



**PROJETO DE GRADUAÇÃO**

**CONSTRUÇÃO DE UM CONCENTRADOR  
SOLAR PARABÓLICO PARA UTILIZAÇÃO EM  
DISPOSITIVOS TÉRMICOS**

Por,  
**Fernando Falkenberg Marques**

Brasília, 22 de Dezembro de 2020

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
Faculdade de Tecnologia  
Departamento de Engenharia Mecânica

PROJETO DE GRADUAÇÃO

**CONSTRUÇÃO DE UM CONCENTRADOR  
SOLAR PARABÓLICO PARA UTILIZAÇÃO EM  
DISPOSITIVOS TÉRMICOS**

POR,

**Fernando Falkenberg Marques**

Relatório submetido como requisito parcial para obtenção  
do grau de Engenheiro Mecânico.

**Banca Examinadora**

Prof. João Manoel Dias Pimenta, UnB/ ENM  
(Orientador)

Prof. Mário Benjamim Baptista de Siqueira, UnB/  
ENM

Prof. José Leonardo Ferreira, UnB/ IFD

---

---

---

Brasília, 22 de Dezembro de 2020

---

## RESUMO

Este projeto de graduação apresenta um estudo do projeto e da construção de um concentrador solar parabólico de disco de pequenas dimensões e baixo custo para a utilização em sistemas de geração de energia descentralizados. São discutidos aspectos fundamentais da geração de energia a partir da radiação solar, além do estado atual das tecnologias na área e o potencial brasileiro, influenciado pela sua localização geográfica e condições climáticas. Na construção do concentrador são utilizados materiais de fácil aquisição, como antenas parabólicas, filmes poliméricos espelhados e tubos de cobre com o objetivo de tornar o projeto acessível. São apresentadas as escolhas de projeto e de construção do concentrador solar. O custo de fabricação ficou próximo de R\$425,00 (US\$70,00) por metro quadrado, o que é três vezes menor do que o custo de projetos anteriores semelhantes. Após a construção, foram realizados testes que demonstraram uma potência de 600 W e uma eficiência próxima aos 20%. Considerando o caráter de protótipo e os pontos passíveis de melhorias apresentados, é indicado um possível aumento na eficiência, e melhora nas características de desempenho do sistema quando comparado com projetos semelhantes anteriores. Por último, são discutidos os erros e os acertos do projeto para que sejam feitas melhorias de desempenho e de viabilidade econômica em projetos futuros para aplicações em residências e estabelecimentos comerciais.

---

## ABSTRACT

This graduation project presents a study of the design and construction of a parabolic dish solar concentrator of small sizes and low cost for use in decentralized power generation systems. Fundamental aspects of power generation from solar radiation are discussed, as well as the current state of technologies in the field and the Brazilian potential, influenced by their geographical location and climatic conditions. In the construction of the concentrator, materials of easy acquisition such as parabolic satellite dishes, mirrored polymeric films and copper tubes are used to make the project accessible. The design and construction choices for the solar concentrator are presented. The manufacturing cost was close to R\$ 425.00 (US\$ 70.00) per square meter, which is three times less than the cost of similar previous projects. After the construction, the tests conducted demonstrated 600 W of power and near to 20% efficiency. Considering the fact of it being a prototype and that there are improvements that can be done, the tests indicated a possible increase in efficiency and improvements in the performance when compared to similar projects of the past. Finally, the project's errors and successes are discussed so that performance and economic viability improvements can be made in future projects for residential and commercial applications.

# SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>8</b>
1.1 TEMA EM ESTUDO E SUA RELEVÂNCIA	8
1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	9
1.3 OBJETIVOS	11
1.4 METODOLOGIA	11
1.5 ESTRUTURA	11
<b>2 REVISÃO DE CONCEITOS GERAIS</b>	<b>12</b>
2.1 ENERGIA SOLAR	12
2.2 REVISÃO SOBRE COLETORES SOLARES	18
<b>3 PROJETO E CONSTRUÇÃO</b>	<b>22</b>
3.1 SUPERFÍCIE CONCENTRADORA PARABÓLICA	22
3.2 SUPERFÍCIE REFLETIVA	24
3.3 ABSORVEDOR DE CALOR	25
3.4 BASE DE SUSTENTAÇÃO DO CONCENTRADOR	29
<b>4 RESULTADOS</b>	<b>32</b>
4.1 EXECUÇÃO DOS EXPERIMENTOS	32
4.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS	35
<b>5 CONCLUSÃO</b>	<b>44</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>46</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>49</b>

# LISTA DE FIGURAS

2.1	Sol e sua atmosfera.	12
2.2	Irradiância no topo da atmosfera em função do espectro eletromagnético da radiação solar.	14
2.3	Matriz elétrica brasileira em maio de 2017.	15
2.4	Mapa do total anual de irradiação solar direta normal com destaque para regiões com maior potencial de aproveitamento da energia solar concentrada.	16
2.5	Fotoperíodo ao longo do ano para diferentes latitudes.	17
2.6	Usina heliotérmica com torre central Gemasolar, Espanha.	19
2.7	Planta SEGS de 354 MW na Califórnia.	20
2.8	Sistema Advanco Vanguard.	20
2.9	Sistema SBP-1984 de discos/stirling de 50 kW na Arábia Saudita.	21
3.1	Perdas de energia no aproveitamento da luz solar.	22
3.2	CAD produzido para a visualização dos principais componentes do projeto.	22
3.3	Antena Parabólica de Tv de 1,90m de diâmetro e 10 Telas - MD190 Century.	23
3.4	Folhas de polímero espelhado de dimensões 10 x 0,6 m.	24
3.5	Disposição das superfícies de polímero espelhado e e.v.a. sobre as telas de alumínio do concentrador parabólico.	25
3.6	Componentes do absorvedor de calor.	26
3.7	Tinta spray preto fosco para altas temperaturas Chemicolor.	27
3.8	Coefficiente de absorção efetivo em função da altura e do diâmetro (a partir do diâmetro da cavidade) de um absorvedor de calor cilíndrico obtido como melhor alternativa para o projeto.	28
3.9	Manta de lã cerâmica e serpentina de cobre de diâmetro ¼".	29
3.10	Apontamento do concentrador.	30
3.11	Encaixe traseiro do concentrador parabólico.	30
3.12	Fixação da base de sustentação do concentrador, junto com todo o sistema, em um tubo de aço preso por concreto no chão.	31
3.13	Sistema pronto para o funcionamento.	31
4.1	Bomba FI-3308 selecionada ao lado das curvas características do sistema e da bomba obtidos com o código disponível no anexo VI.	32
4.2	Diagrama dos componentes do experimento.	33
4.3	Erro da guiagem manual em função do tempo registrado em um teste qualquer.	36
4.4	Potência em função do tempo registrada durante os experimentos nº 2, 3 e 4.	37
4.5	Potência em função do tempo registrada durante o experimento nº 6.	37
4.6	Eficiência energética do concentrador em função do tempo durante o teste nº 4. A equação 4.3 é geradora dessa figura.	38
4.7	Temperatura de entrada e de saída da água e temperatura ambiente em função do tempo ao longo do teste nº 4.	39
4.8	Gráfico da potência (Q) em função da média logarítmica das diferenças de temperatura dos testes nº 2, 3, 4 e 5, junto com a extrapolação da curva cuja inclinação representa o valor do coeficiente global de transferência de calor multiplicado pela área de troca de calor do absorvedor.	40
4.9	Coefficiente global de transferência de calor e coeficiente global de transferência de calor multiplicado pela área de troca de calor em função do tempo obtidos durante os testes nº 2, 3, 4 e 5.	41
4.10	Vazão em função do tempo registrada para todos os testes.	42
4.11	Temperatura interna máxima do absorvedor de calor sem circulação de água medida pelo sensor infravermelho TA601A e tabela com os valores de temperatura de estagnação obtidos por KAUSHIKA (1999).	42

# LISTA DE EQUAÇÕES

2.1	Equivalência entre Massa e Energia de Einstein.	12
3.1	Cálculos da absorptância efetiva de um absorvedor de cavidade.	26
3.2	Aumento linear transversal em ótica.	27
3.3	Ampliação do diâmetro da imagem.	27
4.1	Cálculo do erro da guiagem.	35
4.2	Cálculo da potência.	36
4.3	Cálculo da eficiência.	38
4.4	Cálculo do coeficiente global de transferência de calor.	39
4.5	Cálculo do LMTD.	40

# LISTA DE SÍMBOLOS

## Símbolos Latinos

$A$	Área	[m <sup>2</sup> ]
$c_p$	Calor específico a pressão constante	[kJ/kg.K]
$h$	Entalpia específica	[kJ/kg]
$\dot{m}$	Vazão mássica	[kg/s]
$T$	Temperatura	[°C]
$U$	Coefficiente global de transferência de calor	[W/m <sup>2</sup> .K]
$Q$	Potência	[W]
LMTD	Média Logarítmica das Diferenças de Temperatura	[°C]

## Símbolos Gregos

$\alpha$	Absortividade	[%]
$\Delta$	Variação entre duas grandezas similares	
$\rho$	Densidade	[m <sup>3</sup> /kg]

## Subscritos

$amb$	ambiente
$ext$	externo
$int$	interno
$in$	entrada
$ex$	saída

## Grupos Adimensionais

$Nu$	Número de Nusselt
$Re$	Número de Reynolds

## Siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

# 1 INTRODUÇÃO

*Este capítulo apresenta objetivamente o tema em estudo, um compilado dos conhecimentos na área, os objetivos, a metodologia e a estrutura do trabalho. Os temas aqui abordados serão aprofundados nos capítulos seguintes.*

## 1.1. TEMA EM ESTUDO E SUA RELEVÂNCIA

Em uma sociedade com necessidade crescente de soluções energéticas sustentáveis, a energia solar é uma das principais alternativas de um esforço mundial para a implementação de uma matriz energética renovável e limpa. A rigor a energia solar não é renovável, mas dentro das escalas de grandeza do tempo da vida no planeta Terra, ela pode ser considerada inesgotável. Estima-se que o Sol continuará gerando níveis semelhantes de radiação pelos próximos cinco bilhões de anos. Ainda assim, o uso da energia solar está sujeito às condições atmosféricas e aos ciclos astronômicos que determinam a presença da luz solar nas células fotovoltaicas, coletores e concentradores, o que muitas vezes se torna difícil de prever para tempos distantes no futuro. Nas ocasiões em que a energia solar não está disponível, existem as soluções da termoacumulação e das energias eólica, geotérmica, dentre outras. A energia solar não deve ser vista como a única alternativa, mas sim como uma solução que deve ser aplicada em conjunto com outras ecologicamente sustentáveis e que se alternam quando as condições climáticas mudam.

A utilização de energias não renováveis e poluentes, além de esgotarem a disponibilidade de recursos do planeta, gera resíduos muitas vezes prejudiciais à vida humana e aos ecossistemas. Os combustíveis fósseis liberam grandes quantidades de gases de efeito estufa na atmosfera, além de componentes responsáveis por chuvas ácidas e doenças respiratórias. As usinas termonucleares são relativamente limpas, mas geram resíduos radioativos de difícil manejo. As usinas hidrelétricas são fontes de energia renovável, mas inundam vastas áreas, prejudicando as populações próximas e o equilíbrio ecológico da região. Nesse sentido, a utilização da energia solar apresenta quase nenhum dano ao meio ambiente. Seu impacto fica restrito à fabricação dos painéis fotovoltaicos, superfícies concentradoras e acessórios, todos com vida útil tipicamente superior aos 25 anos (ENERGIA..., 2019).

O Brasil possui um grande potencial ainda não explorado para a utilização da energia solar. Mesmo possuindo a terceira maior capacidade instalada de geração do mundo, está em trigésimo em relação à geração de energia solar per capita (INPE, 2017). Sua vasta área continental com alta incidência de radiação solar favorece ainda mais o potencial de crescimento dessas tecnologias. Para os seus 15 milhões de habitantes sem acesso à energia elétrica (HAAG, 2007), em sua maioria morando em locais isolados, a utilização da luz solar para a geração de energia, preparo de alimentos e aquecimento da água é talvez a única alternativa economicamente viável. O cenário não é diferente em muitos locais do mundo.

Registros históricos indicam que a civilização humana se utilizou da energia do Sol para suprir as mais diversas necessidades, desde o conforto térmico até o preparo de alimentos. Com o passar do tempo, o uso térmico da energia solar passou por uma série de avanços tecnológicos e a necessidade da geração de energia de forma eficiente, rentável e ambientalmente consciente mantém o fomento por novas tecnologias na área (INPE, 2017). Já Wenzel, 2015, cita fontes de calor de temperaturas relativamente baixas, entre 60°C e 200°C, como sendo consideradas fontes de energia do futuro, com grande potencial de crescimento. Isso se deve à sua disponibilidade e baixo impacto ambiental. Por último, quanto mais pontos de geração de energia, ou seja, mais descentralizada a matriz energética de uma civilização, menos propensa a falhas devido a desastres naturais ou erros humanos. Diminui-se o gasto com transporte de energia e aumenta-se a autossuficiência de cada região, daí a importância de soluções energéticas de pequena escala, eficientes e de baixo custo.



Este projeto de graduação se insere nesse contexto ao propor a construção de um concentrador solar parabólico para aplicação em dispositivos térmicos de geração de energia elétrica, de energia térmica ou de realização de trabalho mecânico. Assim, serão avaliadas as características construtivas que afetam o desempenho do sistema e sua viabilidade econômica. O concentrador solar em questão é uma alternativa para a utilização da energia solar em aplicações de baixo custo, tanto residenciais como comerciais, como substituto de fontes de energia poluentes. Um futuro em que soluções como essa são acessíveis e amplamente utilizadas se mostra melhor para a sobrevivência humana no planeta.

## 1.2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As pesquisas com fontes de energia renováveis têm aumentado significativamente nas últimas décadas, conforme se observa o crescente impacto da civilização humana no equilíbrio dos ecossistemas e a então necessidade de preservação dos recursos naturais do planeta Terra. O avanço das tecnologias é constante. Ainda assim, se prevê um crescimento significativo na pesquisa e desenvolvimento de fontes de geração de energias limpas em um futuro próximo.

O INPE publicou em 2017 sua segunda edição do Atlas Brasileiro de Energia Solar, trabalho este que utiliza os dados dos satélites da série GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite) e do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) em parceria com a Universidade Federal de São Paulo (UNIFESP), a Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), a Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) e o Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC), além de diversas outras instituições, para gerar um mapa dos últimos 17 anos da energia solar no Brasil, seu desenvolvimento, fatores ambientais que influenciam na sua disponibilidade e aproveitamento, distribuição espacial de recursos, conceitos teóricos, análises históricas e planejamentos futuros. O trabalho consiste em uma sólida contribuição para o entendimento do recurso solar no Brasil.

Ceballos (2000) e Haag (2007) trazem metodologias para a caracterização da radiação solar e da influência de fatores climáticos e estimativas de incidência de radiação para a geração de energia.

Filho (2008) faz uma revisão dos concentradores existentes no mundo e propõe a construção de um concentrador solar do tipo cilindro-parabólico com acompanhamento automático, de baixo custo para a produção de vapor superaquecido para diversas aplicações. Em seu trabalho são usadas lâminas de espelho de vidro fixadas em um molde de fibra de vidro com uma área total de 2,24 m<sup>2</sup> em um suporte de material reciclado. A temperatura máxima atingida no aquecimento da água foi de 197,7°C, com uma eficiência de 38% e um custo de fabricação de R\$450,00.

Castellanos (2012) faz uma revisão teórica sobre concentradores solares, com ênfase nos concentradores de discos parabólicos acoplados a motores Stirling. Neste trabalho são apontadas eficiências de até 31% e temperaturas de até 900°C para esses sistemas. Ainda assim, é verificada a escassez de estudos sobre os sistemas de discos parabólicos quando comparados aos sistemas cilindro parabólicos e de receptor central.

Moghimi (2015) discute as vantagens e desvantagens de cada tipo de concentrador solar. Também são feitas considerações importantes sobre absorvedores de calor por cavidade, como o fato de as distâncias entre os tubos que conduzem o fluido de trabalho e o revestimento do absorvedor de calor serem pouco estudados na literatura. É indicado que tubos de menores diâmetros, encostados um no outro e encostados nas paredes do absorvedor apresentam os melhores resultados. Esse resultado influenciou nas decisões do presente trabalho.

Xiao (2014) faz uma análise da convergência de raios solares em um absorvedor de cavidade se utilizando de técnicas estatísticas de Monte-Carlo e computacionais de Ray-Tracing e indica temperaturas superiores a 400 °C para concentradores de discos parabólicos. A absortância considerada é de 90%, com um revestimento externo ao absorvedor de lâ de vidro e uma abertura de cavidade coberta por vidro pyrex. O valor da eficiência encontrado para o absorvedor é de 99%.

Kaushika (1999) é o trabalho que mais se assemelha a este, onde é construído um concentrador solar de disco parabólico de baixo custo a partir de uma antena parabólica comercial. Os

custos encontrados para o projeto foram próximos aos US\$200,00 por metro quadrado de concentrador. São feitas considerações sobre a construção, efetividade do formato parabólico e do concentrador de calor. A maior temperatura de estagnação atingida foi de 469 °C. Também é feita uma avaliação das perdas de eficiência ao longo do tempo devido à deterioração dos materiais.

Duffie & Beckmann apresenta um trabalho que é referência na área de engenharia solar e processos térmicos. Em seu capítulo 4.5 são apresentadas as formas de absorção de energia eletromagnética a partir da emitância e absorptância dos materiais, trabalho que é continuado no capítulo 4.9, onde são apresentados mecanismos de absorção seletiva. A absorção seletiva garante que um absorvedor de calor consiga receber o máximo da energia eletromagnética em dada frequência ao mesmo tempo em que emite pouco em frequências menores, diminuindo as perdas de calor por radiação. Ainda no mesmo capítulo é indicado o papel crítico da durabilidade dessas superfícies em aplicações de absorção de calor, visto que esse tipo de equipamento deve operar por anos sob mínima manutenção e exposto às condições climáticas. No capítulo 4.10 é discutida a relação intrínseca entre absorptância e emitância e a necessidade de se priorizar uma alta absorptância em virtude de uma baixa emitância.

Li (2006), faz uma análise da reflectância de materiais, incluindo polímeros metalizados, que foram utilizados no presente trabalho.

Chen (2015) e Reynolds (2004) apresentam um trabalho na caracterização teórica e experimental de absorvedores de calor por cavidade para concentradores solares de espelhos parabólicos lineares. Este último se utiliza de tinta preta fosca para altas temperaturas como revestimento interno do absorvedor.

Souza (2014) demonstra o processo de seleção de uma bomba para um sistema hidráulico que é utilizado no presente trabalho.

Larsen (2012) mostra referências de coletores já construídos pelo mundo e relata a importância do projeto do absorvedor de calor para a eficiência total do sistema. Ele diz que 91% da perda de energia do absorvedor acontece pela abertura de sua cavidade, o que revela a importância de projetos que considerem cobrir a cavidade com materiais transparentes, como o vidro. Além disso é relatado um aumento na eficiência ao se utilizar duplas camadas de vidro na abertura da cavidade do absorvedor. Também é citado um aumento de até 10% na eficiência de absorvedores de calor com revestimentos internos seletivos, em comparação com revestimentos escuros de tintas comuns. Como isolante para o exterior do absorvedor é utilizado lã de rocha e a emissividade considerada para uma tinta preto fosca para altas temperaturas é de 88%. Por último, seus testes experimentais são realizados em um ambiente fechado, se utilizando de lâmpadas em um ambiente controlado.

Singh (2010) faz uma análise das absorptâncias e emitâncias de tintas comuns em comparação com tintas seletivas em absorvedores de calor. É utilizada lã de vidro como revestimento isolante para o mesmo e as eficiências variaram entre 16% até 60% para um absorvedor com revestimento de tinta comum e entre 26% e 71% para absorvedores com revestimento seletivo. A temperatura do fluido de trabalho, no caso a água, variou entre 60 e 95 °C.

Sobre a utilização de revestimentos isolantes no absorvedor de calor, Keerthan (2012) diz que as características de isolantes de lã de vidro são praticamente constantes até os 700 °C, não importando a espessura e a densidade. O mesmo vale para a lã de rocha até os 900 °C, o que a torna mais resistente ao calor. Essa proposição é corroborada por Seraji (2018), que afirma as propriedades melhores da lã de rocha sobre a lã de vidro. Kamiuto fornece bons dados experimentais sobre a condução de calor de fibras isolantes. Por último, Cemento (1957) cita a lã cerâmica, utilizada neste projeto, como superior a ambas lã de vidro e lã de rocha.

A partir da revisão bibliográfica, é possível observar que existem poucos estudos da utilização de discos parabólicos espelhados para o aquecimento de fluidos, ainda que essa solução seja a que atinge o maior fator de concentração solar e conseqüentemente pode atingir as maiores temperaturas quando comparada com outros sistemas termossolares de concentração. Assim, torna-se interessante o estudo de soluções acessíveis para a utilização dessa tecnologia no dia a dia.

### 1.3. OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é projetar, construir e testar um concentrador solar de disco parabólico. A este objetivo geral se associam ainda os seguintes objetivos específicos:

- Desenvolver um método de construção do concentrador solar e da sua montagem;
- Construir o concentrador solar parabólico projetado;
- Avaliar as características construtivas e o desempenho do sistema;
- Discutir a viabilidade econômica do projeto.

### 1.4. METODOLOGIA

A construção do concentrador solar será feita a partir de materiais de fácil aquisição no mercado. Uma antena parabólica será revestida com uma superfície refletiva. Foi projetado um absorvedor de calor percorrido por uma serpentina, instalado no foco do espelho parabólico. A serpentina será percorrida por água, que acumula calor. O projeto do absorvedor segue um método baseado nas equações propostas por Duffie e Beckman (2013), no intuito de maximizar a temperatura atingida pelo fluido na saída do absorvedor. O concentrador terá uma montagem alt-azimutal para que seja possível o acompanhamento do movimento aparente do Sol no céu. Serão avaliadas as temperaturas de entrada e saída do líquido na serpentina durante o funcionamento do dispositivo em diversas condições de operação.

Serão avaliados também a potência e a eficiência do concentrador em relação à incidência de radiação solar; a capacidade de troca de calor da água na serpentina, por meio do coeficiente global de transferência de calor do absorvedor de calor; a precisão do método de acompanhamento do movimento aparente do Sol no céu e a influência da variação da vazão na capacidade de troca de calor do projeto. Espera-se que o revestimento espelhado ofereça uma alta taxa de reflexão nas frequências da luz visível, infravermelho e ultravioleta próximos; que a superfície concentradora parabólica ofereça um alto fator de concentração e conseqüentemente um foco pequeno dentro do absorvedor de calor; que a serpentina e a água absorvam uma grande quantidade da irradiância solar em forma de calor; e que o sistema tenha um custo de aquisição e manutenção pequenos em relação aos benefícios proporcionados pelo mesmo. Finalmente, o calor armazenado no fluido poderá ser utilizado em diversos sistemas de geração de energia, trabalho, termoacumulação, dentre outros, parte essa que fica fora do escopo deste estudo.

### 1.5. ESTRUTURA

Este trabalho está dividido em cinco capítulos:

1 - Introdução: Apresenta objetivamente o tema em estudo, um compilado dos conhecimentos na área, os objetivos, a metodologia e a estrutura do trabalho. Os temas aqui abordados serão aprofundados nos capítulos seguintes.

2 - Revisão de Conceitos Gerais: Discute os aspectos teóricos da utilização da energia solar no mundo, suas características e implicações, bem como os sistemas termossolares de concentração, seus aspectos construtivos e aquilo que já existe na prática atualmente.

3 - Projeto e construção: Expõe as escolhas de projeto e o passo a passo para a construção do concentrador solar.

4 - Resultados: Apresenta a metodologia experimental e os resultados obtidos após a construção do concentrador, avalia as implicações das escolhas de projeto e possibilidades de melhorias no mesmo junto com os custos.

5 - Conclusão: Apresenta de forma objetiva os principais pontos do trabalho, acompanhados de uma avaliação dos objetivos atingidos, conclusões do autor e possíveis melhorias futuras.

## 2 REVISÃO DE CONCEITOS GERAIS

*Aqui são discutidos os aspectos teóricos da utilização da energia solar no mundo, suas características e implicações, bem como os sistemas termossolares de concentração, seus aspectos construtivos e aquilo que já existe na prática atualmente.*

### 2.1. ENERGIA SOLAR

A cada segundo, aproximadamente 4 milhões de toneladas de hidrogênio são transformadas em energia, na forma de radiação eletromagnética, através de processos termonucleares, no núcleo do Sol (PARKER, 1997; ENERGIA..., 2019). Os ciclos Próton-Próton e Carbono-Nitrogênio-Oxigênio são os principais responsáveis por essa geração de energia. Através da equação de equivalência massa-energia de Einstein:

$$E = m \cdot c^2 \quad \text{Eq. 2.1}$$

Obtemos a potência da estrela centro do nosso sistema planetário, de  $3,6 \cdot 10^{26}$  watts (INPE, 2017; PARKER, 1997). Apenas uma fração minúscula dessa energia chega até o planeta Terra, aproximadamente  $1,7 \cdot 10^{17}$  watts. Dessa energia, cerca de 39% (albedo terrestre) é refletida de volta para o espaço. Ainda assim, essa pequena fração da energia solar que atinge o solo do nosso planeta é 10.000 vezes superior ao consumo energético mundial atual (FILHO, 2008; CRESESEB, 2004).

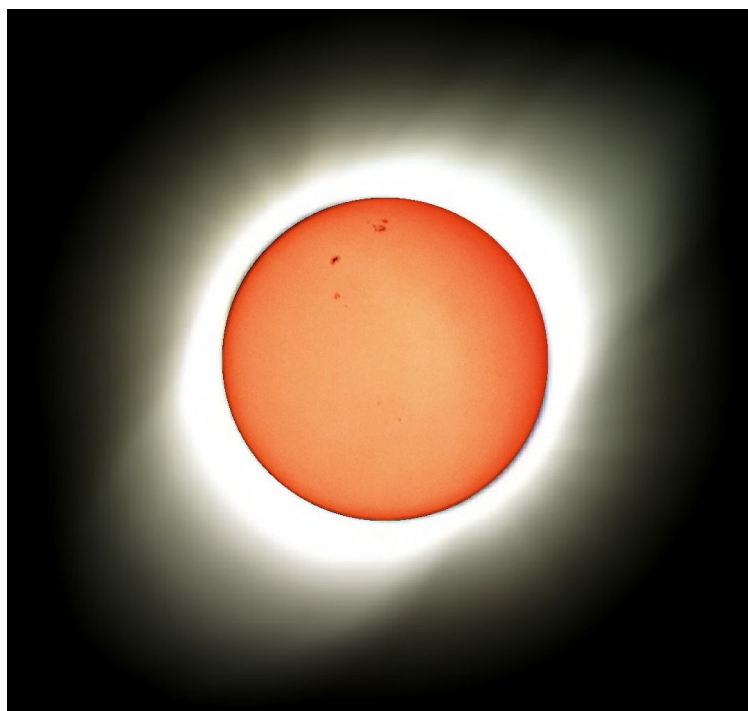


Figura 2.1 - Sol e sua atmosfera (AUTOR, 2020).

A figura 2.1 mostra uma imagem do Sol capturada com um filtro Thousand Oaks no dia 7 de julho de 2017 em Brasília, Brasil, junto com uma imagem de sua atmosfera (a coroa solar), capturada durante o eclipse solar total de 2 de julho de 2019 em Vicuña, Chile. Os processos de fusão nuclear ocorrem no núcleo do Sol, sua energia é irradiada de dentro para fora, passando pela zona de irradiação, atingindo a zona de convecção, fotosfera, cromosfera e, por último, coroa solar, de onde é ejetada para o espaço.

A radiação solar é responsável por praticamente todos os fenômenos energéticos da Terra. Os ventos, quedas d'água, biomassas, dentre outros, são causados originalmente pela energia solar que chega ao planeta. Fenômenos de fissão nuclear das rochas correspondem a um pequeno percentual da energia que não é diretamente proveniente do Sol. Isso não significa que todas essas fontes de energia são renováveis ou sustentáveis. A matriz energética mundial é em sua grande maioria baseada em combustíveis fósseis, como o petróleo, o gás natural e o carvão mineral. Esses materiais se formaram em processos muito específicos e que levariam milhares de anos para talvez se repetirem. Ainda, quando utilizados, esses produtos liberam grandes concentrações de carbono na atmosfera, gás este que desempenha um papel importante na regulação climática por sua contribuição no efeito estufa, responsável pela estabilidade da temperatura média da superfície terrestre (INPE, 2017). Nas últimas décadas, tem sido observada a intensificação do efeito estufa devido ao crescimento do percentual de dióxido de carbono na atmosfera, causado principalmente pelo consumo de combustíveis fósseis, pelo desflorestamento e pelas queimadas, dentre outras atividades que produzem emissão de gases de efeito estufa (IPCC, 2015). Assim, a matriz energética mundial está longe de ser limpa e renovável, oferecendo desafios para a sobrevivência humana em um planeta com mudanças climáticas aceleradas e com recursos naturais sendo explorados acima de suas capacidades de regeneração.

Nesse contexto, a utilização da energia solar seguramente representa a forma de geração energética que mais se adapta ao paradigma de desenvolvimento sustentável, pois usa uma fonte de energia abundante e limpa, além de causar pouco impacto ao meio ambiente (HAAG, 2007). A utilização da energia solar pode ser apresentada como uma transformação da energia eletromagnética emitida pelo Sol em outros tipos de energia com aplicações práticas, como a energia elétrica, a energia térmica para o aquecimento de água e outros fluidos ou a energia cinética para o funcionamento de motores.

INPE, (2017, p. 119) propõe uma nomenclatura baseada na publicação de Duffie e Beckman (2013) para a irradiância solar da seguinte forma:

- Irradiância extraterrestre ( $G_0$ ): é a taxa de energia incidente por unidade de área em um plano horizontal imaginário situado no topo da atmosfera. É também conhecido como irradiância no topo da atmosfera ou GTOA.
- Irradiância direta normal ( $G_n$ ): também conhecida como DNI, é a taxa de energia por unidade de área proveniente diretamente do Sol que incide perpendicularmente à superfície.
- Irradiância difusa horizontal ( $G_{dif}$ ): é a taxa de energia incidente sobre uma superfície horizontal por unidade de área, decorrente do espalhamento do feixe solar direto pelos constituintes atmosféricos (moléculas, material particulado, nuvens, etc.).
- Irradiância direta horizontal ( $G_{dir}$ ): é a taxa de energia por unidade de área do feixe solar direto numa superfície horizontal. Pode ser determinada como o produto entre a irradiância direta normal (DNI) e o cosseno do ângulo zenital solar.
- Irradiância global horizontal ( $G$ ): é a taxa de energia total por unidade de área incidente numa superfície horizontal. A irradiância global é dada pela soma  $G = G_{dif} + G_{dir}$  ou  $G = G_{dif} + G_n \cdot \cos(\theta_z)$  onde  $\theta_z$  é o ângulo zenital.
- Irradiância no plano inclinado ( $G_i$ ): é a taxa de energia total por unidade de área incidente sobre um plano inclinado na latitude do local em relação à superfície da Terra.

A integral da irradiância no tempo é definida como irradiação solar ( $Wh/m^2$ ) ou energia radiante incidente acumulada em um intervalo de tempo. No caso da integral ao longo de um dia, a simbologia adotada é  $H_0$ ,  $H_n$ ,  $H_{dif}$ ,  $H_{dir}$ ,  $H$  e  $H_i$ , respectivamente.

Para sistemas de concentração solar, a componente de irradiância direta normal (DNI) é a que exerce a maior influência, pois é a única componente passível de concentração. Quando comparada com a irradiância extraterrestre, verifica-se que mais de 50% da luz solar consegue atravessar a atmosfera, como demonstrado na figura 2.2. A área sombreada representa a intensidade de radiação que atinge a superfície da Terra.

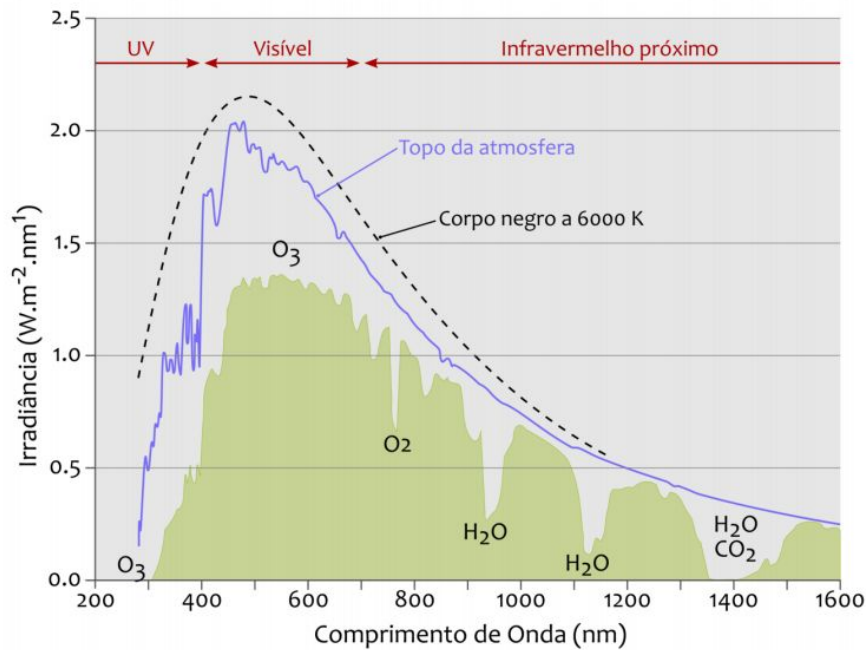


Figura 2.2 - Irradiância no topo da atmosfera em função do espectro eletromagnético da radiação solar, (INPE, 2017).

Os outros 50% da luz que atingem o topo da atmosfera são refletidos, absorvidos ou espalhados pelos seus componentes. A atmosfera terrestre é composta principalmente por uma mistura de gases e representa apenas 0,0001% da massa total da Terra. Esses gases são principalmente o nitrogênio diatômico (78%) e o oxigênio diatômico (21%). Os demais componentes são o argônio, dióxido de carbono, hélio, ozônio, hidrogênio, criptônio, metano, xenônio e radônio, em quantidades muito menores. A água também encontra-se presente nos 3 estados da matéria e contribui significativamente na incidência da irradiação direta normal solar.

Geralmente a composição atmosférica é analisada considerando-se três grupos distintos de componentes: ar seco, vapor d'água e aerossóis. Cada um desses grupos atenua a radiação solar de forma distinta e em comprimentos de onda característicos (HAAG, 2007). O espectro solar é relativamente pouco intenso até um comprimento de onda  $\lambda = 300\text{nm}$ . O espectro do ultravioleta (300 - 400nm) possui intensa absorção pelo ozônio e representa cerca de 6,6% da energia solar que chega à superfície. Na faixa do visível (400 - 700nm), a dispersão de Rayleigh é predominante, com o ozônio responsável por alguma absorção em bandas específicas (bandas de Chappuis). 44,7% da energia solar que chega ao solo está na frequência da luz visível. Por último, no infravermelho próximo (700 - 2800nm) existem bandas de absorção de vapor d'água e dióxido de carbono. 48,7% da energia solar que chega ao solo está na frequência do infravermelho próximo. A integral da irradiância em função do comprimento de onda nos fornece a intensidade da radiação solar, que no topo da atmosfera é dada pela constante solar, esta sendo igual a  $1367\text{ W/m}^2$  (CEBALLOS, 2000).

No Brasil, a matriz elétrica é altamente dependente das hidroelétricas e das termoelétricas. Houve um rápido crescimento da utilização das turbinas eólicas nas últimas duas décadas, o que é ótimo para a criação de uma matriz limpa e renovável, mas a energia solar ainda está longe de ser utilizada em todo o seu potencial.

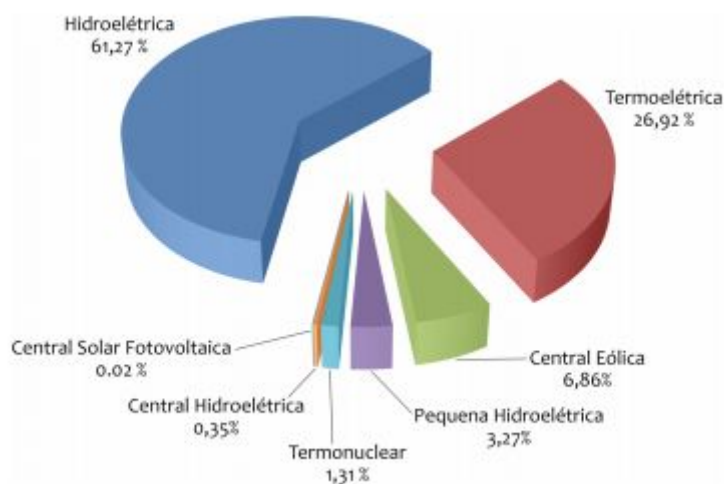


Figura 2.3 - Matriz elétrica brasileira em maio de 2017, (INPE, 2017).

Os locais que possuem uma disponibilidade de irradiação direta normal solar anual acima de 2000 kWh/m<sup>2</sup>, além de uma baixa nebulosidade, são os que geralmente apresentam potencial para a geração heliotérmica em larga escala. No Brasil essas regiões concentram-se em sua maioria no semiárido nordestino. Isso não impossibilita soluções em menor escala para as demais regiões. Mesmo as regiões com menores índices de insolação apresentam grande potencial de aproveitamento energético. O potencial de pequenos aproveitamentos energéticos a partir da energia solar no Brasil é pouco explorado. A figura 2.4 mostra um mapa da irradiação direta normal anual para o Brasil. Brasília se encontra em uma região privilegiada para a produção de energia a partir do Sol.

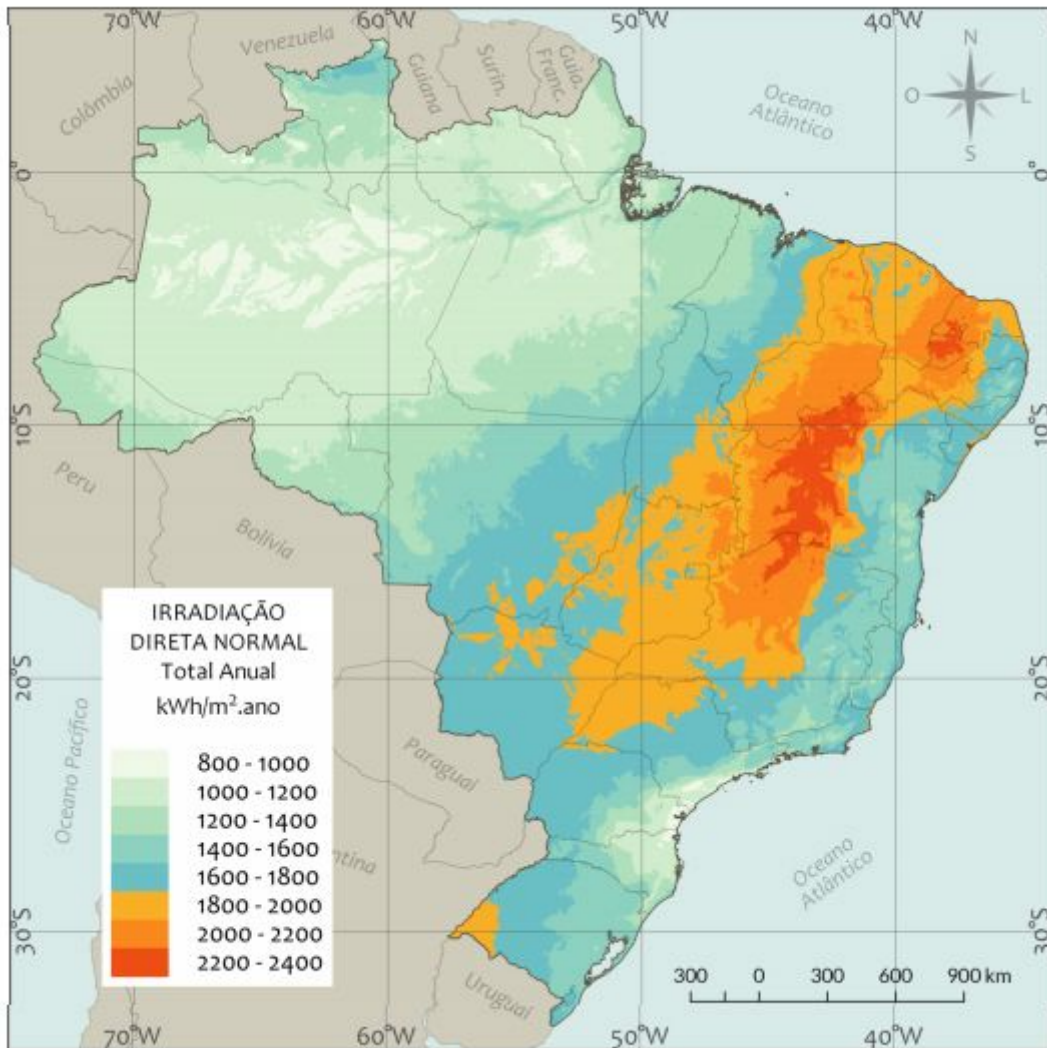


Figura 2.4 - Mapa do total anual de irradiação solar direta normal com destaque para regiões com maior potencial de aproveitamento da energia solar concentrada, (INPE, 2017).

Apesar de possuir um ciclo de máximos e mínimos de aproximadamente 11 anos, a variação da radiação solar ao longo desses ciclos é mínima e não influencia na geração de energia a partir do Sol na Terra. Dentre os fatores que contribuem para a disponibilidade de radiação solar, além das condições atmosféricas, a latitude desempenha um papel crucial. A inclinação de  $23,5^\circ$  do eixo de rotação da Terra faz com que o tempo de insolação em diferentes latitudes varie ao longo do ano. As regiões mais próximas ao equador são as que possuem os horários de dia e noite mais equilibrados, ou seja, não se distanciam muito de 12h cada, durante todo o ano. Nessas regiões, o Sol passa diariamente perto do ponto mais alto do céu, o zênite. O Sol atinge o zênite apenas nas regiões entre os trópicos de Capricórnio e de Câncer. Todas as regiões mais ao sul ou mais ao norte, respectivamente, nunca irão receber a luz do Sol de forma perpendicular ao solo. Isso, somado com as variações do tempo de insolação, são os fatores responsáveis pela intensificação das estações nas regiões com latitude mais elevadas. Quanto maior a sua latitude (não importando se ao sul ou ao norte), maiores os períodos de dia no verão e de noite no inverno. Isso torna a produção de energia a partir da luz solar uma opção secundária nessas regiões, já que não apresenta consistência ao longo do ano. Esses fatores se somam, junto com a baixa umidade atmosférica, para proporcionar ao nordeste os maiores índices de insolação do Brasil. A figura 2.5 ilustra a variação dos períodos de insolação (fotoperíodo) ao longo do ano para as diferentes latitudes encontradas no Brasil.



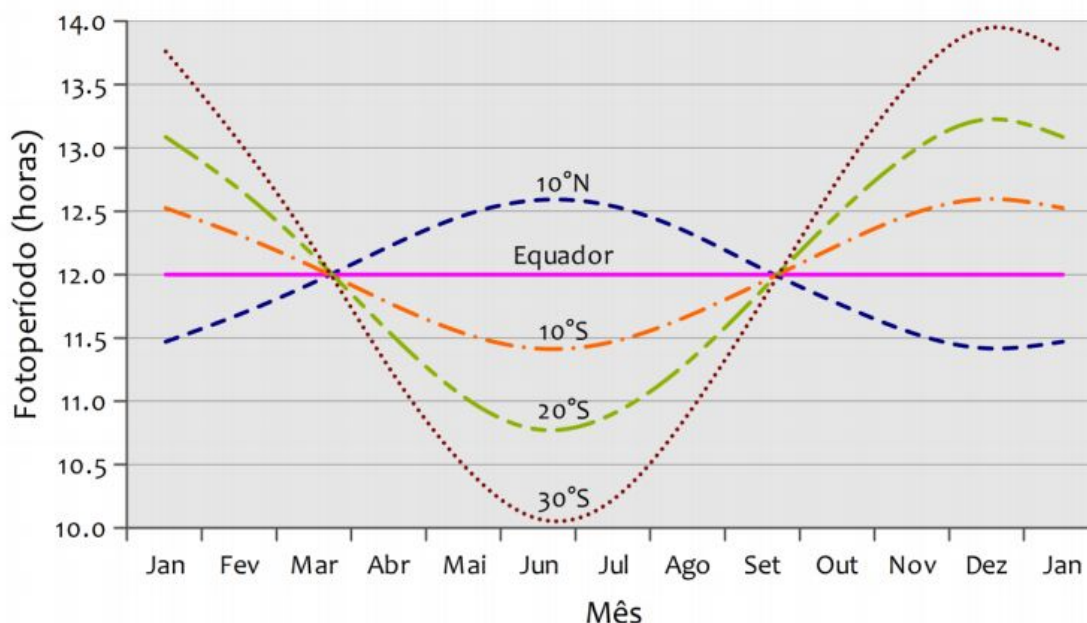


Figura 2.5 - Fotoperíodo ao longo do ano para diferentes latitudes, (INPE, 2017).

Na figura 2.5, em que são representados os fotoperíodos ao longo do ano para as diferentes latitudes brasileiras, os pontos em que todas as linhas se encontram, nos meses de março e setembro, são os equinócios e os pontos em que as linhas mais se separam, em junho e dezembro, são os solstícios. Durante os equinócios o dia e a noite possuem 12 horas de duração em todos os lugares do mundo. Durante os solstícios são atingidas as maiores diferenças entre a duração do dia e da noite para as diferentes latitudes.

Dentre os vários processos de aproveitamento da energia solar, os mais utilizados no Brasil atualmente são os de aquecimento de água e os de geração fotovoltaica. A predominância do uso do chuveiro elétrico no Brasil faz com que sua substituição por aquecedores solares implique diretamente na economia de energia elétrica, cujo custo é elevado e variável em função da disponibilidade de recursos hídricos. O consumo residencial e comercial representa 68% da utilização da energia elétrica no Brasil, entre 2018 e 2020. Já a indústria representa cerca de 10% (ANEEL, 2020). Os coletores solares para o aquecimento de água, devido às condições climáticas, são muito utilizados nas regiões sul e sudeste em aplicações residenciais e comerciais (hotéis, restaurantes, clubes, hospitais, etc.) e oferecem grandes economias com energia elétrica, já que o aquecimento da água, devido às suas características termodinâmicas, demanda grandes quantidades energia e geralmente corresponde a uma grande parte do consumo desses estabelecimentos. Nas regiões norte e nordeste as placas fotovoltaicas são utilizadas por comunidades isoladas da rede de energia elétrica. Esses painéis podem atingir mais de 20% de eficiência. Soluções com o aproveitamento da energia solar para a cocção de alimentos e dessalinização da água também se mostram importantes para essas comunidades. O aprimoramento dessas tecnologias é fundamental para a expansão futura dos sistemas de aproveitamento da energia solar, tanto nos quesitos do barateamento e aumento da eficiência dos dispositivos, quanto nos métodos de produção de informação meteorológica específicos para o planejamento e o controle de sistemas de energia, para cada região do território mundial.

O aproveitamento da energia solar aplicado em sistemas que requerem maiores temperaturas ocorre através de concentradores solares, cuja finalidade é captar a radiação eletromagnética solar incidente em uma área relativamente grande e focá-la numa área menor, de modo que a temperatura desta última aumente consideravelmente. O formato parabólico é o ideal para essas aplicações pois faz com que os raios solares que incidem sobre as superfícies refletoras (espelhos) sejam refletidos em direção a uma superfície muito menor, onde se encontra o material a ser aquecido. Os sistemas de alta

concentração parabólicos atingem temperaturas bastante elevadas, com eficiências que variam de 14% a 22%. Para esses sistemas é fundamental a existência de um sistema de orientação, promovendo custos adicionais, visto que é necessária a incidência da irradiação direta normal para o aproveitamento da energia solar. Esses custos adicionais (que não existem para os sistemas que utilizam placas fotovoltaicas) são minimizados em sistemas de grande porte (ENERGIA..., 2019).

## 2.2 REVISÃO SOBRE COLETORES SOLARES

Para que não haja ambiguidade, neste projeto serão tratados como coletor solar todos os tipos de equipamentos que têm como objetivo principal a coleta da luz solar para aproveitamento energético. Nessa categoria estão incluídos os coletores que não concentram a luz solar, como os coletores solares planos para aquecimento de água de consumo residencial, assim como os concentradores que focam a luz solar através de lentes e/ou espelhos. Segundo INPE (2017), com relação às tecnologias mais promissoras para a absorção da energia solar, existem dois grupos principais de concentradores solares: os de concentração linear e os de concentração bidimensional:

Os concentradores lineares aumentam a densidade de fluxo da irradiância sobre uma linha onde localiza-se o dispositivo absorvedor de energia solar. As principais tecnologias de concentradores lineares são os concentradores parabólicos (parabolic troughs) e os concentradores Fresnel (linear Fresnel collectors). A tecnologia de concentradores parabólicos é atualmente a mais difundida em usinas para geração termelétrica a partir da energia solar. Sistemas bidimensionais concentram os raios solares sobre um ponto aumentando a densidade de fluxo de irradiância e permitindo temperaturas de trabalho mais altas e, conseqüentemente, melhor eficiência de conversão do ciclo termodinâmico para geração de potência. Discos concentradores (parabólicos ou cilíndricos) e torres centrais são as principais tecnologias usadas para esse tipo de aplicação.

O mais popular dos equipamentos de aproveitamento da luz solar em aplicações de pequeno porte é o coletor solar plano, que converte energia solar em energia térmica. O sistema fornece água quente a temperaturas variáveis entre 40 e 60°C, atendendo basicamente demandas de uso residencial, em cozinhas e banheiros. Do ponto de vista da disponibilidade de recursos solares, o Brasil reúne as condições necessárias para a implantação desses sistemas, ou seja, regiões com elevado nível da componente direta da radiação, fator essencial para definir a viabilidade técnica desses sistemas (FRAIDENRAICH, 2002). A capacidade total mundial instalada de aquecedores solares, em 2016, ultrapassou os 456 GWth (gigawatt térmico), correspondendo a aproximadamente 652 milhões de metros quadrados de coletores instalados. Em 2017 o Brasil passou a ter 1,1 GW instalados, número que está longe do potencial máximo do país (INPE, 2017).

Na categoria dos concentradores lineares já existem instalações em operação comercial de geração de energia a partir do Sol. Com temperaturas superiores aos 300°C no foco (ECHAZÚ, 2000), destinam-se a aplicações que requerem temperaturas mais elevadas, como a secagem de grãos e a produção de vapor superaquecido. Entre meados e final dos anos 1980, foram instalados nove sistemas parabólicos no sul da Califórnia, EUA, com potências que variam entre 14 MW e 80 MW, totalizando 354 MW de potência instalada. Tratam-se de sistemas híbridos, os quais operam com auxílio de gás natural, de modo a atender a demanda em horários de baixa incidência solar. Os custos da eletricidade gerada têm variado entre US\$ 90 e US\$ 280 por megaWatt-hora.

Os sistemas de torres concentradoras têm se mostrado promissores. Essa tecnologia já comprovou-se comercialmente viável em instalações como a usina de 19,9 MW Gemasolar na Espanha (figura 2.6), a primeira a produzir energia elétrica por 24 horas ininterruptas, ao armazenar parte da energia coletada durante o dia em forma de um reservatório térmico de nitratos de sódio e de potássio líquidos. A maior usina do tipo atualmente é a Ivanpah, nos EUA, com capacidade instalada de 392 MW.



Figura 2.6 - Usina heliotérmica com torre central Gemasolar, Espanha (Burgaleta et al., 2011 apud INPE, 2017).

Por último, nos sistemas de discos parabólicos a relação de concentração é maior. Com o vapor de água, ou qualquer outro fluido aquecido, é possível a transformação da energia térmica em eletricidade, como por exemplo em uma turbina a vapor ou em um ciclo de Rankine orgânico acoplado a um gerador elétrico. Fatores de concentração podem atingir a ordem de magnitude de  $10^5$  (DUFFIE & BECKMAN, 2013). Quanto maior o fator de concentração desejado, melhor a qualidade ótica do sistema e por consequência maior o seu custo. Maiores fatores de concentração resultam em temperaturas mais elevadas e por consequência maiores eficiências no aproveitamento da energia térmica. Concentradores solares com óticas extremamente precisas e fatores de concentração muito altos são também chamados de fornaças solares. Outra característica dos concentradores solares é a necessidade de rastreamento do movimento do Sol, para que o foco do sistema permaneça sempre no absorvedor.

A combinação dos altos custos dos componentes óticos e da necessidade de manutenção dos sistemas de rastreamento mecânico fizeram com que esses sistemas fossem pouco utilizados em comparação com outros sistemas de concentração da luz solar.

Filho (2008, p. 6) faz uma uma revisão das tecnologias aplicadas ao redor do mundo. A Califórnia, EUA, tem atualmente uma instalação capaz de gerar uma grande quantidade de energia elétrica a partir da energia solar. A planta SEGS (Solar Energy Generating System), na Califórnia, demonstrada na figura 2.7, é composta por concentradores do tipo cilindro parabólicos, com mais de 2,5 milhões de metros quadrados de área de coleta e possui capacidade de 354 MW.



Figura 2.7 - Planta SEGS de 354 MW na Califórnia (WIKIPEDIA, 2020).

O sistema Vanguard 1 é ilustrado na figura 2.8. Construídos pela empresa Advanco no Rancho Mirage, no sul da Califórnia, são formados por configurações no concentrador de vidro/metal com 336 espelhos na superfície do concentrador, apresentando um elevado fator de concentração de 2800 soles no receptor de 20 cm de diâmetro de abertura, com uma potência total de 25 KW. Apesar de problemas com o ruído dos motores de acompanhamento e perda de gás hidrogênio utilizado no absorvedor de calor, o sistema alcançou 29,4% de eficiência e foi operado por cerca de 2.000 horas durante 18 meses.



Figura 2.8 - Sistema Advanco Vanguard (CIEMAT, 2009 apud CASTELLANOS, 2012).

A figura 2.9 ilustra o sistema SBP-1984, “Schlaich, Bergermann and Partner”, que foi construído em 1984, acoplado a dois grupos de concentradores com motores Stirling de 50 kW cada, na Arábia Saudita, pela SBP de Stuttgart. Os concentradores têm o diâmetro de 17 metros, com a tecnologia de membrana esticada de aço inoxidável e espessura de 0,5 mm. Este sistema tem uma estrutura que permite altas concentrações de radiação solar na cavidade do receptor. Para alcançar alta durabilidade na refletividade é sobreposta uma membrana de vidro fino. Os receptores absorvem a radiação solar concentrada e aquecem o gás hélio do motor Stirling, que através de um gerador é

transformada em energia elétrica. Tiveram problemas devido às partículas de poeira, afetando a superfície do vidro dos concentradores na forma de arranhões, alterando o fator de reflexão.

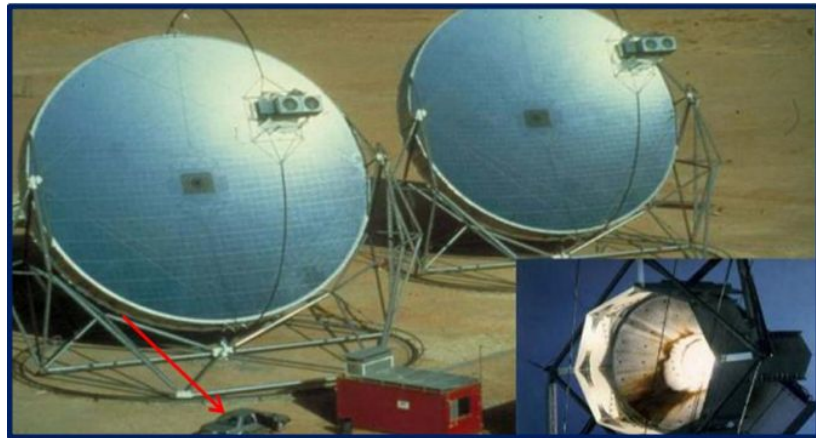


Figura 2.9 - Sistema SBP-1984 de discos/stirling de 50 kW na Arábia Saudita (Geyer, 2007 apud CASTELLANOS, 2012).



# 3 PROJETO E CONSTRUÇÃO

*Aqui são expostas as escolhas de projeto e o passo a passo para a construção do concentrador solar.*

## 3.1. SUPERFÍCIE CONCENTRADORA PARABÓLICA

No projeto de um concentrador solar é necessária a consideração do caminho percorrido pela radiação eletromagnética do Sol e suas transformações até a obtenção da energia no seu formato final. Faz parte do projeto do sistema a tentativa de se obter a maior eficiência energética através da redução das perdas óticas e térmicas.

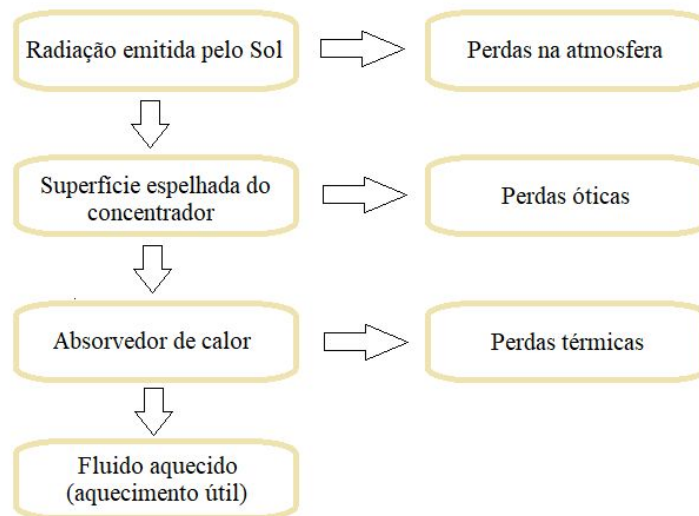


Figura 3.1 - Perdas de energia no aproveitamento da luz solar.

Ao sair do Sol até ser absorvida em forma de calor pelo fluido de trabalho do concentrador solar, a luz irá interagir com a atmosfera terrestre, a superfície refletiva do concentrador solar e a serpentina dentro do absorvedor de calor. Ao interagir com a matéria essa radiação pode ser refletida, absorvida e/ou transmitida, em função do seu comprimento de onda. Assim, o projeto do concentrador solar é dividido em quatro componentes principais, sendo estes:

- 1. Superfície concentradora parabólica;
- 2. Superfície refletiva;
- 3. Absorvedor de calor;
- 4. Base de sustentação do concentrador.

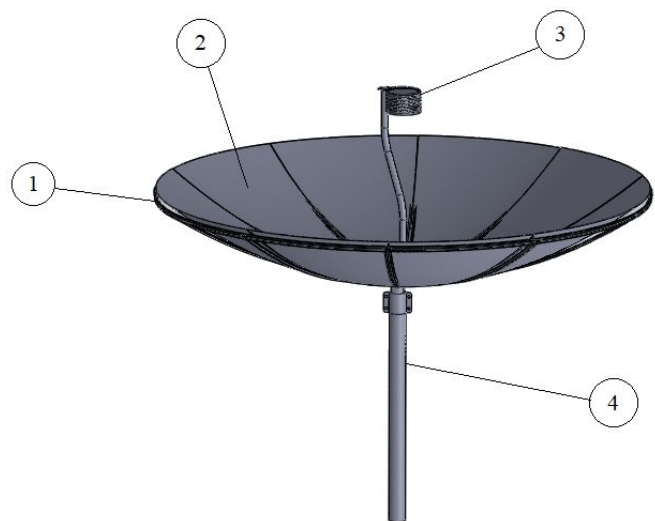


Figura 3.2 - CAD produzido para a visualização dos principais componentes do projeto.

O concentrador parabólico é o componente responsável pelo formato da superfície espelhada que irá refletir a radiação solar em direção ao foco. Foi considerada a possibilidade de se projetar e fabricar uma superfície parabólica. Existem alternativas que aproveitam a curvatura de superfícies líquidas rotativas, a curvatura de câmaras pressurizadas ou até mesmo a curvatura de peças feitas em marcenaria com dimensões precisas (FILHO, 2008). No lugar disso, a alta disponibilidade de antenas parabólicas prontas e de baixo custo fez com que se considerasse mais eficiente a seleção de uma antena disponível no mercado. É importante perceber que as antenas parabólicas comerciais são projetadas para concentrar ondas eletromagnéticas em um foco, dessa forma não importando se essas ondas serão na frequência de rádio ou de luz visível. O formato parabólico é importante pois é o único que garante a concentração das ondas eletromagnéticas em um único ponto. A utilização de outros formatos, como o esférico, geram aberrações que acarretam em perdas de energia. Considerando uma antena parabólica feita para refletir as ondas de rádio para um foco, ela servirá também para frequências visíveis do espectro eletromagnético. Para essa função foi selecionada a antena parabólica da marca Century de 1,90 m de diâmetro:



Figura 3.3 - Antena Parabólica de TV de 1,90m de diâmetro e 10 Telas - MD190 Century (CENTURY, 2020).

O diâmetro de 1,90 metros garante uma área de coleta de 2,83 m<sup>2</sup>. Sua construção é em liga de alumínio 6063, com telas de alumínio 1200 H22. Com o preço de R\$269,00 essa foi considerada a melhor opção para o projeto. Sua distância focal é de 0,65 m e sua montagem foi feita de acordo com o manual da antena MD190 Century, disponível como Anexo I deste trabalho. A última etapa, em que é adicionado o filtro LNBF não faz parte do projeto, pois tem como objetivo a utilização da antena para captar sinal de TV via satélite.

A durabilidade dos materiais utilizados na superfície concentradora parabólica é garantida pois, de modo geral, os metais resistem bem às influências atmosféricas já que não possuem porosidade. A maior preocupação para esse componente a longo prazo será a umidade do ar contendo oxigênio dissolvido, que atua para a ocorrência de corrosão (SOUZA, 2017). O alumínio 6063 possui maiores quantidades de magnésio e silício em sua composição, com uma alta resistência à corrosão e média resistência mecânica. O alumínio 1200 H22 possui alta resistência à corrosão devido ao teor de alumínio de 99% em sua composição. Por ser deformado plasticamente a frio e recozido, possui baixa dureza e alta maleabilidade, o que possibilita a correção de uma eventual deformação que afete o desempenho ótico. Essa possível correção é discutida no capítulo 5.

### 3.2. SUPERFÍCIE REFLETIVA

Quase 95% da radiação eletromagnética emitida pelo Sol está nas frequências da luz visível e do infravermelho próximo. Isso faz com que espelhos comuns se tornem excelentes refletores de energia solar. Para a composição da superfície refletiva do concentrador solar foi considerada inicialmente a utilização de placas de acrílico com revestimento espelhado devido, dentre outros fatores, à sua disponibilidade no mercado, maleabilidade para se adequar ao formato parabólico do concentrador, facilidade de corte nos formatos desejados e alta refletividade nas frequências de radiação visível, infravermelha e ultravioleta próximas. Os espelhos acrílicos são comumente utilizados para projetos de concentradores solares parabólicos lineares e segundo Bethea (1981), podem ultrapassar os 84% de refletividade. Posteriormente essa opção foi descartada, substituída pela opção de uma superfície em polímero autoadesivo espelhado.

O polímero autoadesivo espelhado foi escolhido para o projeto por apresentar um custo oito vezes menor que as placas de acrílico. A folha com 10,0 x 0,6 metros, suficiente para o revestimento de toda a superfície do concentrador parabólico, custou R\$172,14.



Figura 3.4 - Folhas de polímero espelhado de dimensões 10,0 x 0,6 m (BANGGOOD, 2020).

O filme polimérico refletivo não pode ser fixado diretamente na tela de alumínio da superfície concentradora, pois isso acarretaria em graves deformações. Por isso, o projeto da superfície refletiva inclui uma camada intermediária entre o polímero espelhado e as telas do concentrador parabólico. O material escolhido para essa camada foi o acetato-vinilo de etileno (e.v.a.) com 2 mm de espessura, por sua maleabilidade, dilatação térmica não muito alta, acessibilidade e capacidade de se fixar bem com o polímero autoadesivo e com as telas de alumínio do concentrador parabólico. O custo total dessa camada foi de R\$94,99. Por ser um bom isolante térmico, a camada de e.v.a. também contribui para diminuir a dilatação térmica tanto da superfície concentradora parabólica, quanto da superfície refletiva.

Tanto o polímero espelhado, quanto o e.v.a. foram recortados utilizando as pétalas da superfície concentradora parabólica como molde. O polímero foi fixado com seu lado autoadesivo no e.v.a. limpo. Por último, o e.v.a. foi fixado na tela de alumínio da superfície concentradora parabólica com cola de silicone nas laterais e cola branca em toda a sua superfície, adicionando um custo de R\$48,00 ao projeto. A figura 3.5 mostra de forma esquemática a montagem do polímero espelhado (1) sobre o e.v.a. (2), que foi colado sobre a tela de alumínio (3) da superfície concentradora parabólica, sempre com o cuidado de não adicionar dobras à superfície refletiva.



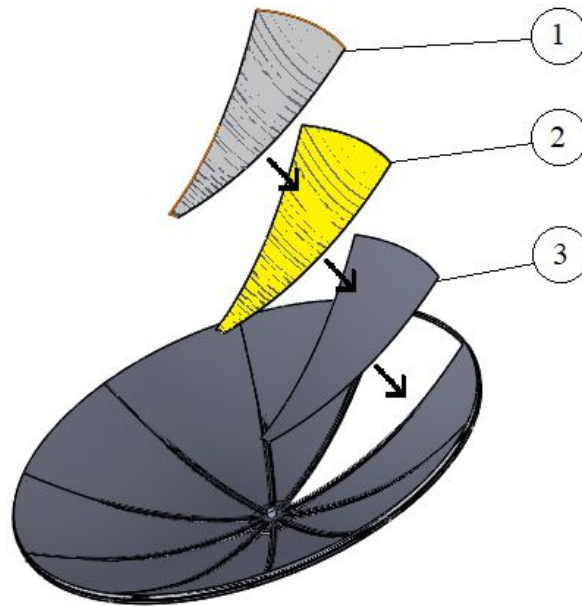


Figura 3.5 - Disposição das superfícies de polímero espelhado (1) e e.v.a. (2) sobre as telas de alumínio (3) do concentrador parabólico.

Para determinar a durabilidade da superfície espelhada, Souza (2017) faz considerações sobre as propriedades físicas e químicas dos polímeros. A baixa energia de ligação e o baixo ponto de fusão, tornam os polímeros, dentre os materiais usados na construção, aqueles com menor durabilidade, pois suas interações com as variáveis atmosféricas são mais intensas.

Além da dilatação, a estabilidade reduzida das suas ligações químicas faz com que os polímeros se alterem estruturalmente quando expostos a temperaturas elevadas. Assim, as variáveis atmosféricas: radiação solar e temperatura do ar são os agentes mais severos na redução da vida útil dos elementos poliméricos. Diferentemente dos metais, a degradação de materiais poliméricos expostos ao ambiente tende a ocorrer devido à ação combinada da radiação ultravioleta, do calor e do oxigênio atmosférico (natureza físico-química). Os polímeros podem sofrer degradação por meio de rompimento das ligações moleculares, causando diminuição do seu peso molecular. Devido à forte relação entre o peso molecular e as propriedades dos materiais poliméricos, as rupturas das ligações da cadeia molecular reduzem a resistência mecânica e química dos polímeros.

### 3.3. ABSORVEDOR DE CALOR

O absorvedor de calor é um componente fundamental para o funcionamento de um concentrador solar. Sua função é a de absorver o calor que chega na forma de radiação eletromagnética e transmiti-lo para o fluido de trabalho, no caso a água. Os absorvedores comumente utilizados em aplicações de concentração de luz solar são os de cavidade, onde a radiação entra por uma abertura localizada no foco do parabolóide e sofre uma série de reflexões no interior do absorvedor, trocando calor com um fluido. O projeto do absorvedor de calor possui grande influência na eficiência final do concentrador solar. A figura 3.6 mostra uma vista em corte de um modelo padrão de absorvedor de calor de cavidade.

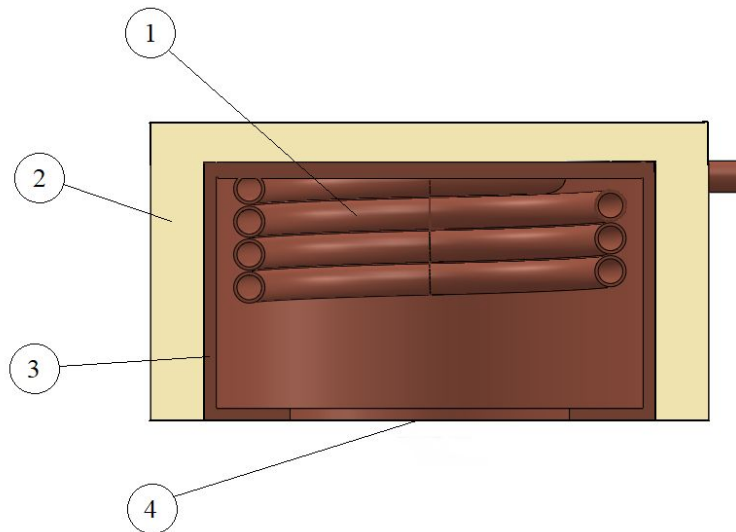


Figura 3.6 - Componentes do absorvedor de calor. (1) Serpentina, (2) revestimento isolante, (3) carcaça do absorvedor e (4) cavidade do absorvedor.

O parâmetro utilizado para avaliar a qualidade do absorvedor durante a etapa de projeto foi sua absorptância efetiva. A absorptância efetiva é uma grandeza adimensional que indica a fração de luz que é absorvida em relação à quantidade de luz que entra no absorvedor. A absorptância efetiva de uma cavidade sem tampa em sua abertura é uma função da absorptância das superfícies internas e da razão da área de superfície interna com a área da abertura. Para a máxima eficiência do absorvedor de calor deve-se maximizar a área interna do mesmo, minimizando o tamanho da abertura. Ao mesmo tempo, um absorvedor muito grande gera uma sombra significativa no espelho concentrador e uma maior perda térmica por condução, convecção e radiação, reduzindo a quantidade de calor absorvido e consequentemente a eficiência do conjunto. Daí a necessidade de um projeto otimizado, que considere todas as variáveis no intuito de maximizar a quantidade de luz coletada e a quantidade de calor absorvido e transferido para o fluido no interior da serpentina. A solução ótima é aquela que gera o maior aumento de temperatura no fluido que circula dentro do absorvedor de calor.

Duffie e Beckman (2013, p. 197) indica a equação 3.1 para o cálculo da absorptância efetiva de um absorvedor de calor por cavidade:

$$\alpha_{eff} = \frac{\alpha_i}{\alpha_i + (1 - \alpha_i) A_a/A_i} \quad \text{Eq. 3.1}$$

Onde  $\alpha_{eff}$  é a absorptância efetiva do absorvedor,  $\alpha_i$  é a absorptância das superfícies internas do absorvedor,  $A_a$  é a área da abertura da cavidade e  $A_i$  é a área das superfícies internas.

A determinação de  $\alpha_i$  se dá pela escolha do revestimento interno ao absorvedor. O revestimento escolhido foi a pintura com a tinta spray preto fosco para altas temperaturas da marca Chemicolor. Essa tinta possui uma capacidade de absorção de 90,0% da luz em todo o espectro visível, além de grande absorção nos espectros infravermelho e ultravioleta, assim,  $\alpha_i = 0,9$  (XIAO, 2014). O preço da tinta foi de R\$64,00 para 3 recipientes de 350 ml.



Figura 3.7 - Tinta spray preto fosco para altas temperaturas Chemicolor (LIVRE, 2020).

Para a determinação de  $A_a$  torna-se necessário o conhecimento do tamanho da imagem do Sol gerado no foco do concentrador parabólico.  $A_a$  deve ser grande o suficiente para que possibilite a entrada de toda luz que é concentrada no foco do concentrador parabólico. Para a determinação do tamanho mínimo da abertura da cavidade, utiliza-se a equação para o aumento linear transversal em ótica:

$$\frac{i}{o} = \frac{p'}{p} \quad \text{Eq. 3.2}$$

Onde  $i$  é o tamanho da imagem,  $o$  o tamanho do objeto,  $p'$  a distância da imagem e  $p$  a distância do objeto. Resolvendo a equação para  $o = 1.391.000.000$  (diâmetro do Sol em metros),  $p' = 0,65$  (distância focal do concentrador em metros) e  $p = 149.600.000.000$  (distância média entre Sol e Terra, em metros), obtemos que o tamanho da imagem do Sol no foco é de 6,04 mm de diâmetro, para uma ótica perfeita. Isso significa um fator de concentração próximo de 98.830. Fatores de concentração na literatura apresentam valores entre 600 e 3000 para concentradores solares de disco (CASTELLANOS, 2012). Tais fatores de concentração aumentam significativamente o tamanho esperado para a imagem do Sol no foco do concentrador. Para a situação mais desfavorável (fator de concentração de 600), a estimativa do diâmetro da imagem é multiplicada de acordo com a equação 3.3,

$$i' = i \cdot \sqrt{\frac{F_{ct}}{F_{cr}}} \quad \text{Eq. 3.3}$$

onde  $i'$  é o novo diâmetro da imagem,  $F_{ct}$  ( $= 98.830$ ) é o fator de concentração teórico e  $F_{cr}$  ( $= 600$ ) é o fator de concentração real. Nessas condições,  $i' = 77,5$  mm de diâmetro. A partir dessas estimativas, foi determinado um diâmetro otimista de 70 mm para a cavidade do absorvedor de calor, logo  $A_a = \pi \cdot 35^2 = 3848,45 \text{ mm}^2$ , ou  $A_a = 0,00384845 \text{ m}^2$ .

Resta a determinação de  $A_i$ , que depende intrinsecamente da geometria do absorvedor. Os formatos com maior área interna serão aqueles que fornecerão a melhor absorção de calor, logo a escolha do maior absorvedor parece a mais interessante. Mas é importante lembrar que a sombra projetada pelo absorvedor deve ser a menor possível para que não obstrua de maneira significativa a superfície espelhada do concentrador parabólico.

Para a determinação da melhor geometria para o projeto do absorvedor de calor foi criado um código que calcula a absorptância efetiva a partir da área interna do mesmo. O código funciona com a linguagem computacional Octave e tem como variáveis iniciais o diâmetro da cavidade do absorvedor, uma altura e uma largura máxima para o absorvedor, a absorptância do revestimento interno, a espessura do isolante térmico e o diâmetro do concentrador parabólico. O código então calcula a absorptância efetiva com base na equação 3.1 para os formatos esférico, cilíndrico e cúbico, variando

suas dimensões dentro de toda a faixa permitida pelas variáveis iniciais. O código também leva em consideração a perda gerada pela sombra do absorvedor na superfície do concentrador parabólico, de acordo com a sua geometria. Finalmente, o código apresenta um gráfico tridimensional da absorptância efetiva em função das alturas e larguras do absorvedor de calor e também a geometria e as dimensões do projeto com maior absorptância efetiva. A vantagem de se criar um código para essa etapa do projeto foi a possibilidade de se alterar as variáveis livremente e considerar a influência na eficiência final de forma rápida. O código também poderá ser utilizado para a otimização de projetos futuros e está disponível como Anexo II deste trabalho. O embasamento teórico para o código encontra-se no Anexo III.

O projeto final do absorvedor considerou os valores para as variáveis iniciais de:

- diâmetro da cavidade: 70 mm.
- altura máxima do absorvedor: 75 mm.
- largura máxima do absorvedor: 200 mm.
- absorptância do revestimento interno: 0,9.
- espessura do isolante térmico: 22,5 mm.
- diâmetro do concentrador solar: 1,90 m.

A altura máxima do absorvedor foi escolhida como sendo de 75 mm, pois essa é a altura que garante que a abertura da cavidade se encontre no foco do concentrador, ao mesmo tempo em que se encaixa diretamente com o braço central da antena parabólica Century. A largura máxima do absorvedor foi escolhida como 200 mm, pois, em simulações anteriores, se observou que esse valor era suficiente para fornecer o resultado ótimo.

Assim, o absorvedor ótimo para o projeto fornecido pelo código, ou seja, aquele que fornecerá o maior ganho de temperatura para o fluido em circulação, foi o de geometria cilíndrica, altura de 75 mm, diâmetro de 135 mm, com uma absorptância efetiva de 98,35%. A figura 3.8 foi gerada pelo código e indica a eficiência de absorção ( $\alpha_{eff}$ ) do absorvedor em função de sua geometria.

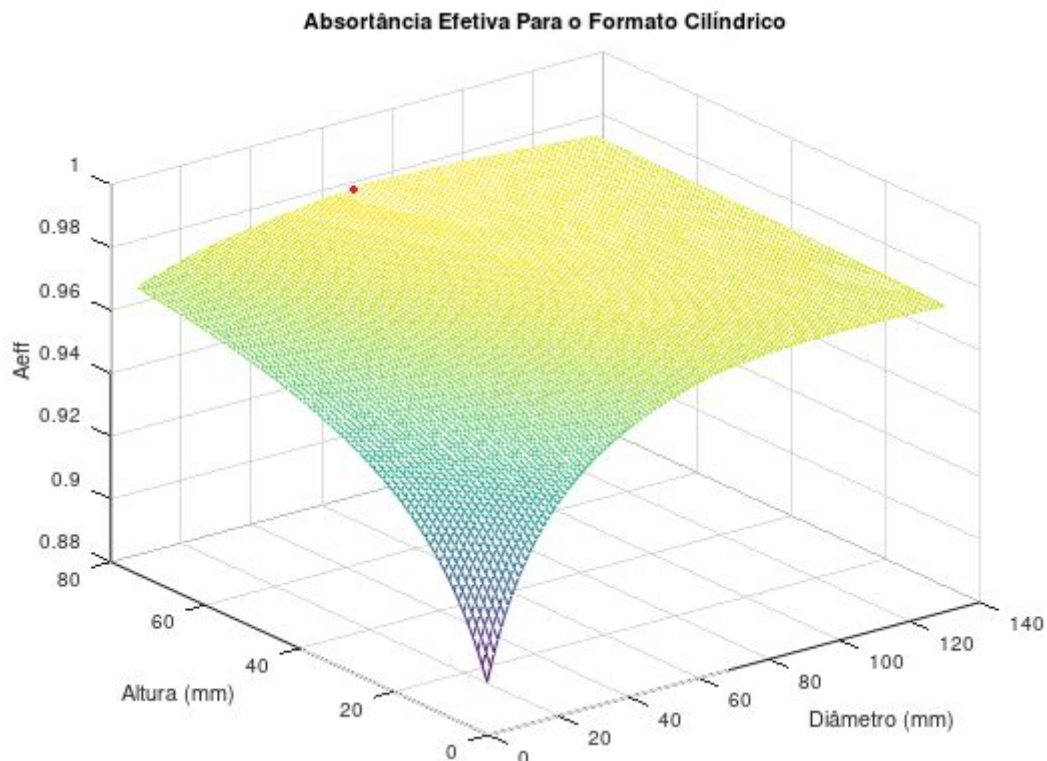


Figura 3.8 - Coeficiente de absorção efetivo em função da altura e do diâmetro (a partir do diâmetro da cavidade) de um absorvedor de calor cilíndrico obtido como melhor alternativa para o projeto. O ponto em vermelho indica o valor ótimo escolhido para o projeto.

O material do isolante térmico que reveste o absorvedor de calor foi escolhido como uma manta de lã cerâmica, devido a sua alta resistência e baixa condutividade térmica (CEMENTO, 1957). O material da serpentina foi escolhido com base na sua condutividade térmica e disponibilidade no mercado. Uma alta condutividade térmica favorece a troca de calor entre o absorvedor e o fluido de trabalho. A partir do Anexo V o cobre foi escolhido como material para a serpentina. Para que a serpentina pudesse se adequar às dimensões já determinadas pela superfície concentradora parabólica e pela geometria do absorvedor de calor, o seu diâmetro foi definido como  $\frac{1}{4}$ " para o diâmetro externo, com paredes de 0,79 mm de espessura.

Para se adequar ao formato do absorvedor de calor, a serpentina é dobrada manualmente. As dimensões já estabelecidas para o absorvedor de calor permitiram um total de 10 voltas da serpentina no interior do mesmo. A serpentina é fixada no interior do absorvedor através de pressão com a carcaça. Um maior contato entre as serpentinas e uma menor distância entre as paredes do absorvedor e a serpentina garantem uma melhor troca de calor. O comprimento total da serpentina ficou em 4,24 m, com o preço total de R\$141,50.



Figura 3.9 - Manta de lã cerâmica e serpentina de cobre de diâmetro  $\frac{1}{4}$ " (LIVRE, 2020).

O absorvedor será revestido por uma camada de 25 mm de espessura de lã de cerâmica, com um preço de R\$69,80. A lã cerâmica envolve todas as superfícies do absorvedor, com exceção da parte inferior, por onde os raios solares entram. A fixação da lã cerâmica se dá através de uma cola própria para altas temperaturas, vendida em conjunto com a mesma. O adesivo é a base de fibra cerâmica e grãos finos eletrofundidos, suportando temperaturas de até 1260°C (LIVRE, 2020).

Foram feitos desenhos técnicos dos componentes do absorvedor com o auxílio de ferramentas CAD, que foram enviados para a fabricação em uma metalúrgica. O custo de fabricação dessas peças foi de R\$80,00 e os desenhos técnicos estão no Anexo IV deste trabalho. O absorvedor de calor será fixado com parafusos no braço central do concentrador parabólico que já vem com o conjunto da antena parabólica, de modo que a cavidade fique exatamente sobre o foco dos raios de luz do espelho.

### **3.4. BASE DE SUSTENTAÇÃO DO CONCENTRADOR**

A base de sustentação do concentrador se aproveitou da base original de aço galvanizado da antena parabólica selecionada como superfície concentradora parabólica. Esse componente deve permitir o movimento de direcionamento do concentrador em direção ao Sol. O direcionamento deve acompanhar o Sol em seu movimento azimutal diário de leste a oeste, assim como em seu movimento de elevação. Para Brasília a elevação atinge 50,5° ao norte durante os solstícios de inverno e 82,5° ao sul durante os solstícios de verão. Nos dias 5 de novembro e 5 de fevereiro o Sol passa exatamente pelo zênite. A figura 3.10 indica os ângulos de azimute e elevação, comumente utilizados no rastreamento de objetos celestes.



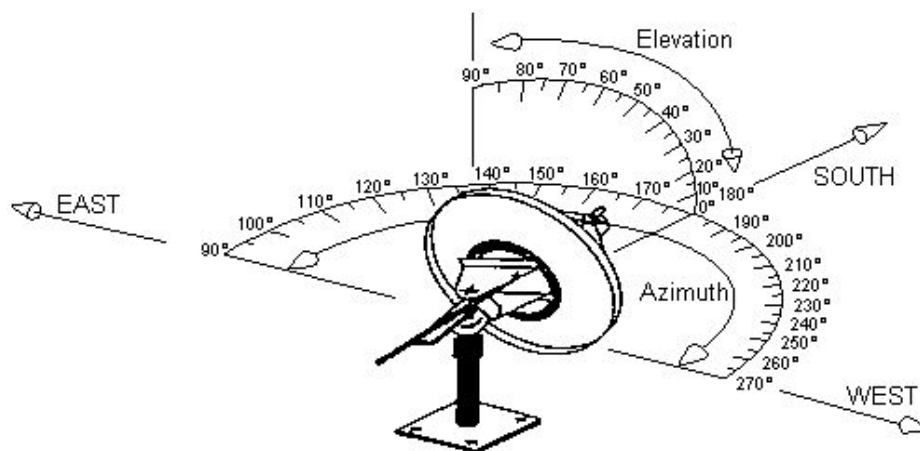


Figura 3.10 - Apontamento do concentrador (ELETRÔNICA, 2020).

Para o pleno funcionamento comercial de um concentrador solar de disco parabólico, o projeto da base de sustentação do concentrador deve ser de um sistema motorizado com guiagem automática. Isso pode ser feito de maneira acessível se utilizando de motores de passo e engrenagens com fusos. Neste trabalho nos limitamos a realizar a guiagem de forma manual. Futuros trabalhos devem incluir o projeto de uma guiagem motorizada.

O encaixe do concentrador com sua base de sustentação se dá através de um tubo de aço galvanizado de 2" de diâmetro. Isso garante uma durabilidade semelhante à determinada para a superfície concentradora parabólica, discutida no capítulo 3.1. A montagem do concentrador parabólico na base de sustentação é feita utilizando os componentes originais da antena parabólica, detalhados na imagem 3.11. O tubo de 2" é então encaixado por dentro de um tubo de 2,5", este fixado por concreto no chão, como mostra a figura 3.12. Pedacos de borracha entre os tubos fazem o papel de amortecedores para evitar movimentos indesejados causados pelo vento. Esse tipo de montagem permite a rotação do concentrador (movimento de azimute) e também o movimento em altitude apenas apertando ou afrouxando uma arruela. A figura 3.13 mostra o sistema construído e pronto para o funcionamento.



Figura 3.11 - Encaixe traseiro do concentrador parabólico (ENCRYPTED, 2020).



Figura 3.12 - Fixação da base de sustentação do concentrador, junto com todo o sistema, em um tubo de aço preso por concreto no chão.



Figura 3.13 - Sistema pronto para o funcionamento.

## 4 RESULTADOS

*Serão apresentados a metodologia experimental e os resultados obtidos após a construção do concentrador, avaliadas as implicações das escolhas de projeto e possibilidades de melhorias no mesmo junto com os custos.*

### 4.1. EXECUÇÃO DOS EXPERIMENTOS

Os experimentos têm como objetivo a avaliação da eficiência e aplicabilidade dos métodos construtivos e de projeto adotados. Pretende-se avaliar a potência total gerada pelo sistema através do aquecimento da água, a eficiência do sistema ao comparar a potência total gerada com a intensidade luminosa emitida pelo Sol, as temperaturas atingidas no aquecimento da água, os erros e os acertos do projeto. Foram encontradas dificuldades durante a realização dos experimentos, relacionadas principalmente com o tempo/condição climática de Brasília no final do ano. Sendo assim, os procedimentos experimentais e os resultados apresentados a partir deste capítulo podem e devem ser aprimorados em trabalhos futuros. Ainda assim, considerou-se importante a apresentação dos resultados obtidos, visto que fornecem uma base de comparação para os próximos projetos.

Parte importante do projeto do absorvedor inclui a seleção de uma bomba que será responsável pela circulação da água na serpentina dentro do absorvedor. O código disponível como Anexo VI foi criado para determinar as curvas características do sistema projetado e de uma bomba, baseado no método proposto por Souza (2014). A bomba selecionada foi do modelo FI-3308, de diafragma, e sua curva característica, fornecida pelo fabricante, está representada na figura 4.1.

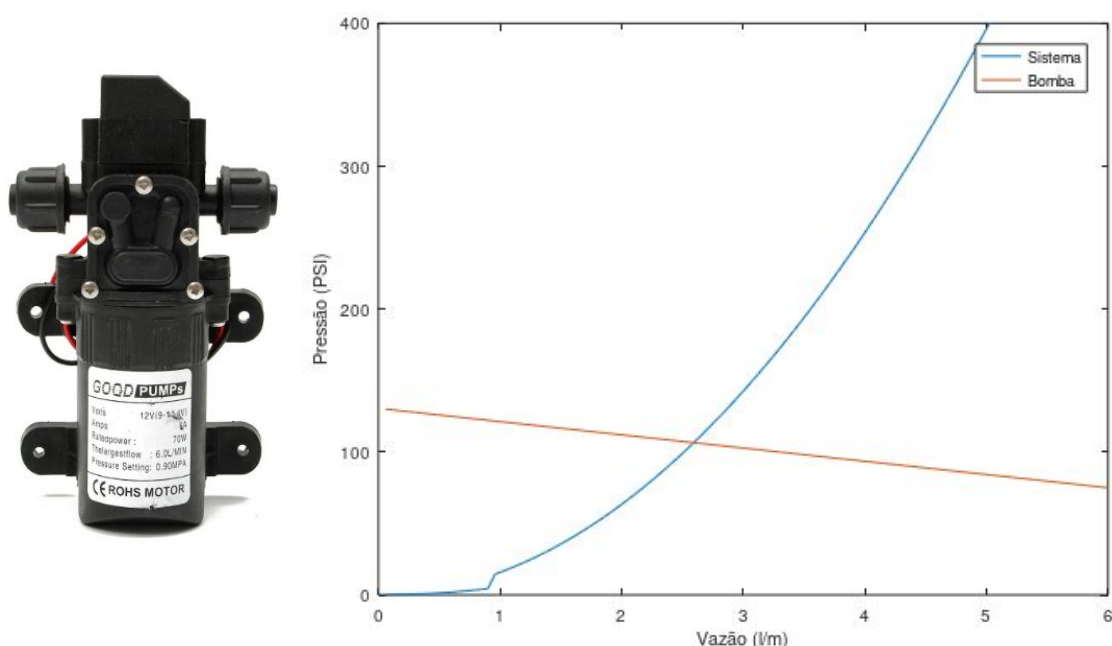


Figura 4.1 - Bomba FI-3308 selecionada (BANGGOOD, 2020) ao lado das curvas características do sistema e da bomba obtidos com o código disponível no anexo VI.

Para a medição da temperatura da água e ambiente foi selecionado o sensor Ds18b20. Para a medição de vazão foi selecionado o sensor YF-8402B. Para a medição de intensidade luminosa foi selecionado o sensor MAX88921 da marca MAXIM Inc e para a medição da inclinação do concentrador foi selecionado o sensor de gravidade ICM20690 da marca InvenSense, ambos componentes internos do smartphone Samsung Galaxy Note 3. Os sensores foram calibrados e o



processo de calibração está detalhado no Anexo VII. Links para os datasheets desses sensores também se encontram no Anexo VII

Os sensores de temperatura e de vazão funcionam quando ligados a uma placa de aquisição de dados, no caso, um arduino UNO. O código utilizado para a coleta de dados desses sensores está disponível no anexo VIII.

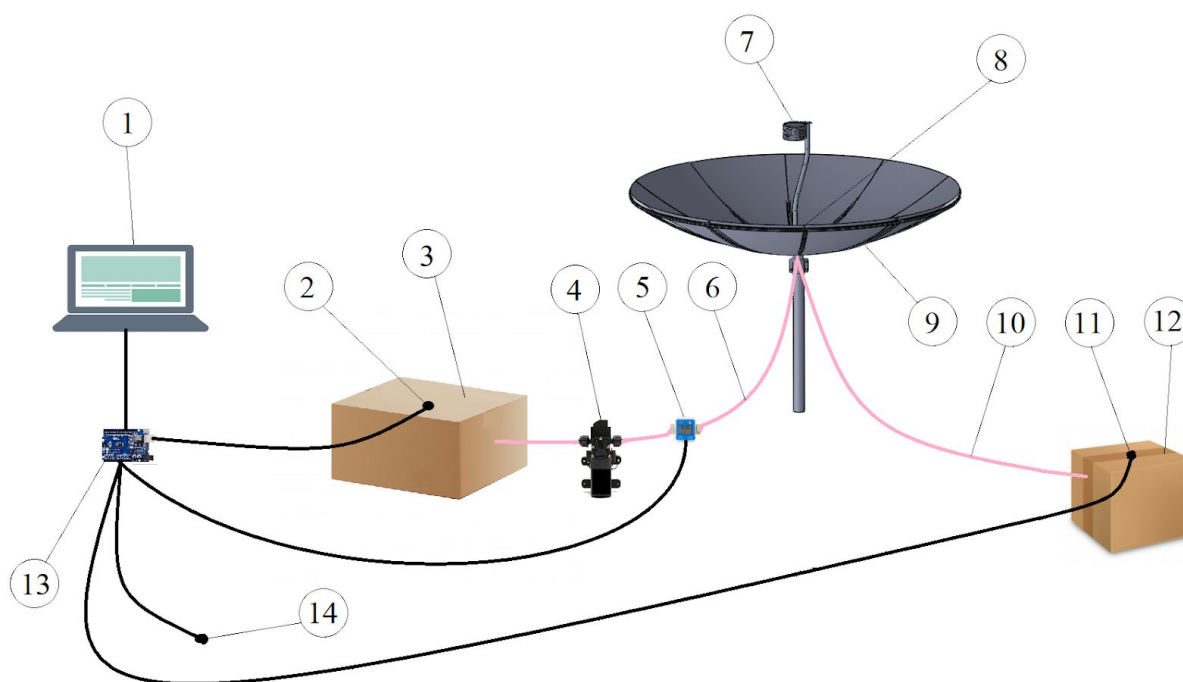


Figura 4.2 - Diagrama dos componentes do experimento. (1) computador, (2) sensores de temperatura de entrada ligados ao arduino, (3) reservatório de entrada, (4) bomba hidráulica, (5) sensor de vazão ligado ao arduino, (6) mangueira de sucção, (7) absorvedor de calor, (8) sensores de inclinação e intensidade luminosa, (9) concentrador parabólico, (10) mangueira de descarga, (11) sensores de temperatura de saída ligados ao arduino, (12) reservatório de saída, (13) placa arduino UNO e (14) sensor de temperatura ambiente ligado ao arduino.

A figura 4.2 mostra a organização dos componentes do experimento. O computador (1) é ligado a uma placa arduino UNO (13) que registra os dados coletados pelos sensores de temperatura e de vazão. Dois sensores de temperatura (2) são colocados dentro de um reservatório de entrada (3). O reservatório serve como recipiente onde os sensores são fixados. Cada sensor tem uma incerteza de 0,5 °C. A temperatura considerada para a água no interior do reservatório é a média simples das temperaturas registradas por cada sensor. A bomba hidráulica (4) é responsável pela circulação da água no sistema. A água sai do reservatório de entrada e vai para a bomba hidráulica sendo succionada. É importante que esse trecho seja curto, pois a bomba de diafragma não deve trabalhar com sucção. Um sensor de vazão (5) é adicionado logo em sequência, ligado ao arduino. O sensor de vazão fornece a cada segundo os dados de vazão, em litros por minuto, e de volume total escoado, em litros, para o arduino. Esses dados são armazenados em um arquivo “.txt” no computador. A mangueira de sucção (6) é responsável por levar o fluxo de água até o absorvedor de calor (7). Os sensores de inclinação e de intensidade luminosa (8) são fixados no disco central do concentrador parabólico (9), de modo que ficam alinhados com o posicionamento do concentrador. Os dados desses sensores são coletados a cada cinco segundos e são posteriormente sincronizados e adicionados aos arquivos contendo as informações de temperatura e vazão. A presença de nuvens é registrada manualmente. Após sair da mangueira de sucção, a água vai para a serpentina de cobre, circula pelo absorvedor de calor e vai para a mangueira de descarga (10). A mangueira de descarga é responsável por levar o fluxo de água até o reservatório de saída (12), onde a temperatura do fluido é medida por

dois sensores de saída (11), de mesma marca e modelo dos sensores de entrada. A média simples desses últimos é considerada como a temperatura de saída. Por último, um sensor de temperatura (14) de mesma marca e modelo é colocado do lado de fora do sistema para medir a temperatura ambiente. Cada um dos cinco sensores envia dados de temperatura a cada segundo para a placa arduino. O arduino envia os dados para o computador, onde ficam registrados em um arquivo “.txt”. A ligação entre cada componente do circuito hidráulico descrito é feita sempre por mangueiras de silicone conectadas com engates rápidos. Essa observação é importante pois testes realizados anteriormente com mangueiras de outros materiais e conexões simples apresentaram problemas com dilatação térmica e vazamentos. As temperaturas interna e externa do absorvedor de calor são registradas a cada 15 minutos com o sensor infravermelho TA601A, da marca TASI, calibrado para uma emissividade de 0,95.

Com todos os sensores funcionando, a bomba é ligada em sua tensão nominal de 12 V e o concentrador é apontado para o Sol. O apontamento para o Sol é feito de forma manual ao manter a sombra do absorvedor de calor sempre no centro do concentrador. A precisão do apontamento será avaliada ao comparar os dados do sensor de inclinação com as informações sobre o posicionamento do Sol disponibilizadas pelo software Stellarium. Foram feitos 12 testes e suas características estão indicadas na tabela 4.1.

<b>Teste</b>	<b>Horário de início</b>	<b>Horário de término</b>	<b>Temperatura média de entrada [°C]</b>	<b>Temperatura média de saída [°C]</b>	<b>Vazão [l/min]</b>	<b>Comentário</b>
1	08h53	09h04	21,6	22,9	2,19	vazão normal por 10 minutos
2	10h08	10h28	23,3	25,7	2,48	vazão normal por 20 minutos
3	10h29	10h39	23,7	26,7	2,40	vazão normal por 10 minutos
4	10h42	10h52	24,1	28,3	1,99	vazão diminuída por 10 minutos
5	10h54	11h06	24,1	30,0	1,37	vazão diminuída por 10 minutos
6	11h07	11h17	23,5	24,5	2,44	vazão aumentada por 10 minutos
7	11h19	11h22	24,2	27,0	2,45	vazão aumentada por 3 minutos
8	11h24	11h30	24,5	27,2	2,53	vazão aumentada por 5 minutos
9	12h27	12h32	25,0	27,7	2,34	vazão normal por 5 minutos
10	13h02	13h05	24,9	29,9	1,22	vazão diminuída por 3 minutos
11	13h21	13h32	25,0	27,2	2,43	vazão aumentada por 10 minutos
12	13h38	13h48	25,6	28,5	2,41	vazão aumentada por 10 minutos

Tabela 4.1 - Características dos 12 testes realizados.

No total foram mais de 200 litros circulados e quase duas horas de experimentos. Os testes 6, 7, 8, 11 e 13 foram feitos com a bomba funcionando sob uma tensão de 16 V, o que aumentou a vazão de água. Nos testes 4, 5 e 10 foram adicionadas dobras na mangueira de silicone, o que fez com que a vazão de água diminuísse. Esses testes com diferentes vazões foram feitos com o objetivo de se analisar a influência da variação de vazão no coeficiente global de transferência de calor do absorvedor de calor. O teste 6 foi influenciado pela presença de nuvens. Por último, foi medida a temperatura interna do absorvedor de calor sem o escoamento de água, para que fosse comparada com os resultados obtidos por Kaushika (1999) em um teste semelhante. Os resultados desses testes são discutidos no capítulo 4.2. Todos os resultados dos testes podem ser encontrados no Anexo X.

## 4.2. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os testes foram realizados no dia 15 de dezembro de 2020, na cidade de Brasília, nos horários entre 8h e 14h. Nesse dia existiu Sol direto com a eventual obstrução de nuvens. Não houveram rajadas de ventos.

O código disponível como Anexo IX foi criado com o objetivo de analisar os dados coletados durante os testes. O código interpreta o arquivo “.txt” que contém todos os dados dos experimentos e fornece gráficos como saídas. Além disso, ele indica a potência média e a eficiência média do sistema, bem como o coeficiente global de transferência de calor do absorvedor de calor. A partir do código é possível fazer uma análise completa dos resultados experimentais do concentrador solar parabólico.

Uma das saídas do código é um gráfico com o erro da guiagem, apresentado na figura 4.3. As informações captadas com o sensor de inclinação são comparadas com as posições do Sol durante a realização do experimento e o erro é a diferença entre a inclinação do concentrador e a inclinação do Sol, em graus (equação 4.1). O erro médio da guiagem medido foi de 1,05°, valor que representa um bom funcionamento da técnica de manter a sombra do absorvedor centralizada no concentrador. Uma boa guiagem manual indica que as perdas causadas por esse método são pequenas. É interessante perceber que existem picos no gráfico, por volta dos tempos 40, 200, 290 e 310 segundos. Esses picos são os momentos em que o operador encosta no concentrador e o reposiciona. Outra característica observável neste gráfico é que nos momentos entre as mudanças de posição do concentrador, o valor do erro varia com uma taxa constante. Essa taxa foi calculada como aproximadamente 13,7 °/h, valor muito próximo da velocidade de rotação da Terra (15 °/h). Embora demonstre consistência nas medições, a comparação direta desses dois últimos valores não pode ser levada como precisa, visto que existem outros movimentos associados que podem causar variações no movimento aparente do Sol no céu.

$$E = I_c - I_r \quad \text{Eq. 4.1}$$

$E$  é o erro,  $I_c$  é a inclinação do concentrador e  $I_r$  é a inclinação real do Sol.

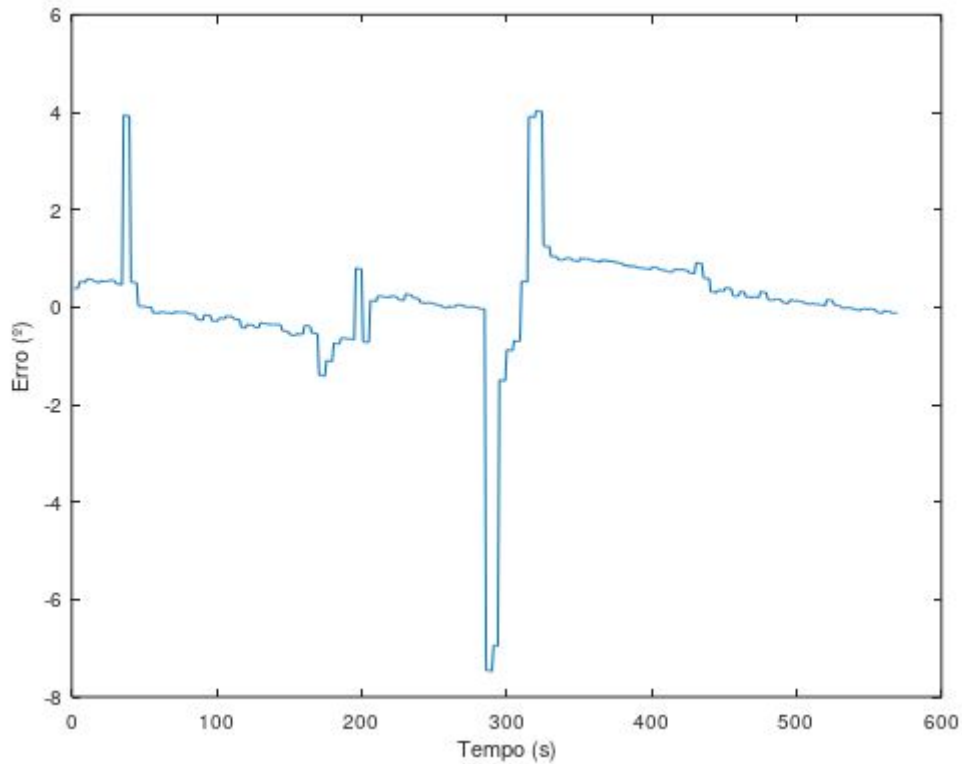


Figura 4.3 - Erro da guiagem manual em função do tempo registrado em um teste qualquer.

Outra saída do código é um gráfico com os valores de potência em função do tempo obtido nos experimentos. Para chegar aos resultados mostrados nas figuras 4.4 e 4.5 o código aplica a equação 4.2, onde  $Q$  é a potência ([W]),  $\dot{m}$  é a vazão mássica ([kg/s]),  $c_p$  é a calor específico da água sob pressão constante ([J/kg .°C]) e  $\Delta T$  é a diferença entre a temperatura de entrada e saída da água ([°C]). O valor de  $c_p$  utilizado para os experimentos foi constante de 4.180 J/kg.°C e a densidade da água foi de 1 kg/l. Esses valores podem ser alterados livremente no código, que aplica a equação 4.2 ao longo de todo o tempo do experimento.

$$Q = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T \quad \text{Eq. 4.2}$$

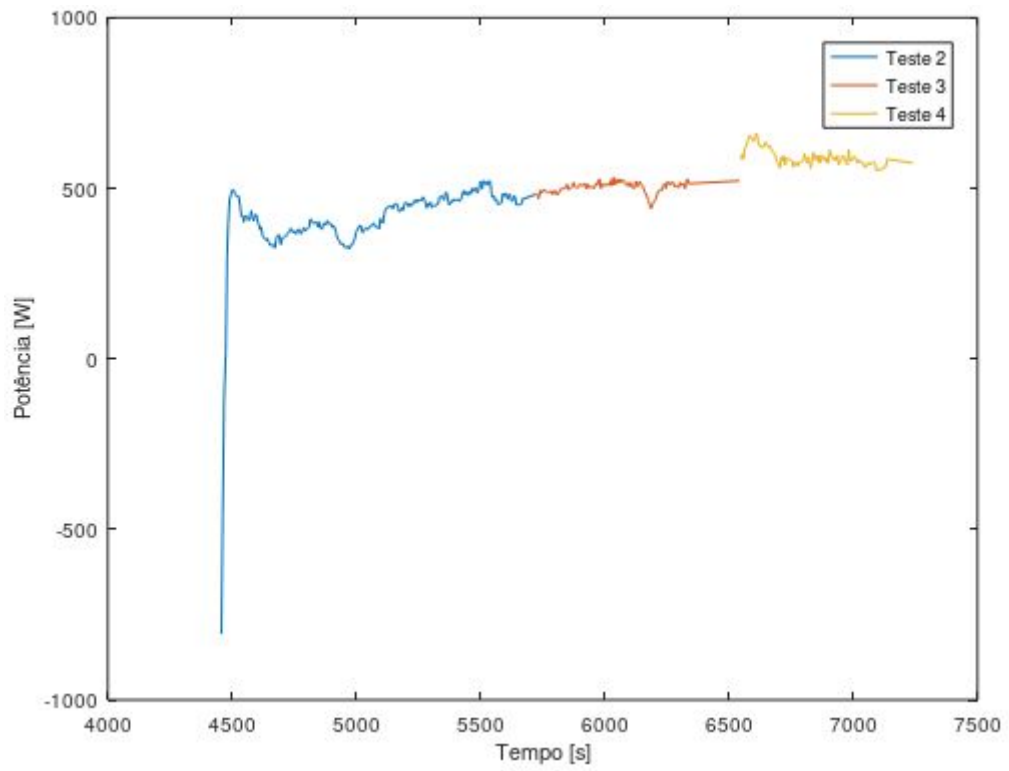


Figura 4.4 - Potência em função do tempo registrada durante os experimentos n° 2, 3 e 4.

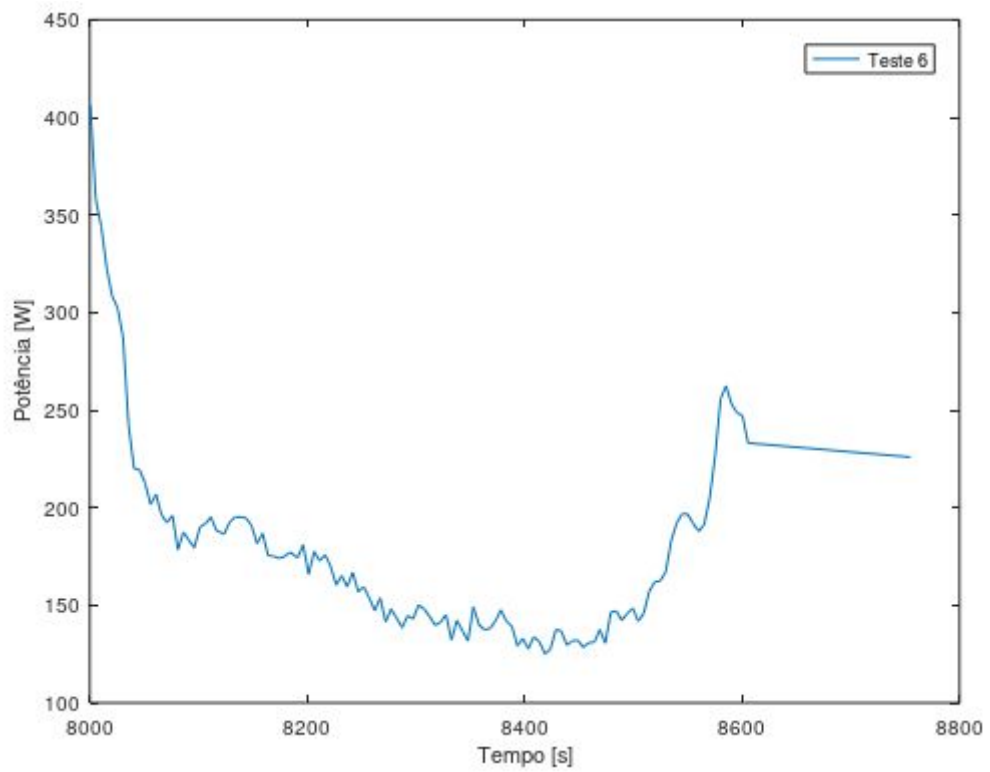


Figura 4.5 - Potência em função do tempo registrada durante o experimento n° 6.

A potência ao longo do tempo variou principalmente em função da presença ou não de nuvens. Durante os testes nº 2, 3 e 4 não houveram nuvens diretamente em frente ao Sol e foram atingidas potências médias de 412 W, 502 W e 590 W, respectivamente. Na figura 4.5 é possível observar a influência da presença de nuvens no gráfico da potência do experimento nº 6, onde a potência média obtida foi de 178 W. Ainda assim, devido às condições climáticas de Brasília nos últimos meses do ano, não foi possível realizar um teste em que as condições de vento e intensidade luminosa do Sol, por exemplo, permanecessem constantes. Isso só é possível de se atingir em experimentos fechados com variáveis climáticas controladas.

A maior potência média foi obtida durante o teste nº 4. Foi possível perceber intervalos em que a potência permaneceu estável com valores acima de 600 W, como por exemplo, no intervalo próximo dos 6600 segundo da figura 4.4. Nos outros testes, a potência média variou entre 178 W e 540 W.

Outra saída do código, apresentada na figura 4.6, é a eficiência do concentrador parabólico em função do tempo. A eficiência é calculada comparando a potência do concentrador com dados do sensor de intensidade luminosa obtido simultaneamente. O sensor adequado para esse tipo de análise é um pireliômetro, entretanto o alto custo e a dificuldade de acesso a esse tipo de sensor fez com que os experimentos fossem realizados com um luxímetro. Um luxímetro não possui a mesma precisão de um pireliômetro e não serve para medir a irradiação direta normal, portanto, a análise da eficiência serve apenas como uma demonstração de método para projetos futuros.

Ainda assim, é possível fazer uma conversão dos dados coletados em lux para W/m<sup>2</sup>. Para isso deve-se dividir o valor obtido em lux por um fator de conversão que depende do espectro de emissão do seu corpo luminoso. Schlyter (2017) sugere um fator de conversão para o Sol próximo de 95. Com essas considerações feitas, o luxímetro demonstrou precisão ao detectar a diminuição da intensidade luminosa do Sol durante a passagem de nuvens e relacionar a passagem de nuvens com a perda de potência do concentrador. O fluxo de radiação solar medido dessa forma ficou próximo dos 1000 W/m<sup>2</sup> sob iluminação direta do Sol, num dia com poucas nuvens, próximo do meio dia. Na equação 4.3,  $E_f$  é a eficiência e  $I$  é a intensidade luminosa em Watts.

$$E_f = \frac{Q}{I} \quad \text{Eq. 4.3}$$

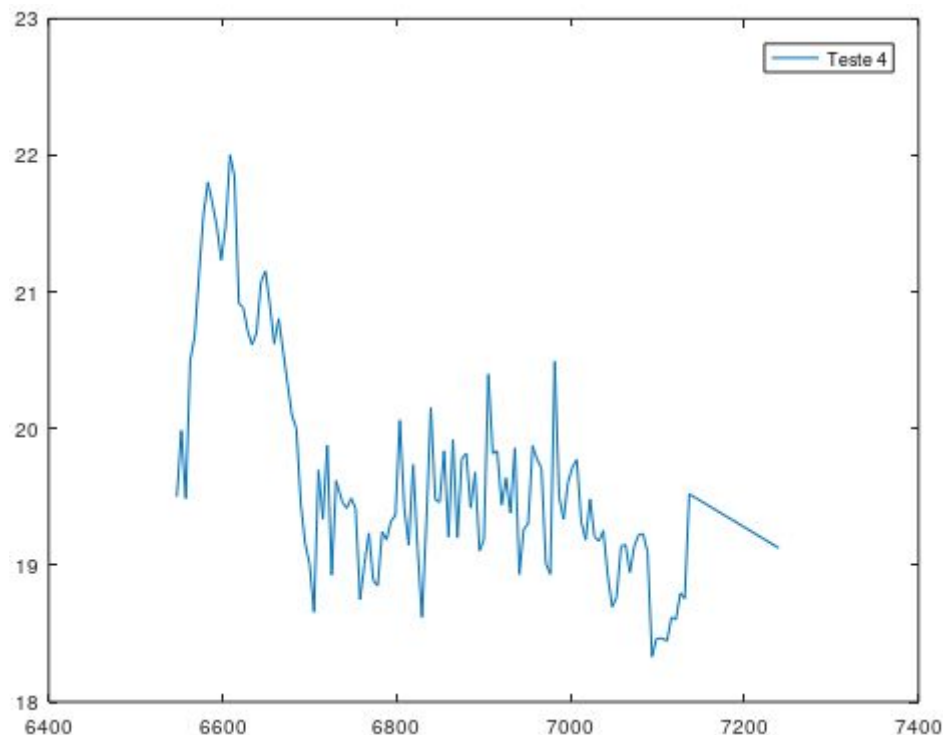


Figura 4.6 - Eficiência energética do concentrador em função do tempo durante o teste nº 4. A equação 4.3 é geradora dessa figura.

A maior média de eficiência foi obtida durante o teste nº 4, onde atingiu o valor de 20%. Da mesma forma que a curva de potência, a curva de eficiência se manteve estável em alguns momentos, em valores um pouco maiores que a média. No teste nº 4 esses valores foram próximos de 21%. Nos outros testes o valor médio da eficiência variou entre 6% e 18%.

Outra saída do código é um gráfico com as temperaturas da água e do ambiente durante a realização do teste. Em nenhum teste a temperatura ambiente variou mais do que 5 °C. Foi possível observar que o regime permanente foi atingido de forma rápida logo no início dos testes. A maior diferença de temperatura entre a entrada e a saída ocorreu durante os testes de número 5 e 10, onde foram registrados valores médios de 5,9 e 5,1 °C respectivamente. Esse resultado condiz com o esperado, pois foram os testes em que a vazão de água foi menor. A menor diferença de temperatura entre a entrada e a saída ocorreu durante o teste número 6, onde foi registrado um valor médio de 1,0 °C. Esse resultado ocorreu devido à presença de nuvens. Nos testes em que a vazão foi maior, foram registradas diferenças de temperatura menores e ao mesmo tempo potências maiores, já que a troca de calor do fluido com o absorvedor de calor aumentou nessas condições. A figura 4.7 mostra um gráfico com as temperaturas ambiente, de entrada e de saída durante o teste nº 4.

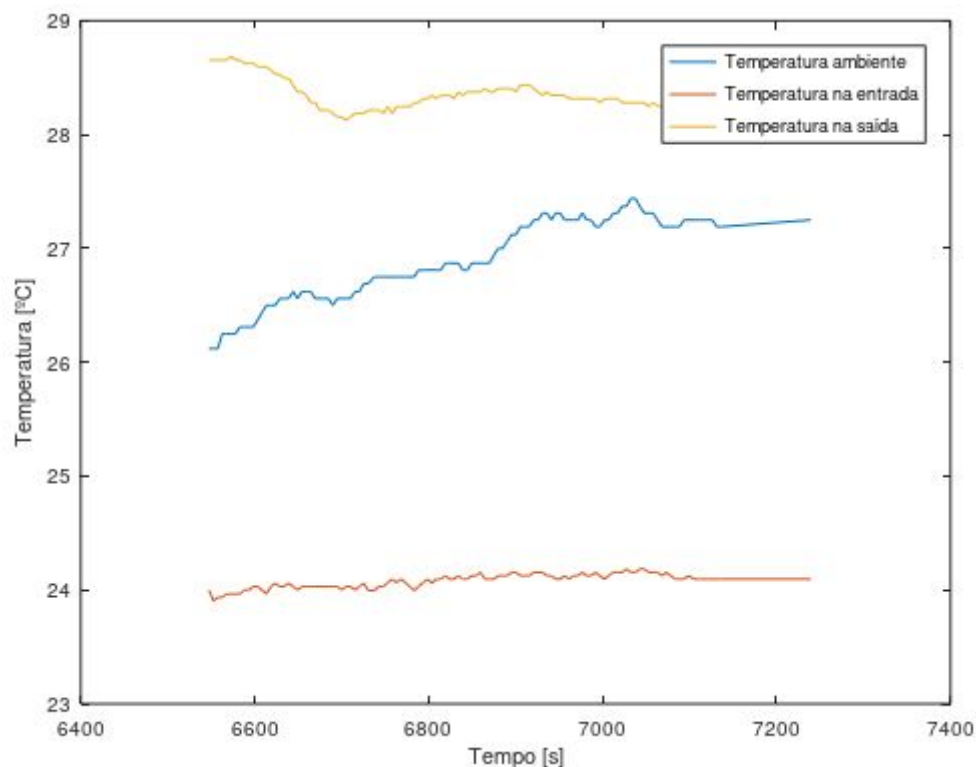


Figura 4.7 - Temperatura de entrada e de saída da água e temperatura ambiente em função do tempo ao longo do teste nº 4.

Um resultado interessante é relacionado aos registros de presença de nuvens. Em todos os momentos em que foi registrada a presença de nuvens foi observada uma queda na potência do absorvedor. É possível observar também uma influência direta entre a potência registrada e o aumento/diminuição da temperatura. Foi observada uma perda de temperatura de saída nos mesmos momentos em que nuvens foram registradas, ocasionando perda de potência.

Para a determinação do coeficiente global de transferência de calor do absorvedor de calor, o código realiza um cálculo de acordo com a equação 4.4,

$$Q = U \cdot A \cdot LMTD \quad \text{Eq. 4.4}$$

onde  $Q$  é a potência ([W]) calculada na equação 4.2,  $U$  é o coeficiente global de transferência de calor do absorvedor ([W/°C]),  $A$  é a área de troca de calor do absorvedor e  $LMTD$  é a média logarítmica das diferenças de temperatura (Logarithmic Mean Temperature Difference, [°C]), dada pela equação 4.5,

$$LMTD = \frac{(T_{in} - T_{amb}) - (T_{ex} - T_{amb})}{\ln \frac{(T_{in} - T_{amb})}{(T_{ex} - T_{amb})}} \quad \text{Eq. 4.5}$$

onde  $T_{in}$  é a temperatura de entrada da água,  $T_{ex}$  é a temperatura de saída da água e  $T_{amb}$  é a temperatura registrada pelo sensor infravermelho TA601A no interior do absorvedor de calor. O sensor infravermelho foi utilizado para a medição da temperatura ambiente no interior do absorvedor de calor, pois os sensores Ds18b20 não suportam temperaturas acima dos 125 °C. O método LMTD é indicado dada a característica assintótica da curva de temperatura da água em relação à temperatura interna do absorvedor de calor.

A figura 4.8 mostra o gráfico da potência em função da LMTD registrados durante os experimentos nº 2, 3, 4 e 5. Esses experimentos foram escolhidos pois foram menos afetados pela presença de nuvens. Cada experimento com vazão alterada corresponde a um ponto experimental. É feita a extrapolação de uma reta que passa pela origem e atravessa os valores de potência em função do LMTD. A inclinação dessa reta nos fornece o valor de  $U \cdot A$ . O valor de  $U \cdot A$  obtido variou entre 3,34 e 4,16 W/m<sup>2</sup>.°C nos experimentos mostrados. Considerando que a área de troca de calor da serpentina,  $A$ , é de 0,138 m<sup>2</sup>, os valores encontrados para o coeficiente global de transferência de calor do absorvedor de calor variaram entre 24,18 e 30,15 W/°C.

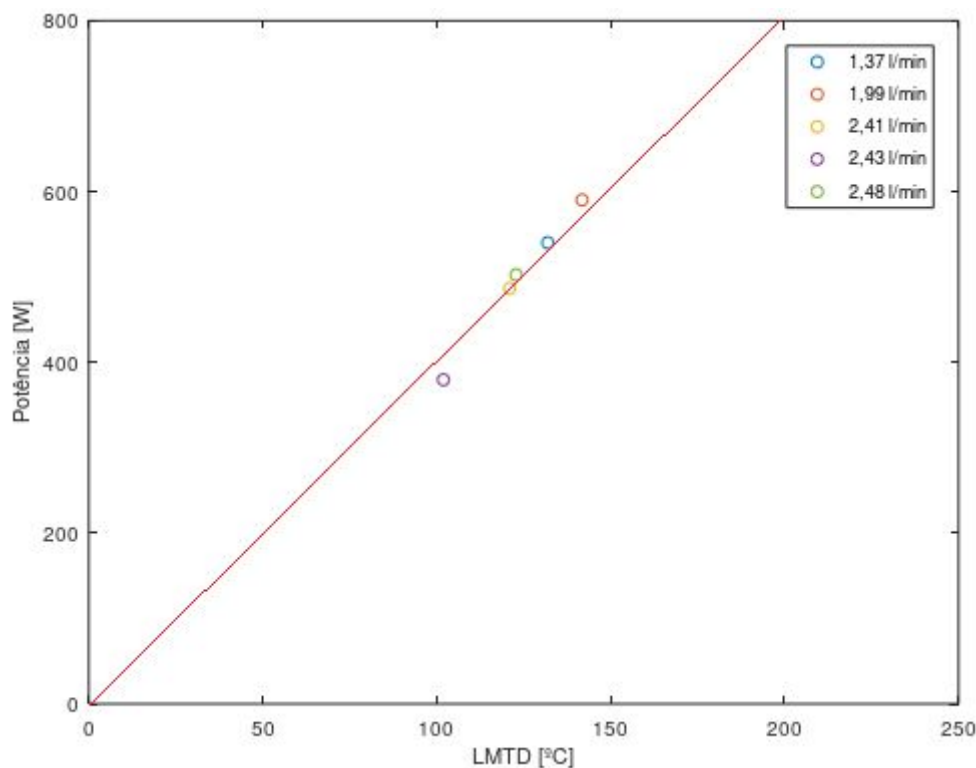


Figura 4.8 - Gráfico da potência ( $Q$ ) em função da média logarítmica das diferenças de temperatura dos testes nº 2, 3, 4 e 5, junto com a extrapolação da curva cuja inclinação representa o valor do coeficiente global de transferência de calor multiplicado pela área de troca de calor do absorvedor.



A figura 4.9 mostra os valores obtidos para o coeficiente global de transferência de calor ( $U$ ) e do coeficiente global de transferência de calor multiplicado pela área de troca de calor ( $UA$ ) em função do tempo. Foi observado que o valor de  $U$  aumenta com o aumento da vazão dentro da serpentina.

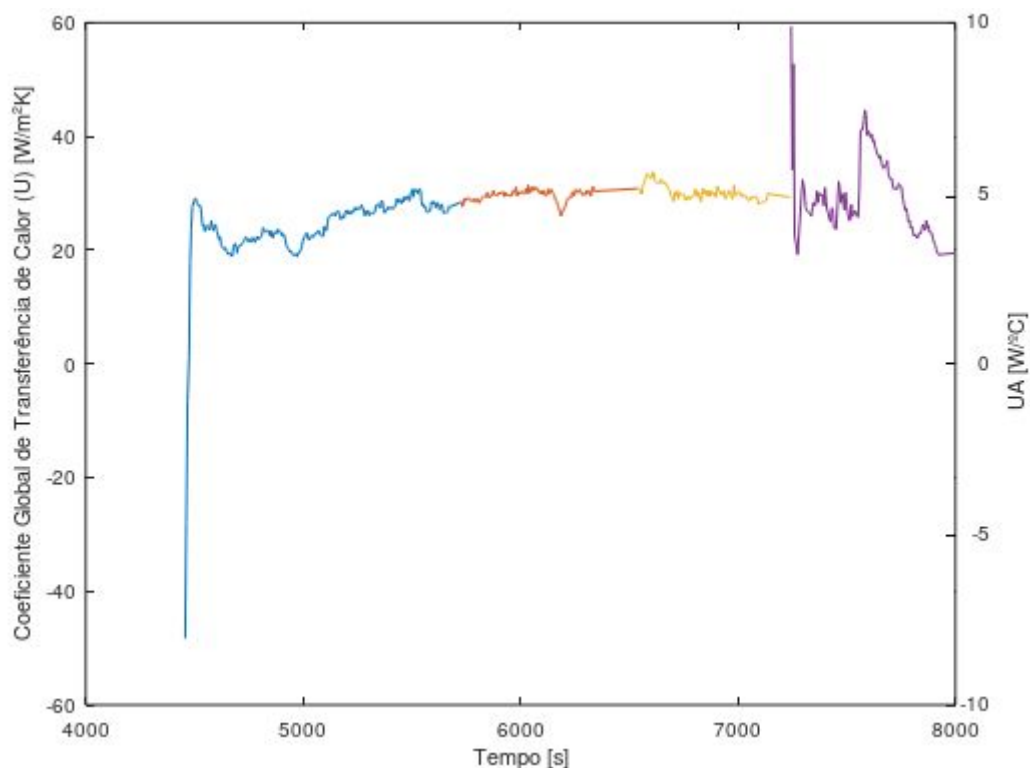


Figura 4.9 - Coeficiente global de transferência de calor e coeficiente global de transferência de calor multiplicado pela área de troca de calor em função do tempo obtidos durante os testes nº 2, 3, 4 e 5.

Em todos os testes, a vazão ficou próxima daquela calculada pelas curvas características da bomba e do sistema, mostrada na figura 4.1, variando entre 1,22 e 2,53 l/min, com sua média sendo de 2,35 l/min quando sob tensão nominal de 12 V. No teste em que a bomba trabalhou sob tensão de 16 V a vazão subiu para 2,45 l/min em média. No teste em que houve obstrução da mangueira de silicone a vazão variou entre 1,22 e 1,99 l/min. A figura 4.10 mostra os valores de vazão em função do tempo obtidos durante todos os testes. Foi possível observar que o aumento da tensão na bomba resultou em uma variação mínima na vazão.

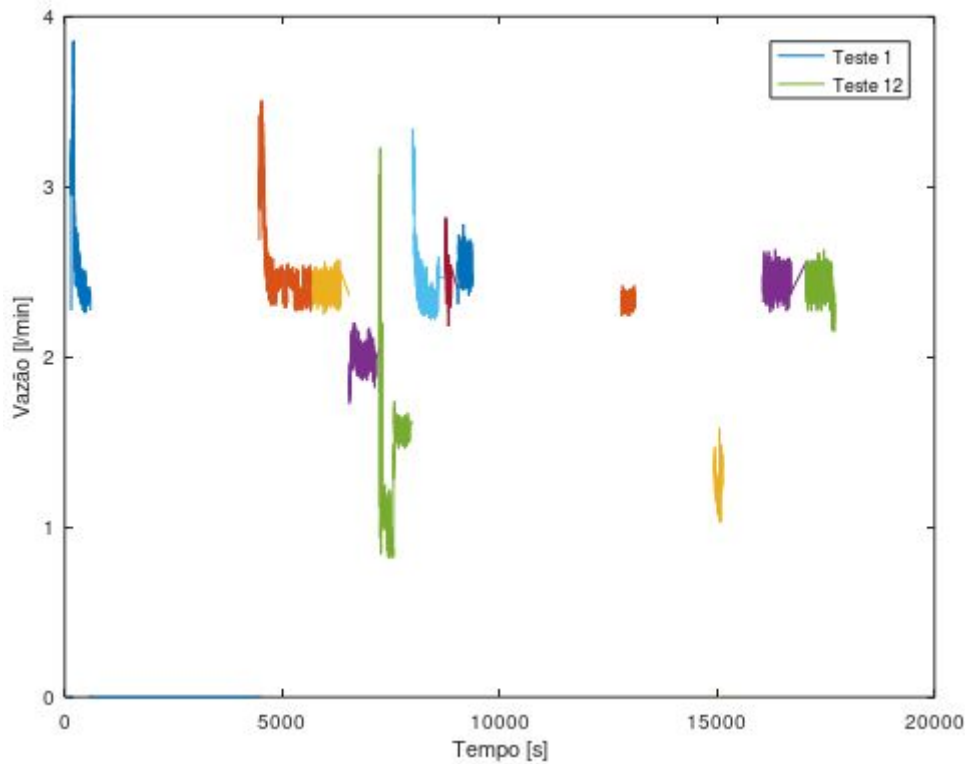


Figura 4.10 - Vazão em função do tempo registrada para todos os testes.

Também foi feita a medição da temperatura interna do absorvedor sem circulação de água. Os valores passaram facilmente dos 300 °C, sendo o valor máximo medido de 448,1 °C, condizente com os valores apresentados por Kaushika (1999). Em seu teste, Kaushika utiliza uma antena parabólica de 2,4 m de diâmetro revestida com um filme polimérico de liga de alumínio com prata.



Time	Solar intensity (W/m <sup>2</sup> )	Stagnation temperature (°C)	Ambient temperature (°C)
11.00	980	469	33.0
11.30	860	352	32.0
12.00	840	410	33.5
12.30	940	433	33.5
13.00	920	398	32.0
13.30	800	288	31.0
14.00	810	248	31.0
14.30	700	224	30.5
15.00	480	156	30.0
15.30	360	111	30.0

Figura 4.11 - À esquerda, a temperatura interna máxima do absorvedor de calor sem circulação de água medida pelo sensor infravermelho TA601A. À direita, a tabela com os valores de temperatura de estagnação obtidos por KAUSHIKA (1999).

Com todos os testes feitos, percebeu-se que o principal fator gerador de perda de eficiência do atual projeto é a ótica da superfície refletiva. Diferentemente do esperado, foi possível observar que o foco dos raios luminosos estava ocupando uma área maior do que o absorvedor de calor. Isso faz com que grande parte da energia coletada seja jogada no lado externo do concentrador e não aqueça a água.

Futuros projetos devem levar isso em consideração, ao procurar melhores métodos para a obtenção de uma superfície parabólica refletiva eficiente.

O custo total do projeto ficou próximo dos R\$1200,00, o que significa um custo de aproximadamente R\$425,00 por metro quadrado de área de coleta de radiação solar. Kaushika (1999) obteve um valor praticamente três vezes superior (US\$200,00 por metro quadrado). Isso indica uma clara melhoria, que tem sua origem no barateamento das tecnologias de fabricação nas últimas duas décadas. A continuação dessa tendência traça horizontes otimistas para a implementação de sistemas de geração de energia a partir do Sol. Com as devidas otimizações, um equipamento semelhante pode ser suficiente para as necessidades de conforto térmico de uma residência. Acoplado a um motor Stirling, um concentrador solar pode gerar energia elétrica a baixo custo e praticamente sem impactos negativos no meio ambiente. A produção em larga escala tornaria os custos de fabricação ainda menores. Ainda assim, concentradores solares de discos parabólicos possuem desvantagens em relação a outras formas de geração de energia a partir do Sol. Essa é uma solução que se limita a necessidades específicas, como por exemplo a geração de calor a altas temperaturas. Faz-se assim necessária a continuação de pesquisas que visem a melhoria da qualidade de vida humana em harmonia com a natureza.

## 5 CONCLUSÃO

*É apresentada de uma forma objetiva os principais pontos do trabalho, junto com uma avaliação dos objetivos atingidos, conclusões do autor e possíveis melhorias futuras.*

Projetos de concentradores solares de discos parabólicos são menos estudados do que concentradores parabólicos lineares, fresnel lineares ou coletores planos. Isso se deve principalmente à dificuldade de fabricação de formatos de discos parabólicos precisos e à necessidade de um acompanhamento motorizado em dois eixos, fatores que acarretam em maiores custos de fabricação e de manutenção. Contudo, avanços tecnológicos nas últimas décadas têm contribuído para um crescente barateamento dessa tecnologia.

Nesse trabalho é apresentado o projeto de fabricação de um concentrador solar de disco parabólico que tem como objetivo a coleta da energia solar para a utilização em dispositivos térmicos para a geração de energia elétrica, geração de conforto térmico residencial/comercial ou geração de trabalho mecânico. O projeto teve um custo total próximo dos R\$1200,00 (US\$200,00) para um concentrador de 1,90 metros de diâmetro e 2,83 m<sup>2</sup> de área de coleta de luz solar e foi projetado, construído e testado com sucesso. Os testes foram realizados para caracterizar o desempenho do sistema. Esses testes mostraram eficiências que variaram entre 6% e 21%, considerando condições climáticas pouco favoráveis. A potência gerada no aquecimento da água variou entre 170 e 600 W. Esses resultados são condizentes com a literatura, que indica eficiências próximas de 20%, o que significa potências próximas dos 600 W para o mesmo concentrador. Ainda assim, é visto um potencial para melhorias em projetos futuros que corrijam possíveis falhas. O coeficiente global de transferência de calor do absorvedor de calor variou entre 24,18 e 30,15 W/°C, o que mostra potencial para melhorias futuras, ainda que os resultados obtidos estejam de acordo com o esperado teoricamente.

Kaushika (1999) estima um custo entre 200 e 225 dólares por metro quadrado para um coletor solar de disco parabólico de baixo custo. O projeto atual conseguiu reduzir esse custo em três vezes, enquanto manteve uma temperatura de estagnação semelhante com uma área de coleta 60% menor. Isso demonstra o avanço nos processos de fabricação dos materiais utilizados e o seu barateamento nas últimas duas décadas. Também indica um potencial futuro de maior acessibilidade para esse tipo de tecnologia. Os principais pontos passíveis de melhoria deste projeto são:

- Por ser muito fino, a camada de polímero espelhado apresentou imperfeições que causaram grandes perdas óticas. A utilização de outras soluções, como placas acrílicas espelhadas ou placas metálicas polidas, junto com novas formas de fixar a superfície refletora ao formato parabólico devem ser estudadas. Também existe a possibilidade de tentar corrigir as distorções da superfície refletiva do projeto atual alterando manualmente o formato da superfície concentradora parabólica. Sua construção em alumínio maleável permite isso.
- Realizar uma modelagem computacional para o projeto do absorvedor de calor, comparar com o método analítico proposto no atual trabalho e também comparar com experimentos.
- Determinar experimentalmente o fator de concentração do projeto ou de projetos futuros.
- Aprimorar o projeto do absorvedor. Existem variáveis envolvidas no processo de troca de calor de um dispositivo ótico que podem ser estudadas mais a fundo. Os projetos aprimorados podem ser fabricados e testados para comparação.
- Considerar as perdas por radiação e por convecção nas superfícies externas do absorvedor de calor. Essa é uma parte importante do projeto de um absorvedor de calor que não foi aprofundada no atual trabalho e que possui grande importância para o projeto do sistema.

- A técnica apresentada por Filho (2008), de fabricação de moldes em material reciclável e fibra de vidro para a confecção de um concentrador solar linear, mostrou bons resultados e poderia ser adaptada para a obtenção de discos parabólicos.
- Existe a possibilidade de realizar experimentos com o concentrador em um ambiente fechado, em condições controladas de temperatura, umidade e ventilação, com lâmpadas incandescentes. Tais experimentos forneceriam resultados experimentais mais confiáveis.
- A determinação das perdas de eficiência do atual projeto pode ser um trabalho futuro.
- Estudos para a utilização do fluido aquecido, que sai como produto do concentrador solar, como por exemplo, a energia solar térmica para a produção de frio, conhecido como refrigeração solar, ou a utilização em Ciclos de Rankine Orgânicos.
- Determinação de novos procedimentos experimentais. Realizar testes ao longo de vários meses, ou até um ano, para a determinação do potencial anual de geração de energia. Medir a umidade relativa do ar e sua influência na intensidade de radiação solar. Análise das incertezas nas medições.
- Desenvolver um pireliômetro para uma análise mais detalhada da eficiência do sistema.
- Projeto de uma guiagem eletrônica automatizada.

Conclui-se que o atual projeto atingiu seus objetivos iniciais, de projetar, construir e testar um concentrador solar de discos parabólicos, com sucesso. Fica ressaltada a importância da continuação dos estudos de sistemas semelhantes para um futuro em que as fontes de energia limpas e renováveis passem a ser a maior parcela da geração energética mundial.

# REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANEEL. **RELATÓRIOS DE CONSUMO É RECEITA DE DISTRIBUIÇÃO**. Disponível em: < <http://www.aneel.gov.br/relatorios-de-consumo-e-receita> >. Acesso em: 01/12/2020.
- BANGGOOD. Imagem de produto. Disponível em: < [https://www.banggood.com/10mX60cm-Mirrored-Wall-Paper-Contact-Paper-PVC-Decor-Sticker-Self-Adhesive-Silver-Gold-p-1358811.html?rmmds=myorder&cur\\_warehouse=CN](https://www.banggood.com/10mX60cm-Mirrored-Wall-Paper-Contact-Paper-PVC-Decor-Sticker-Self-Adhesive-Silver-Gold-p-1358811.html?rmmds=myorder&cur_warehouse=CN) > e < [https://www.banggood.com/FL-3308-130PSI-6L-or-Min-Water-High-Pressure-Diaphragm-Pump-Caravan-Boat-DC12V-p-1071746.html?rmmds=myorder&ID=514178&cur\\_warehouse=CN](https://www.banggood.com/FL-3308-130PSI-6L-or-Min-Water-High-Pressure-Diaphragm-Pump-Caravan-Boat-DC12V-p-1071746.html?rmmds=myorder&ID=514178&cur_warehouse=CN) >. Acesso em 25/11/2020.
- BETHEA, R. M; BARRIGER, M. T.; WILLIAMS, P. F.; CHIN, S. **ENVIRONMENTAL EFFECTS ON SOLAR CONCENTRATOR MIRRORS**. Crosbyton Solar Power Project, Texas Tech University. Solar Energy Vol. 27, No. 6, p. 497-511, 1981.
- CASTELLANOS, L. S. M. **MODELAGEM DE SISTEMAS DE GERAÇÃO DE ELETRICIDADE A PARTIR DE ENERGIA SOLAR UTILIZANDO PRATOS PARABÓLICOS E MOTORES STIRLING (DISH/STIRLING)**. Universidade Federal de Itajubá, 2012.
- CEBALLOS, J. C. **ESTIMATIVA DE RADIAÇÃO SOLAR À SUPERFÍCIE COM CÉU CLARO: UM MODELO SIMPLIFICADO**. Cachoeira Paulista, São Paulo. Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos, INPE. Revista Brasileira de Meteorologia, v. 15, n. 1, p. 113-122, 2000.
- CEMENTO, I. T. C. **LANA CAOLINICA, FIBRE CERAMICA REFRACTARIA**. Instituto Técnico de la Construcción i del Cemento, Últimos avances en materiales de construcción. Boletín de circulación limitada Vol. 7, nº 79 Febrero, 1957.
- CENTURY. Imagem de produto. Disponível em: < <https://www.centurybr.com.br/produtos/antena-md190> >. Acesso em: 25/11/2020.
- CHEN, F.; LI, M.; ZHANG, P.; LOU, X. **THERMAL PERFORMANCE OF A NOVEL LINEAR CAVITY ABSORBER FOR PARABOLIC TROUGH SOLAR CONCENTRATOR**. Energy conversion and management 90, 2015.
- CRESESB. **MANUAL DE ENGENHARIA PARA SISTEMAS FOTOVOLTAICOS**. Rio de Janeiro. Grupo de Trabalho de Energia Solar, CEPSEL. Edição Especial, PRC-PRODEEM, p. 23, 2004.
- DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. **SOLAR ENGINEERING OF THERMAL PROCESSES**. University of Wisconsin-Madison, Solar Energy Laboratory. 4. Ed Nova York: John Wiley & Sons, 2013.
- ECHAZÚ, R.; CADENA, C.; SARAVIA, L. **ESTUDIO DE MATERIALES REFLECTIVOS PARA CONCENTRADORES SOLARES**. INENCO, Universidad Nacional de Salta, Buenos Aires, 2000. Disponível em: < <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/79370> >. Acesso em: 21/10/2019.
- ELETRÔNICA, N. Como apontar Antena Parabólica usando o Google Maps. Disponível em: < <http://blog.novaeletronica.com.br/como-apontar-antena-para-satelite-usando-o-google-maps/> >. Acesso em: 25/11/2020.
- ENCRYPTED. Images. Disponível em: < [https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn%3AANd9GcTreNfVWuRueVr0iPvx4e9U3F5wq\\_d3YFPUoiWx2r-VPSObGzmJI](https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn%3AANd9GcTreNfVWuRueVr0iPvx4e9U3F5wq_d3YFPUoiWx2r-VPSObGzmJI) >. Acesso em: 25/11/2020.
- ENERGIA SOLAR. Disponível em: < [https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/34425580/Energia\\_Solar.pdf?response-content-disposition=inline%3B%20filename%3DENERGIA\\_SOLAR.pdf&X-Amz-Algorithm=AWS4-H](https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/34425580/Energia_Solar.pdf?response-content-disposition=inline%3B%20filename%3DENERGIA_SOLAR.pdf&X-Amz-Algorithm=AWS4-H) >

[MAC-SHA256&X-Amz-Credential=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A%2F20191022%2Fus-east-1%2Fs3%2Faws4\\_request&X-Amz-Date=20191022T032913Z&X-Amz-Expires=3600&X-Amz-SignedHeaders=host&X-Amz-Signature=87038cca43fe6ceed3b84eff7fb802bf518ed361b6c8df515002c63db4f6ca2d](https://www.mercadolivre.com.br/MLB-693740065-kit-manta-fibra-cermica-isolamento-termico-cola-adesivo- _JM#&gid=1&pid=4) >. Acesso em: 22/10/2019.

FILHO, J. R. de S. **PROJETO, CONSTRUÇÃO E LEVANTAMENTO DE DESEMPENHO DE UM CONCENTRADOR SOLAR CILINDRO PARABÓLICO COM MECANISMO AUTOMÁTICO DE RASTREAMENTO SOLAR.** Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2008.

FRAIDENRAICH, N. **TECNOLOGIA SOLAR NO BRASIL. OS PRÓXIMOS 20 ANOS.** Grupo de Pesquisas em Fontes Alternativas de Energia, Departamento de Energia Nuclear. Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, 2002. Disponível em: < [https://www.feagri.unicamp.br/energia/energia2002/jdownloads/pdf/papers/paper\\_Fraidendraich.pdf](https://www.feagri.unicamp.br/energia/energia2002/jdownloads/pdf/papers/paper_Fraidendraich.pdf) >. Acesso em: 22/10/2019.

HAAG, R. **DESENVOLVIMENTO DE UM RADIÔMETRO ESPECTRAL E METODOLOGIA PARA CARACTERIZAÇÃO DO ESPECTRO SOLAR.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2007.

INPE. **ATLAS BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR.** Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. 2. ed. São José dos Campos, Brasil, 2017.

IPCC **CLIMATE CHANGE 2014: SYNTHESIS REPORT.** Contribution of Working Groups I, II, and III to the Fifth Assessment Report to the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva: IPCC, p. 3, 2015.

KAMIUTO, K. **TWO-PARAMETER FORMULA FOR THE TOTAL EFFECTIVE THERMAL CONDUCTIVITIES OF CERAMIC-FIBER INSULATIONS.** Solar Energy Thermal Applications Laboratory, Oita University, Oita 870-11, Japan, 1990.

KAUSHIKA, N. D.; REDDY, K. S. **PERFORMANCE OF A LOW COST SOLAR PARABOLOIDAL DISH STEAM.** Energy Conversion and Management. Elsevier Science Ltd, 1999.

KEERTHAN, P.; MAHENDRAN, M. **THERMAL PERFORMANCE OF COMPOSITE PANELS UNDER FIRE CONDITIONS USING NUMERICAL STUDIES: PLASTERBOARDS, ROCKWOOL, GLASS FIBER AND CELLULOSE INSULATIONS.** Science and Engineering Faculty, Queensland University of Technology, Brisbane, QLD 4000, Australia, 2012.

LARSEN, F. F.; ALTAMIRANO, M.; HERNÁNDEZ, A. **HEAT LOSS OF A TRAPEZOIDAL CAVITY ABSORBER FOR A LINEAR FRESNEL REFLECTING SOLAR CONCENTRATOR.** Renewable Energy 39, 2012.

LI, R.; LI, C.; HE, S.; DI, M.; YANG, D. **RADIATION EFFECT OF KEV PROTONS ON OPTICAL PROPERTIES OF ALUMINIZED KAPTON FILM.** Radiation physics and chemistry 76, 2007.

LIVRE, M. Imagem de produto. Disponível em: < [https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-693740065-kit-manta-fibra-cermica-isolamento-termico-cola-adesivo- \\_JM#&gid=1&pid=4](https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-693740065-kit-manta-fibra-cermica-isolamento-termico-cola-adesivo- _JM#&gid=1&pid=4) >, < [https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-1549325937-tubo-cobre-eluma-14-635mm-x-079mm-10-metros-2-porcas- \\_JM](https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-1549325937-tubo-cobre-eluma-14-635mm-x-079mm-10-metros-2-porcas- _JM) > e < [https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-1243579083-3-tinta-spray-alta-temperatura-preto-fosco-chemicolor-350ml- \\_JM](https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-1243579083-3-tinta-spray-alta-temperatura-preto-fosco-chemicolor-350ml- _JM) >. Acesso em: 25/11/2020.

MOGHIMI, M. A.; CRAIG, K. J.; MEYER, J. P. **OPTIMIZATION OF A TRAPEZOIDAL CAVITY ABSORBER FOR THE LINEAR FRESNEL REFLECTOR.** Solar Energy 119, 2015.



- PARKER, E. N. **REFLECTIONS ON MACROPHYSICS AND THE SUN:** (Special Historical Review). Enrico Fermi Institute and Departments of Physics and of Astronomy, University of Chicago. Solar Physics, v. 176, p. 219–247, 1997.
- REYNOLDS, D. J.; JANCE, M. J.; BEHNIA, M.; MORRISON, G. L. **AN EXPERIMENTAL AND COMPUTATIONAL STUDY OF THE HEAT LOSS CHARACTERISTICS OF A TRAPEZOIDAL CAVITY ABSORBER.** SOLAR ENERGY 76, 2004.
- SCHLYTER, P. **Radiometry and photometry in astronomy.** Stockholm, Sweden, 2017. Disponível em: < <http://stjarnhimlen.se/comp/radfaq.html#10> >. Acesso em 27/11/2020.
- SERAJI, M. M.; KIANERSI, S.; HOSSEINI, S. H.; DAVARPANAH, J.; ELAHI, S. **PERFORMANCE EVALUATION OF GLASS AND ROCKWOOL FIBERS TO IMPROVE THERMAL STABILITY AND MECHANICAL STRENGTH OF MONOLITHIC PHENOL-FORMALDEHYDE BASED CARBON AEROGELS.** Journal of Non-Crystalline Solids 491, 2018.
- SINGH, P. L.; SARVIYA, R. M.; BHAGORIA, J. L. **THERMAL PERFORMANCE OF LINEAR FRESNEL REFLECTING SOLAR CONCENTRATOR WITH TRAPEZOIDAL CAVITY ABSORBERS.** Applied Energy 87, 2010.
- SOUZA, P. H. A. I. **APRESENTAÇÃO DOS CÁLCULOS PARA SELEÇÃO DE BOMBA PARA SISTEMA DE REAPROVEITAMENTO DE ÁGUA DE POÇOS ARTESIANOS.** Escola politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2014.
- SOUZA, R. B. et al. **INFLUÊNCIA DAS VARIÁVEIS ATMOSFÉRICAS NA DEGRADAÇÃO DOS MATERIAIS DA CONSTRUÇÃO CIVIL.** Revista Eletrônica de Engenharia Civil, v. 13, n. 1, 2017. Disponível em: < <https://doi.org/10.5216/reec.v13i1.41448> >. Acesso em: 22/10/2019.
- WENZEL, T. A. **ANÁLISE TERMODINÂMICA E SIMULAÇÃO DE UM CICLO RANKINE ORGÂNICO.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2015.
- WIKIPEDIA. Solar Energy Generating Systems. Disponível em: < [https://en.wikipedia.org/wiki/Solar\\_Energy\\_Generating\\_Systems](https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_Energy_Generating_Systems) >. Acesso em: 25/11/2020.
- XIAO, X.; ZHANG, P.; SHAO, D. D.; LI, M. **EXPERIMENTAL AND NUMERICAL HEAT TRANSFER ANALYSIS OF A V-CAVITY ABSORBER FOR LINEAR PARABOLIC TROUGH SOLAR COLLECTOR.** Energy Conversion and Management 86, 2014.

# ANEXOS

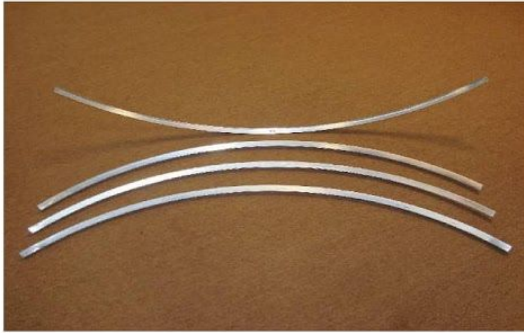
		Pág.
<b>Anexo I</b>	<b>Manual da antena MD190 Century</b>	50
<b>Anexo II</b>	<b>Código em Octave: absortancia_efetiva5.m</b>	58
<b>Anexo III</b>	<b>Cálculos do Absorvedor de Calor</b>	63
<b>Anexo IV</b>	<b>DT's de fabricação do Absorvedor de Calor</b>	66
<b>Anexo V</b>	<b>Condutividade térmica do cobre</b>	71
<b>Anexo VI</b>	<b>Código em Octave: curva_caracteristica</b>	72
<b>Anexo VII</b>	<b>Calibração dos sensores</b>	75
<b>Anexo VIII</b>	<b>Código em Arduino IDE: DS18x20_Temperature_and_Flow</b>	82
<b>Anexo IX</b>	<b>Código em Octave: tsts</b>	86
<b>Anexo X</b>	<b>Resultados experimentais</b>	113



Peças e Componentes da Antena



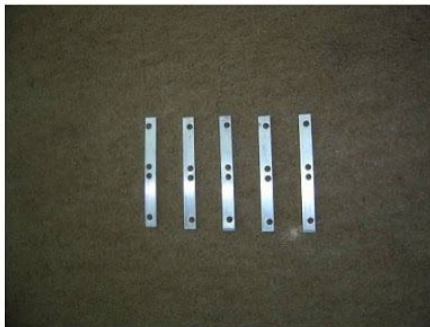
DISCOS – Superior e Inferior



**Anel de Fechamento**



**Longarinas**



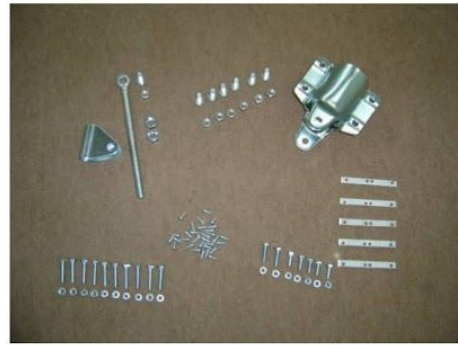
**Chapas de Emenda**



**Suporte do LNB**



**Kit de Parafusos**



**Detalhe do Kit de Parafusos**



**Jogo de Telas**

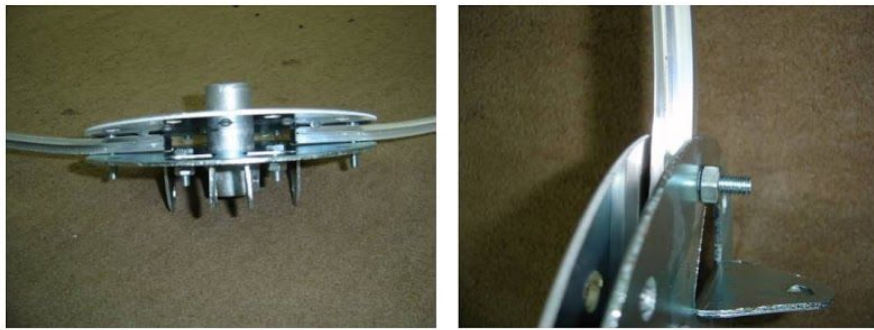


**Capa protetora para LNBF  
(acompanha o produto)**



## Montagem da Antena

Separados os materiais, iniciar a montagem da antena conforme sequência abaixo.



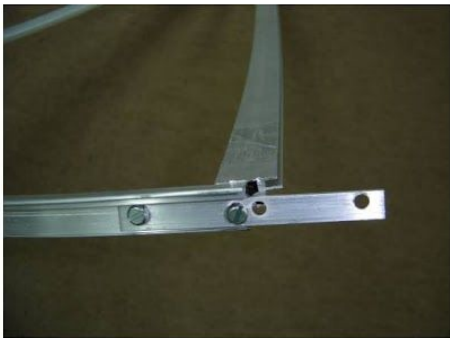
Colocar as longarinas entre os discos - Detalhe



Longarinas colocadas



**Fixação das Chapa de Emenda**



**Fixação das longarinas nos beirais**



**Estrutura da Antena montada**





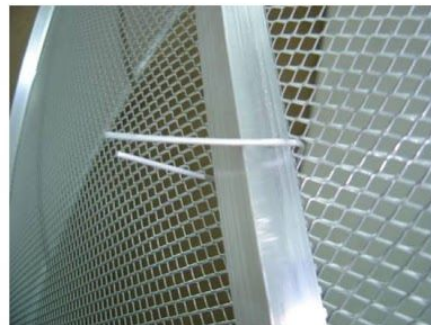
**Colocação das Telas nas longarinas**



**Aperto final no disco – Não esmagar a ponta da longarina**



**Grampos de Alumínio**



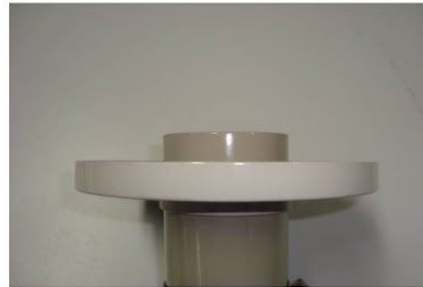
**Colocação do Grampo na tela**



**Colocação dos Grampos**



**Fixação da Antena no Tubo**



**Montagem do LNBF no disco e fixação no suporte de LNBF**



Após a montagem da antena e fixação no tubo, deve-se apontar a antena, verificando a posição de Azimute e Elevação para a cidade onde a Antena está localizada e o satélite. No caso dos sinais analógicos o satélite é o Star One C2 e o programa de cálculo de apontamento está disponível em nosso site [www.centurybr.com.br](http://www.centurybr.com.br)

Também é possível acessar em nosso site um filme que traz maiores detalhes sobre a montagem das Antenas Parabólicas Century.

## ANEXO II: Código em Octave: absortancia\_efetiva5.m

```
clear
clc
printf('Variáveis Globais: \n')
printf('Diâmetro da cavidade (mm):          ')
d = 70                                     %diâmetro da cavidade do absorvedor
(mm)%
printf('Altura máxima do absorvedor (mm):    ')
Amax = 75
printf('Largura/Diâmetro máximo do absorvedor(mm):  ')
Lmax = 200
printf('Absortância do revestimento interno (%%):    ')
ai = 0.9                                   %absortância interna do absorvedor,
determinada pela tinta usada (valor de 0 até 1)%
Aa = pi*(d/2)**2;                          %Área da cavidade do absorvedor,
determinada por d (mm^2)%
aeff0 = 0;                                 %Absortância efetiva do absorvedor de calor
para o formato cúbico(%), aqui é bom começar sendo 0, pois esse valor vai ser modificado pelo
código%
aeff0_ci=0;                                %Absortância efetiva do absorvedor de
calor para o formato cilíndrico(%), aqui é bom começar sendo 0, pois esse valor vai ser modificado
pelo código%
aeff0_es=0;                                %Absortância efetiva do absorvedor de
calor para o formato esférico(%), aqui é bom começar sendo 0, pois esse valor vai ser modificado pelo
código%
printf('Espessura do isolante térmico (mm):      ')
e_i = 22.5                                 %Espessura do revestimento de isolante
térmico (mm)%
printf('Diâmetro do concentrador solar (mm):    ')
d_c = 1900                                  %diâmetro do coletor solar (mm)%
A_c = pi*(d_c/2)**2;                       %Área do coletor solar (mm^2)%
%cria uma matriz identidade 500x500 que será utilizada pelo código para plotar gráficos%

printf('\n\n')

%cálculo da eficiência para o formato esférico

for diametro_es= (d+1):1:Lmax
    Ai_es = (4*pi*((diametro_es/2)**2) -
(2*pi*(diametro_es/2)*((2*(diametro_es/2))-sqrt(((2*(diametro_es/2)**2)-(4*((d/2)**2)))/2)));
%calcula a área interna da esfera (mm^2)%
    if (diametro_es+2*e_i)>=180
```

```

    Aes=(pi*((diametro_es/2)+e_i)**2)/A_c;
else
    Aes=(pi*(90**2))/A_c;
endif
aeff_es = (ai/(ai+(1-ai)*(Aa/Ai_es)));
matri_es(diametro_es)=(aeff_es-Aes);
if aeff_es-Aes>aeff0_es
    diametro0_es=diametro_es;
    aeff0_es = aeff_es-Aes;
endif
endfor

%cálculo da eficiência para o formato cilíndrico

for altura_ci= 1:1:Amax %varia a altura do cilindro (mm)%
    for diametro_ci= d:1:Lmax %varia a largura do cilindro (mm).
    Aqui largura e comprimento são considerados iguais devido à simetria axial%
        Ai_ci = 2*(pi*(diametro_ci/2)**2) + altura_ci*(2*pi*(diametro_ci/2)) - Aa;%calcula a área
        interna do cilindro (m^2)%
        if (diametro_ci+2*e_i)>180
            aeff_ci = (ai/(ai+(1-ai)*(Aa/Ai_ci))) - (pi*((diametro_ci/2)+e_i)**2)/A_c;%calcula a
            absortância efetiva do absorvedor para o cilindro, já considerando a sombra produzida no coletor solar
            (%)%
        else
            aeff_ci = (ai/(ai+(1-ai)*(Aa/Ai_ci))) - (pi*(90**2))/A_c;
        endif
        if aeff_ci>aeff0_ci %substitui aeff0 com o maior valor de
        absortância para o cilindro até o momento%
            aeff0_ci=aeff_ci; %indica o maior valor de aeff para o
            cilindro até o momento%
            diametro0_ci = diametro_ci; %indica o valor do diametro que
            obteve o maior valor de aeff para o cilindro até o momento%
            altura0_ci = altura_ci; %indica o valor da altura que obteve o
            maior valor de aeff para o cilindro até o momento%
        endif
        matri_ci(altura_ci,diametro_ci)=(aeff_ci);
    endfor
endfor

%cálculo da eficiência para o formato cúbico

```

```

for altura= 1:1:Amx                                %varia a altura do cubo (mm)%
    for largura= d:1:Lmax                            %varia a largura do cubo (mm). Aqui
largura e comprimento são considerados iguais devido à simetria axial%
        Ai = 2*(largura*altura + largura*largura + altura*largura) - Aa;    %calcula a área interna
do cubo (m^2)%
        if sqrt((((largura/2)+e_i)**2)*2)>90
                aeff = (ai/(ai+(1-ai)*(Aa/Ai))) - ((pi*(90**2))/A_c) -
                (((sqrt((((largura/2)+e_i)**2)*2))-90)**2)*5.4)/A_c;%calcula uma aproximação da área que o
absorvedor irá obstruir considerando que a antena já possui uma região de 180mm de diâmetro que
não possuirá espelho no centro da parábola(%)%
                %é interessante uma explicação para a equação acima: o concentrador possui um disco no seu
centro que serve para a fixação dos braços e das pétalas. Esse disco possui 18cm de diâmetro e não
será espelhado. Foi considerado, tanto para essa quanto para as outras geometrias, que esse disco é
uma
                % "sombra natural" no concentrador, assim sendo, se o absorvedor for menor do que esse disco, a
sombra dele não irá influenciar na eficiência total do concentrador. Para as geometrias cilíndrica e
esférica é fácil determinar se a sombra do absorvedor é menor ou maior que esse disco central do
                %coletor. Agora, para o formato cúbico, existe a situação em que a sombra do cubo está inscrita
no disco, a que a sombra cobre completamente o disco e a intermediária, em que parte da sombra
cobre parte do disco e parte não. A equação acima aproxima justamente esse caso. É calculada a
eficiência
                %do absorvedor, logo após é subtraída a área do disco e depois subtraída a área de pequenos
triângulos que são as pontas da sombra do cubo que não estão inscritas ao disco central. Após o
cálculo desses triângulos é acrescentado um fator de multiplicação igual a 5.4, que se deve ao fato de
serem
                %4 triângulos multiplicados por um fator de 1.35, que é o maior erro possível de acontecer nessa
aproximação. Dessa forma o valor encontrado para a absorvância efetiva do cubo nessas condições
jamais será maior do que o real, podendo ser igual ou ligeiramente menor (no máximo, mas para a
maioria
                %dos casos muito menos do que isso, 0.194% menor, sendo esse erro máximo quando a menor
sombra da ponta do cubo está para fora do disco central e mínimo (0.00%) quando a sombra do cubo
está quase cobrindo completamente o disco central).%
                endif
                if (largura+2*e_i)>=180
                        aeff = (ai/(ai+(1-ai)*(Aa/Ai))) - ((largura+2*e_i)*(largura+2*e_i))/A_c;    %calcula a
absorvância efetiva do absorvedor, já considerando a sombra produzida no coletor solar (%)%
                endif
                if sqrt((((largura/2)+e_i)**2)*2)<=90
                        aeff = (ai/(ai+(1-ai)*(Aa/Ai))) - (pi*(90**2))/A_c;                                %calcula a absorvância efetiva
do absorvedor, considerando que ele é menor do que o disco central do concentrador solar que não
será espelhado (%)%
                endif
                if aeff>aeff0                            %substitui aeff0 com o maior valor de
absorvância até o momento%

```

```

        aeff0=aeff;                                %indica o maior valor de aeff até o
momento%
        largura0 = largura;                          %indica o valor da largura que obteve o
maior valor de aeff até o momento%
        altura0 = altura;                            %indica o valor da altura que obteve o
maior valor de aeff até o momento%
    endif
    matri(altura,largura)=(aeff);
endfor
endfor

matri_ci(:,[1:d-1])=[];
matri(:,[1:d-1])=[];
aeff0_es=max(matri_es);
%aeff0_es
%aeff0_ci
%aeff0

max1=max(aeff0_ci,aeff0_es);
max2=max(aeff0,aeff0_es);
max3=max(aeff0,aeff0_ci);

if aeff0>max1
    figure
    mesh(matri)
    title('Absortância Efetiva Para o Formato Cúbico')
    ylabel ('Altura (mm)')
    xlabel ('Largura (mm)')
    zlabel ('Aeff')
    diametro=largura0;
    altura=altura0;
    printf('A melhor geometria é: cúbica\n')
    printf('Eficiência máxima (%%):          ')
    aeff0                                     %mostra a absortância efetiva máxima do
absorvedor de calor encontrada para o formato cúbico(%%)%
    printf('Largura (mm):          ')
    largura0                                 %mostra a largura que forneceu a absortância
efetiva máxima do absorvedor de calor para o formato cúbico(mm)%
    printf('Altura (mm):          ')

```



```

    altura0
endif
if aeff0_ci>max2
    figure
    mesh(matri_ci)
    title('Absortância Efetiva Para o Formato Cilíndrico')
    ylabel ('Altura (mm)')
    xlabel ('Diâmetro (mm)')
    zlabel ('Aeff')
    diametro=diametro0_ci;
    altura=altura0_ci;
    printf('A melhor geometria é: cilíndrica\n')
    printf('Eficiência máxima (%%):          ')
    aeff0_ci                                %mostra a absortância efetiva máxima do
absorvedor de calor encontrada para o formato cilíndrico(%%)%
    printf('Diâmetro (mm):          ')
    diametro0_ci                            %mostra a largura que forneceu a
absortância efetiva máxima do absorvedor de calor para o formato cilíndrico (mm)%
    printf('Altura (mm):          ')
    altura0_ci
endif
if aeff0_es>max3
    figure
    plot(matri_es)
    title('Absortância Efetiva Para o Formato Esférico')
    ylabel ('Aeff')
    xlabel ('Raio (mm)')
    diametro=diametro0_es;
    altura=diametro0_ci;
    printf('A melhor geometria é: esférica\n')
    printf('Eficiência máxima (%%):          ')
    aeff0_es                                %mostra a absortância efetiva máxima do
absorvedor de calor encontrada para o formato esférico(%%)%
    printf('Diâmetro (mm):          ')
    diametro0_es
endif
printf('\n\n')

```

### Absorvedor Esférico:

Para o cálculo das áreas internas de um absorvedor de calor esférico foi usada a fórmula para a área de uma esfera:

$$A_{esf} = 4\pi R^2$$

Onde  $A_{esf}$  é a área da esfera e  $R$  o raio da mesma. Foi usada também a fórmula para a área de uma calota:

$$A_c = 2\pi R h$$

Onde  $A_c$  é a área da calota e  $h$  é a altura da calota, conforme a figura (III.1).

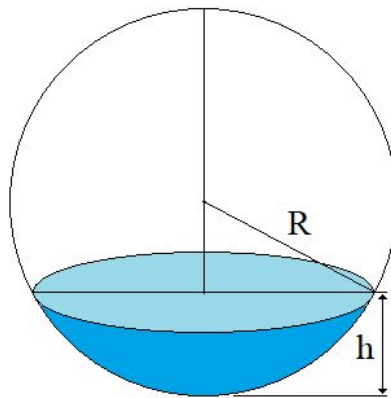


Figura III.1 - Área da calota.

A altura  $h$  da calota foi determinada para cada diâmetro da esfera como a altura que corresponderia a um furo de 70 mm de diâmetro para a cavidade do absorvedor, conforme o indicado:

$$R^2 = 35^2 + (R - h)^2$$

Logo,

$$h^2 - 2hR + 1225 = 0$$

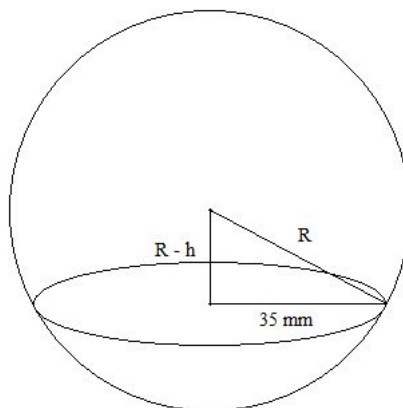


Figura III.2 - Cálculo de h.

### Absorvedor Cilíndrico:

Para o cálculo das áreas internas de um absorvedor cilíndrico, foi utilizada a fórmula:

$$A_{cil} = 2 \cdot \pi \cdot [(D/2)^2 + (D/2) \cdot a] - \pi \cdot (d/2)^2$$

Onde  $D$  é o diâmetro do cilindro,  $a$  é a altura do cilindro e  $d$  é o diâmetro da cavidade por onde a luz do concentrador parabólico irá adentrar o absorvedor de calor.

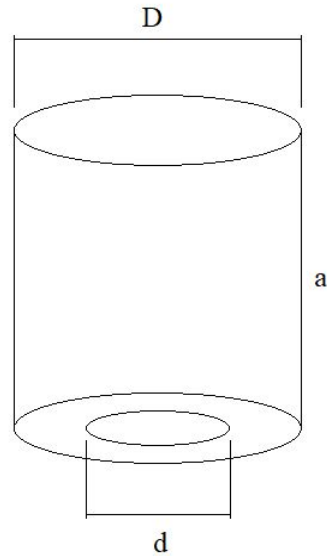


Figura III.3 - Cálculo da área interna do cilindro.

### Absorvedor Cúbico:

Para o cálculo das áreas internas do absorvedor cúbico, foi utilizada a fórmula:

$$A_{cubo} = 2 \cdot (a \cdot l + a \cdot c + l \cdot c) - \pi \cdot (d/2)^2$$

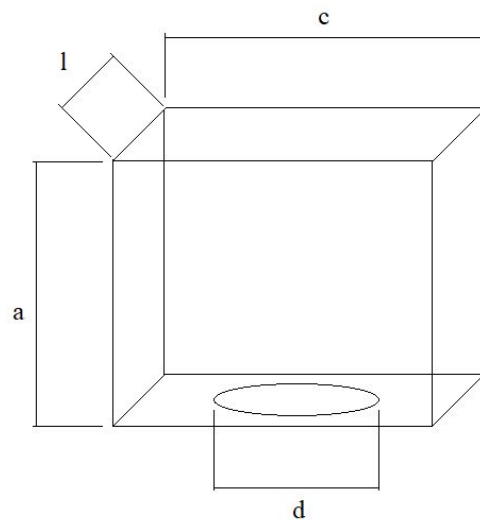


Figura III.4 - Cálculo da área interna do cubo.

Onde  $a$  é a altura do cubo,  $l$  é a largura do cubo,  $c$  é o comprimento do cubo e  $d$  é o diâmetro da cavidade por onde a luz do concentrador parabólico irá adentrar o absorvedor de calor.

Com a área interna de cada absorvedor, foi possível o cálculo do coeficiente de absorção efetivo,  $\alpha_{eff}$ , de acordo com a equação de Duffie e Beckman (2013, p. 197) indicada na página 25 deste trabalho.

### **Efeito da Sombra:**

Para levar em consideração a perda de coleta de luz gerada pela sombra do absorvedor de calor no concentrador parabólico, considerou-se a área da maior seção transversal ortogonal ao eixo óptico do conjunto. Essa área também inclui os componentes relacionados à espessura do revestimento isolante térmico de lã de cerâmica e exclui a área de um círculo de 18 cm de diâmetro no centro do concentrador, pois essa área é ocupada pelos discos da superfície concentradora parabólica e não é coberta pela superfície espelhada.

$$\alpha_s = \alpha_{eff} - A_s/A_c$$

Onde  $\alpha_s$  é o coeficiente de absorção efetivo com sombra,  $A_s$  é a área de sombra gerada pelo absorvedor de calor e  $A_c$  é a área total de coleta de luz do concentrador parabólico.  $A_c = 2.830.000 \text{ mm}^2$ , como demonstrado no capítulo 4.2. Os valores de  $A_s$  serão dados por:

#### **Para a esfera:**

$$A_s = \pi(R + 20)^2$$

#### **Para o cilindro:**

$$A_s = \pi[(D/2) + 20]^2$$

#### **Para o cubo:**

$$A_s = (l + 40) \cdot (c + 40)$$

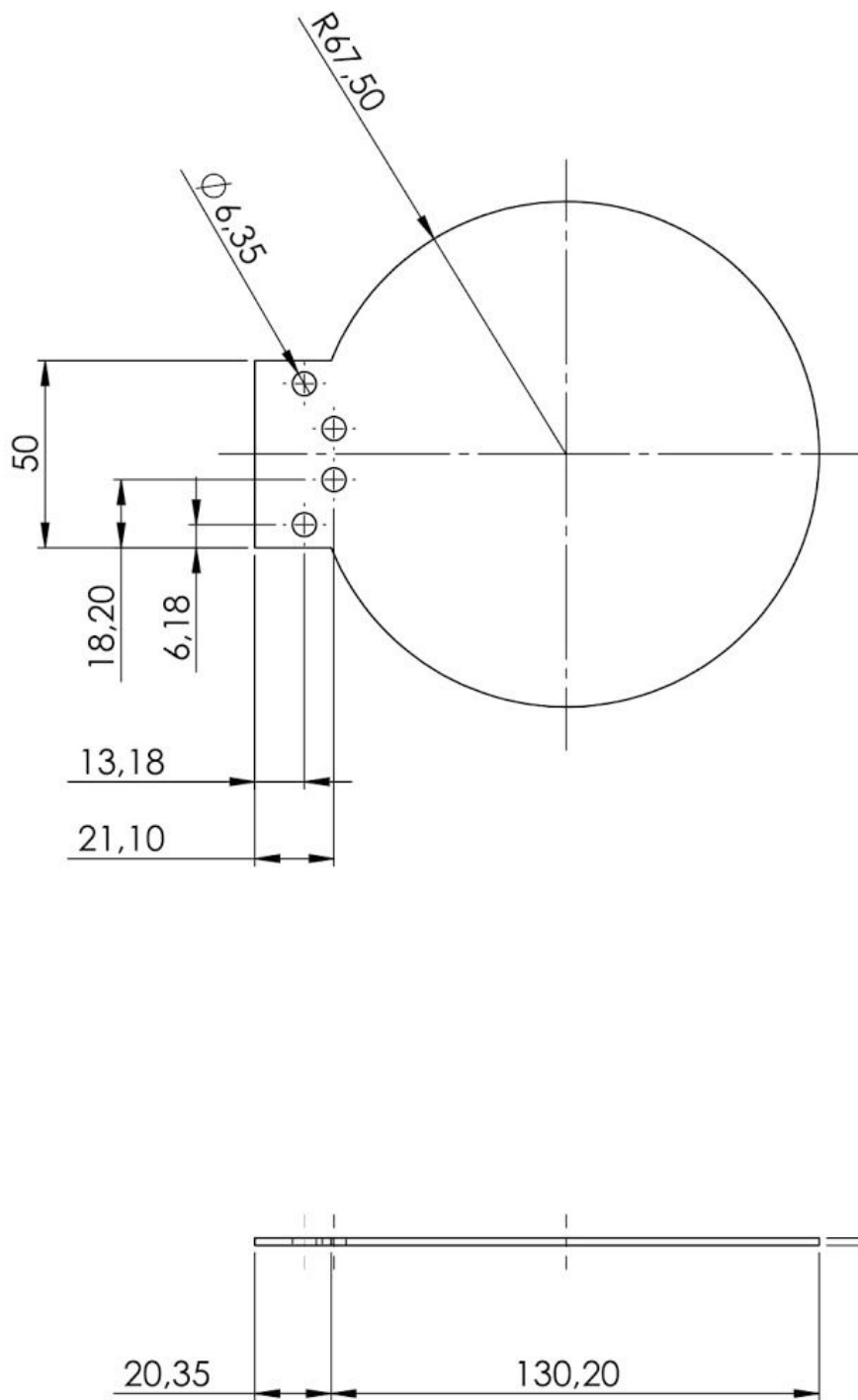
Dessa forma, foi possível traçar os gráficos dos coeficientes de absorção efetivos com sombra em relação às dimensões dos absorvedores. Os valores de  $\alpha_{eff}$  apresentados no capítulo 4 já levam em consideração essa perda causada pela sombra e, por simplicidade, não recebeu o nome de  $\alpha_s$ .

### **Influência das perdas de calor por radiação e convecção:**

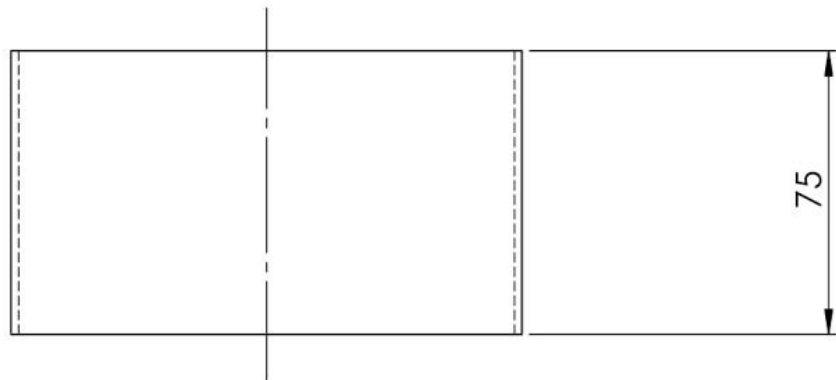
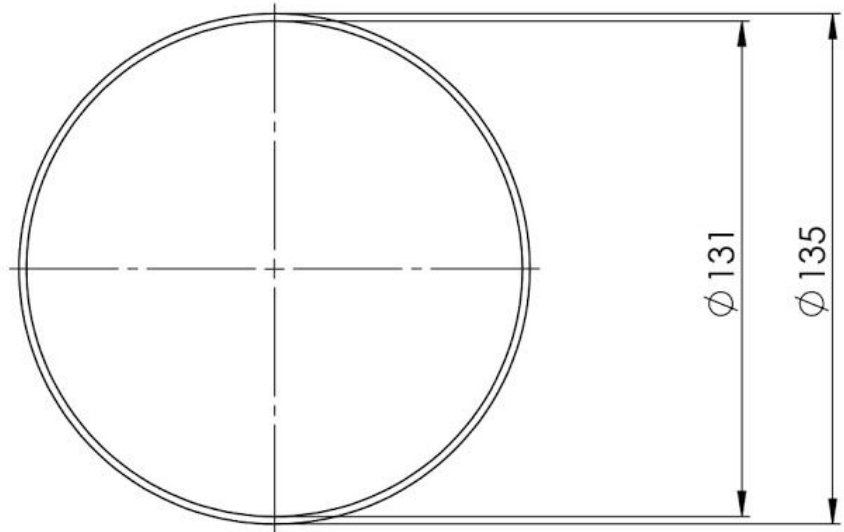
A perda de calor por condução pode ser desconsiderada por ser muito inferior às outras grandezas envolvidas.

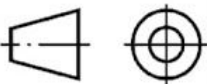
## **ANEXO IV: DT's de fabricação do Absorvedor de Calor**

---

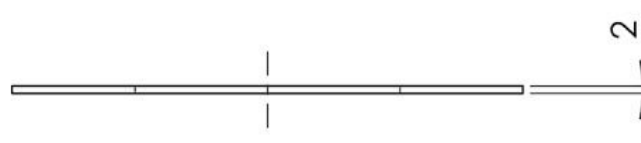
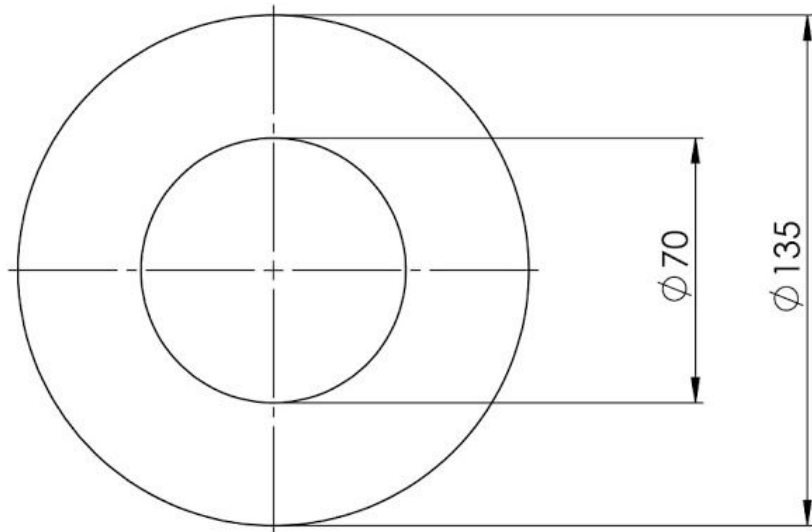


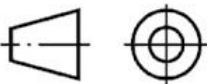
UnB	Faculdade de Tecnologia - Departamento de Engenharia Mecânica		
	Projeto de Graduação 2 - Concentrador Solar Parabólico		
Orientador:	João Manoel Dias Pimenta	Data:	Unidade: mm
Desenhista:	Fernando Falkenberg Marques	23/09/2020	
Material:	Corte em chapa de Aço 2mm	Escala: 1:2	
	Absorvedor de Calor - peça 1	FOLHA 1 de 3	
		NBR ISO 2768-mK	

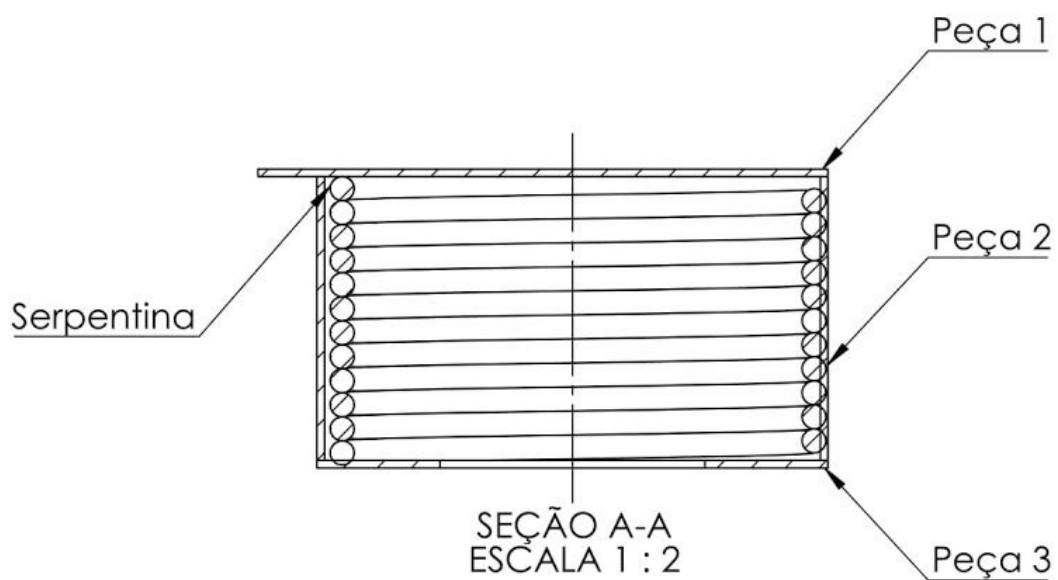
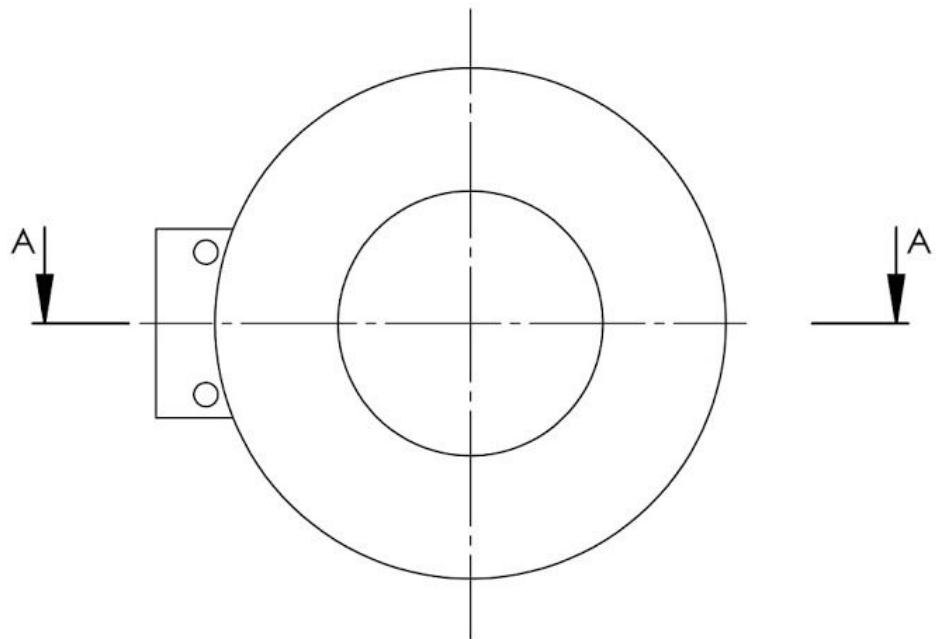


UnB	Faculdade de Tecnologia - Departamento de Engenharia Mecânica		
	Projeto de Graduação 2 - Concentrador Solar Parabólico		
Orientador:	João Manoel Dias Pimenta	Data:	Unidade: mm
Desenhista:	Fernando Falkenberg Marques	23/09/2020	
Material:	Corte e calandragem em chapa de Aço 2mm	Escala: 1:2	
	Absorvedor de Calor - peça 2	FOLHA 2 de 3	
		NBR ISO 2768-mK	





UnB	Faculdade de Tecnologia - Departamento de Engenharia Mecânica		
	Projeto de Graduação 2 - Concentrador Solar Parabólico		
Orientador:	João Manoel Dias Pimenta	Data:	Unidade: mm
Desenhista:	Fernando Falkenberg Marques	23/09/2020	
Material:	Corte em chapa de Aço 2mm	Escala: 1:2	
	Absorvedor de Calor - peça 3	FOLHA 3 de 3	
		NBR ISO 2768-mK	



UnB	Faculdade de Tecnologia - Departamento de Engenharia Mecânica		
	Projeto de Graduação 2 - Concentrador Solar Parabólico		
Orientador:	João Manoel Dias Pimenta	Data: 23/09/2020	Unidade: mm
Desenhista:	Fernando Falkenberg Marques	Escala: 1:2	
	Montagem - Absorvedor de Calor	FOLHA 1 de 1	
		NBR ISO 2768-mK	

## ANEXO V: Condutividade térmica do cobre

---

### Condutividade térmica de materiais a 27 °C (300 K)

Material	Condutividade térmica (K)
metais	$[K] = W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1} (J \cdot s^{-1} \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$
Grafeno	4115 <sup>[4]</sup> (Valor Médio)
Alumínio	237 <sup>[5]</sup>
Cobre	401 <sup>[5]</sup>
Ferro	80,2 <sup>[5]</sup>
Ouro	317 <sup>[5]</sup>
Prata	429 <sup>[5]</sup>
Tungstênio	174 <sup>[5]</sup>
outros materiais	$[K] = W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1} (J \cdot s^{-1} \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$
Grafite pirolítico	195 (planar) <sup>[5]</sup> 5,70 (perpendicular) <sup>[5]</sup>
Vidro	0,79 (valor médio)
Tijolo	0,6 (valor médio)
Madeira (pinho)	0,13 (valor médio)
Fibra de vidro	0,05
Epoxi	0,30 (cargueada com sílica) 0,15 (não cargueada) <sup>[6][7]</sup>
Espuma de poliestireno	0,03
Polipropileno	0,25 <sup>[8]</sup>
Espuma de poliuretano	0,02
Água	0,61
Ar	0,03

Fonte: < [https://pt.wikipedia.org/wiki/Condutividade\\_t%C3%A9rmica](https://pt.wikipedia.org/wiki/Condutividade_t%C3%A9rmica) >, acesso em 22/12/2020.

## ANEXO VI: Código em Octave: curva\_caracteristica

---

```
printf('\n\n')

printf('Variáveis Globais: \n')

printf('Aceleração da gravidade (m/s^2):      ')
g = 9.81

printf('\n\n')

printf('Variáveis do Fluido: \n')

printf('Massa Específica (kg/m^3):            ')
ro = 998
printf('Viscosidade Absoluta (Pa*s):          ')
mu = 0.001
printf('Viscosidade Cinemática:                ')
nu = 0

printf('\n\n')

printf('Variáveis do Sistema: \n')

d_t = 25.4/4000;                                %diâmetro externo do tubo da
serpentina (m)%

e_p = 0.79/1000;                                %espessura da parede da serpentina
(m)%

n = fix((altura/1000)/d_t);                      %número de espiras da
serpentina (adimensional)%

a_h = 0.8;                                       %altura da haste (m)%

printf('Diâmetro Interno do Tubo (m):      ')
D = d_t - 2*e_p
printf('Área Interna do Tubo (m^2):         ')
A = pi*(D/2)**2
printf('Comprimento do Tubo (m):           ')
L = 2*pi*(diametro/2000)*n + 2*a_h
```

```

Ltot = n*4*0.13;
printf('Rugosidade do Tubo (m):          ')
e = 0
f = e/D;
printf('Vazão Mínima(ml/s):            ')
Qmi = 1
printf('Vazão Máxima(ml/s):           ')
Qma = 100
printf('Velocidade do Escoamento Mínima (m/s):    ')
Vmi = (Qmi/1000000)/A
printf('Velocidade do Escoamento Máxima (m/s):    ')
Vma = (Qma/1000000)/A

printf('\n\n')

for Q = Qmi:1:Qma

V=(Q/1000000)/A;

Re = ro*V*D/mu;

if Re < 2000
    f = 64/Re;
endif
if Re > 4000
    f = 0.1;                %diagrama de moody
endif

%Darcy-Weisbach
hfr = f * (L/D) * (V**2)/(2*g);
hfl = f * (Ltot/D) * (V**2)/(2*g);
hf = hfr +hfl;

hs=0;
hd=hf;

H=hd-hs;

```

```
caracteristica(Q)=(H);
```

```
curva(Q)=(Q);
```

```
endfor
```

```
bomba = linspace(130,75,100);
```

```
figure
```

```
plot((curva*60)/1000,caracteristica*1.42229517324,";Sistema;",(curva*60)/1000,bomba,";Bo  
mba;")
```

```
title('Curvas Características do Sistema e da Bomba')
```

```
ylabel ('Pressão (PSI)')
```

```
xlabel ('Vazão (l/m)')
```

## ANEXO VII: Calibração dos sensores

---

O método utilizado para a calibração dos sensores de temperatura consiste em colocar todos os cinco sensores em um banho de gelo e medir suas temperaturas durante tempo suficiente para que não variem de forma significativa. Adicionalmente o mesmo procedimento é feito em com um banho de água fervente. Os dados de temperatura de cada sensor são lidos a cada segundo pela placa arduino UNO e salvos em um arquivo .txt em um computador. Para analisar os dados coletados, um código em Octave é utilizado.

Código calibtemp:

```
clear
clc

x = load('dtbfbq');

r=rows(x);

a=[1:5:r];
b=[2:5:r];
c=[3:5:r];
d=[4:5:r];
e=[5:5:r];

x_a=x(a,:);
x_b=x(b,:);
x_c=x(c,:);
x_d=x(d,:);
x_e=x(e,:);

temp(:,1)=[x_a(:,2)];
temp(:,2)=[x_b(:,2)];
temp(:,3)=[x_c(:,2)];
temp(:,4)=[x_d(:,2)];
temp(:,5)=[x_e(:,2)];

figure
plot(temp)

zero=temp(30:109,:);
```



```
figure
```

```
plot(zero)
```

```
max=temp(358:413,:);
```

```
figure
```

```
plot(max)
```

```
med_zero_a=(sum(zero(:,1))/80)
```

```
med_zero_b=(sum(zero(:,2))/80)
```

```
med_zero_c=(sum(zero(:,3))/80)
```

```
med_zero_d=(sum(zero(:,4))/80)
```

```
med_zero_e=(sum(zero(:,5))/80)
```

```
printf('\n')
```

```
med_zero=(med_zero_a+med_zero_b+med_zero_c+med_zero_d+med_zero_e)/5
```

```
printf('\n\n')
```

```
med_max_a=(sum(max(:,1))/56)
```

```
med_max_b=(sum(max(:,2))/56)
```

```
med_max_c=(sum(max(:,3))/56)
```

```
med_max_d=(sum(max(:,4))/56)
```

```
med_max_e=(sum(max(:,5))/56)
```

```
printf('\n')
```

```
med_max=(med_max_a+med_max_b+med_max_c+med_max_d+med_max_e)/5
```

```
printf('\n\n')
```

```
med_a=(med_zero_a+med_max_a)/2;
```

```
med_b=(med_zero_b+med_max_b)/2;
```

```
med_c=(med_zero_c+med_max_c)/2;
```

```
med_d=(med_zero_d+med_max_d)/2;
```

```
med_e=(med_zero_e+med_max_e)/2;
```

```
med=(med_zero+med_max)/2;
```

```
aa=med_a-med
```

```
bb=med_b-med
```

```
cc=med_c-med
```

```
dd=med_d-med
```

```
ee=med_e-med
```

O código cria um gráfico com as temperaturas registradas por cada sensor, como mostra a figura X.1. Logo no começo as temperaturas ficaram estáveis próximas de 0 °C. Posteriormente uma chama é ligada para aquecer a água. Durante o aquecimento os sensores de temperatura apresentam discordâncias maiores pois eles estavam em lugares diferentes do recipiente, alguns em contato direto com o fundo aquecido pela chama, outros em contato direto com pedaços de gelo que ainda não haviam derretido. Quando todos os pedaços de gelo derreteram, as discordâncias voltaram a níveis mínimos. Nos últimos instantes do experimento a temperatura se mantém estável próximo da temperatura de ebulição da água para a cidade de Brasília (1000m acima do nível do mar), que é de 98 °C. O sensor A é registrado em azul, B em vermelho, C em amarelo, D em roxo e E em vermelho.

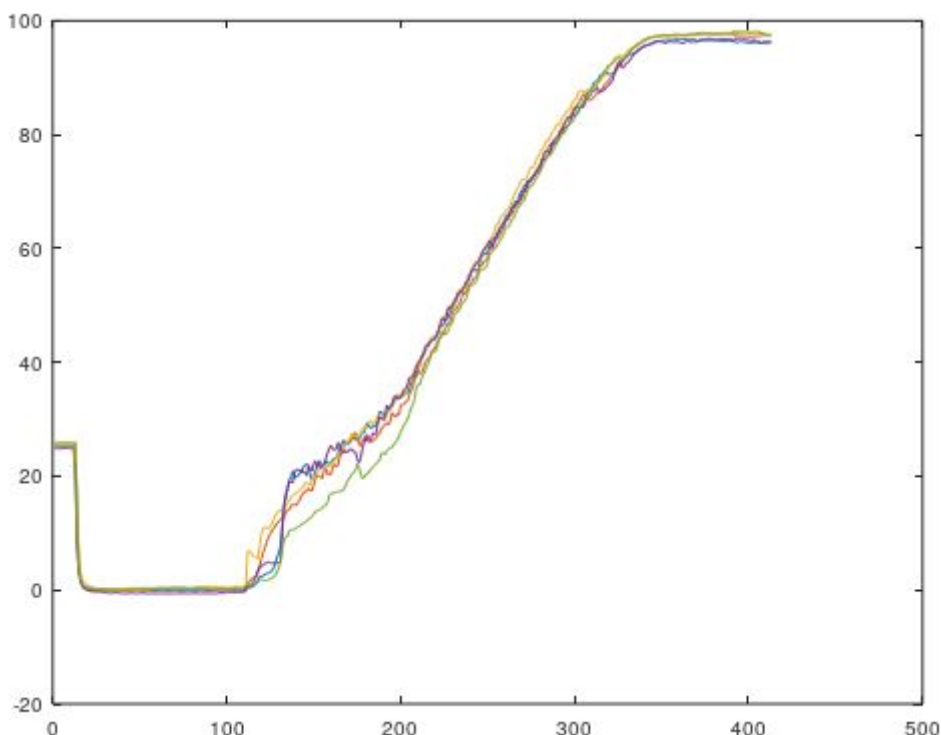


Figura VII.1 - Gráfico das temperaturas registradas durante a calibração dos sensores de temperatura Ds18b20. Nessa figura o eixo x representa o tempo dividido por 5, ou seja, onde está indicado “100” significa que haviam se passado 500 segundos do experimento. O eixo y é a temperatura em °C.

O código separa a região em que a temperatura de congelamento é atingida (figura X.2) da região em que a temperatura de ebulição é atingida (figura X.3).

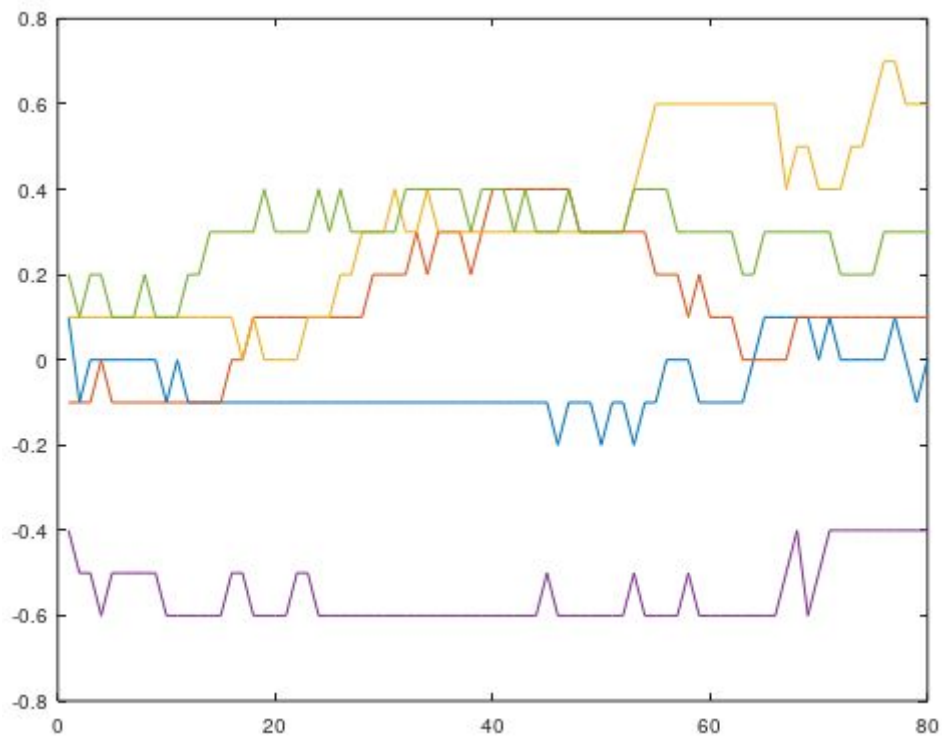


Figura VII.2 - Registros das temperaturas medidas por cada sensor em equilíbrio térmico em banho de gelo.

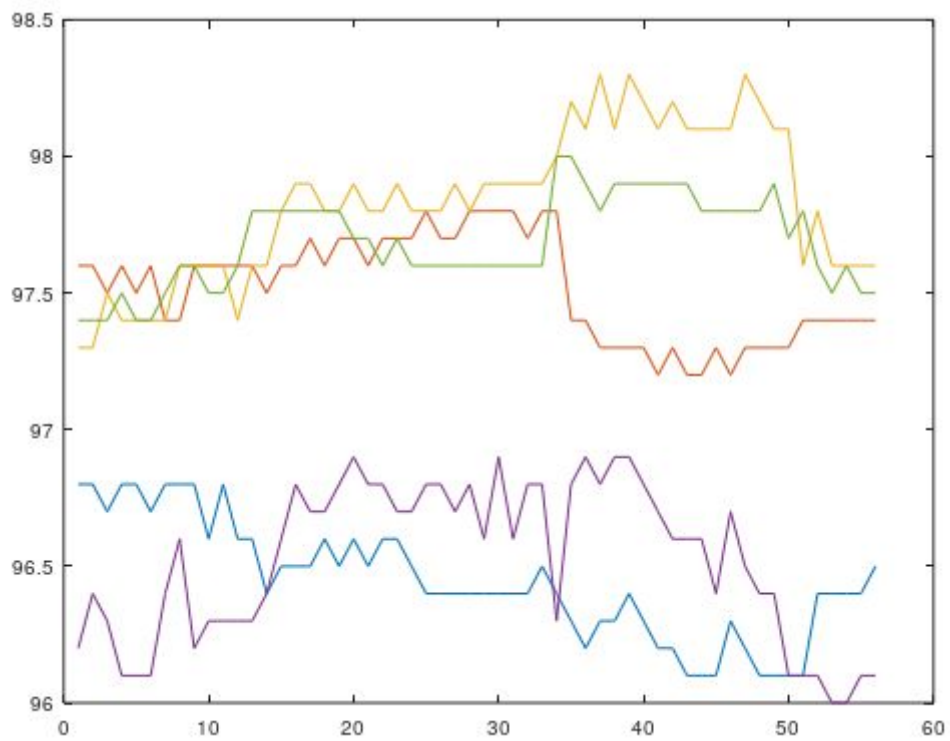


Figura VII.3 - Registros das temperaturas medidas por cada sensor em equilíbrio térmico em banho de água fervente.

Por último, o código mostra as temperaturas médias registradas por cada sensor em cada uma das regiões de equilíbrio térmico.

med\_zero\_a = -0.058750

med\_zero\_b = 0.12750

med\_zero\_c = 0.32000

med\_zero\_d = -0.55000

med\_zero\_e = 0.29000

med\_zero = 0.025750

med\_max\_a = 96.446

med\_max\_b = 97.518

med\_max\_c = 97.827

med\_max\_d = 96.520

med\_max\_e = 97.684

med\_max = 97.199

aa = -0.41850

bb = 0.21034

cc = 0.46105

dd = -0.62752

ee = 0.37462

O valor aa é o desvio médio de temperatura do sensor A. O valor bb é o desvio médio de temperatura do sensor B. O valor cc é o desvio médio de temperatura do sensor C. O valor dd é o desvio médio de temperatura do sensor D. O valor ee é o desvio médio de temperatura do sensor E.

A calibração de cada sensor é feita ao se subtrair o valor do desvio médio das temperaturas medidas por aquele sensor durante todos os experimentos.

Para a calibração do sensor de vazão YF-8402B foi montado um circuito hidráulico semelhante ao utilizado nos testes oficiais. Uma mangueira sai de um reservatório de água, passa pela bomba, vai para o sensor de vazão, passa pela serpentina e vai para um reservatório diferente, inicialmente vazio. A bomba é ligada e os dados de vazão são coletados. Ao atingir um valor próximo de 2 litros de escoamento total a bomba é desligada. O volume do reservatório inicialmente vazio é medido com uma seringa graduada e comparado com o valor medido pelo sensor. Esse teste foi repetido três vezes.

Primeiro teste:

Volume de escoamento medido pelo sensor: 2,08 l

Volume medido pela seringa (calibrada): 1,86 l

Segundo teste:

Volume de escoamento medido pelo sensor: 1,75 l

Volume medido pela seringa (calibrada): 1,57 l

Terceiro teste:

Volume de escoamento medido pelo sensor: 2,09 l

Volume medido pela seringa (calibrada): 1,87 l

Com esses dados foi possível estabelecer um erro médio de 11,7% na medição de volume para esse sensor. Para a calibração do sensor, esse valor deve ser subtraído de todas as medições de volume e vazão. É importante ressaltar que a presença de bolhas dentro das mangueiras foi um empecilho para a execução dos testes e que podem fazer com que o erro real do sensor seja menor do que o erro medido.

Para a calibração do sensor de inclinação, os dados de aceleração em três eixos do sensor foram coletados a cada cinco segundos, durante um intervalo de 20 minutos. O sensor foi movimentado de forma aleatória durante a realização dos testes. A equação VII.1 foi aplicada aos dados coletados,

$$g = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad \text{Eq. VII.1}$$

onde  $x$  é a aceleração medida no eixo  $x$  do sensor,  $y$  é a aceleração medida no eixo  $y$  do sensor,  $z$  é a aceleração medida no eixo  $z$  do sensor e  $g$  é a aceleração da gravidade local medida pelo sensor. O valor de  $g$  é então comparado com o valor padrão calibrado medido no Bloco G do departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Brasília (figura VII.4). Esse método permite que sejam eliminados erros de histerese e instrumentais do sensor, pois força a medição de forma aleatória em todas as direções e depois compara o valor médio dos mesmos com um valor padrão calibrado.



Figura VII.4 - Medição padrão calibrada da aceleração gravitacional no Bloco G do departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Brasília.

O teste realizado no sensor de inclinação forneceu uma aceleração gravitacional consistente equivalente a  $9,8080 \text{ m/s}^2$ . Isso equivale a um erro de 0,28% quando comparado ao valor da gravidade de  $9,7808$  medido pela universidade de Brasília. Para a calibração do sensor de inclinação esse erro deve ser considerado nas medições.

Datasheets:

Sensor de inclinação ICM20690:

<https://invensense.tdk.com/wp-content/uploads/2016/10/DS-000178-ICM-20690-v1.0.pdf>

Acesso em 02/12/2020.

Sensor de intensidade luminosa MAX88921:

<https://pdf1.alldatasheet.co.kr/datasheet-pdf/view/298452/MAXIM/MAX8892.html>

Acesso em 02/12/2020.

Sensor de temperatura DS18B20:

<https://www.gaimc.com/Uploads/Download/Temperature/GTS200.pdf>

Acesso em 02/12/2020.

Sensor TA601A:

[http://www.china-tasi.com/uploads/English\\_Manual/TA601.pdf](http://www.china-tasi.com/uploads/English_Manual/TA601.pdf)

Acesso em 02/12/2020.

## **ANEXO VIII: Código em Arduino IDE: DS18x20 Temperature and Flow**

---

```
#include <OneWire.h>
// OneWire DS18S20, DS18B20, DS1822 Temperature Example
// http://www.pjrc.com/teensy/td_libs_OneWire.html
// The DallasTemperature library can do all this work for you!
// https://github.com/milesburton/Arduino-Temperature-Control-Library
int X;
int Y;
float TIME = 0;
float FREQUENCY = 0;
float WATER = 0;
float TOTAL = 0;
float LS = 0;
const int input = A0;

OneWire ds(10); // on pin 10 (a 4.7K resistor is necessary)
void setup(void) {
  Serial.begin(9600);
}

void loop(void) {
  byte i;
  byte present = 0;
  byte type_s;
  byte data[12];
  byte addr[8];
  float celsius, fahrenheit;

  if ( !ds.search(addr) ) {
    //Serial.println("No more addresses.");
    //Serial.println();
    ds.reset_search();
    //delay(250);
    return;
  }

  //Serial.print("ROM =");
```

```

for( i = 0; i < 8; i++) {
    Serial.write(' ');
    Serial.print(addr[i], HEX);
}

if (OneWire::crc8(addr, 7) != addr[7]) {
    //Serial.println("CRC is not valid!");
    return;
}
Serial.println();

// the first ROM byte indicates which chip
switch (addr[0]) {
    case 0x10:
        //Serial.println(" Chip = DS18S20"); // or old DS1820
        type_s = 1;
        break;
    case 0x28:
        //Serial.println(" Chip = DS18B20");
        type_s = 0;
        break;
    case 0x22:
        //Serial.println(" Chip = DS1822");
        type_s = 0;
        break;
    default:
        //Serial.println("Device is not a DS18x20 family device.");
        return;
}

ds.reset();
ds.select(addr);
ds.write(0x44, 1);    // start conversion, with parasite power on at the end

delay(948);    // maybe 750ms is enough, maybe not
// we might do a ds.depower() here, but the reset will take care of it.

present = ds.reset();

```



```

ds.select(addr);
ds.write(0xBE);    // Read Scratchpad

//Serial.print(" Data = ");
//Serial.print(present, HEX);
//Serial.print(" ");
for ( i = 0; i < 9; i++) {    // we need 9 bytes
    data[i] = ds.read();
    //Serial.print(data[i], HEX);
    //Serial.print(" ");
}
//Serial.print(" CRC=");
//Serial.print(OneWire::crc8(data, 8), HEX);
//Serial.println();

// Convert the data to actual temperature
// because the result is a 16 bit signed integer, it should
// be stored to an "int16_t" type, which is always 16 bits
// even when compiled on a 32 bit processor.
int16_t raw = (data[1] << 8) | data[0];
if (type_s) {
    raw = raw << 3; // 9 bit resolution default
    if (data[7] == 0x10) {
        // "count remain" gives full 12 bit resolution
        raw = (raw & 0xFFF0) + 12 - data[6];
    }
} else {
    byte cfg = (data[4] & 0x60);
    // at lower res, the low bits are undefined, so let's zero them
    if (cfg == 0x00) raw = raw & ~7; // 9 bit resolution, 93.75 ms
    else if (cfg == 0x20) raw = raw & ~3; // 10 bit res, 187.5 ms
    else if (cfg == 0x40) raw = raw & ~1; // 11 bit res, 375 ms
    /// default is 12 bit resolution, 750 ms conversion time
}
celsius = (float)raw / 16.0;
//fahrenheit = celsius * 1.8 + 32.0;
Serial.print(" Temperature = ");
Serial.print(celsius);

```

```

Serial.print(" Celsius, ");
//Serial.print(fahrenheit);
//Serial.println(" Fahrenheit");

X = pulseIn(input, HIGH);
Y = pulseIn(input, LOW);
TIME = X + Y;
FREQUENCY = 1000000/TIME;
WATER = FREQUENCY/38;
LS = WATER/60;
if(FREQUENCY >= 0)
{
if(isinf(FREQUENCY))
{
//lcd.clear();
//lcd.setCursor(0,0);
Serial.print("VOL.: 0.00 L/M");
//Serial.setCursor(0,1);
Serial.print(" TOTAL: ");
Serial.print( TOTAL);
Serial.print(" L");
}
else
{
TOTAL = TOTAL + LS;
//Serial.println(FREQUENCY);
//lcd.clear();
//lcd.setCursor(0,0);
Serial.print("VOL.: ");
Serial.print(WATER);
Serial.print(" L/M");
//lcd.setCursor(0,1);
Serial.print(" TOTAL: ");
Serial.print( TOTAL);
Serial.print(" L");
}
}
}

```

## ANEXO IX: Código em Octave: tst5

---

```
clear
clc

x = load('tsts.txt');           %carrega o arquivo de dados

r=rows(x);                     %calcula o numero de linhas do arquivo x

a=[1:5:r];                     %cria um vetor que começa em 1 e avança de 5 em 5
b=[2:5:r];                     %cria um vetor que começa em 2 e avança de 5 em 5
c=[3:5:r];                     %cria um vetor que começa em 3 e avança de 5 em 5
d=[4:5:r];                     %cria um vetor que começa em 4 e avança de 5 em 5
e=[5:5:r];                     %cria um vetor que começa em 5 e avança de 5 em 5

x_a=x(a,:);                   %seleciona os dados de x coletados pelo sensor 1
x_b=x(b,:);                   %seleciona os dados de x coletados pelo sensor 2
x_c=x(c,:);                   %seleciona os dados de x coletados pelo sensor 3
x_d=x(d,:);                   %seleciona os dados de x coletados pelo sensor 4
x_e=x(e,:);                   %seleciona os dados de x coletados pelo sensor 5

vaz=x(:,5);                   %cria um vetor coluna com os dados de vazão em litros
por minuto

V=x(:,6);                     %cria um vetor coluna com os dados de volume em litros

temp(:,1)=[x_a(:,4)];          %cria uma matriz com os dados de temperatura nas
colunas 1 a 5, de acordo com o respectivo sensor
temp(:,2)=[x_b(:,4)];
temp(:,3)=[x_c(:,4)];
temp(:,4)=[x_d(:,4)];
temp(:,5)=[x_e(:,4)];

vaza(:,1)=[x_a(:,5)];          %cria uma matriz com os dados de vazão nas colunas 1
a 5, de acordo com o respectivo sensor
vaza(:,2)=[x_b(:,5)];
vaza(:,3)=[x_c(:,5)];
vaza(:,4)=[x_d(:,5)];
vaza(:,5)=[x_e(:,5)];
```

```

volu(:,1)=[x_a(:,6)]; %cria uma matriz com os dados de volume nas colunas
1 a 5, de acordo com o respectivo sensor
volu(:,2)=[x_b(:,6)];
volu(:,3)=[x_c(:,6)];
volu(:,4)=[x_d(:,6)];
volu(:,5)=[x_e(:,6)];

ro=1000; %densidade da água (SI)
cp=4180; %cp da água (SI)

for i=1:1:r-1
dt(i)=x(i+1,3)-x(i,3)+(x(i+1,2)-x(i,2))*60+(x(i+1,1)-x(i,1))*3600; %calcula o tempo decorrido
entre cada coleta de dados
endfor

dt=cumsum(dt); %soma o tempo decorrido entre cada coleta de
dados para obter o tempo decorrido total do experimento
dt(r)=dt(r-1); %adiciona uma última fileira no vetor dt para
compatibilizar o tamanho dele com o dos outros vetores

for i=1:1:rows(x_a)-1
dtta(i)=x_a(i+1,3)-x_a(i,3)+(x_a(i+1,2)-x_a(i,2))*60+(x_a(i+1,1)-x_a(i,1))*3600; %calcula o
tempo decorrido entre a primeira e a última coleta de dados do sensor a
dttb(i)=x_b(i+1,3)-x_b(i,3)+(x_b(i+1,2)-x_b(i,2))*60+(x_b(i+1,1)-x_b(i,1))*3600; %calcula o
tempo decorrido entre a primeira e a última coleta de dados do sensor b
dttc(i)=x_c(i+1,3)-x_c(i,3)+(x_c(i+1,2)-x_c(i,2))*60+(x_c(i+1,1)-x_c(i,1))*3600; %calcula o
tempo decorrido entre a primeira e a última coleta de dados do sensor c
dttd(i)=x_d(i+1,3)-x_d(i,3)+(x_d(i+1,2)-x_d(i,2))*60+(x_d(i+1,1)-x_d(i,1))*3600; %calcula o
tempo decorrido entre a primeira e a última coleta de dados do sensor d
dtte(i)=x_e(i+1,3)-x_e(i,3)+(x_e(i+1,2)-x_e(i,2))*60+(x_e(i+1,1)-x_e(i,1))*3600; %calcula o
tempo decorrido entre a primeira e a última coleta de dados do sensor e
endfor
dtta=cumsum(dtta);
dtta(rows(x_a))=dtta(rows(x_a)-1);
dttb=cumsum(dttb);
dttb(rows(x_b))=dttb(rows(x_b)-1);
dttc=cumsum(dtte);
dttc(rows(x_c))=dttc(rows(x_c)-1);
dttd=cumsum(dttd);
dttd(rows(x_d))=dttd(rows(x_d)-1);
dtte=cumsum(dtte);

```

```

dtte(rows(x_e))=dtte(rows(x_e)-1);
dtt=(dtta+dttb+dttc+dtt+dtt)/5;           %dtt é o equivalente ao dt para vetores
com 5 vezes menos números

tamb=temp(:,1);                             %armazena os dados de temperatura
ambiente

tin=(temp(:,3)+temp(:,4))/2;                %armazena os dados de temperatura de
entrada

tex=(temp(:,2)+temp(:,5))/2;                %armazena os dados de temperatura de
saída

m=((vaza(:,1)+vaza(:,2)+vaza(:,3)+vaza(:,4)+vaza(:,5))/5)*(ro/1000);   %calcula a vazão mássica

w=(m/60).*cp.*(tex-tin);                    %q=m*cp*deltaT

tst1=(1:1:490);                             %esse trecho separa os valores de cada um dos
12 teste realizado. Em testes futuros esses valores serão diferentes.
tsts1=(1:1:98);
tst2=(491:1:1655);
tsts2=(99:1:331);
tst3=(1656:1:2240);
tsts3=(332:1:448);
tst4=(2241:1:2825);
tsts4=(449:1:565);
tst5=(2826:1:3440);
tsts5=(566:1:688);
tst6=(3441:1:4045);
tsts6=(689:1:809);
tst7=(4046:1:4175);
tsts7=(810:1:835);
tst8=(4176:1:4490);
tsts8=(836:1:898);
tst9=(4491:1:4795);
tsts9=(899:1:959);
tst10=(4796:1:4950);
tsts10=(960:1:990);
tst11=(4951:1:5545);
tsts11=(991:1:1109);
tst12=(5546:1:6170);

```

```
tsts12=(1110:1:1234);
```

```
vaz1=vaz(tst1);  
realizados
```

```
%calcula a vazão em cada um dos 12 testes
```

```
vaz2=vaz(tst2);
```

```
vaz3=vaz(tst3);
```

```
vaz4=vaz(tst4);
```

```
vaz5=vaz(tst5);
```

```
vaz6=vaz(tst6);
```

```
vaz7=vaz(tst7);
```

```
vaz8=vaz(tst8);
```

```
vaz9=vaz(tst9);
```

```
vaz10=vaz(tst10);
```

```
vaz11=vaz(tst11);
```

```
vaz12=vaz(tst12);
```

```
tamb1=tamb(tsts1);  
12 testes realizados
```

```
%calcula as temperaturas para cada um dos
```

```
tin1=tin(tsts1);
```

```
tex1=tex(tsts1);
```

```
tamb2=tamb(tsts2);
```

```
tin2=tin(tsts2);
```

```
tex2=tex(tsts2);
```

```
tamb3=tamb(tsts3);
```

```
tin3=tin(tsts3);
```

```
tex3=tex(tsts3);
```

```
tamb4=tamb(tsts4);
```

```
tin4=tin(tsts4);
```

```
tex4=tex(tsts4);
```

```
tamb5=tamb(tsts5);
```

```
tin5=tin(tsts5);
```

```
tex5=tex(tsts5);
```

```
tamb6=tamb(tsts6);
```

tin6=tin(tsts6);  
tex6=tex(tsts6);

tamb7=tamb(tsts7);  
tin7=tin(tsts7);  
tex7=tex(tsts7);

tamb8=tamb(tsts8);  
tin8=tin(tsts8);  
tex8=tex(tsts8);

tamb9=tamb(tsts9);  
tin9=tin(tsts9);  
tex9=tex(tsts9);

tamb10=tamb(tsts10);  
tin10=tin(tsts10);  
tex10=tex(tsts10);

tamb11=tamb(tsts11);  
tin11=tin(tsts11);  
tex11=tex(tsts11);

tamb12=tamb(tsts12);  
tin12=tin(tsts12);  
tex12=tex(tsts12);

V1=V(tst1);  
dos 12 testes realizados

V2=V(tst2);

V3=V(tst3);

V4=V(tst4);

V5=V(tst5);

V6=V(tst6);

V7=V(tst7);

V8=V(tst8);

V9=V(tst9);

V10=V(tst10);

%calcula os volumes escoados para cada um

```
V11=V(tst11);
```

```
V12=V(tst12);
```

```
w1=w(tsts1);  
realizados
```

```
%calcula a potência para cada um dos 12 testes
```

```
w2=w(tsts2);
```

```
w3=w(tsts3);
```

```
w4=w(tsts4);
```

```
w5=w(tsts5);
```

```
w6=w(tsts6);
```

```
w7=w(tsts7);
```

```
w8=w(tsts8);
```

```
w9=w(tsts9);
```

```
w10=w(tsts10);
```

```
w11=w(tsts11);
```

```
w12=w(tsts12);
```

```
dt1=dt(tst1);  
12 testes realizados
```

```
%calcula o intervalo de tempo para cada um dos
```

```
dt2=dt(tst2);
```

```
dt3=dt(tst3);
```

```
dt4=dt(tst4);
```

```
dt5=dt(tst5);
```

```
dt6=dt(tst6);
```

```
dt7=dt(tst7);
```

```
dt8=dt(tst8);
```

```
dt9=dt(tst9);
```

```
dt10=dt(tst10);
```

```
dt11=dt(tst11);
```

```
dt12=dt(tst12);
```

```
dt1=dt1(tsts1);  
cada um dos 12 testes realizados
```

```
%calcula o intervalo de tempo reduzido para
```

```
dt2=dt2(tsts2);
```

```
dt3=dt3(tsts3);
```

```
dt4=dt4(tsts4);
```

```
dt5=dt5(tsts5);
```

```
dt6=dt6(tsts6);
```

```
dt7=dt7(tsts7);
```



```
dt8=dt(tst8);
dt9=dt(tst9);
dt10=dt(tst10);
dt11=dt(tst11);
dt12=dt(tst12);
```

```
tabs=148; %temperatura interna média do absorvedor de calor
```

```
lmtd=-(((tin-tabs)-(tex-tabs))./(log((tin-tabs)./(tex-tabs)))); %cálculo do LMTD
```

```
UA=w./lmtd; %cálculo do coeficiente global de transferência de calor multiplicado pela área de transferência de calor
```

```
lmtd1=-((tin1-tabs)-(tex1-tabs))./(log((tin1-tabs)./(tex1-tabs))); %cálculo do LMTD para cada um dos 12 testes realizados
```

```
lmtd2=-((tin2-tabs)-(tex2-tabs))./(log((tin2-tabs)./(tex2-tabs)));
```

```
lmtd3=-((tin3-tabs)-(tex3-tabs))./(log((tin3-tabs)./(tex3-tabs)));
```

```
lmtd4=-((tin4-tabs-20)-(tex4-tabs-20))./(log((tin4-tabs-20)./(tex4-tabs-20)));
```

```
lmtd5=-((tin5-tabs-11)-(tex5-tabs-11))./(log((tin5-tabs-11)./(tex5-tabs-11)));
```

```
lmtd6=-((tin6-tabs)-(tex6-tabs))./(log((tin6-tabs)./(tex6-tabs)));
```

```
lmtd7=-((tin7-tabs)-(tex7-tabs))./(log((tin7-tabs)./(tex7-tabs)));
```

```
lmtd8=-((tin8-tabs)-(tex8-tabs))./(log((tin8-tabs)./(tex8-tabs)));
```

```
lmtd9=-((tin9-tabs)-(tex9-tabs))./(log((tin9-tabs)./(tex9-tabs)));
```

```
lmtd10=-((tin10-tabs)-(tex10-tabs))./(log((tin10-tabs)./(tex10-tabs)));
```

```
lmtd11=-((tin11-tabs+20)-(tex11-tabs+20))./(log((tin11-tabs+20)./(tex11-tabs+20)));
```

```
lmtd12=-((tin12-tabs)-(tex12-tabs))./(log((tin12-tabs)./(tex12-tabs)));
```

```
UA1=w1./lmtd1; %cálculo do coeficiente global de transferência de calor multiplicado pela área de troca de calor para cada um dos 12 testes realizados
```

```
UA2=w2./lmtd2;
```

```
UA3=w3./lmtd3;
```

```
UA4=w4./lmtd4;
```

```
UA5=w5./lmtd5;
```

```
UA6=w6./lmtd6;
```

```
UA7=w7./lmtd7;
```

```
UA8=w8./lmtd8;
```

```
UA9=w9./lmtd9;
```

```
UA10=w10./lmtd10;
```

```
UA11=w11./lmttd11;
```

```
UA12=w12./lmttd12;
```

```
A=((2*pi*(0.0254/8))*10*2*pi*0.065)+(2*pi*0.0675*0.075)+(2*pi*0.0675^2)-(pi*0.035^2);  
%cálculo da área do absorvedor
```

```
U=UA/A; %cálculo do coeficiente global de transferência  
de calor
```

```
U1=UA1/A; %cálculo do coeficiente global de  
transferência de calor para cada um dos 12 testes realizados
```

```
U2=UA2/A;
```

```
U3=UA3/A;
```

```
U4=UA4/A;
```

```
U5=UA5/A;
```

```
U6=UA6/A;
```

```
U7=UA7/A;
```

```
U8=UA8/A;
```

```
U9=UA9/A;
```

```
U10=UA10/A;
```

```
U11=UA11/A;
```

```
U12=UA12/A;
```

```
aa=load('Inc.txt'); %carrega o arquivo com os dados de  
aceleração do acelerômetro
```

```
xx=[aa(:,1)]; %armazena os dados de aceleração do  
acelerômetro
```

```
yy=[aa(:,2)];
```

```
zz=[aa(:,3)];
```

```
mx=[aa(:,10)];
```

```
my=[aa(:,11)];
```

```
mz=[aa(:,12)];
```

```
g=mean(sqrt(xx.^2+yy.^2+zz.^2)); %calcula a gravidade com base nos  
dados do ecelerômetro
```

```
m=mean(sqrt(mx.^2+my.^2+mz.^2));
```

```
ax=asind(xx/g); %calcula a inclinação do concentrador com  
base nos valores de aceleração do acelerômetro
```

```

ay=asind(yy/g);
az=asind(zz/g);
amx=asind(mx/m);
amy=asind(my/m);
amz=asind(mz/m);

re=[aa(:,8)];
rre=[aa(:,9)];
mre=[aa(:,13)];
mrre=[aa(:,14)];
mrrre=[aa(:,15)];

re=re+rre/60;
mre=mre+mrre/60+mrrre/3600;

erro=az+re;                                     %calcula o erro da guiagem
erro(1:70,:)=[];

for i=1:1:rows(aa)-1
tt(i)=aa(i+1,7)-aa(i,7)+(aa(i+1,6)-aa(i,6))*60+(aa(i+1,5)-aa(i,5))*3600;
endfor
tt(:,1:69)=[];

for i=3:1:rows(tt')-2                           %faz uma média dos 5 termos mais próximos para gerar
um gráfico mais suave dos erros
    tt(i)=[(tt(i+2)+tt(i+1)+tt(i)+tt(i-1)+tt(i-2))/5];
endfor
tt(2)=[(tt(1)+tt(2)+tt(3)+tt(4))/4];
tt(1)=[(tt(1)+tt(2)+tt(3)+tt(4))/3];
tt(rows(tt')-1)=[(tt(rows(tt'))+tt(rows(tt')-1)+tt(rows(tt')-2)+tt(rows(tt')-3))/4];
tt(rows(tt')-1)=[(tt(rows(tt'))+tt(rows(tt')-1)+tt(rows(tt')-2))/3];

tt=cumsum(tt);

ef=w/3000;                                       %calcula a eficiência do concentrador
ef1=w1/3000;
ef2=w2/3000;
ef3=w3/3000;

```

```
ef4=w4/3000;  
ef5=w5/3000;  
ef6=w6/3000;  
ef7=w7/3000;  
ef8=w8/3000;  
ef9=w9/3000;  
ef10=w10/3000;  
ef11=w11/3000;  
ef12=w12/3000;
```

```
figure  
plot(tt,erro)  
title('Erro da guiagem por Tempo')  
xlabel('Tempo (s)')  
ylabel('Erro (°)')
```

```
figure  
plot(dtt2,w2,";Teste 2;";dtt3,w3,";Teste 3;";dtt4,w4,";Teste 4;")  
title('Potência por Tempo')  
xlabel('Tempo [s]')  
ylabel('Potência [W]')
```

```
figure  
plot(dtt6,w6,";Teste 6;")  
title('Potência por Tempo')  
xlabel('Tempo [s]')  
ylabel('Potência [W]')
```

```
figure  
plot(dtt4,ef4*100,";Teste 4;")  
title('Eficiência por Tempo')  
xlabel('Tempo [s]')  
ylabel('Eficiência [%]')
```

```
figure  
plot(dtt4,tamb4,";Temperatura ambiente;";dtt4,tin4,";Temperatura na  
entrada;";dtt4,tex4,";Temperatura na saída;")  
title('Temperatura por Tempo')
```

```
xlabel('Tempo [s]')
ylabel('Temperatura [°C]')
```

```
figure
```

```
plot(mean(lmtd5),mean(w5),"o;1,37 l/min;",mean(lmtd4),mean(w4),"o;1,99
l/min;",mean(lmtd12),mean(w12),"o;2,41 l/min;",mean(lmtd11),mean(w11),"o;2,43
l/min;",mean(lmtd3),mean(w3),"o;2,48 l/min;")
```

```
title('Potência por LMTD')
```

```
xlabel('LMTD [°C]')
```

```
ylabel('Potência [W]')
```

```
axis([0,250,0,800]);
```

```
figure
```

```
plot(dtt2,UA2,";Teste 2;",dtt3,UA3,";Teste 3;",dtt4,UA4,";Teste 4;",dtt5,UA5,";Teste 5;")
```

```
title('UA por Tempo')
```

```
xlabel('Tempo [s]')
```

```
ylabel('UA [W/°C]')
```

```
figure
```

```
plot(dtt2,U2,dtt3,U3,dtt4,U4,dtt5,U5)
```

```
title('Coeficiente Global de Transferência de Calor (U) por Tempo')
```

```
xlabel('Tempo [s]')
```

```
ylabel('Coeficiente Global de Transferência de Calor (U) [W/m²K]')
```

```
figure
```

```
plot(dt1,vaz1,";Teste
1;","dt2,vaz2,dt3,vaz3,dt4,vaz4,dt5,vaz5,dt6,vaz6,dt7,vaz7,dt8,vaz8,dt9,vaz9,dt10,vaz10,dt11,vaz11,dt
12,vaz12,";Teste 12;")
```

```
title('Vazão por Tempo')
```

```
xlabel('Tempo [s]')
```

```
ylabel('Vazão [l/min]')
```

```
figure
```

```
plot(dt1,vaz1,';Teste 1;')
```

```
title('Vazão por Tempo')
```

```
xlabel('Tempo [s]')
```

```
ylabel('Vazão [l/min]')
```

```
figure
```

```
plot(dt2,vaz2,';Teste 2;')
title('Vazão por Tempo')
xlabel('Tempo [s]')
ylabel('Vazão [l/min]')
```

```
figure
plot(dt3,vaz3,';Teste 3;')
title('Vazão por Tempo')
xlabel('Tempo [s]')
ylabel('Vazão [l/min]')
```

```
figure
plot(dt4,vaz4,';Teste 4;')
title('Vazão por Tempo')
xlabel('Tempo [s]')
ylabel('Vazão [l/min]')
```

```
figure
plot(dt5,vaz5,';Teste 5;')
title('Vazão por Tempo')
xlabel('Tempo [s]')
ylabel('Vazão [l/min]')
```

```
figure
plot(dt6,vaz6,';Teste 6;')
title('Vazão por Tempo')
xlabel('Tempo [s]')
ylabel('Vazão [l/min]')
```

```
figure
plot(dt7,vaz7,';Teste 7;')
title('Vazão por Tempo')
xlabel('Tempo [s]')
ylabel('Vazão [l/min]')
```

```
figure
plot(dt8,vaz8,';Teste 8;')
title('Vazão por Tempo')
```

```
xlabel('Tempo [s]')
ylabel('Vazão [l/min]')
```

```
figure
plot(dt9,vaz9,';Teste 9;')
title('Vazão por Tempo')
xlabel('Tempo [s]')
ylabel('Vazão [l/min]')
```

```
figure
plot(dt10,vaz10,';Teste 10;')
title('Vazão por Tempo')
xlabel('Tempo [s]')
ylabel('Vazão [l/min]')
```

```
figure
plot(dt11,vaz11,';Teste 11;')
title('Vazão por Tempo')
xlabel('Tempo [s]')
ylabel('Vazão [l/min]')
```

```
figure
plot(dt12,vaz12,';Teste 12;')
title('Vazão por Tempo')
xlabel('Tempo [s]')
ylabel('Vazão [l/min]')
```

```
figure
plot(dt1,V1,';Teste 1;')
title('Volume Escoado por Tempo')
xlabel('Tempo [s]')
ylabel('Volume Escoado [l]')
```

```
figure
plot(dt2,V2,';Teste 2;')
title('Volume Escoado por Tempo')
xlabel('Tempo [s]')
ylabel('Volume Escoado [l]')
```

```
figure
plot(dt3,V3,';Teste 3;')
title('Volume Escocado por Tempo')
xlabel('Tempo [s]')
ylabel('Volume Escocado [l]')
```

```
figure
plot(dt4,V4,';Teste 4;')
title('Volume Escocado por Tempo')
xlabel('Tempo [s]')
ylabel('Volume Escocado [l]')
```

```
figure
plot(dt5,V5,';Teste 5;')
title('Volume Escocado por Tempo')
xlabel('Tempo [s]')
ylabel('Volume Escocado [l]')
```

```
figure
plot(dt6,V6,';Teste 6;')
title('Volume Escocado por Tempo')
xlabel('Tempo [s]')
ylabel('Volume Escocado [l]')
```

```
figure
plot(dt7,V7,';Teste 7;')
title('Volume Escocado por Tempo')
xlabel('Tempo [s]')
ylabel('Volume Escocado [l]')
```

```
figure
plot(dt8,V8,';Teste 8;')
title('Volume Escocado por Tempo')
xlabel('Tempo [s]')
ylabel('Volume Escocado [l]')
```

```
figure
```



```
plot(dt9,V9,',';Teste 9;')
title('Volume Escoado por Tempo')
xlabel('Tempo [s]')
ylabel('Volume Escoado [l]')
```

```
figure
plot(dt10,V10,',';Teste 10;')
title('Volume Escoado por Tempo')
xlabel('Tempo [s]')
ylabel('Volume Escoado [l]')
```

```
figure
plot(dt11,V11,',';Teste 11;')
title('Volume Escoado por Tempo')
xlabel('Tempo [s]')
ylabel('Volume Escoado [l]')
```

```
figure
plot(dt12,V12,',';Teste 12;')
title('Volume Escoado por Tempo')
xlabel('Tempo [s]')
ylabel('Volume Escoado [l]')
```

```
figure
plot(dtt1,tamb1,',';Ambiente;',dtt1,tin1,",";Entrada;",";Saída;")
title('Temperatura por Tempo')
xlabel('Tempo [s]')
ylabel('Temperatura [°C]')
```

```
figure
plot(dtt2,tamb2,',';Ambiente;',dtt2,tin2,",";Entrada;",";Saída;")
title('Temperatura por Tempo')
xlabel('Tempo [s]')
ylabel('Temperatura [°C]')
```

```
figure
plot(dtt3,tamb3,',';Ambiente;',dtt3,tin3,",";Entrada;",";Saída;")
title('Temperatura por Tempo')
```

```
xlabel('Tempo [s]')
ylabel('Temperatura [°C]')
```

```
figure
plot(dtt4,tamb4,';Ambiente;',dtt4,tin4,";Entrada;",dtt4,tex4,";Saída;")
title('Temperatura por Tempo')
xlabel('Tempo [s]')
ylabel('Temperatura [°C]')
```

```
figure
plot(dtt5,tamb5,';Ambiente;',dtt5,tin5,";Entrada;",dtt5,tex5,";Saída;")
title('Temperatura por Tempo')
xlabel('Tempo [s]')
ylabel('Temperatura [°C]')
```

```
figure
plot(dtt6,tamb6,';Ambiente;',dtt6,tin6,";Entrada;",dtt6,tex6,";Saída;")
title('Temperatura por Tempo')
xlabel('Tempo [s]')
ylabel('Temperatura [°C]')
```

```
figure
plot(dtt7,tamb7,';Ambiente;',dtt7,tin7,";Entrada;",dtt7,tex7,";Saída;")
title('Temperatura por Tempo')
xlabel('Tempo [s]')
ylabel('Temperatura [°C]')
```

```
figure
plot(dtt8,tamb8,';Ambiente;',dtt8,tin8,";Entrada;",dtt8,tex8,";Saída;")
title('Temperatura por Tempo')
xlabel('Tempo [s]')
ylabel('Temperatura [°C]')
```

```
figure
plot(dtt9,tamb9,';Ambiente;',dtt9,tin9,";Entrada;",dtt9,tex9,";Saída;")
title('Temperatura por Tempo')
xlabel('Tempo [s]')
ylabel('Temperatura [°C]')
```

```
figure
plot(dtt10,tamb10,';Ambiente;',dtt10,tin10,";Entrada;",dtt10,tex10,";Saída;")
title('Temperatura por Tempo')
xlabel('Tempo [s]')
ylabel('Temperatura [°C]')
```

```
figure
plot(dtt11,tamb11,';Ambiente;',dtt11,tin11,";Entrada;",dtt11,tex11,";Saída;")
title('Temperatura por Tempo')
xlabel('Tempo [s]')
ylabel('Temperatura [°C]')
```

```
figure
plot(dtt12,tamb12,';Ambiente;',dtt12,tin12,";Entrada;",dtt12,tex12,";Saída;")
title('Temperatura por Tempo')
xlabel('Tempo [s]')
ylabel('Temperatura [°C]')
```

```
figure
plot(dtt1,w1,';Teste 1;')
title('Potência por Tempo')
xlabel('Tempo [s]')
ylabel('Potência [W]')
```

```
figure
plot(dtt2,w2,';Teste 2;')
title('Potência por Tempo')
xlabel('Tempo [s]')
ylabel('Potência [W]')
```

```
figure
plot(dtt3,w3,';Teste 3;')
title('Potência por Tempo')
xlabel('Tempo [s]')
ylabel('Potência [W]')
```

```
figure
```

```
plot(dtt4,w4,';Teste 4;')
title('Potência por Tempo')
xlabel('Tempo [s]')
ylabel('Potência [W]')
```

```
figure
plot(dtt5,w5,';Teste 5;')
title('Potência por Tempo')
xlabel('Tempo [s]')
ylabel('Potência [W]')
```

```
figure
plot(dtt6,w6,';Teste 6;')
title('Potência por Tempo')
xlabel('Tempo [s]')
ylabel('Potência [W]')
```

```
figure
plot(dtt7,w7,';Teste 7;')
title('Potência por Tempo')
xlabel('Tempo [s]')
ylabel('Potência [W]')
```

```
figure
plot(dtt8,w8,';Teste 8;')
title('Potência por Tempo')
xlabel('Tempo [s]')
ylabel('Potência [W]')
```

```
figure
plot(dtt9,w9,';Teste 9;')
title('Potência por Tempo')
xlabel('Tempo [s]')
ylabel('Potência [W]')
```

```
figure
plot(dtt10,w10,';Teste 10;')
title('Potência por Tempo')
```

```
xlabel('Tempo [s]')
ylabel('Potência [W]')
```

```
figure
plot(dtt1,w11,',';Teste 11;')
title('Potência por Tempo')
xlabel('Tempo [s]')
ylabel('Potência [W]')
```

```
figure
plot(dtt12,w12,',';Teste 12;')
title('Potência por Tempo')
xlabel('Tempo [s]')
ylabel('Potência [W]')
```

```
figure
plot(dtt1,ef1*100,',';Teste 1;')
title('Eficiência por Tempo')
xlabel('Tempo [s]')
ylabel('Eficiência [%]')
```

```
figure
plot(dtt2,ef2*100,',';Teste 2;')
title('Eficiência por Tempo')
xlabel('Tempo [s]')
ylabel('Eficiência [%]')
```

```
figure
plot(dtt3,ef3*100,',';Teste 3;')
title('Eficiência por Tempo')
xlabel('Tempo [s]')
ylabel('Eficiência [%]')
```

```
figure
plot(dtt4,ef4*100,',';Teste 4;')
title('Eficiência por Tempo')
xlabel('Tempo [s]')
ylabel('Eficiência [%]')
```

```
figure
plot(dtt5,ef5*100,',';Teste 5;')
title('Eficiência por Tempo')
xlabel('Tempo [s]')
ylabel('Eficiência [%]')
```

```
figure
plot(dtt6,ef6*100,',';Teste 6;')
title('Eficiência por Tempo')
xlabel('Tempo [s]')
ylabel('Eficiência [%]')
```

```
figure
plot(dtt7,ef7*100,',';Teste 7;')
title('Eficiência por Tempo')
xlabel('Tempo [s]')
ylabel('Eficiência [%]')
```

```
figure
plot(dtt8,ef8*100,',';Teste 8;')
title('Eficiência por Tempo')
xlabel('Tempo [s]')
ylabel('Eficiência [%]')
```

```
figure
plot(dtt9,ef9*100,',';Teste 9;')
title('Eficiência por Tempo')
xlabel('Tempo [s]')
ylabel('Eficiência [%]')
```

```
figure
plot(dtt10,ef10*100,',';Teste 10;')
title('Eficiência por Tempo')
xlabel('Tempo [s]')
ylabel('Eficiência [%]')
```

```
figure
```

```
plot(dtt11,ef11*100,';Teste 11;')
title('Eficiência por Tempo')
xlabel('Tempo [s]')
ylabel('Eficiência [%]')
```

```
figure
plot(dtt12,ef12*100,';Teste 12;')
title('Eficiência por Tempo')
xlabel('Tempo [s]')
ylabel('Eficiência [%]')
```

```
figure
plot(dtt1,UA1,';Teste 1;')
title('Coeficiente Global de Transferência de Calor multiplicado pela Área de Troca de Calor (UA) por Tempo')
xlabel('Tempo [s]')
ylabel('Coeficiente Global de Transferência de Calor multiplicado pela Área de Troca de Calor (UA) [W/m².°C]')
```

```
figure
plot(dtt2,UA2,';Teste 2;')
title('Coeficiente Global de Transferência de Calor multiplicado pela Área de Troca de Calor (UA) por Tempo')
xlabel('Tempo [s]')
ylabel('Coeficiente Global de Transferência de Calor multiplicado pela Área de Troca de Calor (UA) [W/m².°C]')
```

```
figure
plot(dtt3,UA3,';Teste 3;')
title('Coeficiente Global de Transferência de Calor multiplicado pela Área de Troca de Calor (UA) por Tempo')
xlabel('Tempo [s]')
ylabel('Coeficiente Global de Transferência de Calor multiplicado pela Área de Troca de Calor (UA) [W/m².°C]')
```

```
figure
plot(dtt4,UA4,';Teste 4;')
title('Coeficiente Global de Transferência de Calor multiplicado pela Área de Troca de Calor (UA) por Tempo')
xlabel('Tempo [s]')
```

```
ylabel('Coeficiente Global de Transferência de Calor multiplicado pela Área de Troca de Calor (UA) [W/m².°C]')
```

```
figure
```

```
plot(dtt5,UA5,';Teste 5;')
```

```
title('Coeficiente Global de Transferência de Calor multiplicado pela Área de Troca de Calor (UA) por Tempo')
```

```
xlabel('Tempo [s]')
```

```
ylabel('Coeficiente Global de Transferência de Calor multiplicado pela Área de Troca de Calor (UA) [W/m².°C]')
```

```
figure
```

```
plot(dtt6,UA6,';Teste 6;')
```

```
title('Coeficiente Global de Transferência de Calor multiplicado pela Área de Troca de Calor (UA) por Tempo')
```

```
xlabel('Tempo [s]')
```

```
ylabel('Coeficiente Global de Transferência de Calor multiplicado pela Área de Troca de Calor (UA) [W/m².°C]')
```

```
figure
```

```
plot(dtt7,UA7,';Teste 7;')
```

```
title('Coeficiente Global de Transferência de Calor multiplicado pela Área de Troca de Calor (UA) por Tempo')
```

```
xlabel('Tempo [s]')
```

```
ylabel('Coeficiente Global de Transferência de Calor multiplicado pela Área de Troca de Calor (UA) [W/m².°C]')
```

```
figure
```

```
plot(dtt8,UA8,';Teste 8;')
```

```
title('Coeficiente Global de Transferência de Calor multiplicado pela Área de Troca de Calor (UA) por Tempo')
```

```
xlabel('Tempo [s]')
```

```
ylabel('Coeficiente Global de Transferência de Calor multiplicado pela Área de Troca de Calor (UA) [W/m².°C]')
```

```
figure
```

```
plot(dtt9,UA9,';Teste 9;')
```

```
title('Coeficiente Global de Transferência de Calor multiplicado pela Área de Troca de Calor (UA) por Tempo')
```

```
xlabel('Tempo [s]')
```



```
ylabel('Coeficiente Global de Transferência de Calor multiplicado pela Área de Troca de Calor (UA) [W/m².°C]')
```

```
figure
```

```
plot(dtt10,UA10,',';Teste 10;')
```

```
title('Coeficiente Global de Transferência de Calor multiplicado pela Área de Troca de Calor (UA) por Tempo')
```

```
xlabel('Tempo [s]')
```

```
ylabel('Coeficiente Global de Transferência de Calor multiplicado pela Área de Troca de Calor (UA) [W/m².°C]')
```

```
figure
```

```
plot(dtt11,UA11,',';Teste 11;')
```

```
title('Coeficiente Global de Transferência de Calor multiplicado pela Área de Troca de Calor (UA) por Tempo')
```

```
xlabel('Tempo [s]')
```

```
ylabel('Coeficiente Global de Transferência de Calor multiplicado pela Área de Troca de Calor (UA) [W/m².°C]')
```

```
figure
```

```
plot(dtt12,UA12,',';Teste 12;')
```

```
title('Coeficiente Global de Transferência de Calor multiplicado pela Área de Troca de Calor (UA) por Tempo')
```

```
xlabel('Tempo [s]')
```

```
ylabel('Coeficiente Global de Transferência de Calor multiplicado pela Área de Troca de Calor (UA) [W/m².°C]')
```

```
figure
```

```
plot(dtt1,U1,',';Teste 1;')
```

```
title('Coeficiente Global de Transferência de Calor (U) por Tempo')
```

```
xlabel('Tempo [s]')
```

```
ylabel('Coeficiente Global de Transferência de Calor (U) [W/°C]')
```

```
figure
```

```
plot(dtt2,U2,',';Teste 2;')
```

```
title('Coeficiente Global de Transferência de Calor (U) por Tempo')
```

```
xlabel('Tempo [s]')
```

```
ylabel('Coeficiente Global de Transferência de Calor (U) [W/°C]')
```

```
figure
```

```
plot(dtt3,U3,';Teste 3;')
title('Coeficiente Global de Transferência de Calor (U) por Tempo')
xlabel('Tempo [s]')
ylabel('Coeficiente Global de Transferência de Calor (U) [W/°C]')
```

figure

```
plot(dtt4,U4,';Teste 4;')
title('Coeficiente Global de Transferência de Calor (U) por Tempo')
xlabel('Tempo [s]')
ylabel('Coeficiente Global de Transferência de Calor (U) [W/°C]')
```

figure

```
plot(dtt5,U5,';Teste 5;')
title('Coeficiente Global de Transferência de Calor (U) por Tempo')
xlabel('Tempo [s]')
ylabel('Coeficiente Global de Transferência de Calor (U) [W/°C]')
```

figure

```
plot(dtt6,U6,';Teste 6;')
title('Coeficiente Global de Transferência de Calor (U) por Tempo')
xlabel('Tempo [s]')
ylabel('Coeficiente Global de Transferência de Calor (U) [W/°C]')
```

figure

```
plot(dtt7,U7,';Teste 7;')
title('Coeficiente Global de Transferência de Calor (U) por Tempo')
xlabel('Tempo [s]')
ylabel('Coeficiente Global de Transferência de Calor (U) [W/°C]')
```

figure

```
plot(dtt8,U8,';Teste 8;')
title('Coeficiente Global de Transferência de Calor (U) por Tempo')
xlabel('Tempo [s]')
ylabel('Coeficiente Global de Transferência de Calor (U) [W/°C]')
```

figure

```
plot(dtt9,U9,';Teste 9;')
title('Coeficiente Global de Transferência de Calor (U) por Tempo')
```

```
xlabel('Tempo [s]')
ylabel('Coeficiente Global de Transferência de Calor (U) [W/°C]')
```

```
figure
plot(dtt10,U10,';Teste 10;')
title('Coeficiente Global de Transferência de Calor (U) por Tempo')
xlabel('Tempo [s]')
ylabel('Coeficiente Global de Transferência de Calor (U) [W/°C]')
```

```
figure
plot(dtt11,U11,';Teste 11;')
title('Coeficiente Global de Transferência de Calor (U) por Tempo')
xlabel('Tempo [s]')
ylabel('Coeficiente Global de Transferência de Calor (U) [W/°C]')
```

```
figure
plot(dtt12,U12,';Teste 12;')
title('Coeficiente Global de Transferência de Calor (U) por Tempo')
xlabel('Tempo [s]')
ylabel('Coeficiente Global de Transferência de Calor (U) [W/°C]')
```

```
figure
plot(mean(lmtd1),mean(w1),"o;Teste 1;")
title('Potência por LMTD')
xlabel('LMTD [°C]')
ylabel('Potência [W]')
```

```
figure
plot(mean(lmtd2),mean(w2),"o;Teste 2;")
title('Potência por LMTD')
xlabel('LMTD [°C]')
ylabel('Potência [W]')
```

```
figure
plot(mean(lmtd3),mean(w3),"o;Teste 3;")
title('Potência por LMTD')
xlabel('LMTD [°C]')
ylabel('Potência [W]')
```

```
figure
plot(mean(lmtd4),mean(w4),"o;Teste 4;")
title('Potência por LMTD')
xlabel('LMTD [°C]')
ylabel('Potência [W]')
```

```
figure
plot(mean(lmtd5),mean(w5),"o;Teste 5;")
title('Potência por LMTD')
xlabel('LMTD [°C]')
ylabel('Potência [W]')
```

```
figure
plot(mean(lmtd6),mean(w6),"o;Teste 6;")
title('Potência por LMTD')
xlabel('LMTD [°C]')
ylabel('Potência [W]')
```

```
figure
plot(mean(lmtd7),mean(w7),"o;Teste 7;")
title('Potência por LMTD')
xlabel('LMTD [°C]')
ylabel('Potência [W]')
```

```
figure
plot(mean(lmtd8),mean(w8),"o;Teste 8;")
title('Potência por LMTD')
xlabel('LMTD [°C]')
ylabel('Potência [W]')
```

```
figure
plot(mean(lmtd9),mean(w9),"o;Teste 9;")
title('Potência por LMTD')
xlabel('LMTD [°C]')
ylabel('Potência [W]')
```

```
figure
```

```
plot(mean(lmtd10),mean(w10),"o;Teste 10;")  
title('Potência por LMTD')  
xlabel('LMTD [°C]')  
ylabel('Potência [W]')
```

```
figure  
plot(mean(lmtd11),mean(w11),"o;Teste 11;")  
title('Potência por LMTD')  
xlabel('LMTD [°C]')  
ylabel('Potência [W]')
```

```
figure  
plot(mean(lmtd12),mean(w12),"o;Teste 12;")  
title('Potência por LMTD')  
xlabel('LMTD [°C]')  
ylabel('Potência [W]')
```

## ANEXO X: Resultados Experimentais

Logo ao sair do código em Arduino IDE, os dados de temperatura, vazão, hora e volume possuem a seguinte disposição:

```
17:38:04.078 -> Temperature = 24.81 Celsius, VOL.: 0.00 L/M TOTAL:
0.00 L 28 DA 5A 56 B5 1 3C BC
17:38:05.610 -> Temperature = 24.56 Celsius, VOL.: 0.00 L/M TOTAL:
0.00 L 28 BE 1C 56 B5 1 3C D6
17:38:07.954 -> Temperature = 24.56 Celsius, VOL.: 0.00 L/M TOTAL:
0.00 L 28 7E 39 56 B5 1 3C 63
17:38:10.344 -> Temperature = 23.81 Celsius, VOL.: 0.00 L/M TOTAL:
0.00 L 28 49 87 56 B5 1 3C E6
17:38:12.688 -> Temperature = 24.50 Celsius, VOL.: 0.00 L/M TOTAL:
0.00 L 28 C3 50 56 B5 1 3C CC
```

```
. . . . .
. . . . .
. . . . .
```

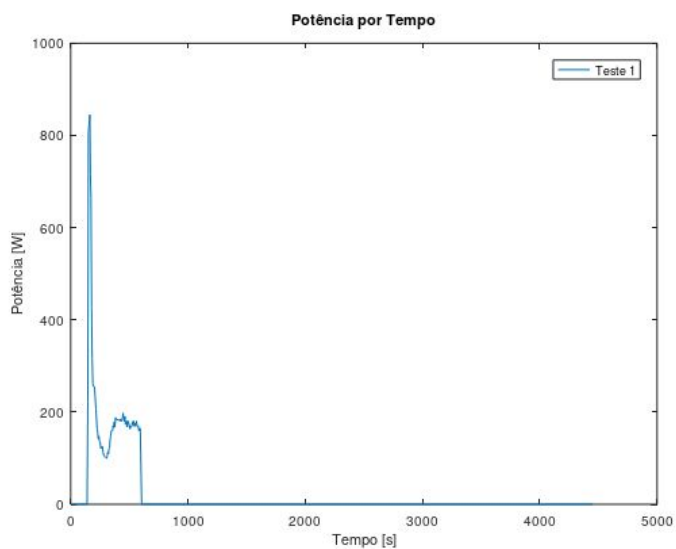
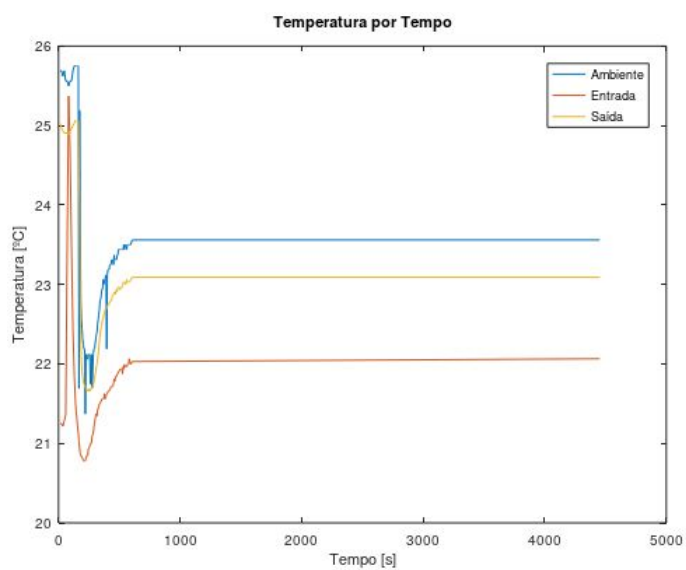
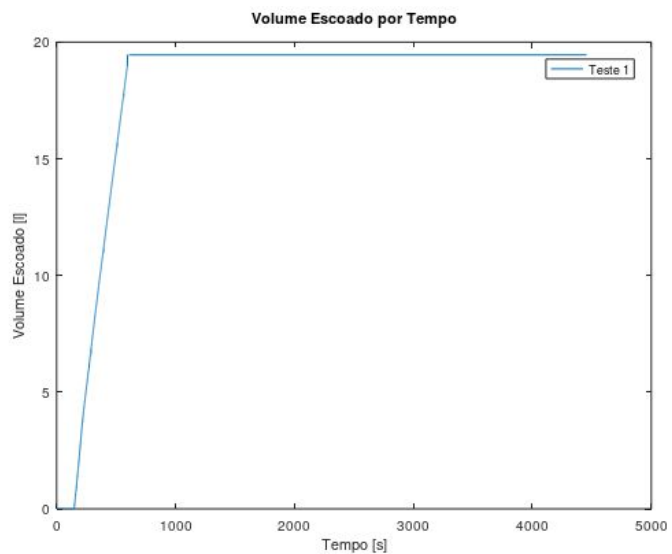
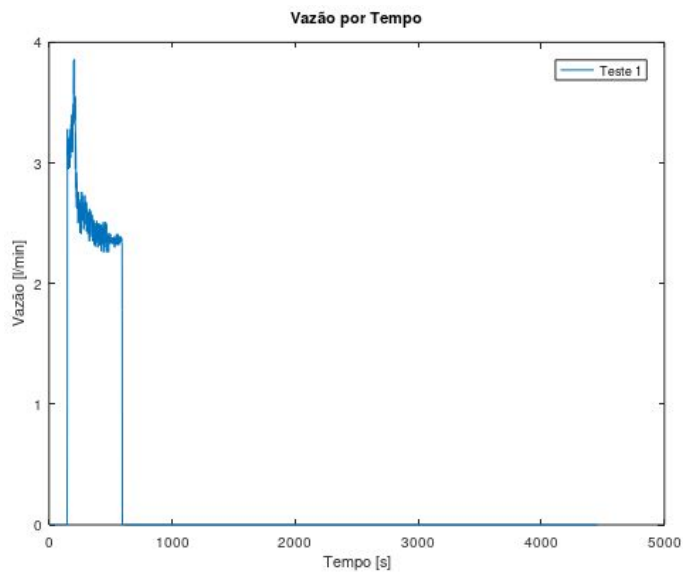
Onde 28 DA 5A 56 B5 1 3C BC é o código do sensor A, 28 BE 1C 56 B5 1 3C D6 é o código do sensor B, 28 7E 39 56 B5 1 3C 63 é o código do sensor C, 28 49 87 56 B5 1 3C E6 é o código do sensor D e 28 C3 50 56 B5 1 3C CC é o código do sensor E.

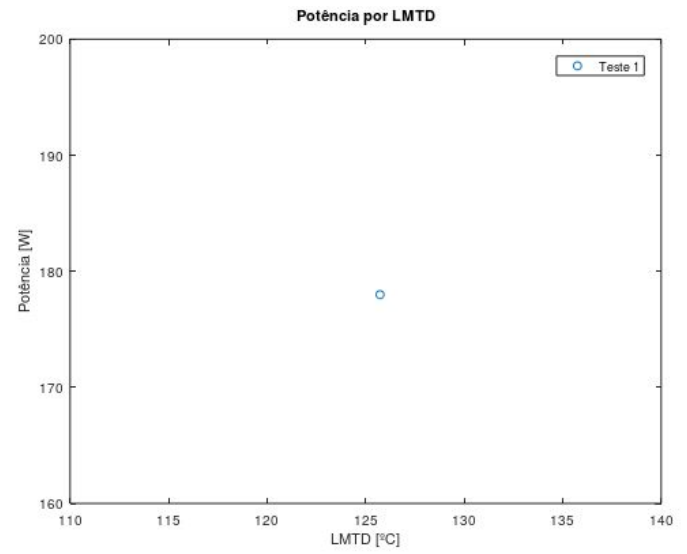
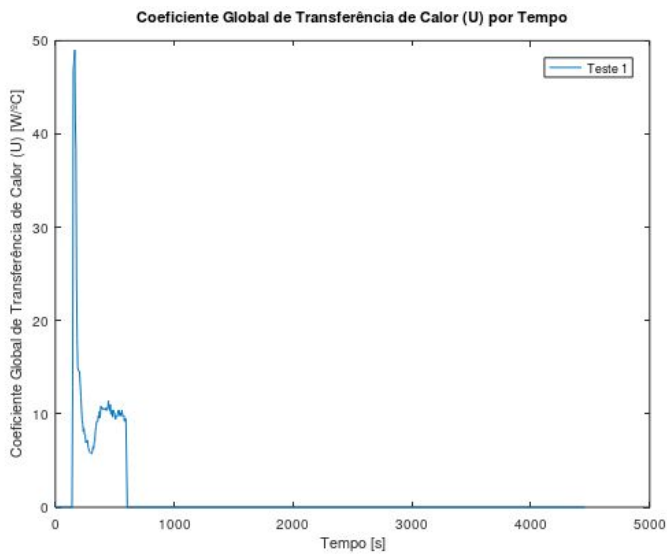
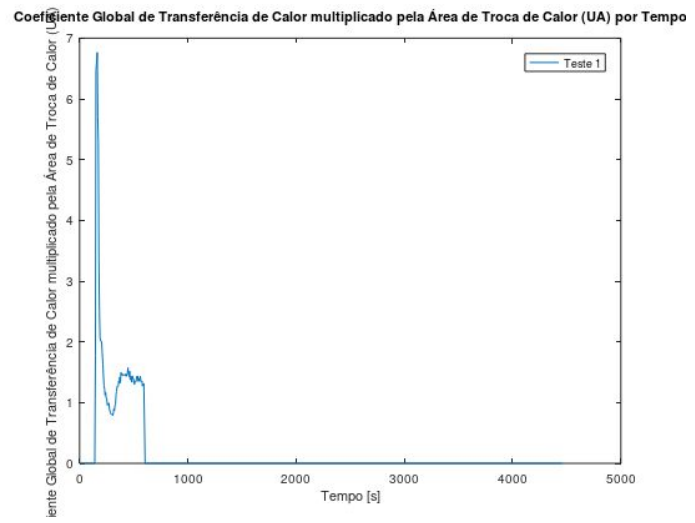
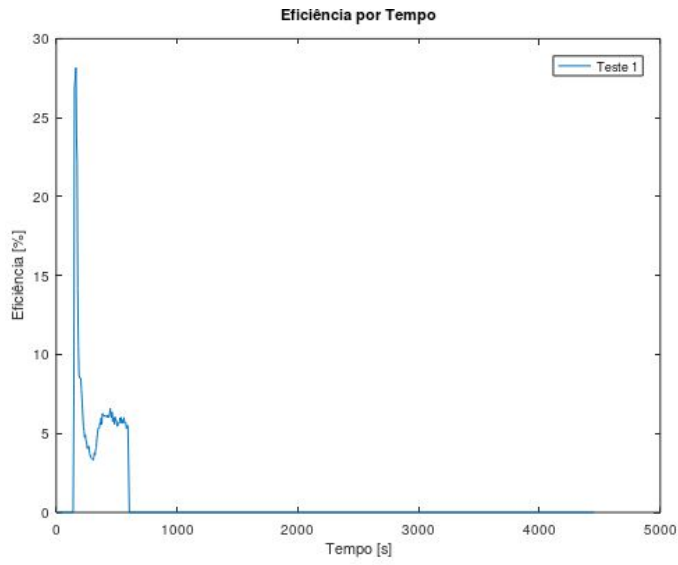
Para ser compreendido pelo código em Octave `tsts`, esses dados devem ser alterados. Todas as letras são apagadas, os pontos e vírgulas que separam os horários se transformam em espaços. A disposição final do arquivo de dados fica da seguinte maneira:

10	54	6.19	24.31	2.28	35.46	1
10	54	7.22	37.06	2.26	35.5	2
10	54	8.2	24.12	2.22	35.53	3
10	54	9.24	36.63	2.28	35.57	4
10	54	10.22	36.88	2.22	35.61	5
.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.

A primeira coluna é o horário em horas. A segunda coluna é o horário em minutos. A terceira coluna é o horário em segundos. A quarta coluna é a temperatura registrada naquele horário em graus Celsius. A quinta coluna é a vazão em litros por minuto. A sexta coluna é o volume total escoado em litros. Por último, a sétima coluna é o número do sensor, onde 1 é o sensor A, 2 é o B, 3 é o C, 4 é o D e 5 é o E. Com o arquivo `.txt` preenchido dessa forma, os resultados dos 12 testes realizados nesse trabalho estão demonstrados a seguir.

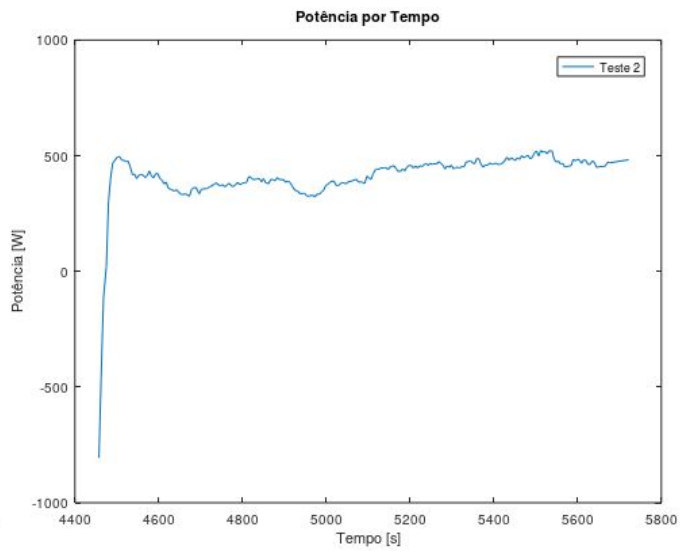
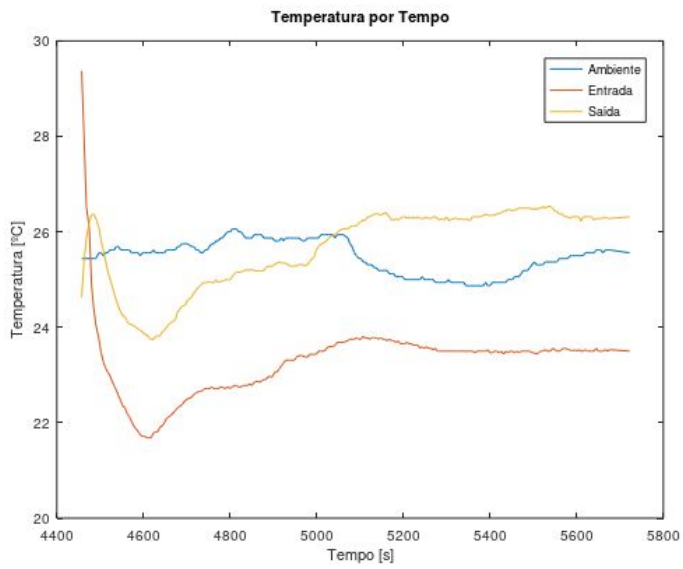
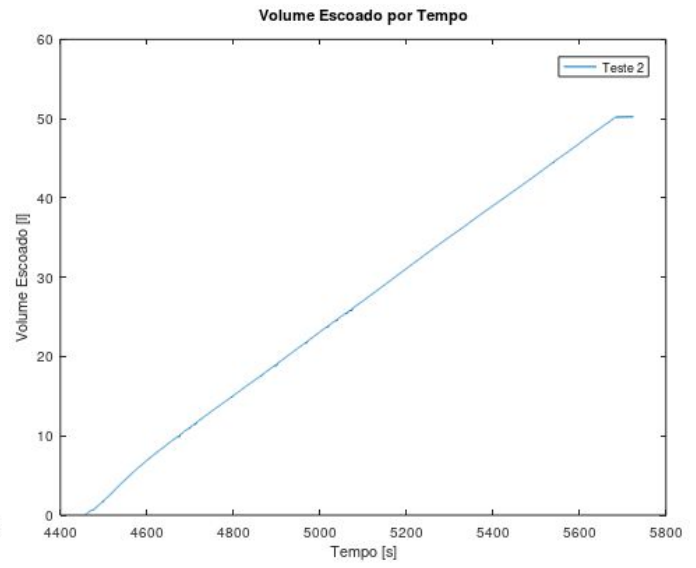
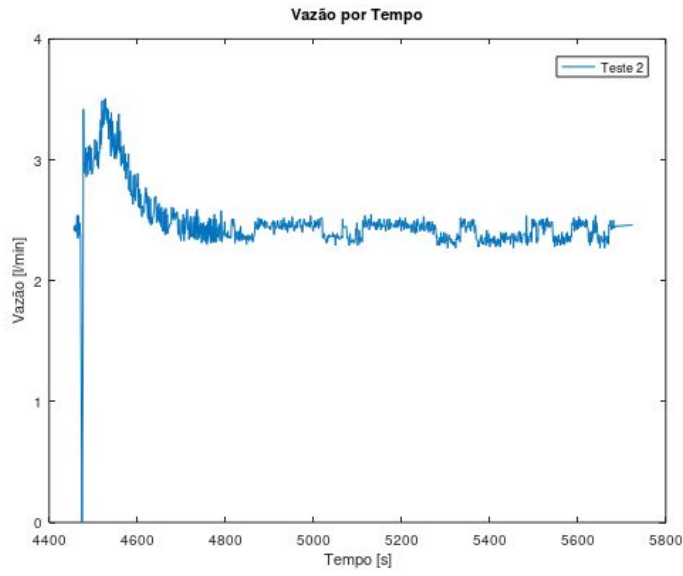
### Teste 1:

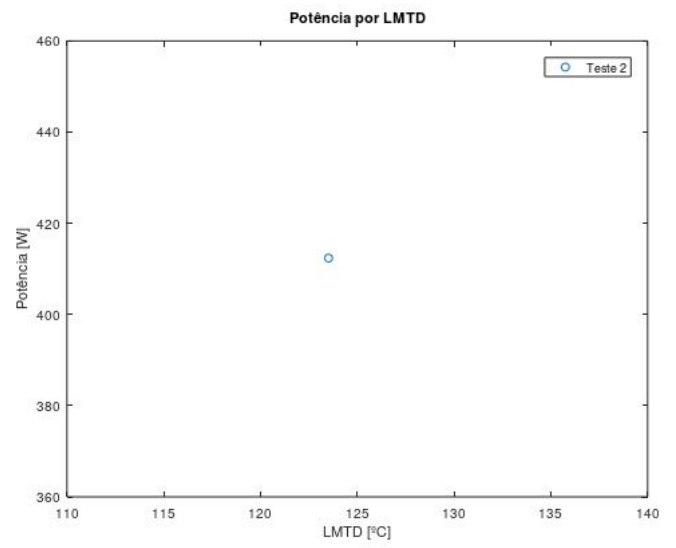
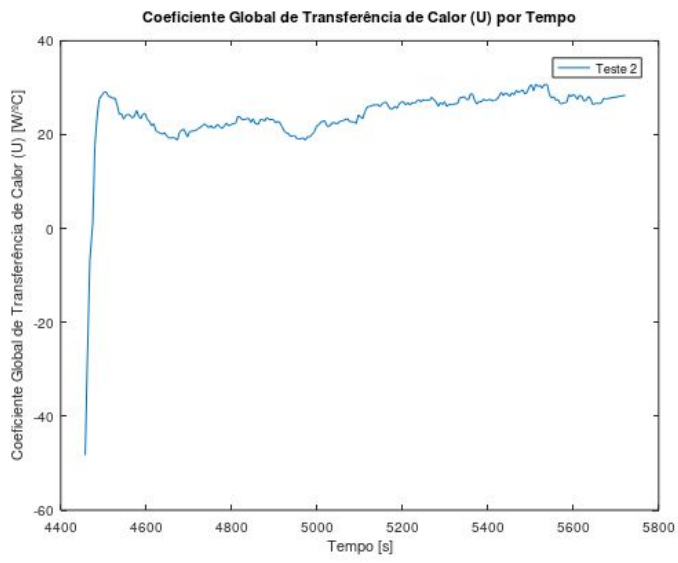
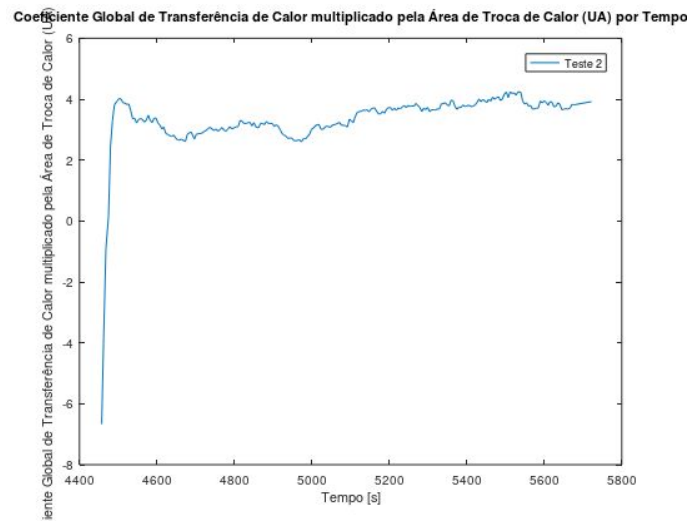
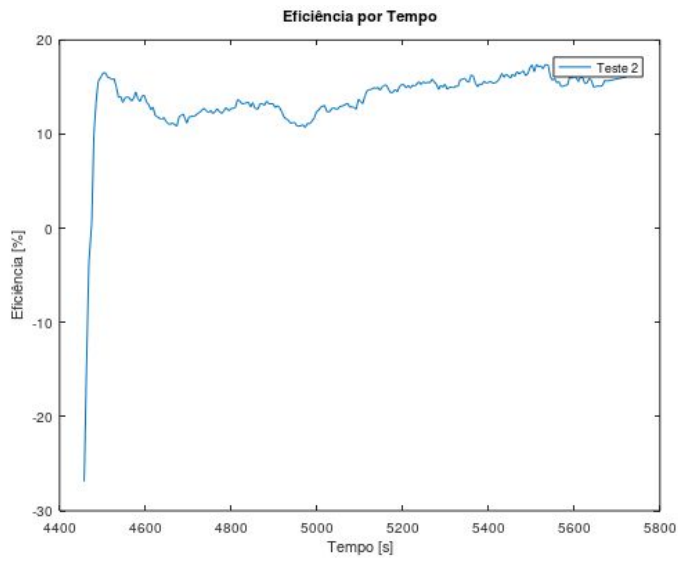




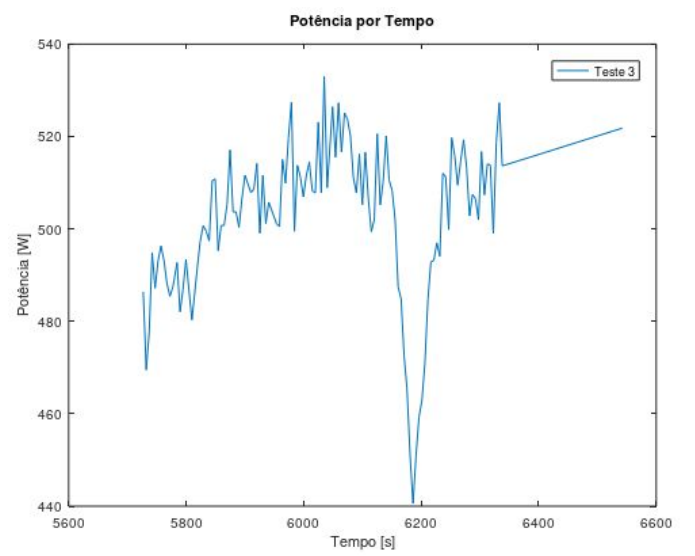
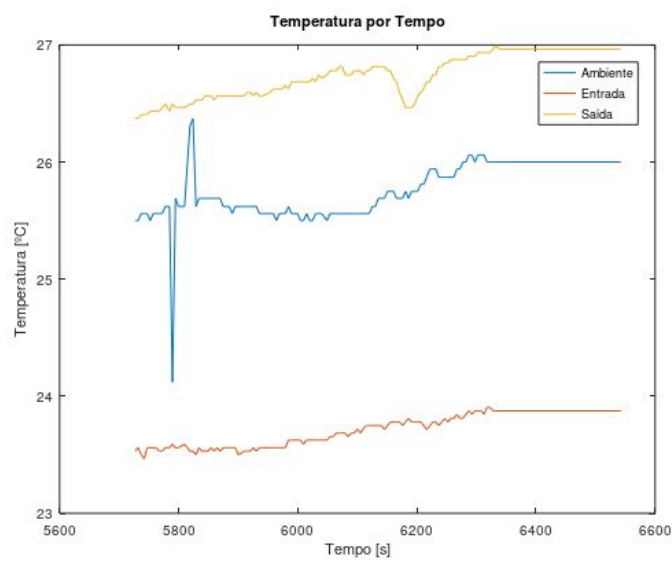
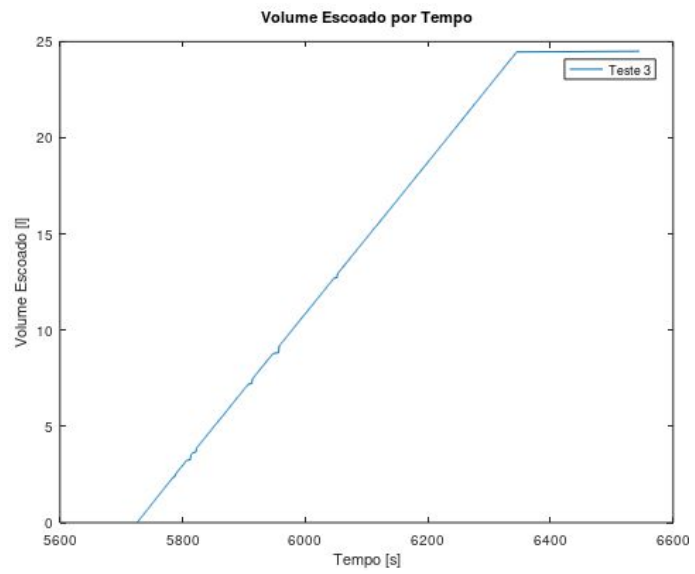
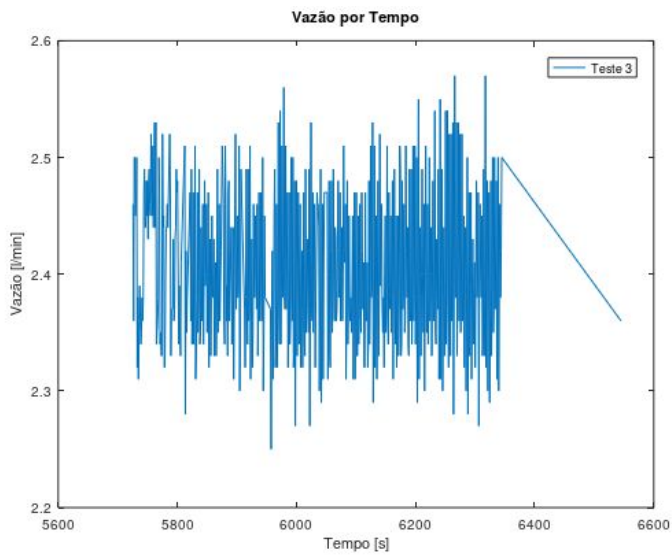


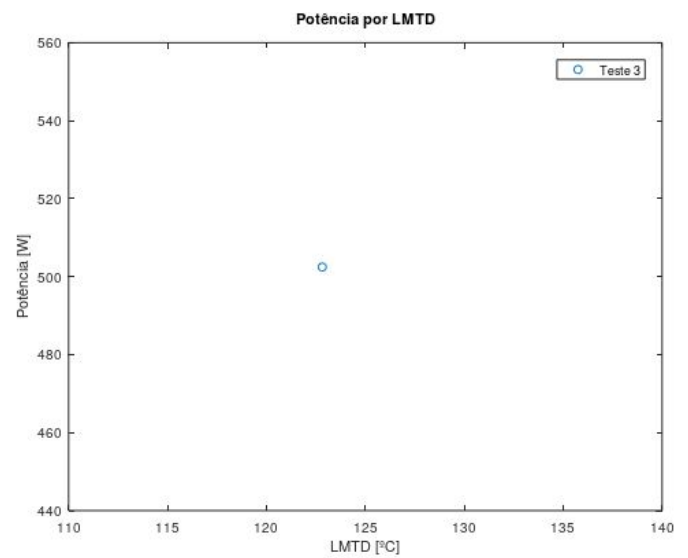
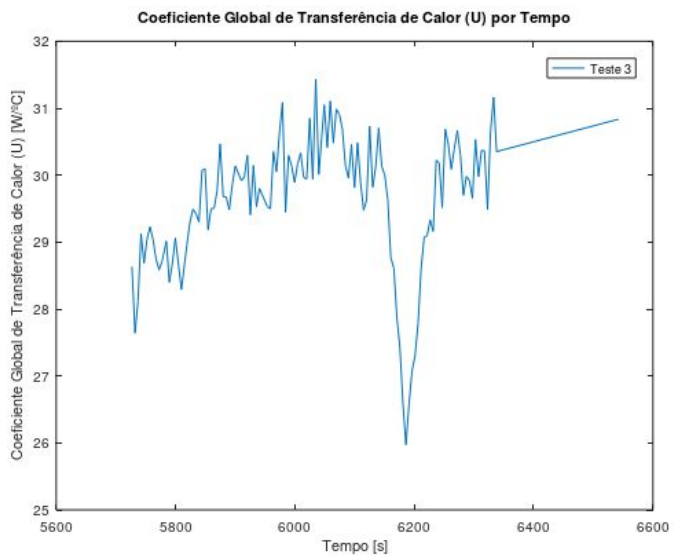
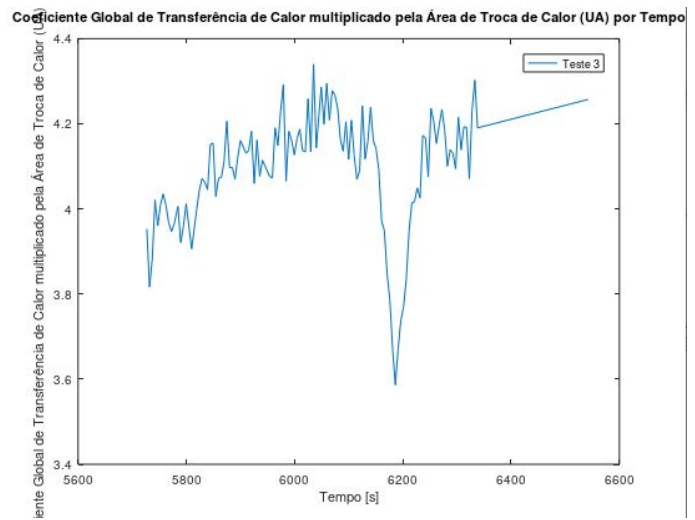
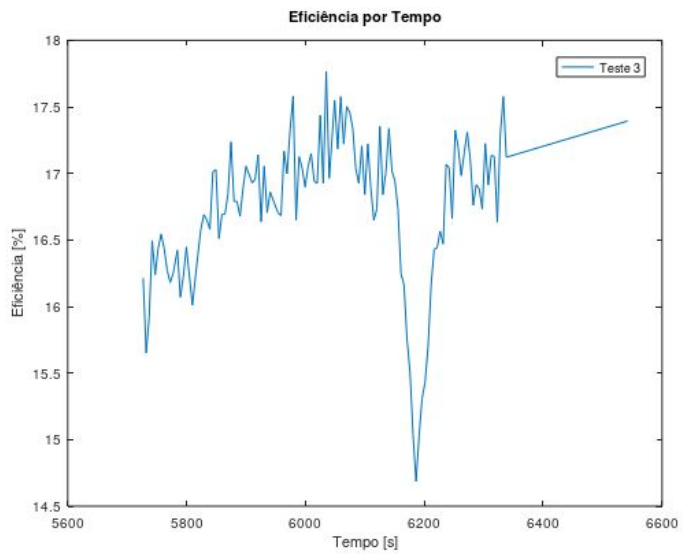
## Teste 2:



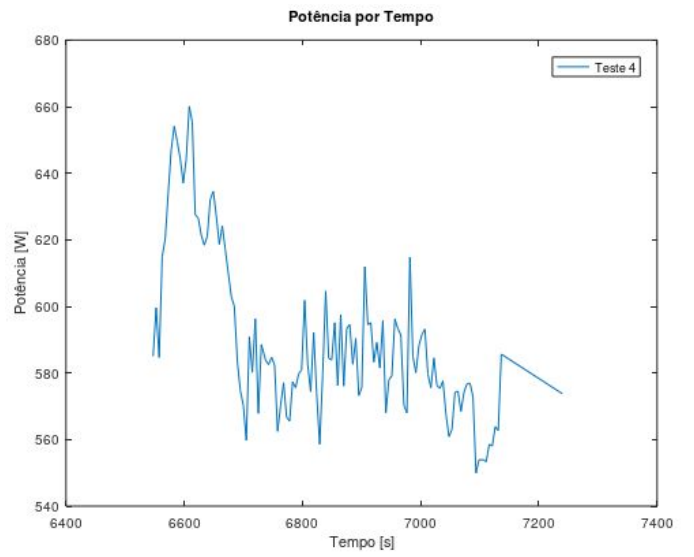
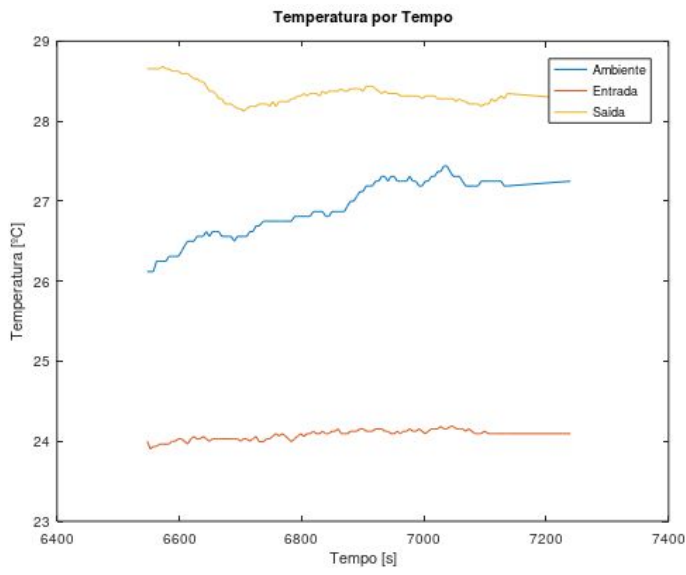
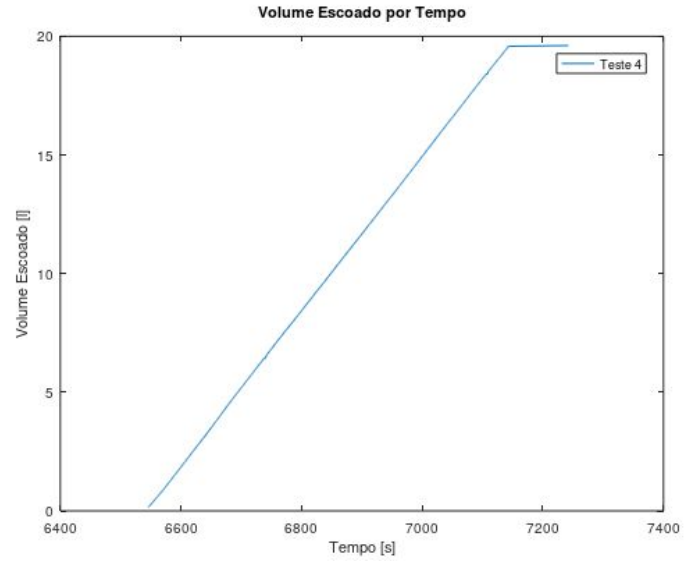
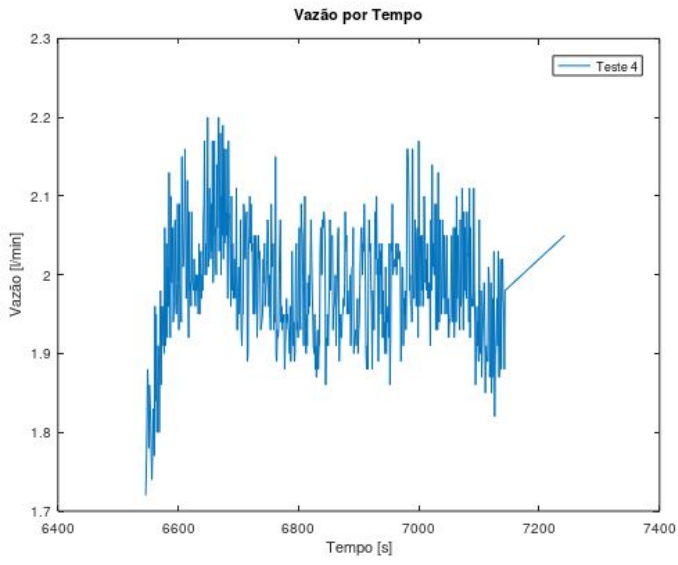


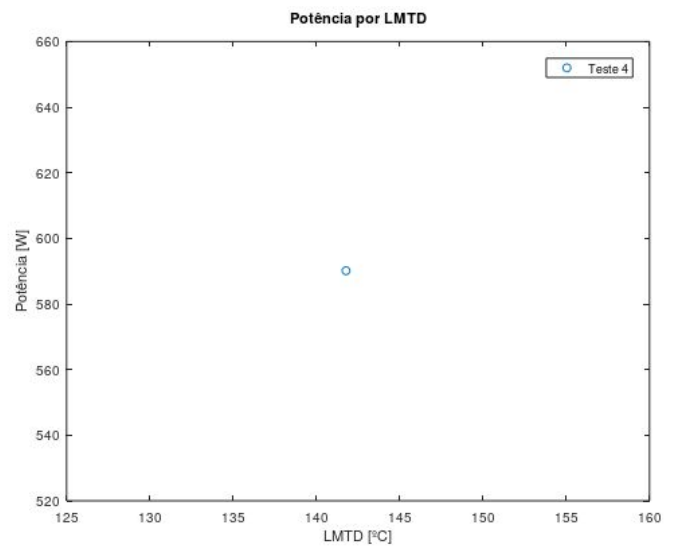
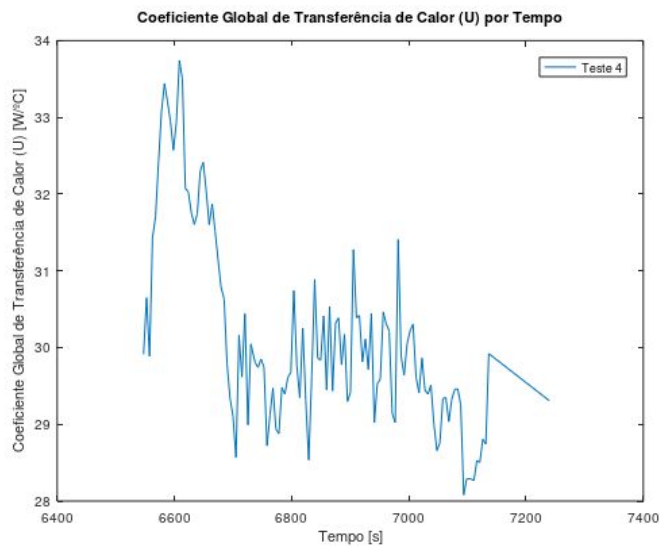
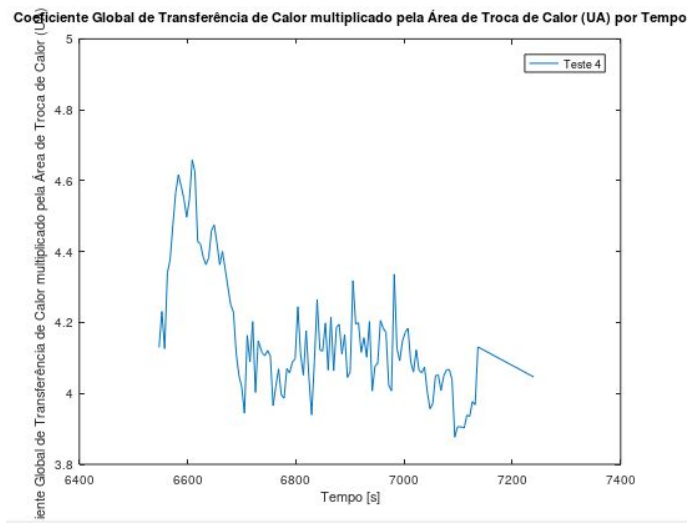
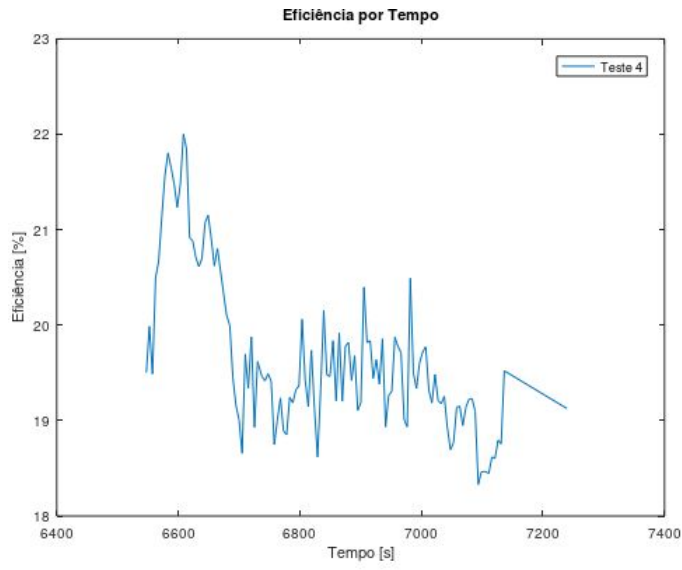
### Teste 3:



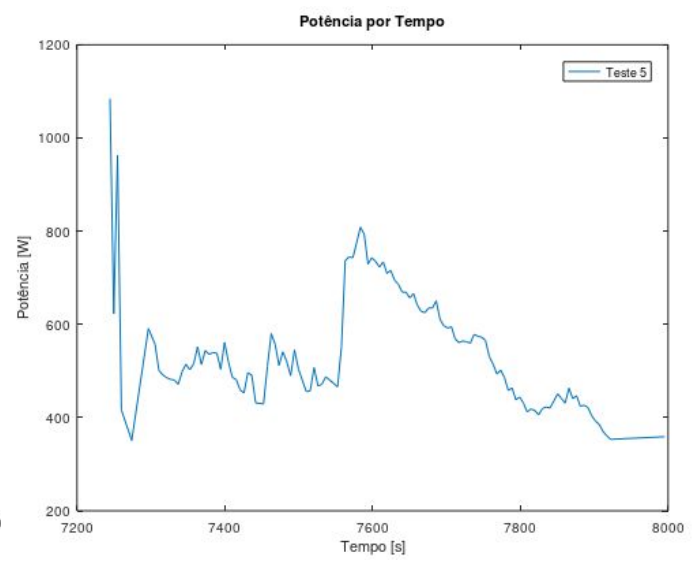
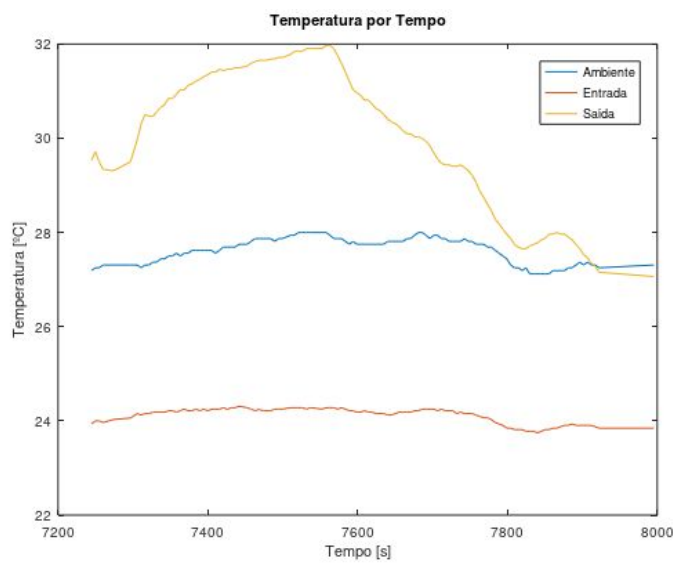
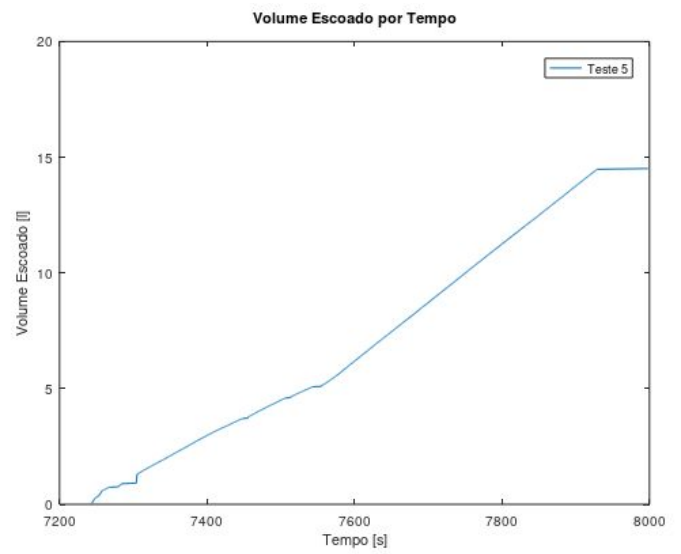
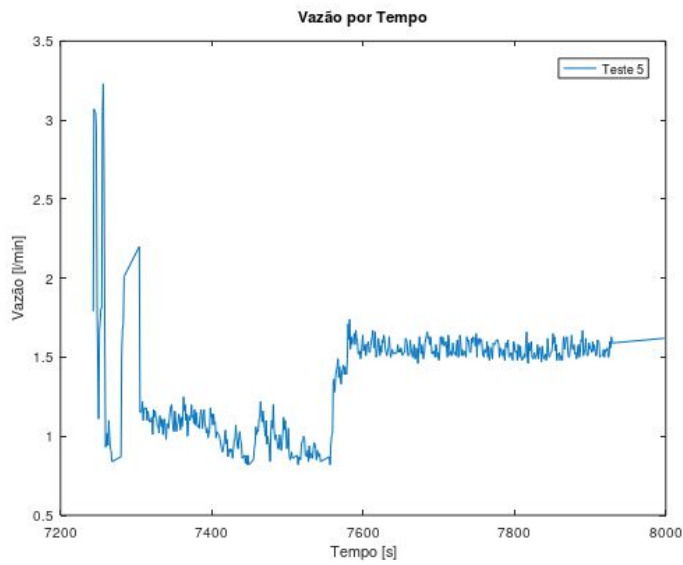


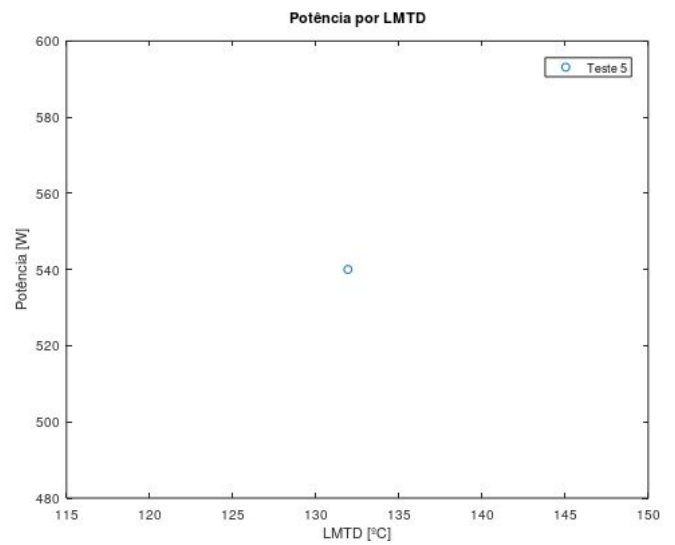
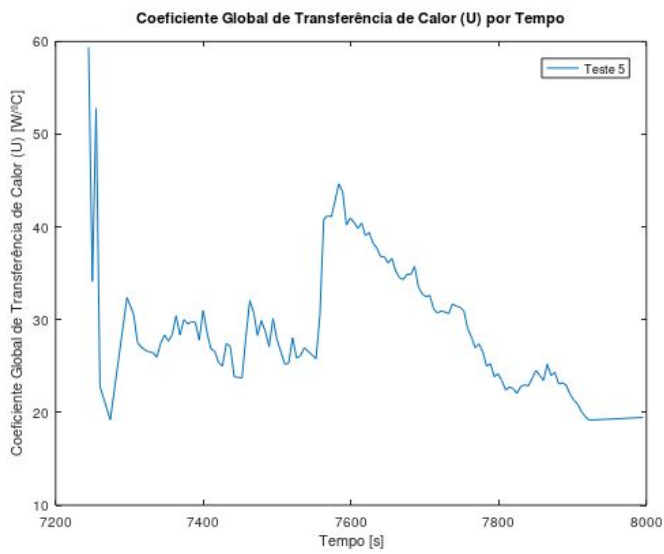
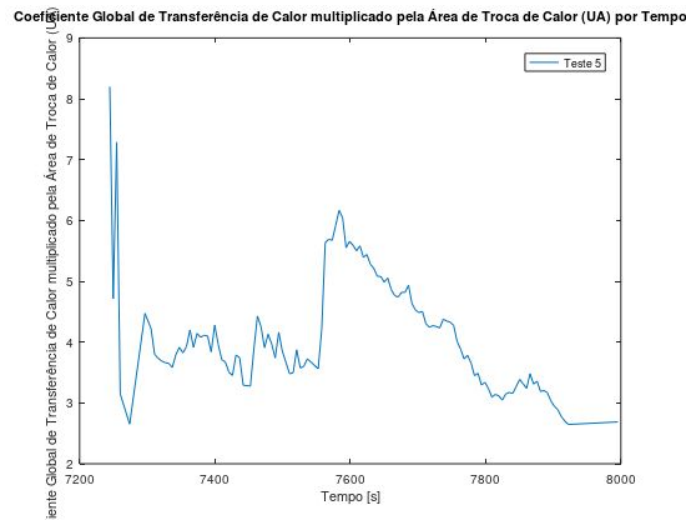
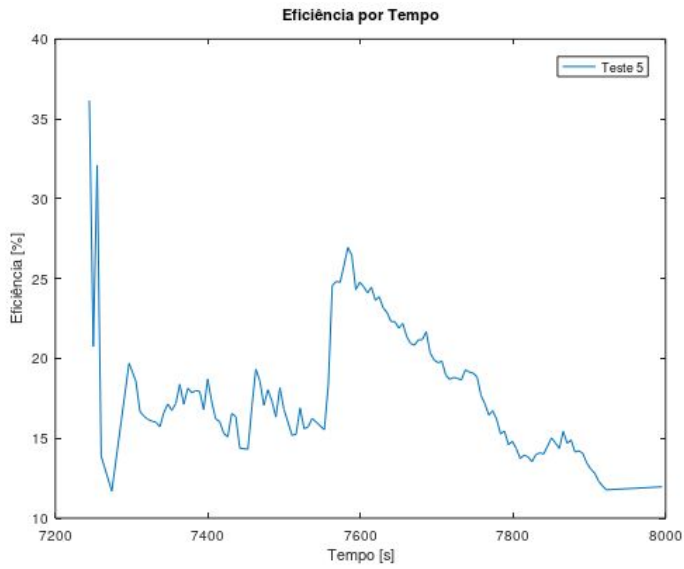
### Teste 4:





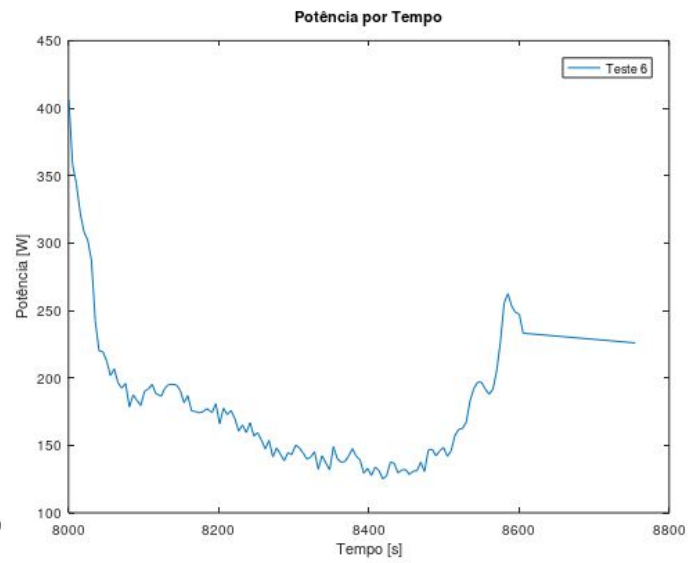
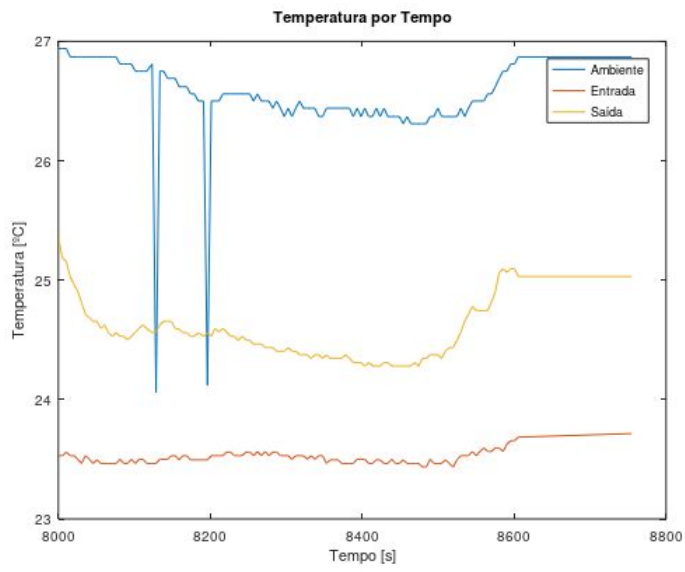
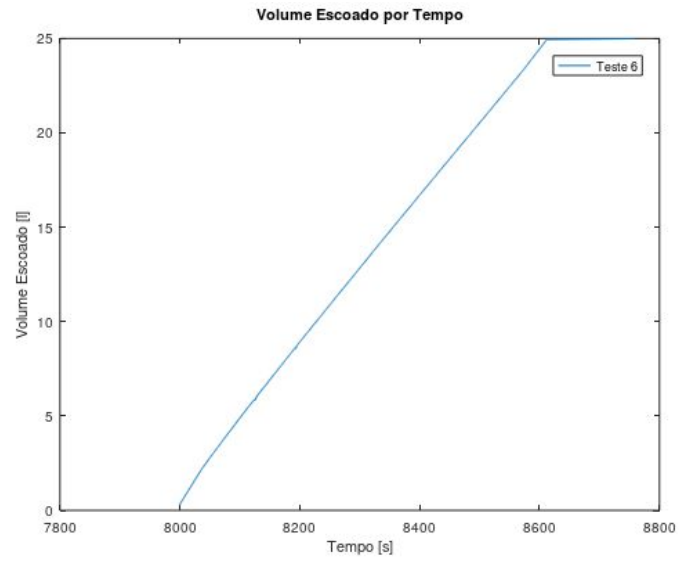
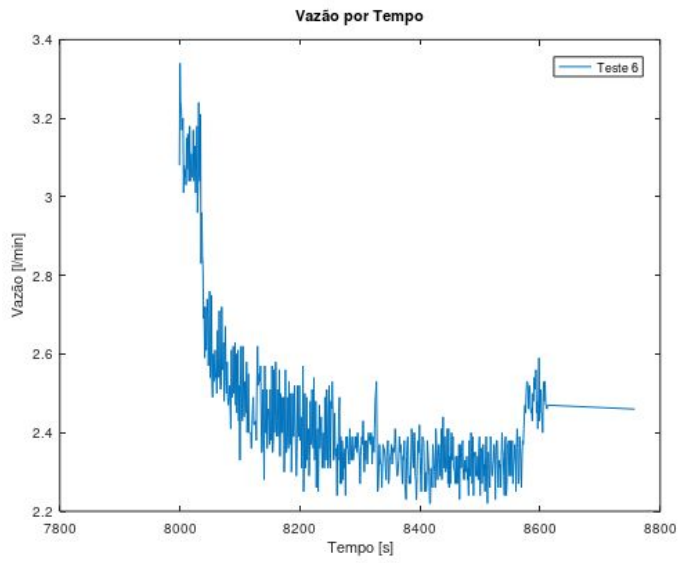
### Teste 5:

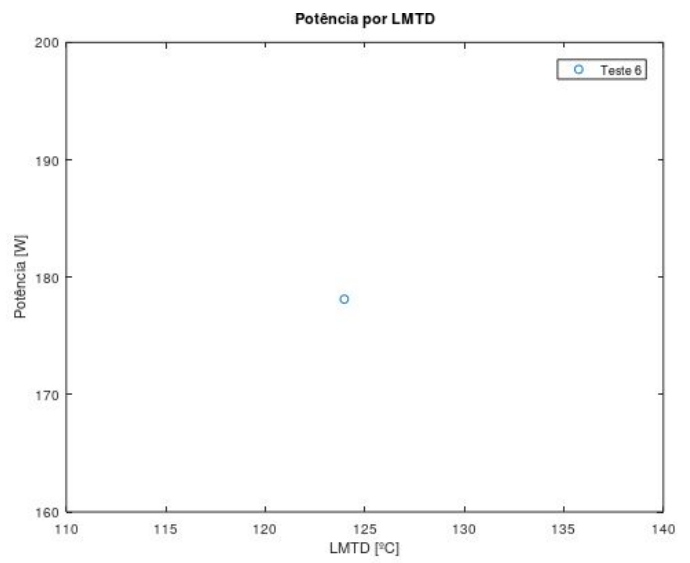
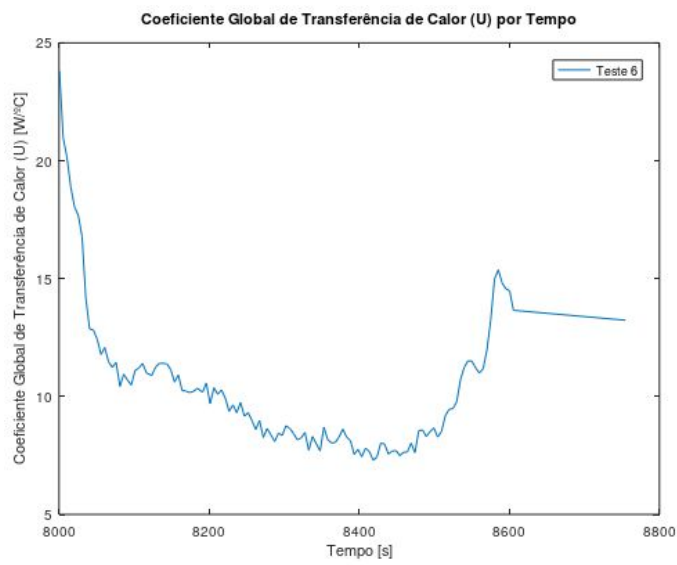
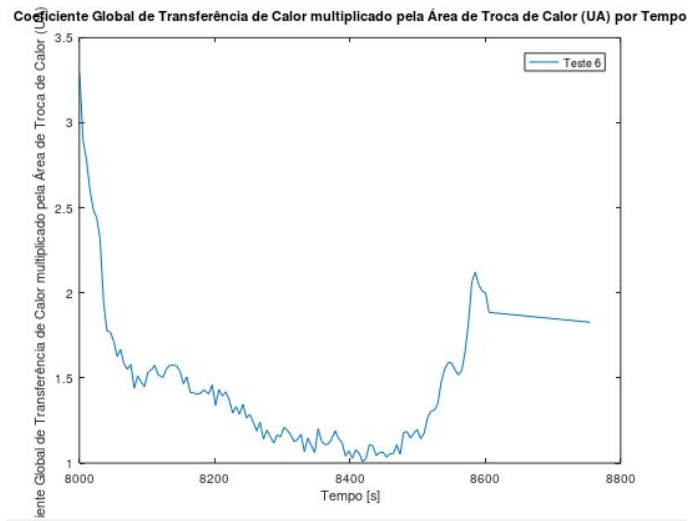
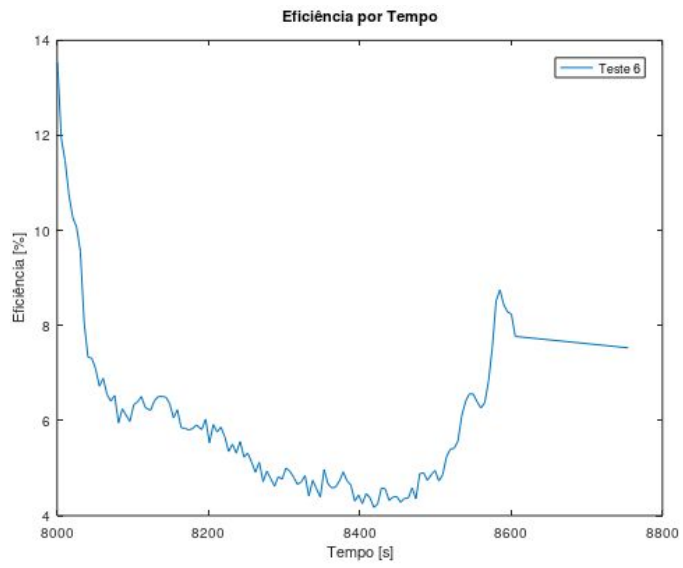




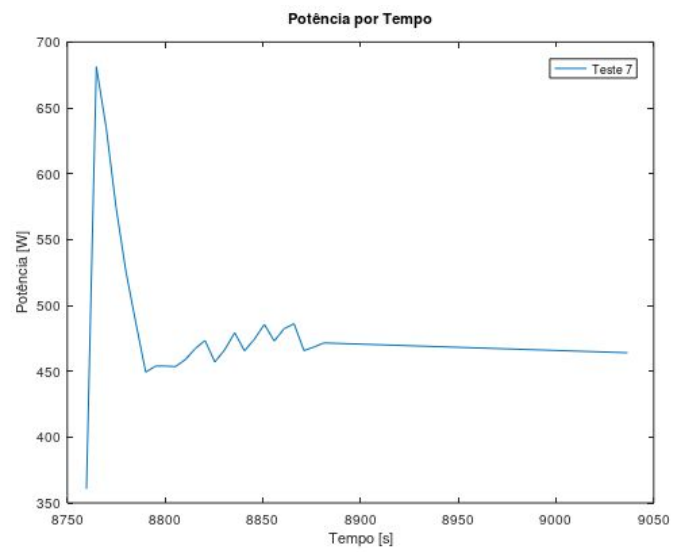
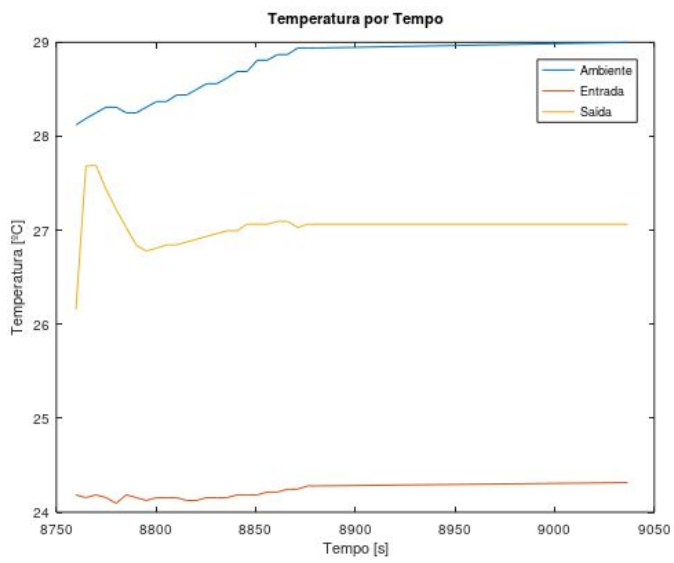
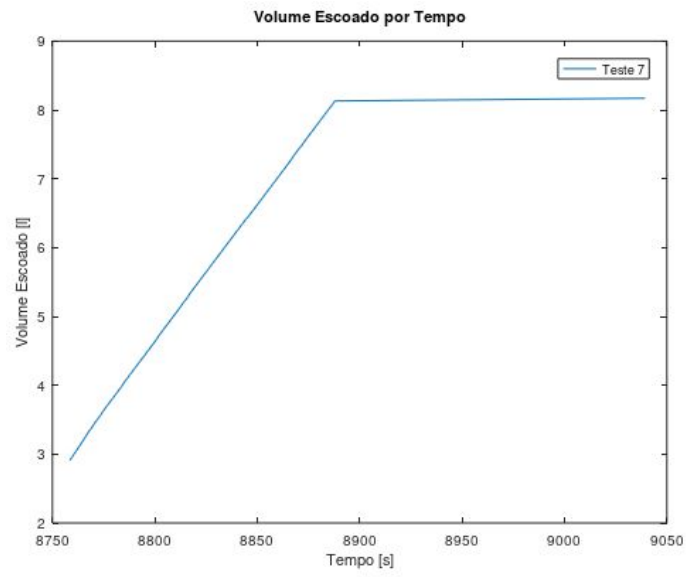
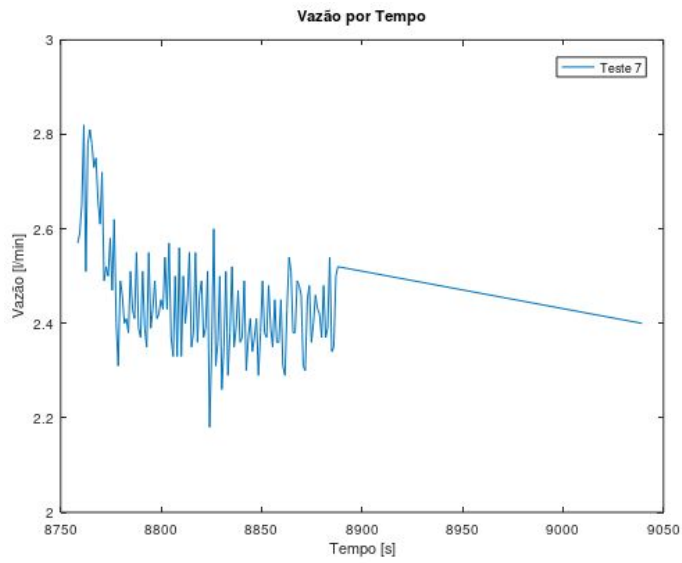


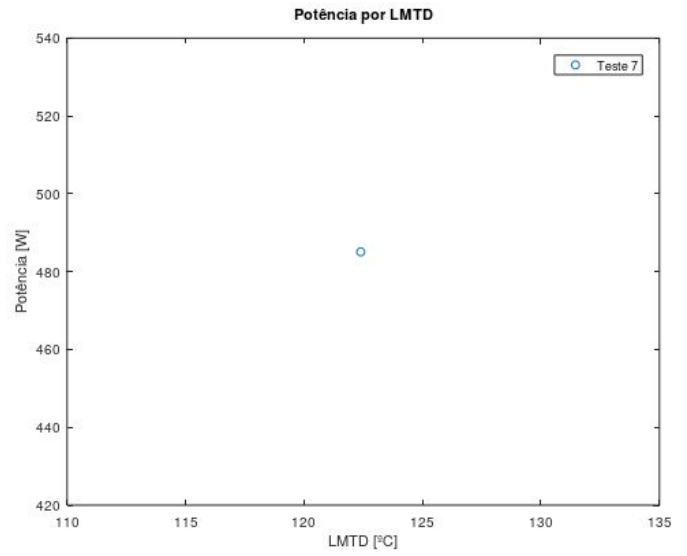
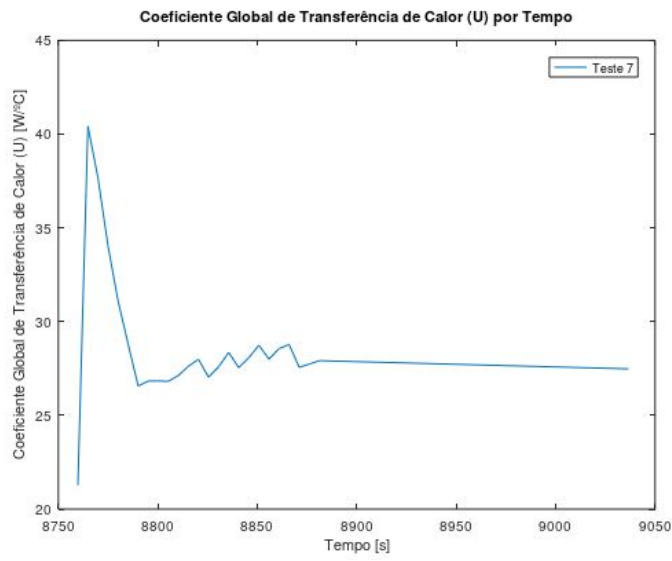
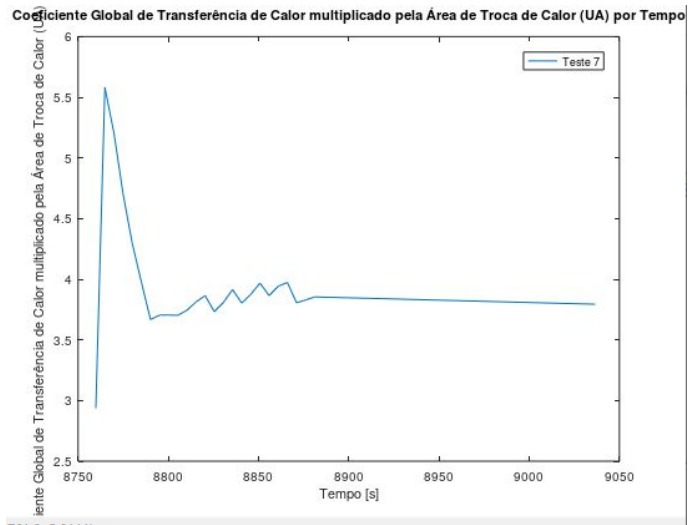
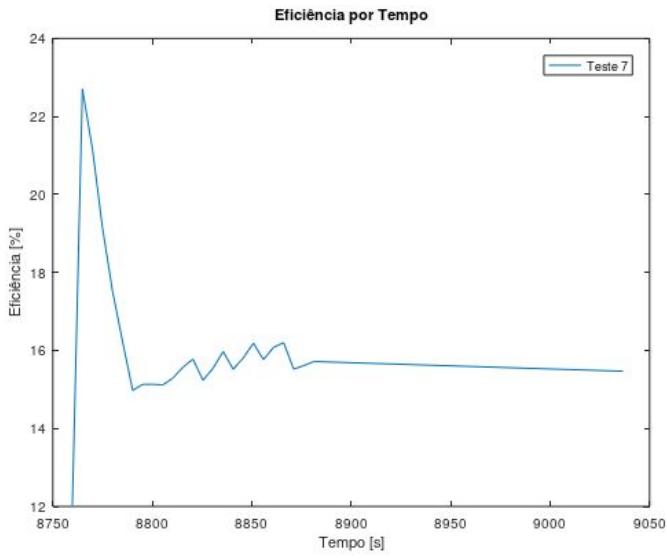
## Teste 6:



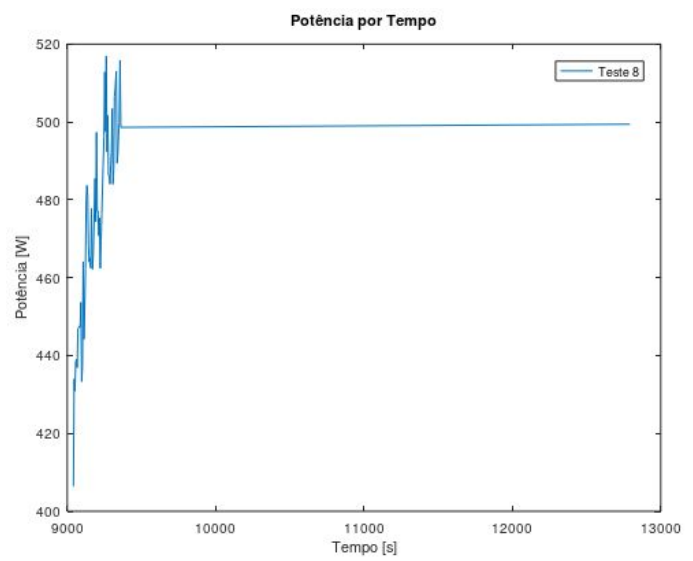
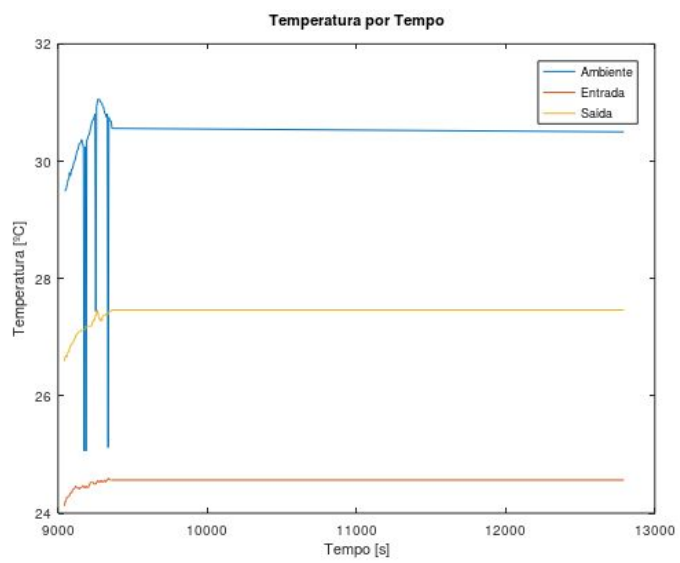
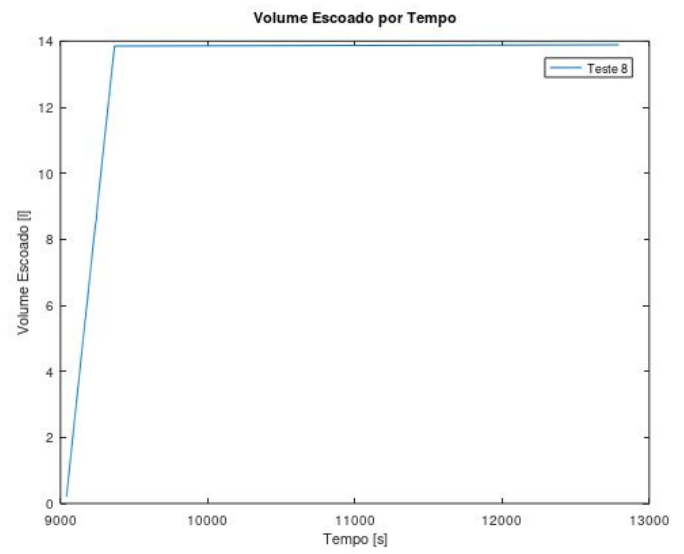
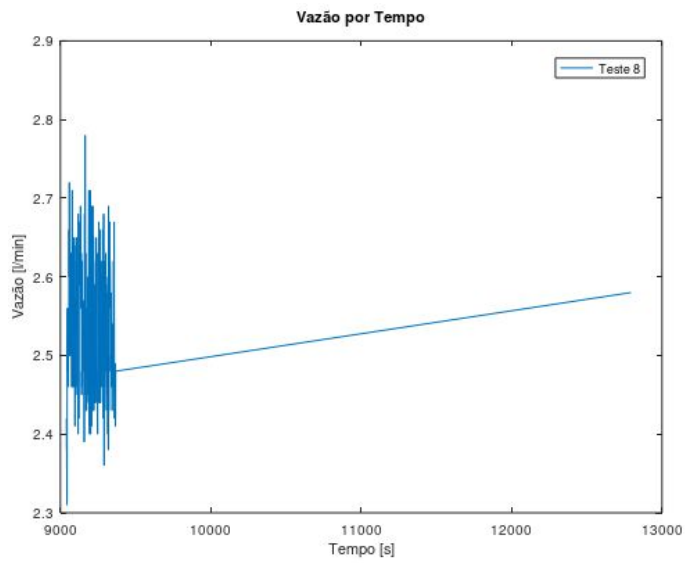


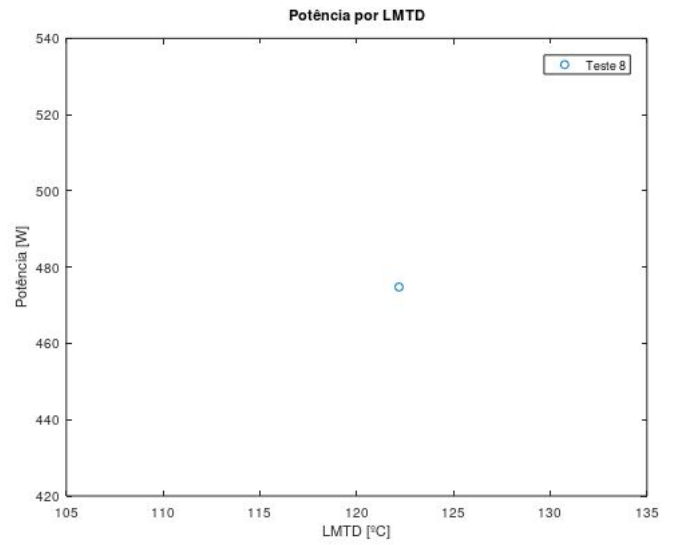
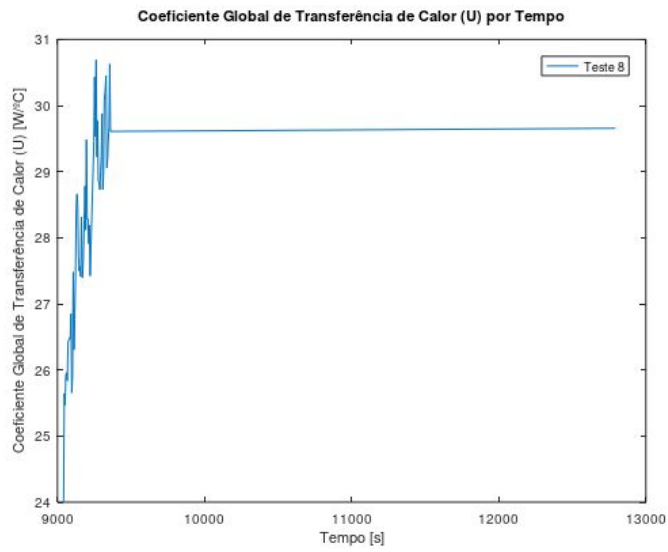
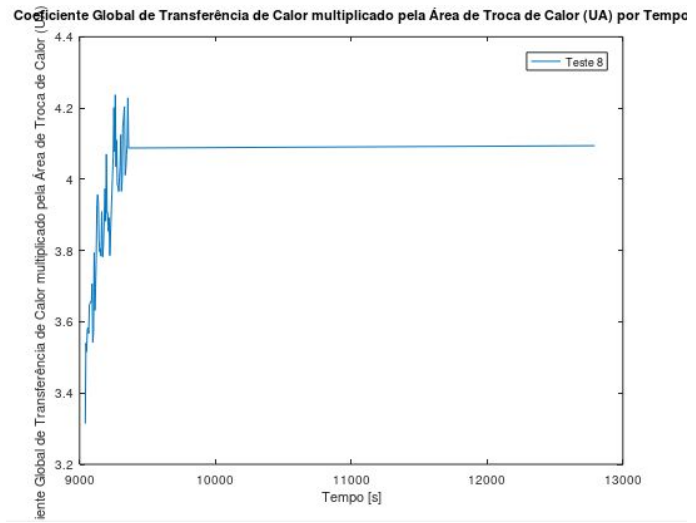
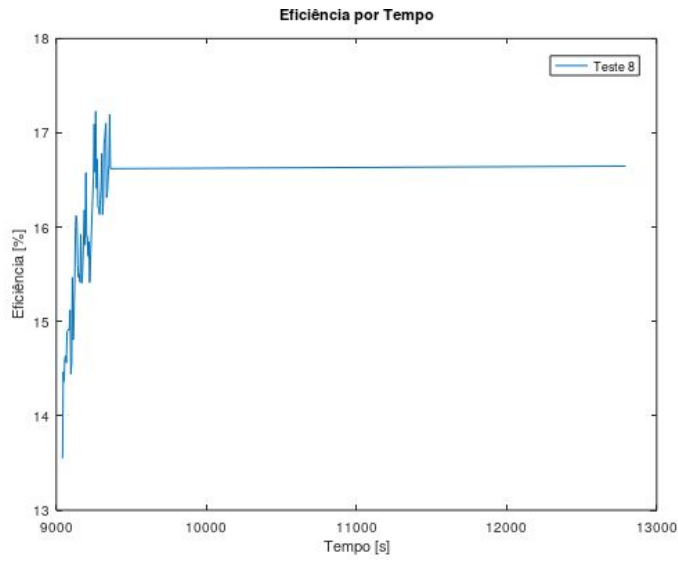
## Teste 7:



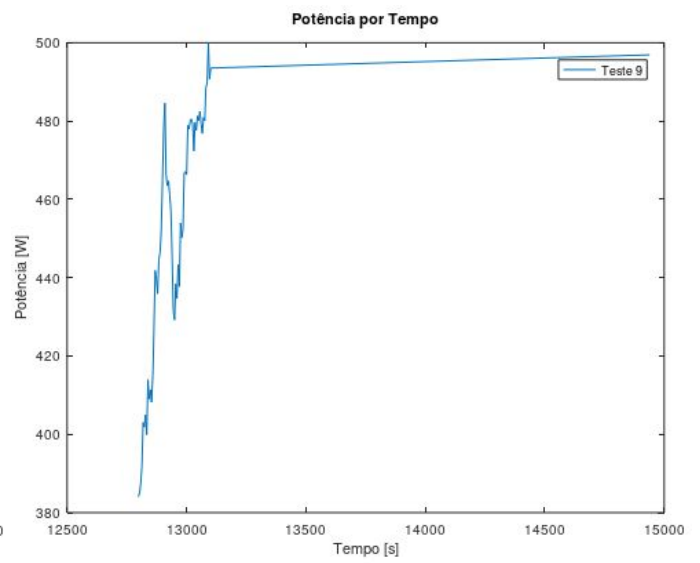
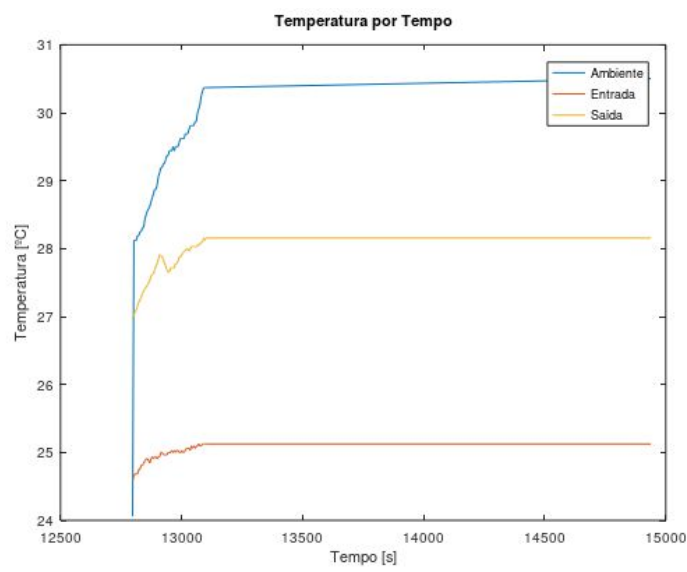
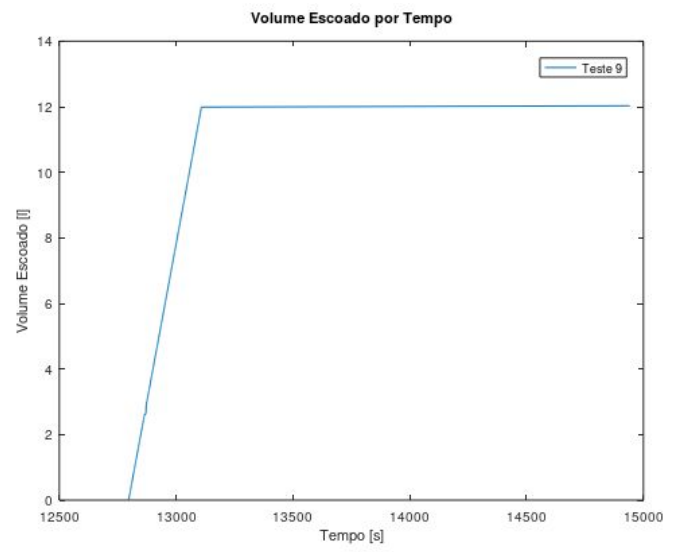
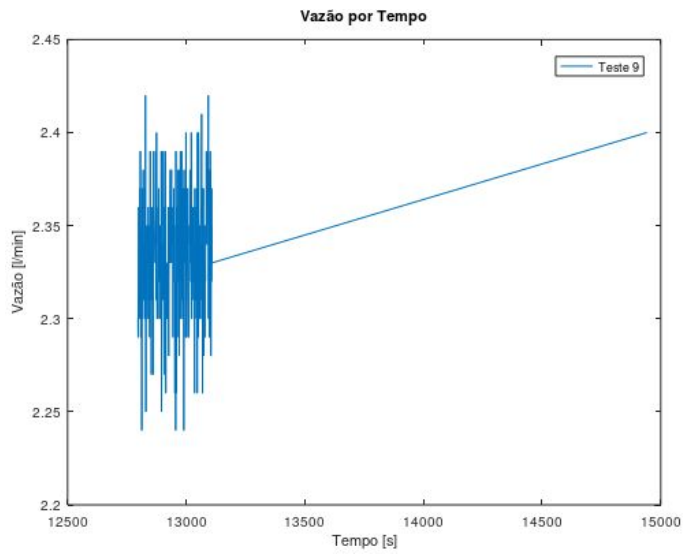


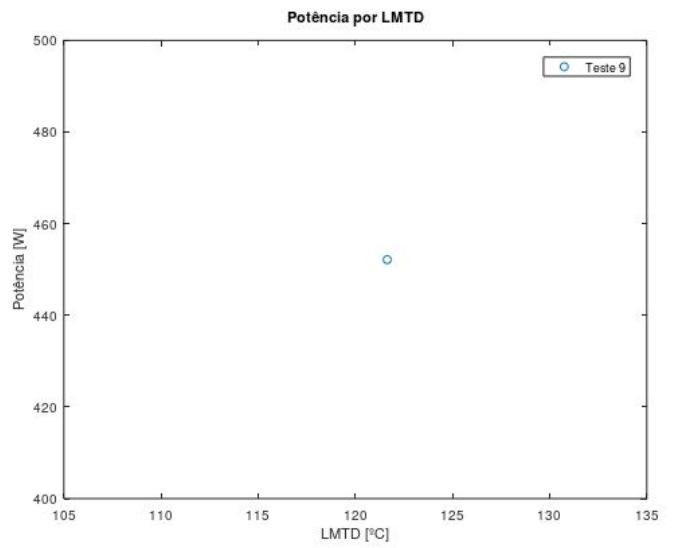
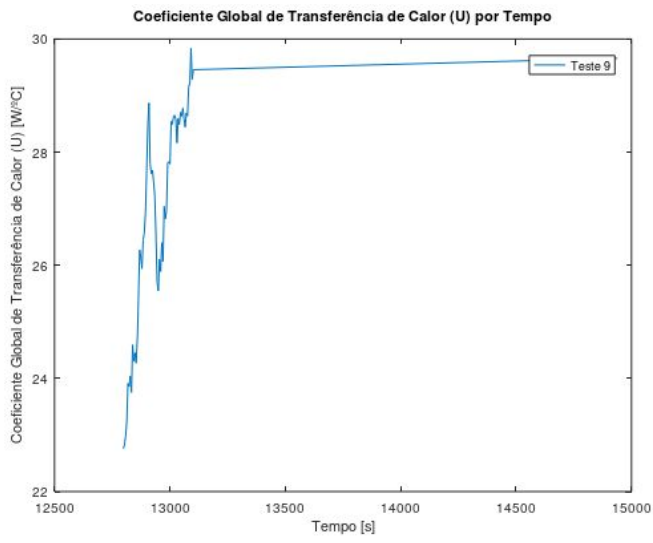
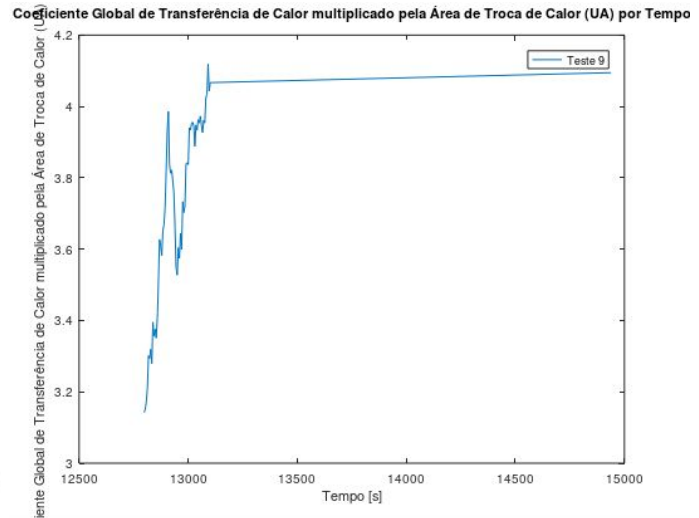
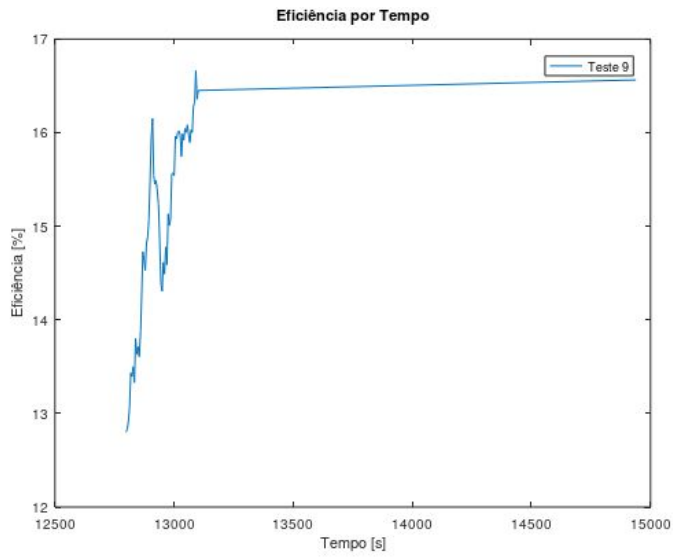
## Teste 8:





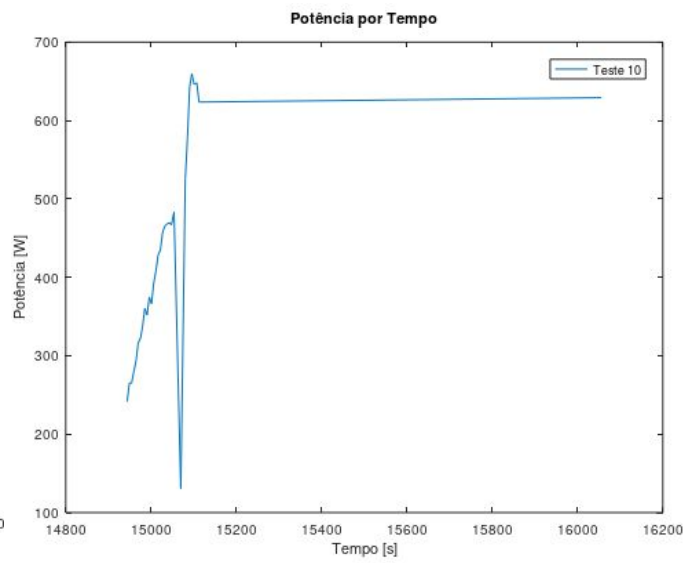
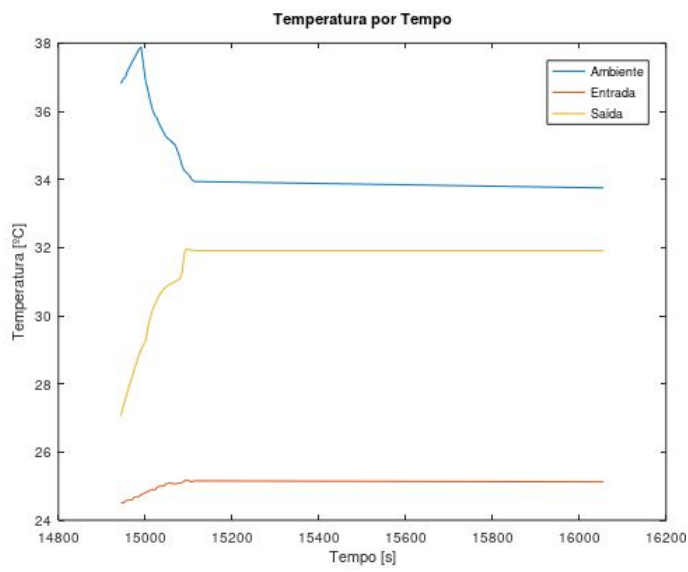
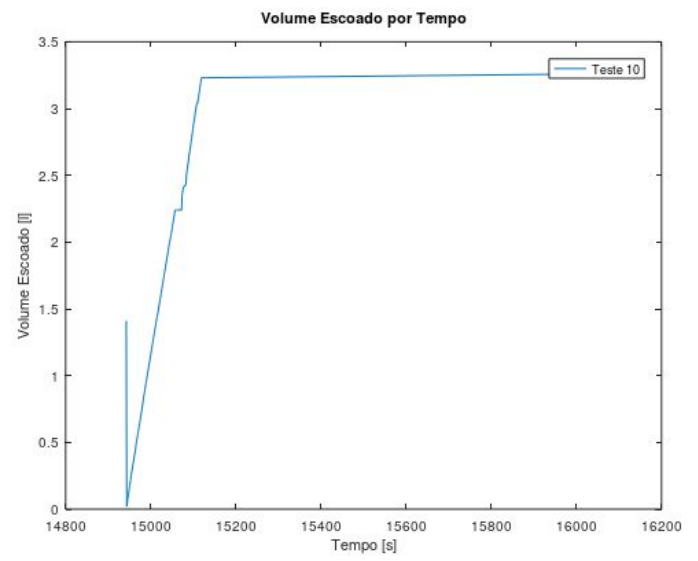
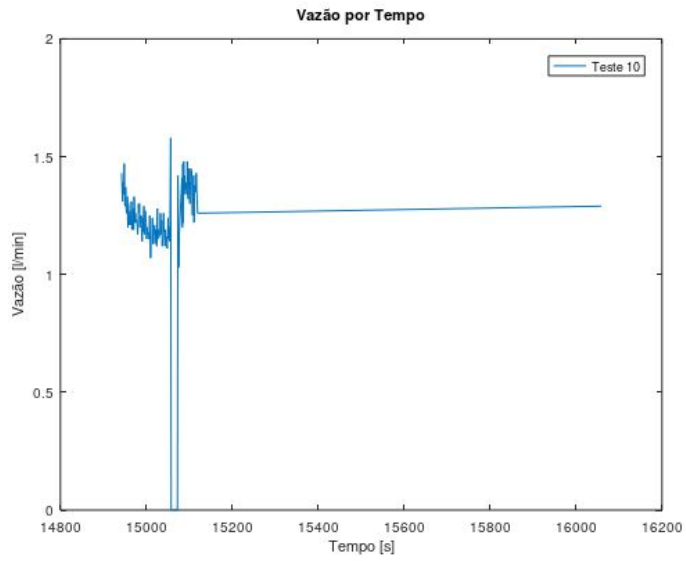
### Teste 9:

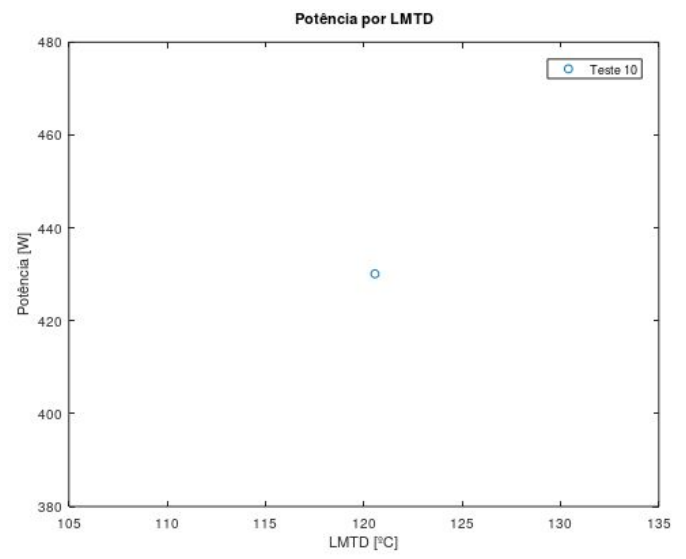
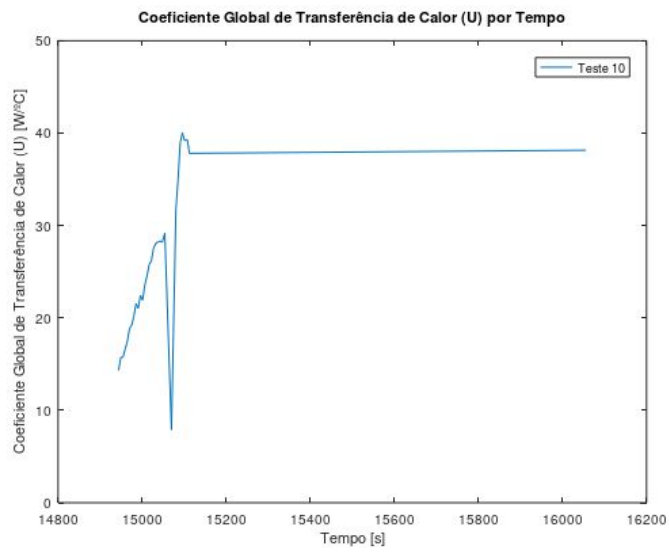
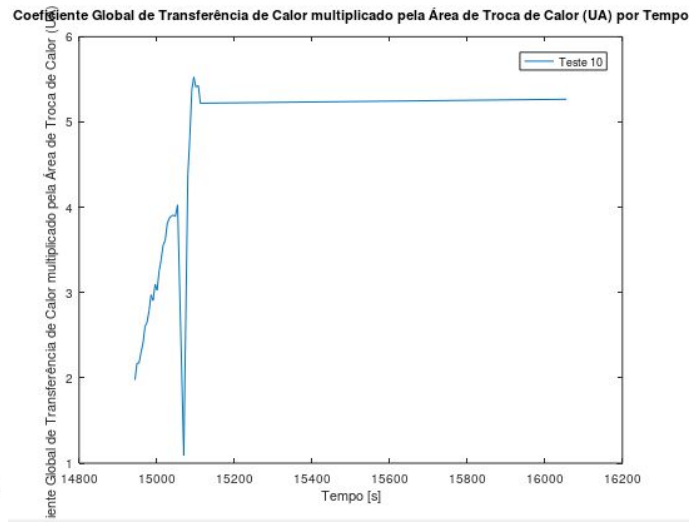
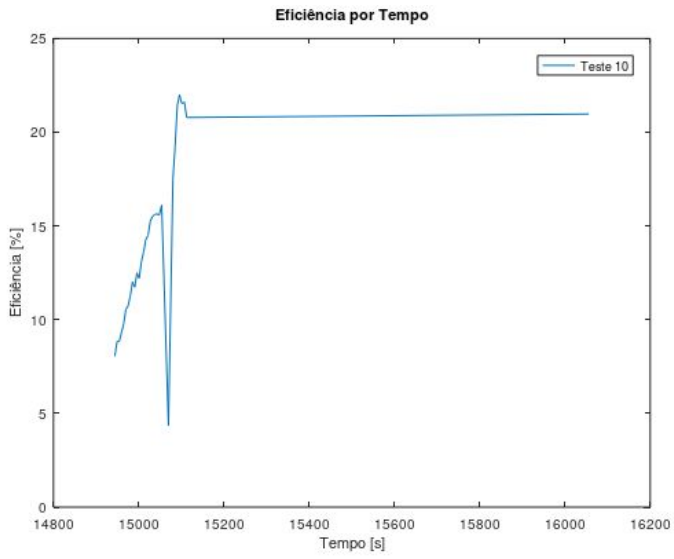




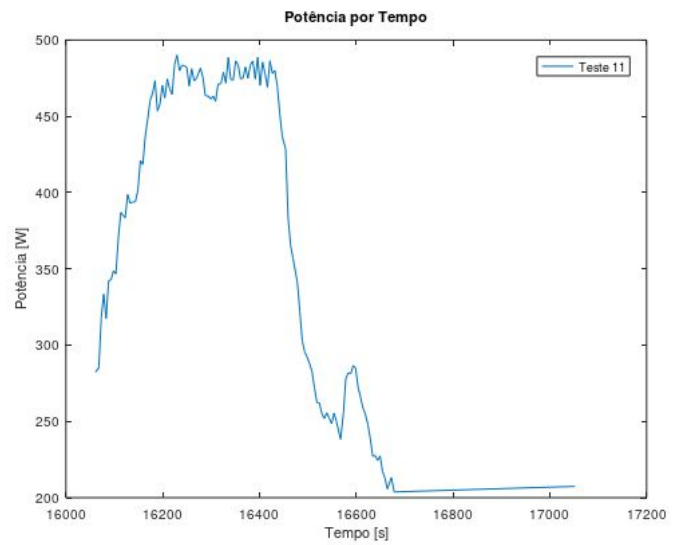
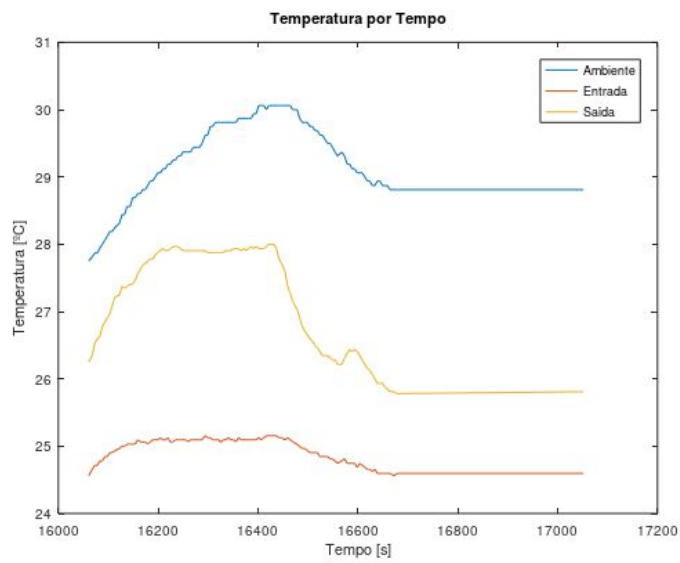
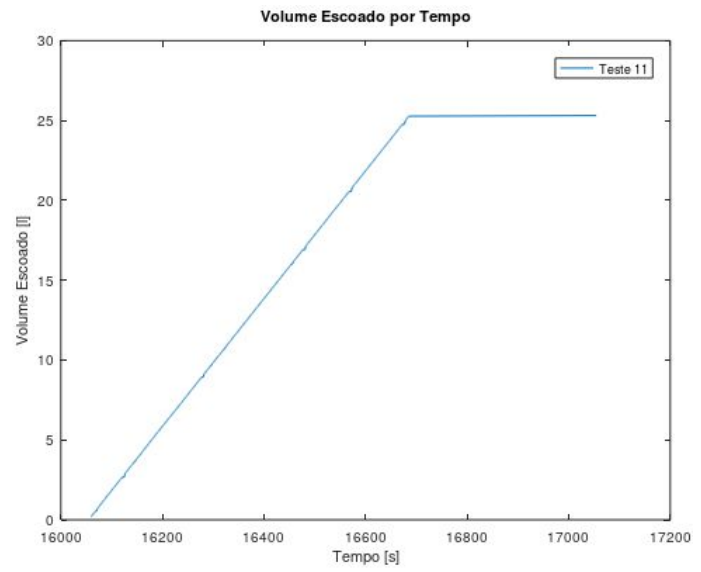
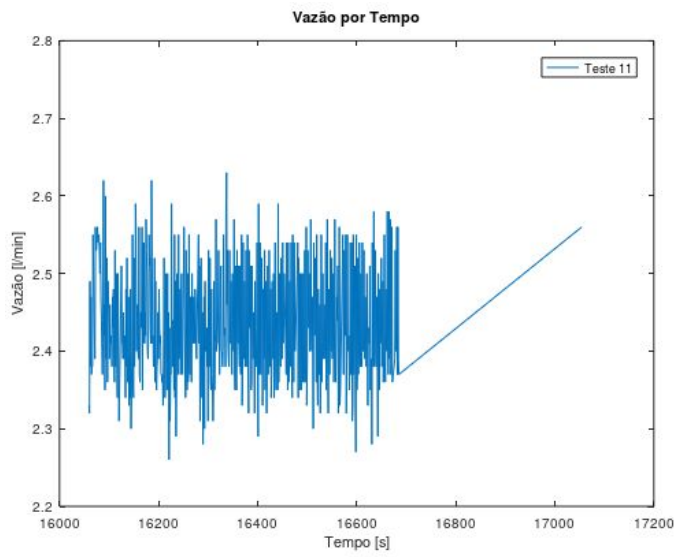


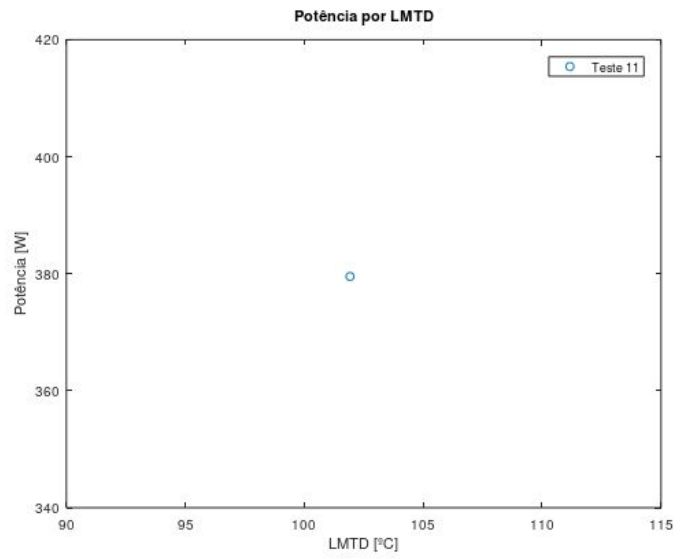
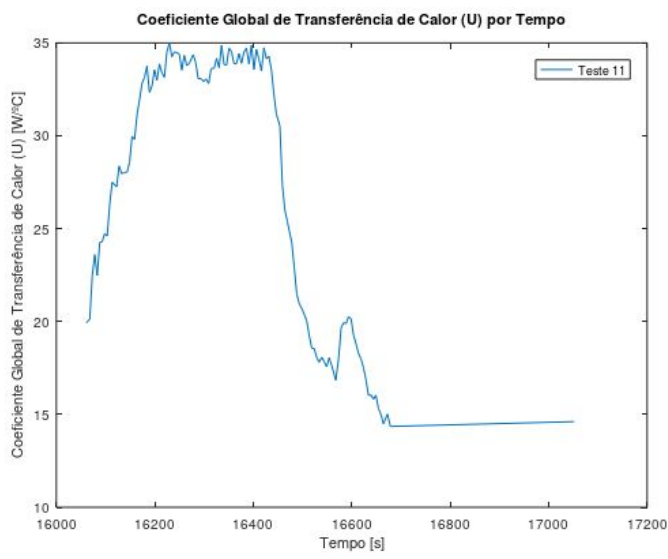
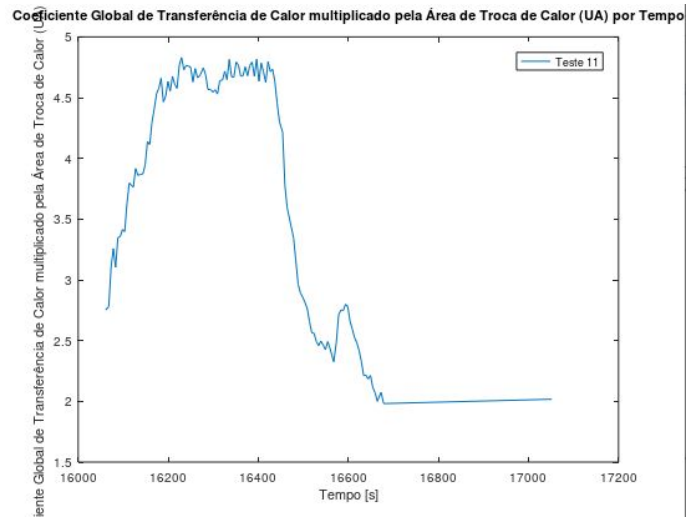
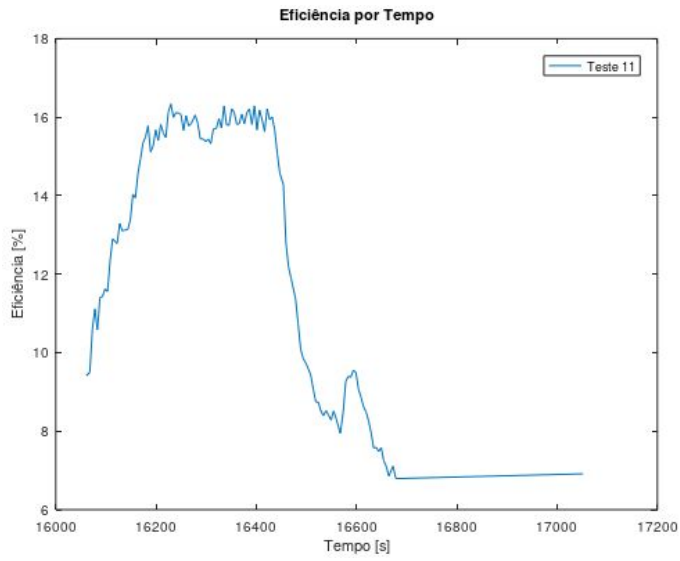
## Teste 10:





## Teste 11:





## Teste 12:

