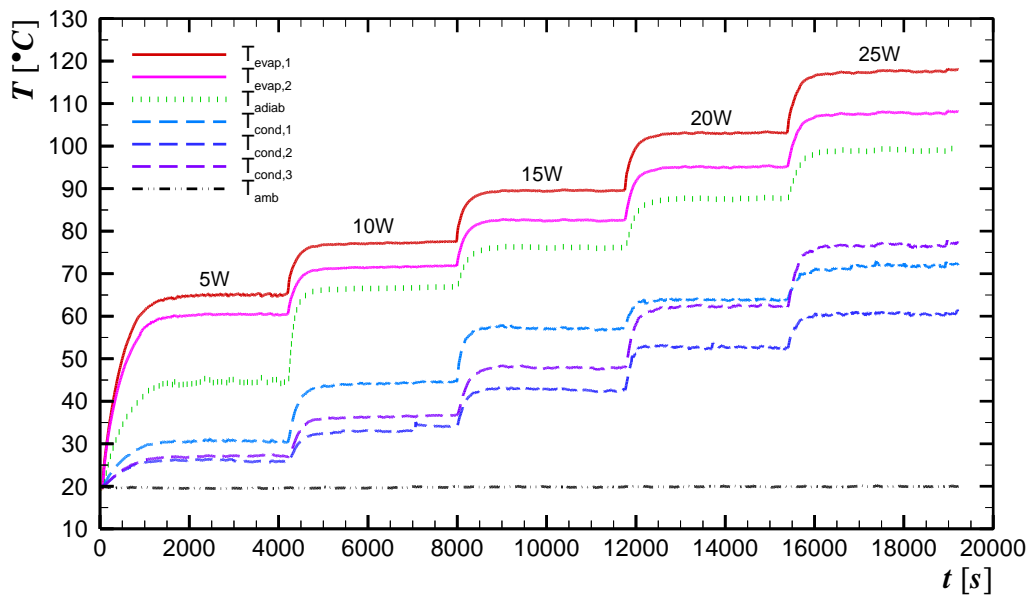
Os resultados encontrados mostram o comportamento dos diferentes fluidos de trabalho com o termossifão operando na posição vertical. Os quatro fluidos de trabalho, acetona, água, etanol e metanol, foram submetidos à potências variando de 5 W a 25 W, com acréscimo de 5 W a cada 30 minutos. Os resultados experimentais obtidos para o comportamento da temperatura em função do tempo podem ser vistos nos gráficos das Figuras 11 a 14.

Figura 11- Comportamento da temperatura em função do tempo para a acetona



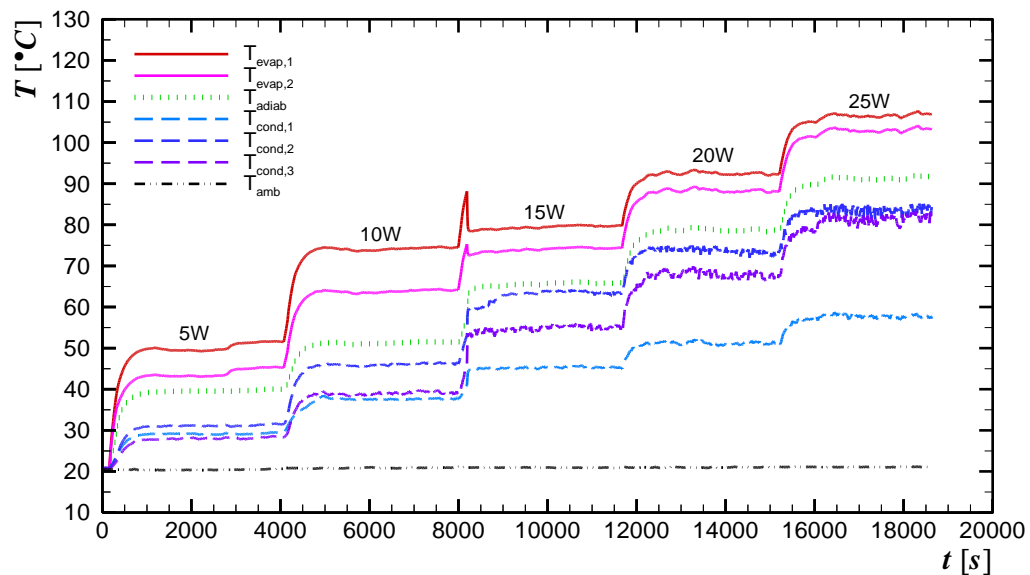
Fonte: Autoria própria.

Figura 12 - Comportamento da temperatura em função do tempo para a água



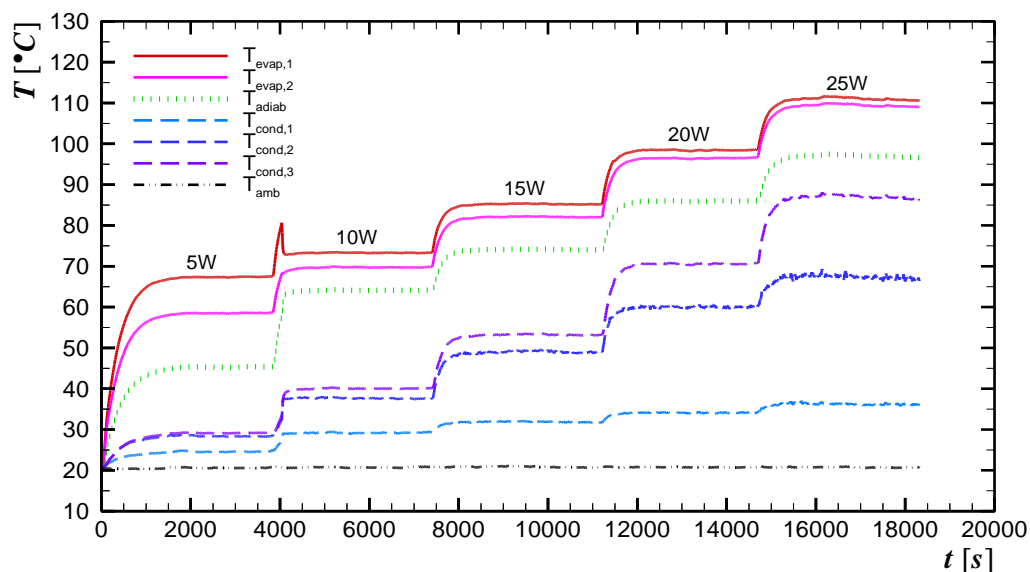
Fonte: Autoria própria.

Figura 13 - Comportamento da temperatura em função do tempo para o etanol



Fonte: Autoria própria.

Figura 14 - Comportamento da temperatura em função do tempo para o metanol



Fonte: Autoria própria

Pode ser observado que a acetona demonstra uma diferença de temperatura entre o evaporador e condensador menor que os outros fluidos de trabalho, por outro lado a água apresenta a maior variação. Outro ponto que pode se percebido é o tempo necessário para que os fluidos de trabalho atinjam o regime permanente, justificando o tempo gasto em cada etapa do teste.

4.2 RESISTÊNCIAS TÉRMICAS

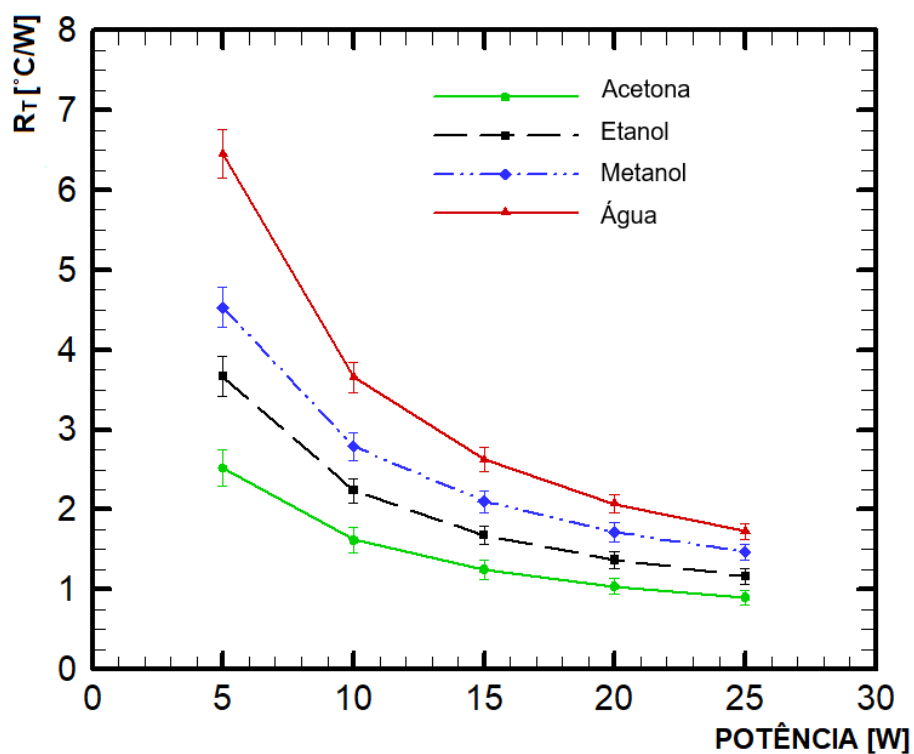
As resistências térmicas dos termossifões são mostradas na Tabela 5 e no gráfico da Figura 15, é possível notar que a acetona atingiu os menores valores de resistência térmica para as potências utilizadas, dessa forma as temperaturas atingidas a cada potência foram as menores, mostrando que esse fluido de trabalho tem maior capacidade térmica. A água, por sua vez, apresentou os maiores valores de resistência térmica, ou seja, as temperaturas atingidas na região do evaporador foram as mais altas em todas as etapas do experimento, o metanol e etanol obtiveram comportamentos parecidos sendo que o metanol apresentou resistência térmica maior que o etanol, portanto um desempenho térmico pior.

Tabela 5 - Resistências térmicas

Potência [W]	Resistência Térmica [°C/W]			
	Acetona	Água	Etanol	Metanol
5	2,52 ± 0,23	6,46 ± 0,31	3,67 ± 0,25	4,53 ± 0,25
10	1,62 ± 0,16	3,66 ± 0,19	2,24 ± 0,15	2,79 ± 0,18
15	1,25 ± 0,13	2,63 ± 0,16	1,68 ± 0,12	2,10 ± 0,14
20	1,04 ± 0,10	2,07 ± 0,12	1,37 ± 0,11	1,72 ± 0,12
25	0,90 ± 0,09	1,73 ± 0,10	1,17 ± 0,10	1,43 ± 0,10

Fonte: Autoria própria.

Figura 15 - Comportamento resistência x potência aplicada



Fonte: Autoria própria.

Os resultados experimentais, quando comparados com as propriedades dos fluidos de trabalho, calor específico a pressão constante, calor latente de vaporização e condutividade térmica, se mostram como esperado.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho foram analisados quatro diferentes fluidos de trabalho, acetona, água, etanol e metanol, utilizados em termossifões sob as mesmas condições operacionais. Todos os termossifões testados se comportaram como esperado e exerceram sua função de forma satisfatória.

O fluido de trabalho que apresentou a menor resistência térmica, ou seja, demonstrou melhor desempenho térmico, foi a acetona e, em contrapartida, o que apresentou a maior resistência e temperaturas mais elevadas foi o termossifão com água como fluido de trabalho.

Como sugestões para trabalhos futuros propõem-se:

- Utilizar nanofluidos para melhorar a eficiência de termossifões;
- Variar a inclinação de operação dos termossifões;
- Variar a razão de preenchimento dos fluidos de trabalho dos termossifões.

REFERÊNCIAS

- AZADA, E., MOHAMMADIEHA, F., & MOZTARZADEH, F. **Thermal performance of heat pipe heat recovery system**. Journal of Heat Recovery Systems, Vol. 5, No. 6, pp. 561-570, ISSN 0890-4332 (1985).
- SOLOMON A. B., ROSHAN R., VINCENT W., KARTHIKEYAN V.K., ASIRVATHAM L. G. **Heat transfer performance of an anodized two-phase closed thermosyphon with refrigerant as working fluid**, International Journal of Heat and Mass Transfer 82 (2015) 521–529.
- ANON, **Heat pipes general information on their use, operation and design**, Data Item No. 80013, Engineering Sciences Data Unit, London, (1980).
- BROST, O., **Closed Two Phase Thermosyphons, Class Notes**, EMC/UFSC Florianópolis, Brazil (1996).
- BUSSE, C.A., **Theory of the Ultimate Heat Transfer Limit of Cylindrical Heat Pipes**, International Journal of Heat and Mass Transfer, 16, 169–186 (1973).
- DUNN, P.D. & REAY, D.A., **Heat Pipes**, 4th Edition, Pergamon, Oxford, England 1994.
- ENGINEERING EQUATION SOLVER. **F-Chart Software**. Middleton, WI, USA. 2002. 320 p.
- SANTO, Michel E. **Análise Experimental de Diferentes Configurações de Termossifões para Aplicação em Coletor Solar**. 2017. 133 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2017.
- FAGHRI, A. **Heat pipe science and technology**, Taylor & Francis, ISBN 978-1560323839, New York USA (1995).
- FAGHRI, A. (2014). **Heat pipes: review, opportunities and challenges**, Taylor & Francis, ISSN: 2155-658X.
- GERSHUNI, A., NISHCHIK A., PYSMENYY Ye., POLUPAN G., SANCHEZ-SILVA F., & CARVAJAL-MARISCAL I. **Heat exchangers of the gas-gas type based on finned heat pipes**. International Journal of Heat Exchangers, Vol. 5, No. 2, pp. 347-358, ISSN 1524-5608 (2004).
- GROLL, M. **Heat pipe research and development in Western Europe**, Heat Recovery Syst. CHP 9 (1) (1989).
- GROLL, M., & RÖSLER, S., **Operation Principles and Performance of Heat Pipes and Closed Two-Phase Thermosyphons**, Journal of Non-Equilibrium Thermodynamics, 17, 91–151 (1992)

GROLL M., NGUYEN-CHI H., KRAHLING H., **Heat recovery units employing reflux heat pipes as components**, Final Report, Contract EE-81-133D(B), Commission of the European Communities Report EUR9166EN, 1984.

HOLMAN, J.P. **Experimental Methods for Engineers**, 6.ed., Singapore, Mcgrall-Hill, 1994.

HRABOVSKÝ P. *et al.* **Compare Cooling Effect of Different Working Fluid in Thermosyphon**, EDP Sciences, EPJ web conferences, Zilinia, Slovakia (2015).

JOUHARA H. **Experimental Investigation of Small Diameter Two-Phase Closed Thermosyphons Charged with Water, FC-84, FC-77 & FC-3283**, School of Engineering and Design, Brunel University, Uxbridge, Middlesex (2015)

KLINBUN J. **Experimental Study of Copper Nano-fluid on Thermosyphons Thermal Performance**, Engineering journal. Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology, (2016)

KRAMBECK, L., NISHIDA, F.B., SANTOS, P.H.D., ANTONINI ALVES, T. **Configurations of Phosphor Bronze Meshes in Heat Pipes: An Experimental Analysis of Thermal Performance**. *International Journal of Advanced Engineering Research and Science (IJAERS)*, Vol-2, Issue-10, (2015).

KRAMBECK, L.; NISHIDA, F. B.; SANTOS, P.H.D.; ANTONINI ALVES, T. **Investigação Experimental de um Tubo de Calor para Aplicação em Controle Térmico de Eletrônicos**, *Anais do XXII Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica*, CREEM 2015, (2015).

KRAMBECK, L.; VANAT, K. J.; SANTOS, P. H.D.; ANTONINI ALVES, T. **Uma Correlação Do Número De Kutateladze Para Termossifões Verticais**, *Anais do XXII Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica*, CREEM 2015, (2015).

KRAMBECK, Larissa. **Investigação Experimental do Desempenho Térmico de Telas Metálicas em Tubos de Calor**. 2016. 90. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2016.

MANTELLI, Márcia B.H. Notas de Aula: **Curso sobre Tubos de Calor e Termossifões**. UFSC, Florianópolis, 2009.

MANTELLI, M.B.H.; LANDA, H.G. de, **Theoretical and Experimental Study of Two-Phase Vertical and Loop Thermosyphons**, 12th International Heat Pipe Conference, Russia (2002).

NISHIDA, Felipe B. **Desenvolvimento de Tubos De Calor com Microranhuras Fabricadas por Eletroerosão a Fio**. 2016. 158 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2016.

NISHIDA, F.B.; MARQUARDT, L. S.; BORGES, V. Y.S.; SANTOS, P. H.D.; ANTONINI ALVES, T. **Development of a Copper Heat Pipe with Axial Grooves Manufactured using Wire Electrical Discharge Machining (Wire-EDM)**, *Advanced Materials Research (Online)*, vol. 1120, pp. 1325-1329, (2015).

NOIE S.H. **Heat transfer characteristics of a two-phase closed thermosyphons**. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 25, No. 4, pp. 495-506, ISSN 1359-4311 (2005).

PAYAKARUK T., TERDTON P., RITTHIDECH S., **Correlations to predict heat transfer characteristics of an inclined closed two-phase thermosyphon at normal operating conditions**, *Applied Thermal Engineering* 20 (2000) 781-790.

PETERSON, G. P. **An Introduction to Heat Pipes: Modeling, Testing and Application**. New York, NY, USA: John Wiley & Sons, 1994.

PETERSON, G.P. (1994). **An introduction to heat pipe modeling, testing, and applications**, John Wiley & Sons, Inc., ISBN 978-0471305125, New York USA.

PIORO, L. S. &PIORO, I. L. **Industrial Two-Phase Thermosyphons**. Begell House Inc., New York, 1997.

REAY, D.; KEW, P. & MCGLLEN, Ryan. **Heat Pipes Theory, Design and applications**. 6. ed. Butterworth-Heubenabm. 2014.

REAY, D.A. (1981). **A review of gas-gas heat recovery systems**. *Journal of Heat Recovery Systems*, Vol. 1, No. 1, pp. 3-41, ISSN 0890-4332

RUSSO, G. M.; KRAMBECK, L.; NISHIDA, F. B.; SANTOS, P. H.D.; ANTONINI ALVES, T. **Desempenho Térmico de Diferentes Fluidos de Trabalho em Termossifões**, *12° Congresso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica, CIBIM XII*, 2015.

SANTOS, P. H.D; KRAMBECK, L.; SANTOS, D. L.F.; ANTONINI ALVES, T.. **Analysis of a Stainless-Steel Heat Pipe Based on Operation Limits**, *International Review of Mechanical Engineering*, vol. 8, pp. 599-608, (2014).

SMITH K., SIEDEL S., ROBINSON A.J., KEMPERS R., **The effects of bend angle and fill ratio on the performance of a naturally aspirated thermosyphon**, *Applied Thermal Engineering*, 101 (2016) 455–467.

TERDTON, P. *et al.* **Investigation of effect of inclination angle on heat transfer characteristics of closed two-phase thermosyphons**, Paper B9P, in: *Proceedings of the Seventh International Heat Pipe Conference*, Minsk, May (1990).

APÊNDICE A – ANÁLISE DAS INCERTEZAS

Taylor (1988) afirma que qualquer resultado de uma medida experimental está sujeito a erros, ou seja, sempre haverá uma diferença entre o valor verdadeiro e o valor medido. As incertezas das medidas experimentais foram analisadas utilizando o procedimento descrito em Holman (2011).

A.1 Incerteza da Potência Dissipada

Com relação ao fornecimento de potência à resistência elétrica dos testes em bancada, as incertezas de medição associadas a potência dissipada ao evaporador foram estimadas. Foi considerada como incerteza a menor divisão de escala dos mostradores de corrente e de tensão da fonte de potência. Dessa maneira, o erro cometido na medição da corrente é igual a 0,01 A e na medição da tensão igual a 0,01 V. A potência elétrica dissipada pela resistência elétrica é calculada como mostrado a seguir.

$$P = V.I \quad (\text{A.1})$$

A incerteza da potência elétrica dissipada será:

$$dP = \frac{\partial P}{\partial V} dV + \frac{\partial P}{\partial I} dI \quad (\text{A.2})$$

$$dP = (I.dV)^2 + (V.dI)^2 \quad (\text{A.3})$$

A energia da forma de calor perdida para o isolamento foi desprezível, portanto:

$$dP \gg dq_{total} \quad (\text{A.4})$$

A.2 Incerteza das Temperaturas

Termopares do Tipo K (cromel-alumel) foram utilizados para a realização deste trabalho. Sabe-se que a repetitividade deste instrumento é 2,2 °C ou 0,75% do valor da leitura. Os valores das incertezas relacionadas ao erro sistemático dos sensores de temperatura foram:

$$\delta T_{Média, evap} = \delta T \delta T_{Média, cond} = \delta T_{Amb} = \frac{2,2}{\sqrt{3}} = 1,27^{\circ}\text{C} \quad (\text{A.5})$$

APÊNDICE B – ARTIGOS PUBLICADOS

THERMAL PERFORMANCE OF THERMOSYPHON FOR DIFFERENT WORKING FLUIDS

G. M. Russo^a,
L. Krambeck^a,
F. B. Nishida^a,
P. H. D. Santos^b,
and T. Antonini Alves^a

Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Departamento Acadêmico de Mecânica
^aCâmpus Ponta Grossa
Ponta Grossa, PR, Brasil, CEP 84.016-210
thiagoalves@utfpr.edu.br
^bCâmpus Curitiba
Curitiba, PR, Brasil, CEP 80.230-901

Received: February 02, 2016
Revised: April 04, 2016
Accepted: May 06, 2016

ABSTRACT

In this paper, an experimental investigation was performed of the thermal performance of different working fluids in thermosyphons that can be used in thermal control of electronic equipment. The working fluids were considered acetone, water, ethanol, and methanol. The thermosyphon are manufactured of copper with an outer diameter of 9.45 mm, an inner diameter of 7.75 mm, a total length of 200 mm, whereas an evaporator of 80 mm length, an adiabatic region of 20 mm in length and a condenser of 100 mm in length. They were loaded with 1.39 ml of the working fluid, corresponding to a filling ratio of 40% of the evaporator volume. Experimental tests were performed in a vertical position considering thermal loads between 5W and 25W. The thermosyphons operated satisfactorily in all the tests. The operating temperature distribution as a function of time and the heat resistance behavior as a function of power dissipation have been presented for each analyzed working fluid. These results indicated that acetone is the working fluid that has the best thermal performance.

Keywords: thermosyphon, working fluid, thermal performance, thermal resistance, experimental

NOMENCLATURE

h_{lv} vaporization latent heat, J/kg
 k thermal conductivity, W/m.K
 M' Number of Merit, Eq. (1)

Greek symbols

ρ density, kg/m³
 μ dynamic viscosity, Pa.s

Subscripts

l liquid phase of the working fluid

INTRODUCTION

Thermosyphons are highly efficient devices, because they use vaporization latent heat of the working fluid. It transports energy as heat with small temperature gradients. They operate in a two-phase cycle and consist of hollow metal tubes filled with a working fluid. They have an operation and manufacture similar to heat pipes, but without the porous structure. Thermosyphons use gravity for circulation of the fluid internally. Thus, thermosyphons have the facility of construction and reduced cost when compared to heat pipes. However, they have restrictions on the operation position.

Thermosyphons have three regions with distinct roles in their operation, they are: evaporator, adiabatic section, and condenser. The evaporator, the

lower region of the tube, is heated by a hot source and the working fluid undergoes an evaporation process. This steam, because of the pressure difference, moves to de colder region (condenser). In this region, the steam generated in the evaporator loses energy as heat and is condensed. The working fluid in liquid state flows back to evaporator by gravity, closing the cycle. The adiabatic section is located between the evaporator and the condenser. In this section there is not heat transfer between the thermosyphon and the environment. In some cases, the adiabatic section is absent. A schematic diagram of the thermosyphon operating principle is shown in Fig. 1. More details of the thermosyphons can be found in Peterson (1994), Mantelli (2013), and Reay *et al.* (2014).

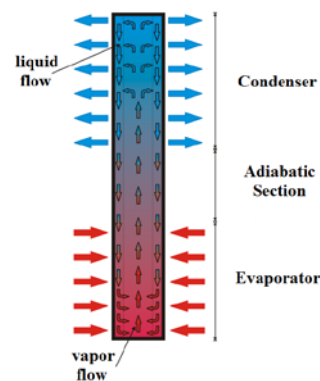


Figure 1. Sketch of the operating principle of thermosyphons.

As mentioned, the thermosyphons are basically composed of a casing and a working fluid that have to be mechanically and chemically compatible with each other. The casing, in most case, is a hollow tuber, made of metal, glass, or ceramic. The working fluid can vary from liquid metal (mercury, sodium, potassium, lithium), for operation at high temperatures, by passing water to intermediate temperatures, and even helium or nitrogen to operate at low temperatures (Peterson, 1994).

As the operating principle of thermosyphon is based on the evaporation and condensation of the working fluid, it must be carefully chosen. For this purpose, the main selection criterion is that the operating temperature of the thermosyphon is compatible with the boiling temperature of the selected working fluid. In addition, thermophysical properties, such as wettability of the fluid, thermal conductivity, viscosity, surface tension, and vapor pressure, are important and should be evaluated (Mantelli, 2013).

A parameter that associates the working fluid properties with its maximum power transmission capacity as heat is called *Number of Merit*, according to Reay et al. (2014), can be expressed by

$$M' = \left(\frac{h_{lv} k_l^3 \rho_l}{\mu_l} \right)^{1/4} \quad (1)$$

where, h_{lv} is the vaporization latent heat of the working fluid, k_l is the thermal conductivity of the liquid phase of the fluid, ρ_l is the density of the liquid phase of the fluid and μ_l is the dynamic viscosity of the liquid phase of the fluid.

The behavior of *Number of Merit*, M' , depending on operating temperature and considering some working fluids is illustrate in Fig. 2.

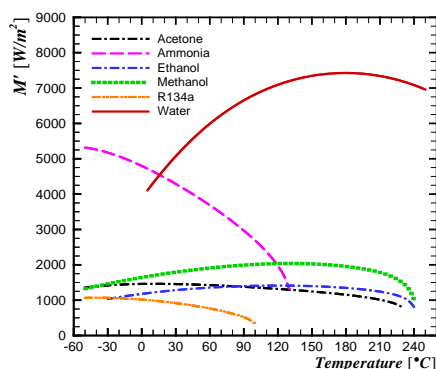


Figure 2. Number of Merit.

In this context, this study was realized an experimental analysis of the thermal performance of different working fluids in thermosyphons. They can be used in thermal control of electronic equipment applications due to their geometrical characteristics. The working fluids analyzed were acetone, deionized water, ethanol, and methanol.

METHODOLOGY

The methodology used in the cleaning, assembly, the tightness test, the evacuation procedure, and the filling with the working fluid of the thermosyphons was based taking into the consideration the instructions of Santos et al. (2014) and Nishida et al. (2015).

Characteristics of Thermosyphons

The thermosyphons were produced by copper tubes with an outer diameter of 9.45 mm, an inner diameter of 7.75 mm, and a length of 200 mm. The thermosyphons have an evaporator of 80 mm in length, an adiabatic region of 20 mm in length, and a condenser of 100 mm in length. The thermosyphons were filled with different working fluids with a ratio of 40% of the evaporator volume. Table 1 shows the main features of the thermosyphons.

Table 1. Main characteristics of the thermosyphons.

Inner diameter [mm]	7.45
Outer diameter [mm]	9.45
Evaporator length [mm]	80.0
Adiabatic section length [mm]	20.0
Condenser length [mm]	100
Volume of working fluid [ml]	1.39
Filling ratio [%]	40.0

Characteristics of studied Working Fluids

The analyzed working fluids in this experimental investigation were acetone (C_3H_6O), deionized water (H_2O), ethanol (C_2H_6O), and methanol (CH_4O). The main thermophysical properties of these chemical substances used as working fluid in the thermosyphons are shown in Table 2. These properties were taken from the library available in software *Engineering Equation Solver*TM (EESTM).

Cleaning of Thermosyphons

The thermosyphons cleaning was necessary. The reasons for this were to ensure the wettability of the working fluid, the impurity elimination, and the vacuum quality improvement. Thus, all the thermosyphon components need to be thoroughly cleaned, before the working fluid is introduced. For this purpose, first, the casing (copper tube with length of 200 mm), the closing lids (milled from a solid copper rod with an outer diameter of 9.45 mm), and the capillary (copper tube with an inner diameter of 1 mm and a length of 40 mm) were cleaned with acetone in order to remove larger dirties. After that, these components were taken to an ultrasonic bath *Kondentech*TM, where remaining immersed in ethylic alcohol during 15 minutes (Fig. 3).

Table 2. Main thermophysical property of the working fluids.

Property (em 20°C e 1 atm)	Working Fluid			
	Acetone	Water	Ethanol	Methanol
Chemical Formula	C ₃ H ₆ O	H ₂ O	C ₂ H ₆ O	CH ₄ O
Molar mass [kg/kmol]	58.08	18.02	46.07	32.04
Specific Heat [J/kgK]	2,131	4,183	2,396	2,505
Vaporization Latent Heat [J/kg]	0.539x10 ⁶	2.453x10 ⁶	0.928x10 ⁶	1.178x10 ⁶
Thermal conductivity [W/mK]	0.1630	0.5861	0.1708	0.1987
Density [kg/m ³]	790.3	998.2	789.4	791.0
Boiling Point [°C]	56.2	99.7	78.4	65.0
Critical Pressure [Pa]	4.70x10 ⁶	22.06x10 ⁶	6.27x10 ⁶	8.10x10 ⁶
Critical Temperature [°C]	235.0	374.0	241.6	240.2
Surface tension [N/m]	0.02334	0.07273	0.02273	0.02267
Dynamic viscosity [Pa.s]	0.0003324	0.001002	0.001162	0.000586

Cleaning of Thermosyphons

The thermosyphons cleaning was necessary. The reasons for this were to ensure the wettability of the working fluid, the impurity elimination, and the vacuum quality improvement. Thus, all the thermosyphon components need to be thoroughly cleaned, before the working fluid is introduced. For this purpose, first, the casing (copper tube with length of 200 mm), the closing lids (milled from a solid copper rod with an outer diameter of 9.45 mm), and the capillary (copper tube with an inner diameter of 1 mm and a length of 40 mm) were cleaned with acetone in order to remove larger dirties. After that, these components were taken to an ultrasonic bath *Kondentech*TM, where remaining immersed in ethylic alcohol during 15 minutes (Fig. 3).



Figure 3. Cleaning the parts of the thermosyphon in the ultrasonic bath.

Assembling of the Thermosyphons

After the components cleaning process, the thermosyphons can be assembled. The closing lids and the capillary were welded at the end of the thermosyphons, according to the positions showed in Fig. 4. The welding process was performed with the aid of a soldering iron *Hikari*TM 300 and the parts

were brazed using a tin alloy as addition material.

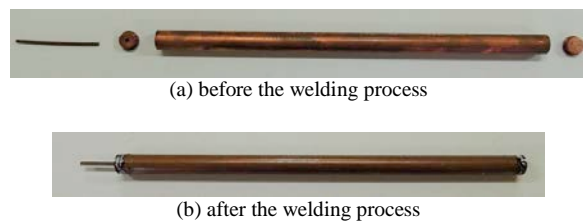


Figure 4. Assembling of the thermosyphon.

Tightness Test

Tightness test was conducted to verify that there was no fault in the welding process. A manual positive displacement pump, a water container, and a polymeric tube were used to accomplish the test. The polymeric tube makes the connections between the pump and the capillary tube. To this end, the thermosyphons were inserted into the water container and, with the positive displacement pump, air were pumped into the tube. If there were some failure, bubbles would appear in the water. It shows that there were flaws in the solder. In case there was the rise of bubbles, the thermosyphon should be disassembled, cleaned, welded and tested for fault correction in the welding process.

Evacuation Procedure

The amount of working fluid inserted in the thermosyphon is very important for the thermodynamic cycle inside the tube is completed. If there is not enough fluid, the evaporator will dry that leads to the thermosyphon collapses. As a result, the heat transfer will be interrupted. Before the filling of thermosyphons with the working fluid, it is necessary to make vacuum inside tube. The vacuum was made by a vacuum pump *EOS Value*TM i260SV (Fig. 5). To this end, a polymeric hose was connected to the capillary of the thermosyphon, joining them to the vacuum pump. The vacuum pump has a flow control valve and a rubber hose that make the link. After that,

the vacuum pump was switched on. It is recommended that this evacuation procedure has a duration at least of 4 hours. During the vacuum process, the reached internal pressure is 90 mbar (9 kPa) and the saturation temperature of water, related to this pressure, is approximately 43.74°C.



Figure 5. Vacuum pump and the thermosyphon.

Thermosyphon Filling with Working Fluid

To perform the thermosyphon fillings with the desired working fluid, a small filling station was developed. The filling station is composed of a universal support, a graduated burette (scale of 0.1 ml) with a capacity of 25 ml *Global Glass™*, and a forceps (Fig. 6). Each evacuated thermosyphon was coupled to a polymeric hose that makes the connection with the burette. After that, the hose was pinched with the forceps, which prevents that the air enters in the thermosyphon. The burette was completely filled with the working fluid. The next step was the opening of the burette valve carefully. Thus it would not formed any air bubble in the tubing between the burette and the thermosyphon. The forceps was carefully opened to drain the working fluid, until the thermosyphon was charged with the

correct quantity. It is emphasized that at the moment of filling, great care must be taken. Otherwise, the thermosyphon vacuum will be lose. If this happens, the entire vacuum process should be performed again. The thermosyphons were filled with 1.39 ml, which corresponds to 40% of evaporator volume or a filling ratio of 40%. After the charging, the capillary was clipped with a grip pliers and the end was welded for the completely sealing.

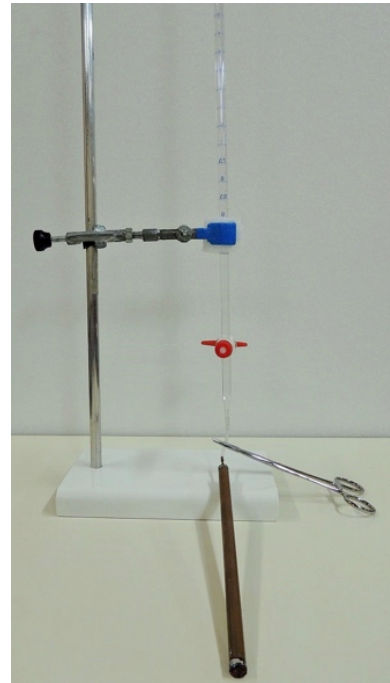


Figure 6. Filling station of the thermosyphons.

EXPERIMENTAL APPARATUS

The experimental apparatus used for the experimental tests is shown in Fig. 7. It is composed of a power supply unit (*Politerm™* POL 16B), a data logger (*Agilent™* 34970A with 20 channels), a *Dell™* desktop, and an *Ultrar™* DF12038HBL2 fan.

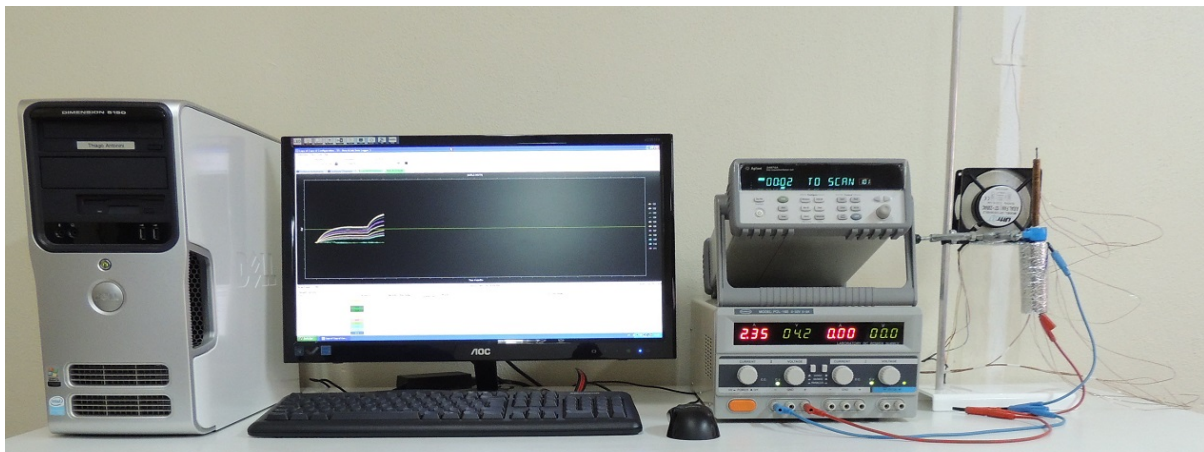


Figure 7. Experimental apparatus.

K-type Thermocouples (*Omega*TM) were used for the evaluation of the thermal behavior of different working fluids in the thermosyphons. They were fixed on the outer surface of the thermosyphon by a thermosensitive adhesive strip (*Kapton*TM). There were two thermocouples in the evaporator ($T_{evap,1}$ and $T_{evap,2}$), one thermocouple in the adiabatic section (T_{adiab}), and three thermocouples in the condenser ($T_{cond,1}$, $T_{cond,2}$, and $T_{cond,3}$) – Fig. 8.

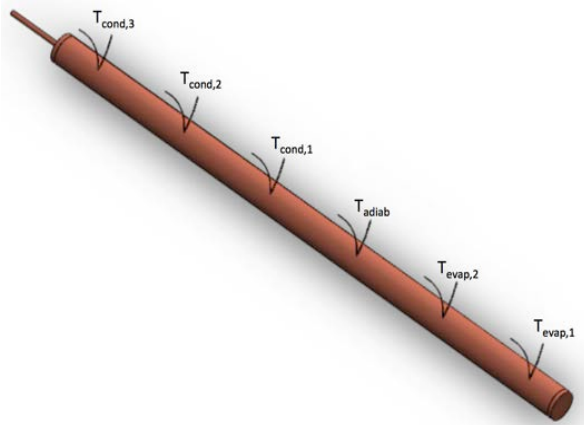
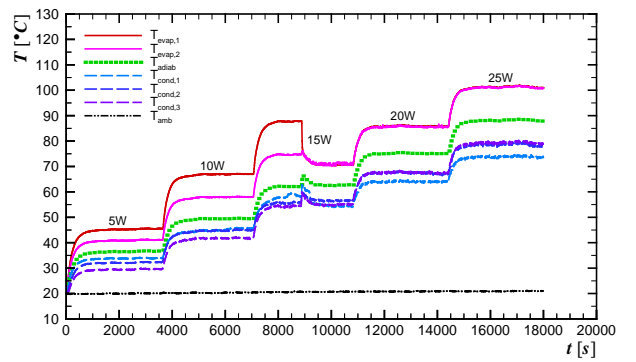


Figure 8. Positioning of the thermocouples.

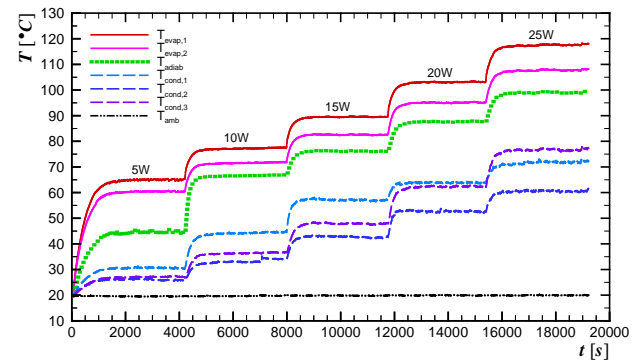
The heating system of the evaporator was conducted by power dissipation from the passage of an electric current in a nickel-chromium alloy power strip resistor. To ensure that the generated heat by Joule effect was transmitted to the evaporator, a thermal insulation is installed in this region. A glass fiber tape was used in adiabatic section as heat insulation and the cooling system using forced convection air was consisted of a fan in the condenser region.

RESULTS AND DISCUSSIONS

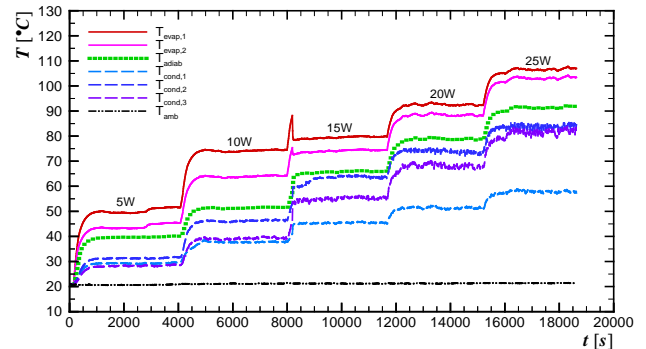
The results feature the thermal performance of different working fluids in thermosyphons operating upright. The working fluids are acetone, water, ethanol, and methanol. Tests were performed three times with increasing thermal loads of 5W, ranging from 5W to 25W. The comparative tests showed errors lower 0.5 °C in mean values. The data uncertainties are estimated to thermocouple temperatures (± 2.2 °C of uncertainty) and power dissipation ($\pm 1\%$ of uncertainty). The ambient temperature was maintained at 20 °C \pm 0.5 °C by a thermal conditioning system. The thermocouples values are acquired each 5 seconds. Each power was applied for 30 minutes, what all the thermocouples showed a stationary value. For security reasons, the maximum operating temperature established was 120 °C. In the Figure 9, temperatures distributions over the thermosyphons are presented for different working fluids.



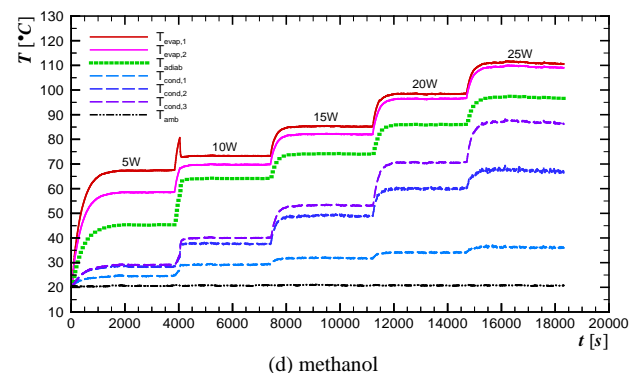
(a) acetone



(b) water



(c) ethanol



(d) methanol

Figure 9. Temperature distributions of the thermosyphons versus time for various working fluids.

In Table 3 and in Fig.10, the thermal resistance performance of different working fluids in the

thermosyphons is shown as a function of applied thermal load. The experimental uncertainties are also presented.

Table 3. Thermal resistance in function of applied power.

Power [W]	Thermal Resistance [$^{\circ}\text{C}/\text{W}$]			
	Acetone	Water	Ethanol	Methanol
5	2.52 ± 0.23	6.46 ± 0.31	3.67 ± 0.25	4.53 ± 0.25
10	1.62 ± 0.16	3.66 ± 0.19	2.24 ± 0.15	2.79 ± 0.18
15	1.25 ± 0.13	2.63 ± 0.16	1.68 ± 0.12	2.10 ± 0.14
20	1.04 ± 0.10	2.07 ± 0.12	1.37 ± 0.11	1.72 ± 0.12
25	0.90 ± 0.09	1.73 ± 0.10	1.17 ± 0.10	1.43 ± 0.10

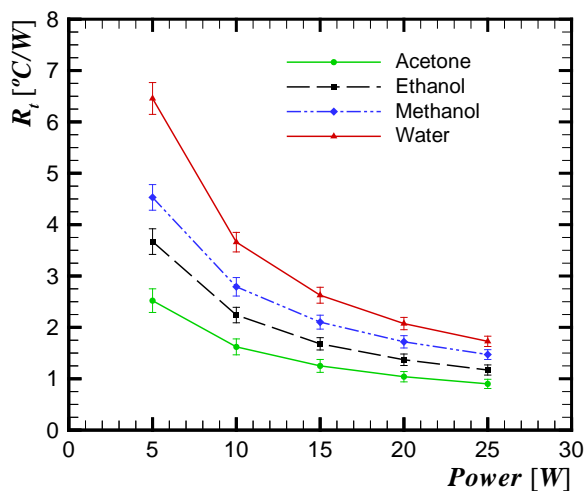


Figure 10. Thermal resistance versus applied power for different working fluids.

As can be seen, regardless of the working fluid used in the thermosyphons, the operating temperature increases and the thermal resistance decreases with the increase of power dissipation. Between the analyzed thermosyphons, acetone is the working fluid that presents the best thermal performance.

CONCLUSIONS

In this paper, an experimental investigation of the thermal performance of different working fluids (acetone, water, ethanol, and methanol) in thermosyphons was presented. These devices can be applied for the thermal control in electronic equipment. Thermosyphons were tested vertically under thermal loads 5W and 25W and operated satisfactorily. The working fluid with better thermal performance was acetone.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors thank the National Council for Scientific and Technological Development (CNPq), as well as the Federal University of Technology - Paraná (UTFPR) for the financial support.

REFERENCES

- Mantelli, M. B. H., 2013, *Thermosyphon Technology for Industrial Applications*, Chapter 11, In: Vasiliev, L. L., and Kakaç, S. (Eds.), *Heat Pipes and Solid Sorption Transformations: Fundamentals and Practical Applications*, CRC Press.
- Nishida, F. B., Marquardt, L. S., Borges, V. Y. S., Santos, P. H. D., and Antonini Alves, T., 2015, Development of a Copper Heat Pipe with Axial Grooves Manufactured using Wire Electrical Discharge Machining (Wire-EDM), *Advanced Materials Research*, Vol. 1120, pp. 1325-1329.
- Peterson, G. P., 1994, *An Introduction to Heat Pipes: Modeling, Testing and Applications*, (Thermal Management of Microelectronic and Electronic System Series), Wiley-Interscience.
- Reay, D. A., Kew, P. A., and McGlen R. J., 2014, *Heat Pipe: Theory, Design and Applications*, Butterworth-Heinemann.
- Santos, P. H. D., Krambeck, L., Santos, D. L. F., and Antonini Alves, T., 2014, Analysis of a Stainless Steel Heat Pipe Based on Operation Limits, *International Review of Mechanical Engineering*, Vol. 8, pp. 599-608.