

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
ESPECIALIZAÇÃO EM PROCESSAMENTO DE ENERGIAS RENOVÁVEIS**

GABRIEL NUNES MAIA JÚNIOR

**CONTRIBUINDO AO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL:
PROPOSTA DE UM COLETOR SOLAR COMPACTO ASSISTIDO POR
TERMOSSIFÕES**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
DE ESPECIALIZAÇÃO**

PONTA GROSSA

2017

GABRIEL NUNES MAIA JÚNIOR

**CONTRIBUINDO AO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL:
PROPOSTA DE UM COLETOR SOLAR COMPACTO ASSISTIDO POR
TERMOSSIFÕES**

Trabalho de Conclusão de Curso de Especialização apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Especialista em Processamento de Energias Renováveis, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador Prof. Dr. Thiago Antonini Alves

PONTA GROSSA

2017



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação
Campus Ponta Grossa



Especialização em Processamento de Energias Renováveis

TERMO DE APROVAÇÃO

CONTRIBUINDO AO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL: PROPOSTA DE UM COLETOR SOLAR COMPACTO ASSISTIDO POR TERMOSSIFÕES

por

Gabriel Nunes Maia Júnior

Este Trabalho de Conclusão de Curso de Especialização foi apresentado em **20 de fevereiro de 2017** como requisito parcial para a obtenção do título de **Especialista em Processamento de Energias Renováveis**. 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. Dr. Max Mauro dos Dias Santos
Membro Titular

Profa. Dra. Fernanda Cristina Corrêa
Membro Titular

Profa. Dra. Fernanda Cristina Corrêa
Coordenadora do Curso

- A FOLHA DE APROVAÇÃO ASSINADA ENCONTRA-SE ARQUIVADA NA
SECRETARIA DO CURSO -

RESUMO

MAIA JUNIOR, Gabriel Nunes. **Contribuindo ao desenvolvimento sustentável:** proposta de um coletor solar compacto assistido por termossifões. 2017. 21 f. Trabalho de Conclusão de Curso de Especialização (Processamento de Energias Renováveis) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2017.

De acordo com o Balanço Energético Nacional de 2016 do Ministério de Minas e Energia, a matriz energética brasileira vem ganhando nova configuração, tornando se cada vez menos dependente de fontes de energias não renováveis, como o petróleo, o gás natural e o carvão, devido ao crescimento da contribuição das fontes alternativas de energia renovável. No âmbito da sustentabilidade destacam-se pesquisas relacionadas à energia solar. Esse tipo de energia é utilizado em coletores solares, tanto para uso industrial como para uso doméstico, com o intuito de aquecer uma quantidade de água armazenada e desta forma reduzir o consumo de energia elétrica. Neste contexto, no presente trabalho foi apresentada uma análise experimental de um termossifão que será acoplado à uma nova concepção de coletor solar compacto assistido por termossifões contribuindo significativamente ao desenvolvimento sustentável.

Palavras-chave: Coletor solar. Termossifão. Energia renovável.

ABSTRACT

MAIA JUNIOR, Gabriel Nunes. **Contributing to sustainable development:** suggestion of a solar collector compact assisted by thermosyphon. 2017. 21 p. Work of Conclusion Course of Especialization (Renewable Energy Processing) - Federal Technology University - Paraná, Ponta Grossa, 2017.

According to the National Energy Balance 2016 of the Ministry of Mines and Energy, Brazilian energy matrix is gaining new configuration, becoming made less dependent on non-renewable energy sources, such as oil, natural gas and charcoal, due to the increased contribution of alternative sources of renewable energy. In the context of sustainability stands out research related to solar energy. This type of energy is used in solar collectors, both for industrial use and for domestic, in order to heat a quantity of water stored and thus reduce the electricity consumption. In this context, this paper was presented in an experimental analysis of a thermosyphon to be linked to a new design of compact solar collector thermosyphon assisted by significantly contributing to sustainable development.

Keywords: Solar collector. Thermosyphon. Renewable energy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Participação das renováveis na matriz energética	7
Figura 2 - Matriz energética brasileira do ano de 2015	8
Figura 3 - Radiação solar global no Brasil, média sazonal.....	9
Figura 4 - Componentes básicos do termossifão	12
Figura 5 - Procedimento de evacuação.....	13
Figura 6 - Aparato experimental	15
Figura 7 - Termopares instalados e sistema de isolamento do evaporador	16
Figura 8 - Distribuição da temperatura em função do tempo	18
Figura 9 - Temperatura de operação em função da carga térmica	19
Figura 10 - Resistência térmica em função da carga térmica.....	19

SUMÁRIO

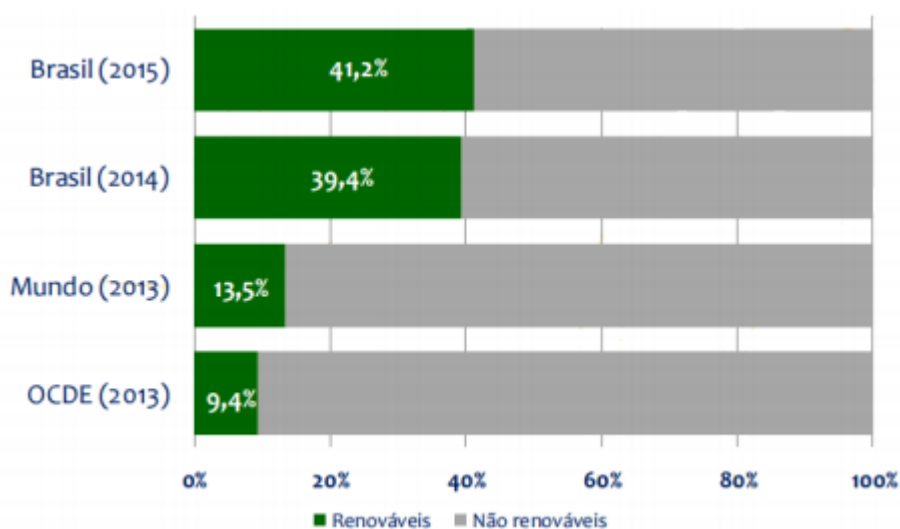
1 INTRODUÇÃO	7
2 MATERIAIS E MÉTODOS.....	11
2.1 CARACTERÍSTICA DO TERMOSSIFÃO	11
2.2 LIMPEZA DOS COMPONENTES DO TERMOSSIFÃO.....	11
2.3 MONTAGEM DO TERMOSSIFÃO	12
2.4 TESTE DE ESTANQUEIDADE	12
2.5 PROCEDIMENTO DE EVACUAÇÃO DOS TERMOSSIFÕES	13
2.6 PREENCHIMENTO DOS TERMOSSIFÕES COM FLUIDO DE TRABALHO...	13
3 PARTE EXPERIMENTAL.....	15
3.1 APARATO EXPERIMENTAL	15
3.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	16
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	18
5 CONCLUSÃO.....	20
REFERÊNCIAS.....	21

1 INTRODUÇÃO

A busca por soluções reais que satisfaçam a demanda crescente de energia no cenário global tem sido objeto de estudos em todas as partes do mundo e, tanto fontes quanto tecnologias renováveis têm sido buscadas para a substituição dos combustíveis fósseis, não renováveis e com elevado potencial de degradação ambiental (LACERDA, 2015).

De acordo com o Ministério de Minas e Energia, MME, o Brasil é o país que mais utiliza recursos renováveis (vide Figura 1). Segundo projeções do Plano Nacional de Energia 2030, o país deverá elevar de 41,2% para 47% a utilização de fontes renováveis em sua matriz energética (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2016).

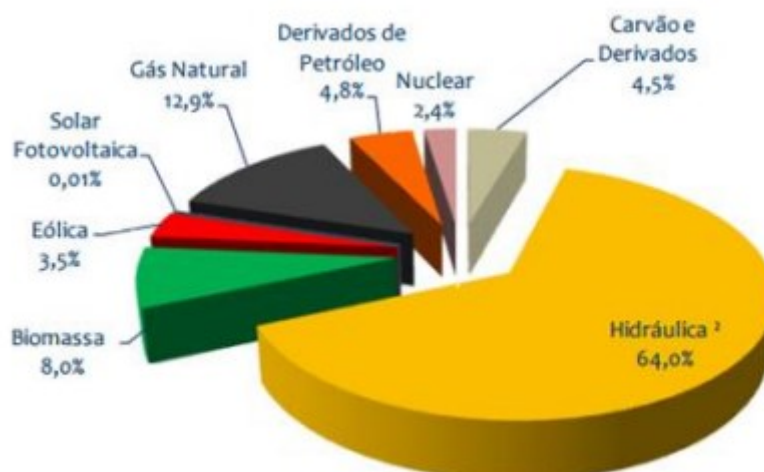
Figura 1 - Participação das renováveis na matriz energética



Fonte: BEN – Balanço Energético Nacional (2016)

A matriz energética brasileira referente ao ano de 2015, ilustrada na Figura 2, foi apresentada no Balanço Energético Nacional (BEN) do ano 2016.

Figura 2 - Matriz energética brasileira do ano de 2015

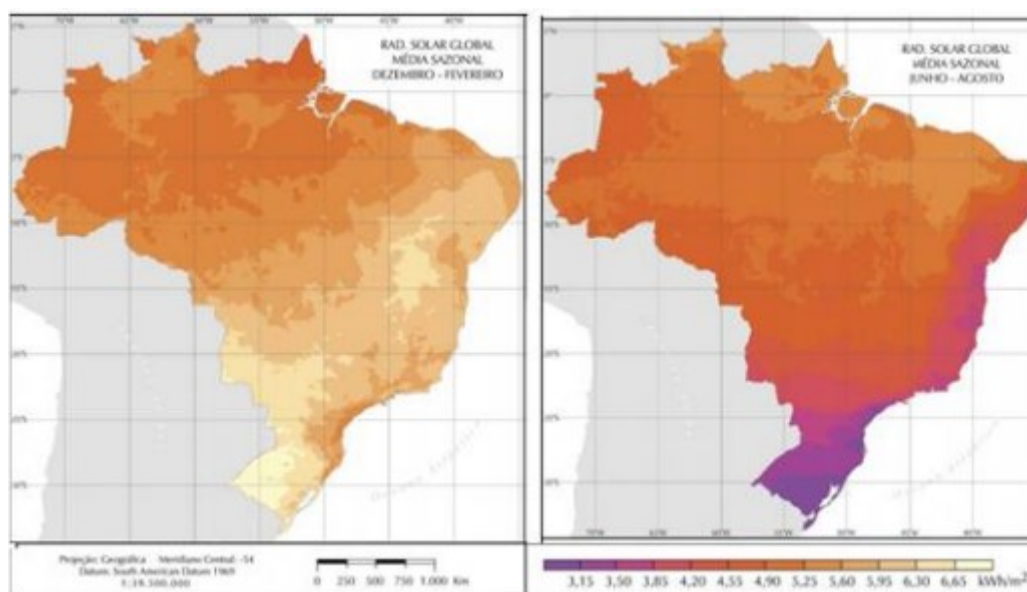


Fonte: BEN – Balanço Energético Nacional (2016)

Na Figura 2 observa-se que 64,0 % do total da energia elétrica gerada no Brasil se dá por meio da geração hidráulica, uma vez que existem grandes bacias hidrográficas em todo território nacional. O gás natural é a segunda maior fonte de geração de energia elétrica, representando 12,9% do total da matriz energética brasileira. Uma outra forma de geração de energia renovável é a biomassa, que utiliza como principal matéria prima cana de açúcar, cavaco, cascas de arroz que se tornam resíduos de processos nas indústrias, e são utilizados para gerar energia, uma vez que apresentam alto poder calorífico. Essa forma de geração representou 8,0 % da geração total de energia segundo o BEN 2016, e essa participação vem aumentando a cada ano. Nota-se ainda que a geração de energia elétrica pela fonte eólica representa 3,5 % do total da geração, porém obteve um aumento de 77,1% em relação ao ano de 2015. Embora a energia solar não represente uma contribuição significativa na matriz energética brasileira, pois contribui com apenas 0,01% do total, ela se destacou no último Balanço Energético Nacional, devido ao seu crescimento de 97% em relação ao ano anterior da análise.

De acordo com o Atlas Brasileiro de Energia Solar (2007), como a maior parte do território brasileiro se encontra na região intertropical, o país tem grande potencial para aproveitar esse tipo de energia o ano todo. A intensidade dos raios solares depende da latitude geográfica da área em questão e da estação do ano (inclinação do eixo da terra). A Figura 3 apresenta a média de irradiação solar no território brasileiro no verão e no inverno, respectivamente.

Figura 3 - Radiação solar global no Brasil, média sazonal



Fonte: Adaptado de Pereira et al (2006)

Ressalta-se que no âmbito da sustentabilidade destacam-se pesquisas relacionadas à energia solar. Esse tipo de energia é utilizado em coletores solares, tanto para uso industrial como para uso doméstico, com o intuito de aquecer uma quantidade de água armazenada e desta forma reduzir o consumo de energia elétrica (HOLETZ, 2014).

Os coletores solares são dispositivos que recebem radiação solar e transferem essa energia sob a forma de calor para o fluido de trabalho. Esses dispositivos devem ser construídos de acordo com as especificações das normas da ABNT NBR 15747:2008 (Sistemas Solares Térmicos e seus Componentes: Coletores Solares) e NBR 15569:2008 (Sistema de Aquecimento Solar de Água em Circuito Direto: Projeto e Instalação), levando-se em consideração as especificações do projeto, como faixa de temperatura, pressão e resistência de exposição à radiação solar.

Outro tipo de coletor solar, que é pouco utilizado no Brasil, é o coletor solar à vácuo, que utiliza termossifões para intensificar a transferência de calor para a água que será aquecida. Embora esses coletores solares contendo dispositivos passivos de transferência de calor estão sendo utilizados no Brasil, a tecnologia de construção desses tipos de coletores solares é estrangeira. Esse tipo de coletor solar à vácuo ou também chamado de coletor assistido por termossifões ou tubos de

calor são amplamente utilizados na Europa, nos Estados Unidos, Canadá e em alguns países da Ásia.

Os termossifões são dispositivos altamente eficientes, pois operam em um ciclo bifásico fechado utilizando calor latente de vaporização para transferir energia na forma de calor por pequenos gradientes de temperatura. Os termossifões são constituídos de um tubo metálico evacuado e hermeticamente fechado, preenchidos por um fluido de trabalho (MANTELLI, 2013). Portanto, esses dispositivos passivos são uma alternativa viável para coletores solares, devido à sua relativa simplicidade de construção e ao bombeamento do fluido do trabalho realizado pela ação da gravidade em função da inclinação da superfície do coletor. Por serem dispositivos que transferem grandes quantidades de calor, a utilização de termossifões ou tubos de calor em coletores solares faz com que os coletores sejam mais compactos em comparação aos coletores solares convencionais (comerciais).

Neste contexto, no presente trabalho foi apresentada uma análise experimental de um termossifão que será acoplado à uma nova concepção de coletor solar compacto assistido por termossifões utilizando em aquecimento de água doméstica contribuindo significativamente ao desenvolvimento sustentável.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

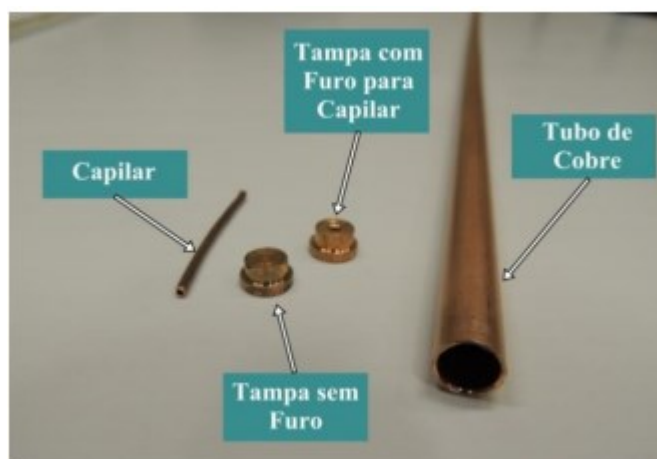
A metodologia utilizada na fabricação do termossifão (limpeza, montagem, teste de estanqueidade, procedimento de evacuação e preenchimento com fluido de trabalho) foi baseada levando em consideração as informações fornecidas em Santos et al. (2014), Vicente et al. (2014), Aguiar (2016), Nishida (2016) e Krambeck (2016). Este dispositivo passivo de transferência de calor foi construído no Laboratório de Controle Térmico (LabCT) pertencente ao Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) do Câmpus Ponta Grossa.

2.1 CARACTERÍSTICA DO TERMOSSIFÃO

O termossifão foi produzido a partir de um tubo de cobre ASTM B75 Liga 122 com diâmetro externo de 12,7 mm, diâmetro interno de 11,0 mm e comprimento total de 950 mm. O termossifão apresenta um evaporador de 800 mm de comprimento, uma região adiabática de 40 mm de comprimento e um condensador de 110 mm de comprimento. O fluido de trabalho utilizado foi água deionizada e a razão de preenchimento foi de 50% em relação ao volume do evaporador.

2.2 LIMPEZA DOS COMPONENTES DO TERMOSSIFÃO

A limpeza dos componentes do termossifão é extremamente importante, pois garante a molhabilidade do fluido de trabalho, a eliminação de impurezas e a melhoria na qualidade do vácuo. Neste contexto, o invólucro, as tampas de fechamento (usinadas a partir de uma barra maciça de cobre ASTM B75 Liga 122 com diâmetro de 12,7 mm) e o capilar (tubo de cobre ASTM B75 Liga 122 com diâmetro interno de 1 mm e com comprimento de 40 mm), Figura 4, foram previamente limpos utilizando acetona, para retirar as maiores sujidades, seguido de uma limpeza com uma solução de ácido sulfúrico com concentração de 10% em volume (H_2SO_4 de 0,1M). Feito isso, estes componentes foram levados a um banho ultrassônico KondentechTM, permanecendo mergulhados em acetona, para que sejam completamente limpos, durante 30 minutos.

Figura 4 - Componentes básicos do termossifão

Fonte: Autoria própria

2.3 MONTAGEM DO TERMOSSIFÃO

Após a realização da limpeza de seus componentes, o termossifão foi propriamente montado. As tampas de fechamento e o capilar foram soldados nas extremidades do invólucro (tubo de cobre ASTM B75 Liga 122) do termossifão. O processo de soldagem foi efetuado com o auxílio de um ferro de soldar Hikari™ Power 300 e os diferentes componentes foram brasados utilizando uma liga de estanho como material de adição.

2.4 TESTE DE ESTANQUEIDADE

Para verificar se não houve falha no processo de soldagem, foi realizado um teste de estanqueidade utilizando uma bomba de deslocamento positivo manual, um recipiente com água e uma conexão para ligar a bomba ao tubo capilar. Para tal, o termossifão foi inserido dentro do recipiente contendo água e, com a bomba de deslocamento positivo foi bombeado ar para dentro do tubo. Se houvesse alguma falha, surgiriam bolhas na água, demonstrando que existiam falhas na solda. Caso ocorresse o surgimento de bolhas, o termossifão deveria ser desmontado, limpo, soldado e testado para a correção da falha no processo de soldagem.

2.5 PROCEDIMENTO DE EVACUAÇÃO DOS TERMOSSIFÕES

Primeiramente, o termossifão foi acoplado a uma bomba de vácuo LAB1000TM através do capilar, para o processo de evacuação inicial, com o intuito de remover principalmente o líquido remanescente do processo de limpeza. Feito isso, o termossifão foi acoplado a uma bomba de vácuo EOS Value™ i260SV (Figura 5). Para garantir uma conexão sem vazamentos, silicone foi aplicado nas conexões da mangueira polimérica previamente à realização de vácuo no tubo. A bomba de vácuo permaneceu em funcionamento por aproximadamente oito horas. Durante o processo de vácuo, a pressão interna atingida é de 90,9 kPa e a temperatura de saturação da água relacionada com essa pressão é aproximadamente 43,74°C. Com o auxílio de um fórceps, a mangueira foi vedada e, então, a bomba de vácuo foi desligada.

Figura 5 - Procedimento de evacuação



Fonte: Autoria própria

2.6 PREENCHIMENTO DOS TERMOSSIFÕES COM FLUIDO DE TRABALHO

Para realizar o preenchimento do termossifão com o fluido de trabalho, foi desenvolvida uma pequena estação de preenchimento composta por um suporte universal, uma bureta graduada (escala de 0,1 ml) com capacidade de 25 ml Global Glass™ e um fórceps. O termossifão evacuado foi acoplado à uma mangueira polimérica que faz conexão com a bureta. Feito isso, a mangueira foi pinçada com o fórceps para evitar que ar entrasse no termossifão. A bureta estava completamente

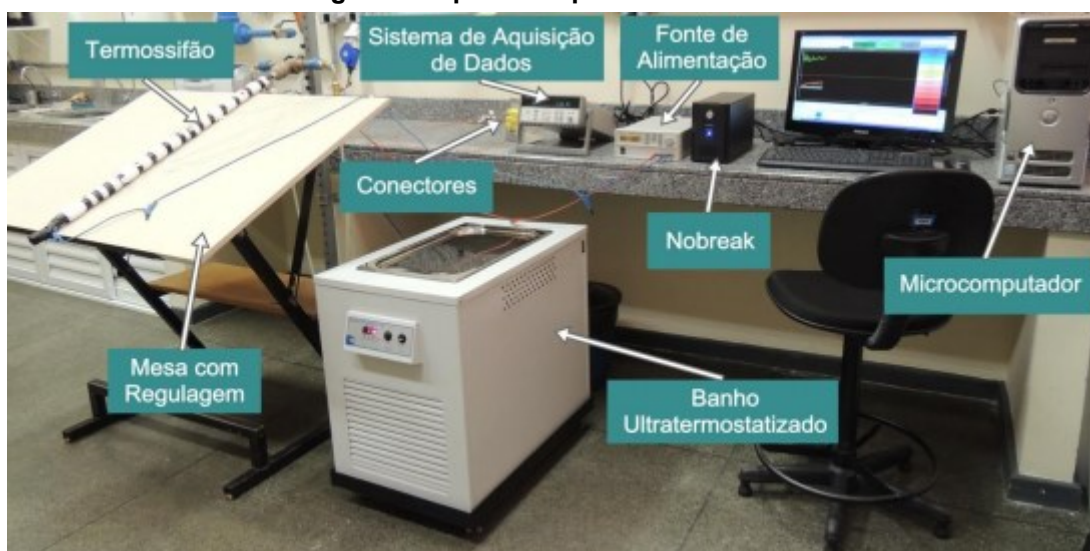
preenchida com o fluido de trabalho. O próximo passo foi abrir a válvula da bureta cuidadosamente para que não fosse formada nenhuma bolha de ar na tubulação entre a bureta e o termossifão. O fórceps foi cuidadosamente aberto para drenar o fluido de trabalho até que o termossifão fosse carregado com o fluido de trabalho. Destaca-se que no momento do preenchimento, muito cuidado é necessário para que não se perca o vácuo existente dentro do termossifão. Se isso acontecer, todo o processo de vácuo deve ser realizado novamente. O termossifão foi preenchido com aproximadamente 38 ml, correspondendo a 50% do volume do evaporador, ou ainda, uma razão de preenchimento de 50%. Após o carregamento, o capilar foi clipado com um alicate de pressão e a extremidade soldada para completa vedação.

3 PARTE EXPERIMENTAL

3.1 APARATO EXPERIMENTAL

O aparato experimental utilizado para os testes, mostrado na Figura 6, é composto por uma fonte de alimentação Keysight™ U8002A, um sistema de aquisição de dados Agilent™ 34970A com 20 canais, um banho ultratermostatizado Solab™ SL-130, um microcomputador Dell™, um nobreak NHSTM de 1200 VA e uma mesa com regulagem de inclinação.

Figura 6 - Aparato experimental



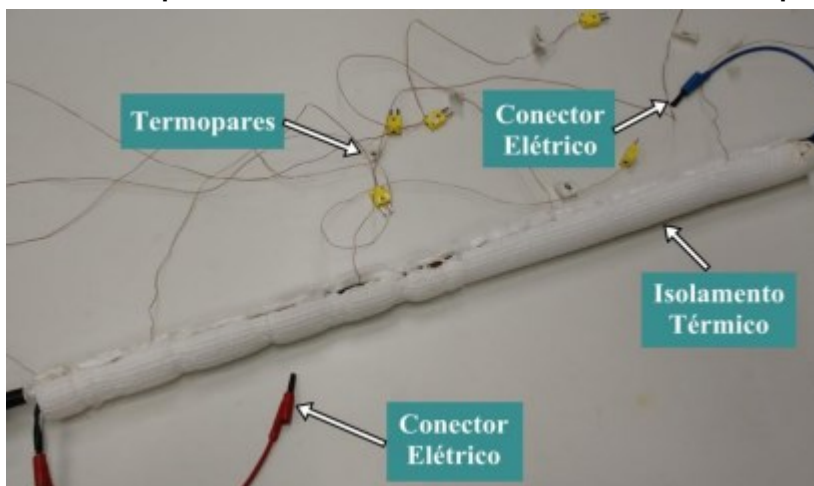
Fonte: Autoria própria

O sistema de aquecimento do evaporador foi realizado pela dissipação de potência proveniente da passagem de uma corrente elétrica em uma fita resistiva de liga níquel-cromo Omega™ de 0,1 mm de espessura e de 3,5 mm de largura. A superfície externa do termossifão foi protegida com fita adesiva termosensível Kapton™ para que o resistor e os termopares não tivessem contato direto com o termossifão. Para garantir que todo o calor gerado por efeito Joule fosse transmitido ao evaporador foram instalados nesta região um isolamento térmico aeronáutico e uma camada de polietileno (Figura 7). Uma fita de fibra de vidro foi usada na seção adiabática como um isolante térmico entre o suporte e o ter mossifão.

O sistema de resfriamento do condensador por convecção forçada de água foi constituído por um circuito hidráulico (tubos, conexões e acessórios) conectado

por mangueiras de silicone ao banho ultratermostatizado. A vazão volumétrica do fluido do fluido de resfriamento do condensador foi controlada e aferida através de um rotâmetro de área variável Omega™. Para a avaliação do comportamento térmico do termossifão foram utilizados termopares Omega™ do Tipo K fixados na superfície externa do termossifão utilizando uma fita termosensível Kapton™.

Figura 7 - Termopares instalados e sistema de isolamento do evaporador



Fonte: Autoria própria

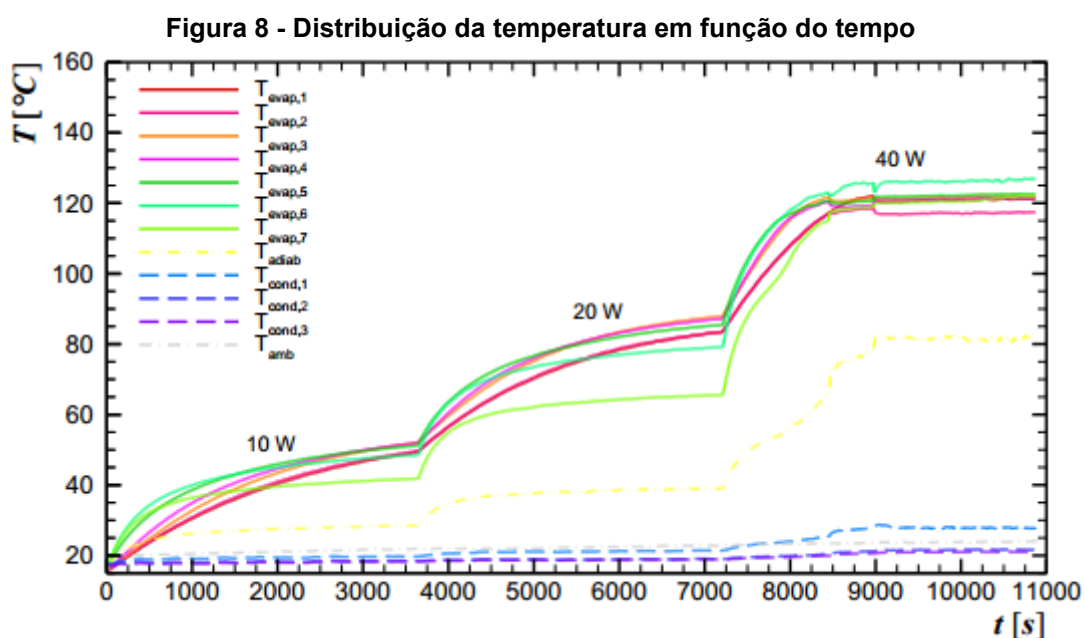
3.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para garantir um melhor resultado e a repetitividade dos testes experimentais, as temperaturas do ambiente e do banho ultratermostatizado foram mantidas em $18\text{ °C} \pm 0,5\text{ °C}$. Uma verificação minuciosa dos equipamentos do aparato experimental e do termossifão testado (fixação de termopares, isolamento térmico, conexão do resistor, entre outros) foi feita antes de cada teste experimental. O termossifão foi cuidadosamente fixado em um suporte universal com garra pelo circuito hidráulico e sua inclinação de trabalho foi regulada em 25° (correspondendo a latitude da cidade de Ponta Grossa/PR ($25^\circ 05' 42''$ sul)). O banho ultratermostatizado foi ligado e ajustado a uma vazão volumétrica de $0,5\text{ L/min}$ controlada por uma válvula existente no rotâmetro. O sistema de aquisição de dados foi, então, ativado e as temperaturas medidas pelos termopares eram verificadas em relação às temperaturas ambiente e do banho ultratermostatizado, e, se estas estivessem estáveis e aproximadamente a 18 °C , finalmente, a fonte de alimentação era ligada e ajustada na dissipação de potência desejada. Os testes foram

realizados para cargas térmicas de 10W, 20W e 40W. Cada carga térmica foi mantida por 60 minutos, onde a condição de funcionamento de regime quase permanente foi atingida. Os dados foram registrados a cada 5 segundos pelo sistema de aquisição de dados e gravados no microcomputador Dell™ através do software Agilent™ Benchlink Data Logger 3. Posteriormente, os dados foram tratados para avaliação do desempenho térmico do termossifão.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

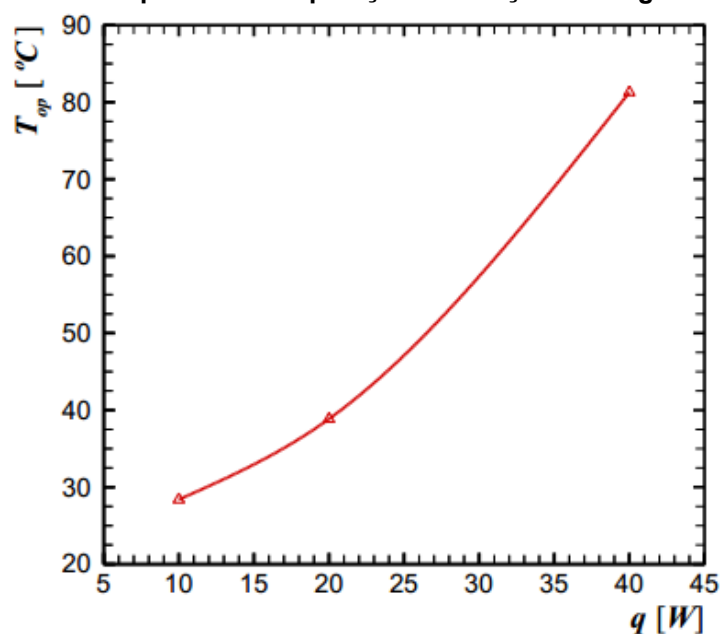
Os resultados experimentais apresentam o comportamento térmico do termossifão que será acoplado à uma nova concepção de coletor solar compacto assistido por termossifões operando em uma inclinação de 25° . Os testes experimentais foram executados três vezes e os erros foram comparados levando em consideração que a diferença entre as médias dos valores fossem menores que $0,5^\circ\text{C}$. A Figura 8 apresenta a distribuição de temperatura em função do tempo para as cargas térmicas crescentes.



Fonte: Autoria própria

A Figura 9 apresenta o comportamento da temperatura de operação do termossifão testado em função da potência dissipada no evaporador. Esta temperatura de operação corresponde à temperatura da seção adiabática durante a execução dos testes experimentais. Como esperado, a temperatura de operação aumenta com o aumento da dissipação de potência.

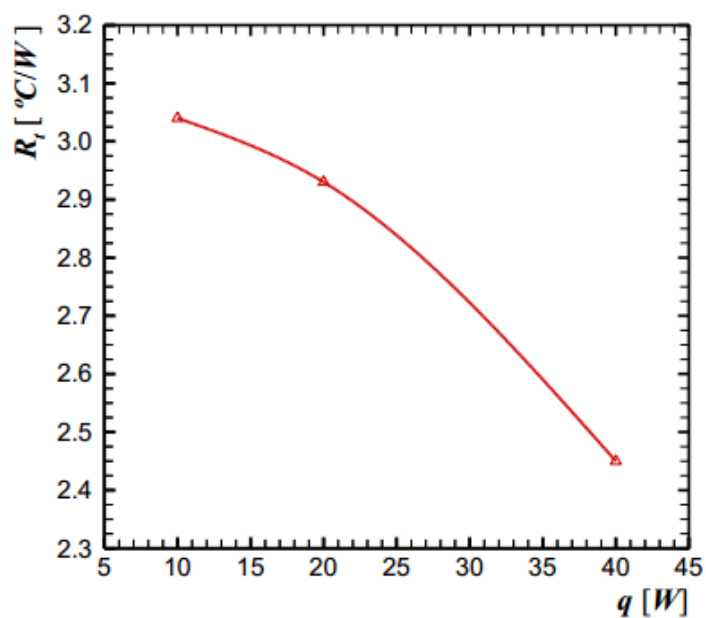
Figura 9 - Temperatura de operação em função da carga térmica



Fonte: Autoria própria

A Figura 10 apresenta o comportamento da resistência térmica em função da dissipação de potência no termossifão. Como esperado, a resistência térmica diminui com o aumento da dissipação de calor no evaporador.

Figura 10 - Resistência térmica em função da carga térmica



Fonte: Autoria própria

5 CONCLUSÃO

Considerando o alarmante cenário energético brasileiro atual, a busca por novas fontes de energia renováveis para geração de energia elétrica ou de ganhos de eficiências naquelas já existentes tem sido objeto de estudo. Neste contexto, no presente trabalho foi apresentada uma análise experimental de um termossifão que será acoplado à uma nova configuração de coletores solares compactos assistidos por termossifões para utilização de aquecimento de água em residências contribuindo significativamente ao desenvolvimento sustentável. Os resultados experimentais mostraram que o termossifão construído funcionou perfeitamente.

REFERÊNCIAS

AGUIAR, V. M. **Influência da razão de preenchimento e da inclinação no desempenho térmico de termossifões**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2016.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Balanco energético nacional - BEN**. Brasília: MME, 2016.

HOLETZ, M. G. **Limites operacionais de termossifões aplicados em coletores solares**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2014.

KRAMBECK, L. **Investigação experimental do desempenho térmico de telas metálicas em tubos de calor**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2016.

LACERDA, K. A. **Remodelagem de uma usina sucroalcooleira para incremento da cogeração de energia com aproveitamento do palhiço**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista (Júlio de Mesquita Filho). Ilha Solteira, 2015.

MANTELLI, M.B.H. Thermosyphon technology for industrial applications. In: VASILIEV, L. L.; KAKAÇ, S. (Eds.). **Heat pipes and solid sorption transformations: fundamentals and practical applications**. Boca Raton (USA): CRC Press, 2013. Chapter 11.

NISHIDA, F. B. **Desenvolvimento de tubos de calor com microranhuras fabricadas por eletroerosão a frio**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2016.