

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

CONSTRUÇÃO E AVALIAÇÃO TÉRMICA DE UM FOGÃO SOLAR COM
CONCENTRADORES TIPO DISCO PARABÓLICO

por

Juliano Romagna

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, novembro de 2015.



Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Departamento de Engenharia Mecânica

CONSTRUÇÃO E AVALIAÇÃO TÉRMICA DE UM FOGÃO SOLAR COM
CONCENTRADORES TIPO DISCO PARABÓLICO

por

Juliano Romagna

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Alcy Rodolfo dos Santos Carrara, Dr.
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Energia e Fenômenos de Transporte**

Orientador: Profa. Letícia Jenisch Rodrigues, Dra.

Comissão de Avaliação:

Prof. Paulo Smith Schneider Dr.

Prof. Paulo Otto Beyer, Dr.

Profa. Thamy Cristina Hayashi, Dra.

Porto Alegre, 25 de novembro de 2015.

Dedico esse trabalho aos meus pais Antonio e Anita, que durante toda a caminhada me apoiaram e auxiliaram incondicionalmente.

Agradeço primeiramente a Deus, e à minha família, meus pais Anita Vizioli Romagna e Antônio Nelson Romagna que me ensinaram absolutamente todos os valores que possuo e auxiliaram nesta caminhada e em tantas outras e que souberem relevar os momentos de tensão e preocupação sempre solícitos e compreensíveis.

À minha namorada, que esteve comigo ao longo desta jornada, paciente no entendimento das dificuldades enfrentadas, me dando apoio e carinho.

Aos meus amigos-irmãos, que souberam relevar as noites em que não pude estar com eles e tantos outros convites necessariamente negados em prol do término deste curso.

À professora orientadora deste trabalho Dra. Letícia Jenisch Rodrigues, pela forma como acolheu este trabalho.

Ao professor do LabSol Dr. Arno Krenzinger e ao engenheiro Dr. César Wilhelm Massen Prieb pelo grande auxílio na condução da instrumentação e ensaio do modelo.

Aos bolsistas do LabSol, em especial ao Felipe Coutinho Saraiva e mestrandos pela prestatividade no auxílio do dia a dia dos testes.

ROMAGNA, J “**Construção e avaliação térmica de um fogão solar com concentradores tipo disco parabólico**”. 2015. 20 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi a construção e a avaliação térmica de um fogão solar com dois concentradores tipo disco parabólico. A partir da análise qualitativa da refletividade de diferentes materiais, utilizando-se um foto-sensor de silício, selecionou-se o material de recobrimento dos discos. O recipiente de cozimento, cuja estrutura é de alumínio, foi isolado com uma mistura de cimento e EPS (poliestireno expandido) entre outros materiais, visando minimizar as perdas térmicas laterais e superior para o ambiente. Uma vez construída a estrutura, o fogão foi instrumentado com vistas à determinação da temperatura da base e das laterais do recipiente de cozimento, da temperatura dos discos, da radiação incidente na base do recipiente de cozimento e do aumento da temperatura de 1L de água ao longo do processo. As temperaturas máximas na lateral, na base do recipiente e nos discos foram de 44,7°C, 178,7°C e 52,9°C, respectivamente. A máxima irradiação medida foi de 1032W/m², e água atingiu 80,5°C de temperatura máxima. O fogão solar construído permite a avaliação de vários parâmetros envolvidos na análise térmica de dispositivos concentradores, de maneira que será utilizado como ferramenta didática experimental na disciplina de Energia Solar Térmica.

PALAVRAS-CHAVE: avaliação térmica de fogão solar, discos concentradores de radiação solar, fogão solar com discos concentradores.

ROMAGNA , J “**Construction and thermal evaluation of a stove of a solar stove with parabolic dish concentrators**”. Ano. 20 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

ABSTRACT

The following project has as its main goal the manufacturing and thermal evaluation of a solar stove with two parabolic dish concentrators. Starting from the qualitative analysis of the reflectivity of different materials, using a silicon photo-sensor the discs covering material was selected. The cooking recipient which is made of aluminum, was isolated with a mixture of cement and EPS (expanded polystyrene) among other materials, focusing on minimize the lateral and superior thermal losses to the ambient. Once the structure was constructed, the stove was instrumented in order to determine the base and lateral temperatures of the cooking recipient, the discs temperature, the radiation incident on the cooking recipient's base and the temperature's rise of 1L of water during the process. The maximum temperatures at the lateral and base of the recipient and the discs were, 44,7 °C, 178,7°C e 52,9°C, respectively. The maximum irradiation measured was 1032 W/m² and the water's maximum temperature was 80,5 °C. The solar stove built allows the evaluation of several parameters involved in the thermal analysis of concentrators dispositives, on a way to be used as an experimental didactic tool for the Thermal solar energy class.

KEYWORDS: Thermal evaluation of a solar stove, solar radiation concentrator discs, solar stove with concentrator discs

ÍNDICE

	Pag.
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	2
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E MODELO MATEMÁTICO	3
4.1. Aspectos gerais	3
4.2. Equacionamento de dimensionamento e desempenho.....	3
5. METODOLOGIA	5
5.1. Seleção do material de recobrimento dos discos concentradores	5
5.1.1. Resistência do material à temperatura	5
5.1.2. Custo total de aplicação	6
5.1.3. Refletividade	6
5.2. Projeto e construção do fogão solar	8
5.2.1. Projeto da estrutura	8
5.2.2. Concentradores	9
5.2.3. Isolamento do recipiente de cozimento	9
5.3. Instrumentação	9
5.3.1. Calibração dos sensores	10
5.4. Procedimento de medição dos dados	11
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES	12
7. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	14
REFERÊNCIAS	15
Apêndice I – Elaboração do corpo de provas	16
Apêndice II – Sugestões para trabalhos futuros	17
Apêndice III – Construção do recipiente de absorvedor	18
Apêndice IV – Curvas de Calibração e Operação	19

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, são visíveis os esforços que a humanidade vem empregando para com o desenvolvimento sustentável que, segundo o relatório Brundtland – o nosso futuro comum – (Brundtland, 1987) é aquele desenvolvimento capaz de suprir as necessidades da geração atual sem comprometer a capacidade de atender às necessidades das gerações futuras. Seguindo nessa linha de raciocínio, temos a energia solar, que figura como fonte alternativa de energia aos custosos meios tradicionais advindos da queima de combustíveis fósseis. Evidenciando a forte tendência mundial de utilização de recursos renováveis temos, segundo a Agência Internacional de Energia (IEA, 2015), que a energia solar poderá até meados deste século tornar-se a maior fonte de energia no mundo, em sua maioria através do uso de sistemas fotovoltaicos descentralizados. Isso sem levar em consideração a parcela associada à geração de energia térmica, que é o aspecto de interesse no presente trabalho.

Nesse sentido, o aproveitamento da radiação oriunda do Sol para aquecimento de água, e outros fluidos de trabalho, já é amplamente utilizado em residências e indústrias. Por exemplo, coletores solares do tipo placa plana são largamente utilizados no aquecimento de água em residências. Por serem os mais simples da categoria, proporcionam flexibilidade de construção aliada a temperaturas de aquecimento, em média 80°C, superiores a temperatura ambiente (Krenzinger, 2001). Por outro lado, os coletores do tipo concentrador parabólico podem atingir temperaturas superiores a 250°C em seu ponto focal com relativa facilidade. Essa característica faz com que sejam preferidos em operações que exigem maiores temperaturas do fluido de trabalho. Conforme evidenciado por Ramos Filho, 2011, a temperatura focal, quando do uso de dois coletores elípticos, pode atingir até 740°C.

Os fogões solares são um exemplo de aplicação deste modelo de coletor concentrador. Como o próprio nome sugere, esse tipo de dispositivo pode ser utilizado no cozimento de alimentos, bastando apenas posicionar um recipiente de cozimento, ou panela, na região focal. Conforme Queiroz, 2005, os fogões solares testados no nordeste brasileiro possuem desempenho similar ao tradicional fogão a gás (butano). Por exemplo, o tempo de cozimento para 0,25 kg de macarrão foi, em média, de 30 minutos para ambos os fogões. Ainda nesta região do país, este tema figura em várias pesquisas acadêmicas, onde existem diversos estudos acerca da viabilidade e da aplicabilidade dos mesmos.

Em nível mundial, entidades como a Unesco desenvolvem e financiam projetos visando o uso de fogões solares na África, principalmente no Zimbábue e no Quênia (Souza *et al.*, 2009). No Quênia, por exemplo, a entidade *Solar Cooking International* financiou um programa que culminou na construção deste tipo de dispositivo beneficiando mais de 15 mil famílias residentes em um campo de refugiados. No Peru encontra-se em andamento um projeto semelhante que envolve a participação de jovens, propiciando também, acesso à saúde e educação para as famílias envolvidas (Souza *et al.*, 2009).

Na literatura especializada, observa-se a proposição de diferentes formatos de fogões solares, tanto dos concentradores como do recipiente de cozimento e da estrutura. No caso dos fogões concentradores, na maioria dos casos, o material de recobrimento utilizado é o espelho. Entretanto, é necessário que o espelho seja cortado em pequenos pedaços e depois ajustado à curvatura do disco. Esse procedimento encarece o produto final e pode trazer riscos a quem o utiliza.

Nesse sentido, justifica-se a avaliação de diferentes materiais de recobrimento, em sua maioria mais resistentes que o espelho, uma vez que uso deste tipo de dispositivo pode se estender para situações de uso mais severas (crítico), como por exemplo em destiladores e em dessalinizações de água. Não obstante, justifica-se também a avaliação térmica desse dispositivo em situações distintas de clima e de incidência solar (irradiação). Isto porque, conforme mencionado anteriormente, o fogão solar pode ser utilizado em diversas regiões (latitudes) do planeta.

O presente trabalho apresenta a construção e a avaliação térmica de um fogão solar semelhante ao proposto por Ramos Filho, 2011, porém utilizando outro recobrimento que não o

espelho. A seleção do material foi feita levando-se em consideração apenas os seguintes quesitos: a resistência do material a temperaturas mais elevadas, custo total de aplicação e uma referência qualitativa da refletividade, a qual será detalhada na Seção 5. As inovações propostas são o uso de parafusos ao longo de toda estrutura, permitindo que o usuário consiga “rastrear” a posição do Sol durante o horário das 09h às 15h, conhecido como janela solar, o emprego de antenas parabólicas tipo banda ku , como disco concentrador, utilizando outro revestimento que não o espelho, e a utilização de isolamento em todo o recipiente de cozimento.

2. OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivos principais a construção e a avaliação térmica de um fogão solar concentrador, tipo disco parabólico. Visando atingir estes objetivos, têm-se as seguintes metas:

- selecionar o tipo de recobrimento dos discos parabólicos, embasado nos quesitos listados anteriormente;
- recobrir dois discos parabólicos (antena banda ku);
- projetar e construir a estrutura do fogão solar, onde serão dispostos os discos concentradores e o recipiente de cozimento;
- isolar o recipiente de cozimento;
- instrumentar o fogão solar visando medir a temperatura na base do recipiente de cozimento (absorvedor), a temperatura na lateral do recipiente de cozimento, a temperatura dos discos, e o aumento de temperatura de 1L de água ao longo do processo;
- realizar as medidas e avaliar o fogão solar utilizando o modelo matemático proposto por Queiroz, 2005.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nos primórdios da civilização humana, o cozimento dos alimentos era desconhecido. Naquela época, os nativos consumiam seu alimento na forma como o encontravam na natureza. Segundo Panwar *et al.*, 2012, foram os essênios os primeiros a utilizar a radiação solar para aquecer alimentos. Entretanto, o primeiro a construir e a utilizar um fogão solar tipo caixa foi Horausse de Saussure, que publicou seu trabalho em 1767. Saussure cozinhou frutas em sua “caixa térmica” atingindo temperaturas em torno de 80°C. Porém, foi apenas no início dos anos 1950 que engenheiros e cientistas começaram a estudar aspectos técnicos de fogões solares (Panwar *et al.*, 2012). Estes estudos concluíram que fogões solares construídos apropriadamente podem cozinhar alimentos de maneira saudável e nutritiva, sendo de fácil construção e manejo (Panwar *et al.*, 2012).

Atualmente, há vários tipos de fogões solares em uso. Tem-se, por exemplo, os fogões em caixa, os fogões concentradores de disco único, os fogões que utilizam a tecnologia dos tubos evacuados, e os fogões concentradores de disco duplo. As formas estão diretamente relacionadas ao tipo e à condição de uso dos mesmos, bem como das especificidades do local de utilização. De maneira geral, segundo Panwar *et al.*, 2012, os fogões podem ser classificados em três categorias: concentradores, tipo caixa e indiretos.

O estudo sobre fogões solares concentradores, a dois discos, não é uma tarefa recente. Há uma década, Queiroz, 2005, avaliou este tipo de dispositivo para o cozimento direto e indireto, propondo também uma metodologia de cálculo para avaliação térmica dos fogões. Em resumo, segundo o autor, pode-se pensar na conversão da energia radiante solar em energia térmica em termos de dois estágios. Primeiramente há a interceptação e a reflexão da radiação solar no concentrador, à qual se tem associada uma eficiência óptica, η_o . Num segundo momento, tem-se a absorção e a conversão da energia radiante em energia térmica, à qual se

tem associada uma eficiência térmica, η_t . Assim, a eficiência total do processo será dada pelo produto da eficiência óptica pela eficiência térmica.

Em Souza *et al.*, 2009, os autores propõem a construção de um fogão solar concentrador, de disco único, utilizando materiais típicos da região e materiais de baixo custo, a urupema (tipo de palha) e canos de PVC, respectivamente. Com isso, buscavam um projeto que aliasse baixo custo e facilidade na montagem, privilegiando um produto típico da região. Por ter sido desenvolvido para baixas latitudes, ou seja, com pouca variação no caminho aparente do Sol ao longo do ano, o fogão não necessita de um sistema de ajuste de inclinação e direção mais apurado. Por outro lado, seu uso fica restrito apenas a este tipo de local.

Finalmente, Ramos Filho, 2011, mostra que para regiões focais menores a temperatura no centro do absorvedor pode ser mais acentuada do que a temperatura medida por Queiroz, 2005, em uma área maior. Porém, à medida que se afasta a medição do centro, a temperatura cai a níveis mais acentuados.

4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E MODELO MATEMÁTICO

Nesta seção são apresentados alguns conceitos básicos concernentes à área, bem como a modelagem matemática utilizada para a avaliação térmica do fogão solar concentrador.

4.1. Aspectos gerais

A Constante Solar, S_c , é definida como sendo a energia proveniente do Sol, por unidade de tempo, incidente em uma superfície, de área unitária, perpendicular à direção de propagação da radiação e distante 1UA, unidade astronômica. Uma vez que seu valor sofre alterações ao longo do tempo, a definição acima passou a ser denominada Irradiância Solar Extraterrestre Total (*TSI*, em inglês), Duffie e Beckmann, 2012. Assim, o termo Constante Solar, S_c , refere-se ao valor médio da *TSI* ao longo de vários anos, cujo valor recomendado pela Organização Meteorológica Mundial (WMO, 2015) é 1367 W/m^2 .

A radiação térmica está associada à taxa na qual a energia é emitida pela matéria como resultado de sua temperatura não-nula (Incropera *et al.*, 2008). No espectro eletromagnético, corresponde à porção intermediária que se estende de 0,1 a $100\mu\text{m}$, incluindo uma fração do ultravioleta, UV, todo o visível e o infravermelho, IV. Além disso, a radiação térmica possui duas características inerentes: a dependência direcional e a dependência espectral.

A maior parte das superfícies encontradas na prática não se comporta como um corpo negro, definido como uma superfície ideal com propriedades fundamentais que são padrão de comparação para os corpos radiantes reais. Assim, faz-se uso de quantidades adimensionais associadas à capacidade de emitir, de absorver, de refletir e de transmitir de uma superfície real comparada às mesmas capacidades de um CN. Essas propriedades radiantes são a emissividade, a absorvidade, a refletividade e transmissibilidade. Neste trabalho, as propriedades de maior interesse são a absorvidade e a refletividade.

A absorvidade, α , pode ser definida como a razão entre a energia radiante absorvida e a energia radiante incidente. Esta propriedade tem o efeito de aumentar a energia interna do meio. Por outro lado, tem-se a refletividade, ρ , que difere um pouco das outras propriedades na medida em que é bidirecional por natureza (direção da radiação incidente e direção da reflexão), podendo ser difusa ou especular. Na superfície, ambas são responsáveis pela nossa percepção de cor, que se deve à reflexão e à absorção, seletivas da porção visível da irradiação incidente oriunda de uma fonte (Incropera *et al.*, 2008).

4.2. Equacionamento de dimensionamento e desempenho

O modelo matemático utilizado na avaliação do fogão solar é o mesmo modelo proposto por Queiroz, 2005. Segundo o autor, o processo de conversão da energia radiante em energia

térmica pode ser representado, basicamente, por duas etapas, Figura 4.1. A cada etapa tem-se uma eficiência associada, de maneira que o produto das duas resulta na eficiência útil do fogão. Ou seja, a eficiência útil do processo será dada pelo produto da eficiência óptica, η_o , pela eficiência térmica, η_t ,

$$\eta = \eta_o \eta_t \quad (4.1)$$

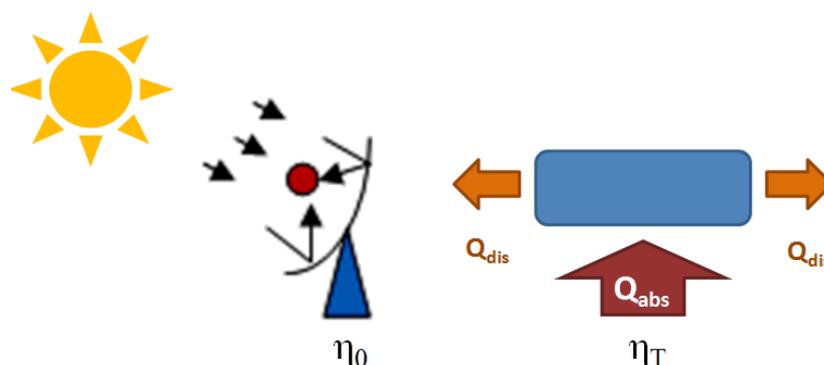


Figura 4.1 – Esquema simplificado do processo de conversão de energia radiante em energia térmica. Fonte: adaptado de Souza *et al.*, 2009.

A taxa útil, q_{util} , pode ser escrita em termos da taxa absorvida, q_{abs} , e da taxa dissipada, q_{dis} , através da seguinte relação

$$q_{util} = q_{abs} - q_{dis} \quad (4.2)$$

sendo a taxa absorvida dada por

$$q_{abs} = I A_c \rho k_r \alpha_p \quad (4.3)$$

na qual, I é a irradiação solar incidente, em W/m^2 , A_c é a área dos discos coletores, em m^2 , ρ é a refletividade do material de recobrimento, k_r é a fração de radiação refletida pelo fundo do recipiente de cozimento e α_p é a absorvidade da superfície inferior do recipiente de cozimento ($k_r = 0,9$ e $\alpha_p = 0,9$, Lion *et al.*, 2007).

A taxa dissipada está associada à transferência de calor por convecção nas laterais do recipiente, de maneira que

$$q_{dis} = h_w A_{lat} (T_A - T_\infty) \quad (4.4)$$

na qual T_A é a temperatura da lateral do recipiente de cozimento (isolamento), em $^\circ C$, T_∞ é a temperatura do ar ambiente, em $^\circ C$, A_{lat} é a área lateral do recipiente de cozimento, em m^2 , h_w é o coeficiente de transferência de calor por convecção, em $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$, obtido através da correlação (Duffie e Beckman, 2012)

$$h_w = 2,8 + 3V_{vento} \quad (4.5)$$

na qual V_{vento} é a velocidade média do vento, em m/s , e A_{latA} é a área lateral do recipiente de cozimento, em m^2 , dada por

$$A_{latA} = H \pi D_a \quad (4.6)$$

na qual H é a altura, em m, e D_a é o diâmetro, em m, do recipiente de cozimento. A área da tampa do recipiente de recobrimento foi desconsiderada.

As eficiências óptica, η_o , e térmica, η_t , e η_{util} , evidenciam a capacidade de conversão de energia dos coletores, sendo dadas, respectivamente, por

$$\eta_o = \rho k_r \alpha_p \quad (4.7)$$

$$\eta_t = \frac{q_{util}}{I_c A_c \eta_o} \quad (4.8)$$

Por fim, Ramos Filho, 2011, estimou a emissividade do fundo do recipiente de cozimento em 0,9 e a temperatura no foco, em kelvin, através da relação

$$T = \left(\frac{C q_{abs}}{\varepsilon \sigma} \right)^{1/4} \quad (4.9)$$

na qual C é o fator de concentração solar dado pela divisão da área de do concentrador dividido pela área do foco em metros quadrados, σ é a constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$), ε é a emissividade do absorvedor ($\varepsilon = 0,9$).

5. METODOLOGIA

Prezando pela simplicidade, pela economia e pela reutilização de materiais, optou-se pelo uso de antenas parabólicas do tipo banda ku (utilizadas principalmente por operadoras de canais de TV por assinatura) para a confecção dos discos concentradores, assim como realizado em Ramos, 2011. A estrutura do fogão solar, embora siga o padrão adotado pelo referido autor, evolui para o uso de juntas parafusadas, que auxiliam no transporte, na armazenagem e no ajuste focal. Não obstante, permitindo a intercambiabilidade do suporte da panela, como será explicado ao longo desta seção.

5.1. Seleção do material de recobrimento dos discos concentradores

Com o intuito de verificar os conceitos de baixo custo, resistência operacional e capacidade funcional, foram confeccionados seis corpos de prova, conforme Apêndice I, que serviram de subsídio para a seleção do material de recobrimento dos discos concentradores. A seleção do material levou em consideração os seguintes quesitos: a resistência do material à temperatura, o custo total de aplicação e uma referência qualitativa da refletividade.

5.1.1. Resistência do material à temperatura

Entende-se por resistência do material à temperatura, a capacidade que o mesmo possui de resistir, sem perder suas características de cor e forma, às temperaturas alcançadas durante a jornada de trabalho do fogão solar. Através de dados de fabricantes, Tabela 5.1, avaliou-se a temperatura de fusão dos materiais analisados, bem como seu comportamento aos efeitos de exposição solar.

O único material excluído das possibilidades foi a folha dourada. Esta apresenta fragilidade a temperaturas acima de 60°C , estando apenas 13% acima da máxima temperatura observada nos testes, $52,95^\circ\text{C}$. Esta margem pequena, somada ao fato da baixa resistência de sua pigmentação, impossibilita o uso da mesma.

Tabela 5.1 - Avaliação da resistência à temperatura e resistência mecânica.

Recobrimento	Temperatura de resistência (fabricante) (C°)	Análise resistência mecânica (Polimento, enceramento e limpeza da superfície).
Espelho	1250	<i>Inalterado</i>
Aço polido	1350	<i>Inalterado</i>
Aço polido com verniz	600 (verniz)	<i>Inalterado</i>
Folha dourada (PVC)	60	<i>Perda de pigmentação</i>
Filme de alumínio	660	<i>Inalterado</i>
Cobre	1085	<i>Inalterado</i>

5.1.2. Custo total de aplicação

O custo total de aplicação foi analisado levando-se em consideração os seguintes aspectos: custo do material de recobrimento, custo dos insumos de fixação (quando necessários), custo de insumos para tratamento da superfície e custo dos trabalhos envolvidos em sua aplicação, tendo como base o salário médio brasileiro de um auxiliar de produção, isto é, R\$ 1055,00 mensais (FIPE, 2015), equivalente a R\$ 4,40 por hora, em uma jornada de 240 horas mensais.

A confecção das amostras serviu de subsídio para esta etapa da seleção. Foram computados os tempos de execução para cada uma, bem como a quantidade de insumos necessários para a confecção das mesmas. Com base nesses valores, pode-se estimar o custo total de aplicação, por metro quadrado. O material e a técnica utilizados em cada amostra encontra-se no Apêndice I. A Tabela 5.2 apresenta os custos calculados para 1m² de cada recobrimento.

Tabela 5.2 - Custos, por metro quadrado, para cada recobrimento.

Tipo	Recobrimento	Colagem	Polimento	Horas trabalho	Total
Espelho	R\$ 175,93	R\$ 5,00	-	R\$ 12,00	R\$192,93
Aço polido	R\$ 17,60	-	R\$ 60,13	R\$ 36,00	R\$113,73
Aço polido com verniz	R\$ 27,13	-	R\$ 73,35	R\$ 48,00	R\$148,48
Folha dourada	R\$34,28	R\$5,00	R\$ 5,00	R\$48,00	R\$92,28
Folha de alumínio	R\$ 62,66	-	R\$ 60,13	R\$36,00	R\$158,79
Cobre	R\$ 83,33	R\$ 5,00	R\$ 60,13	R\$ 12,00	R\$160,46

5.1.3. Refletividade

A refletividade do material de recobrimento é a característica de maior relevância, pois é a propriedade radiante de uma superfície associada à razão entre a intensidade da radiação refletida e da radiação total incidente. O Laboratório de Energia Solar da UFRGS, LabSol, dispõe de equipamentos adequados para a medição da refletividade. Contudo, foi verificado que para as amostras confeccionadas neste trabalho, seria necessária a construção de aparatos que garantissem a exposição das mesmas a um fluxo de radiação do Sol, o qual deveria incidir perpendicularmente. Devido ao tempo necessário para o projeto e a construção de tal aparato, a possibilidade de uso desses equipamentos foi suprimida.

Assim, optou-se por uma avaliação qualitativa, expondo todas as amostras à radiação solar sob as mesmas condições e utilizando o mesmo sensor de radiação. A refletividade das amostras foi avaliada da seguinte maneira: utilizando-se um sensor fotossensível de silício, que interceptou a radiação refletida de cada uma delas, submetidas às mesmas condições angulares, conforme Figura 5.1.

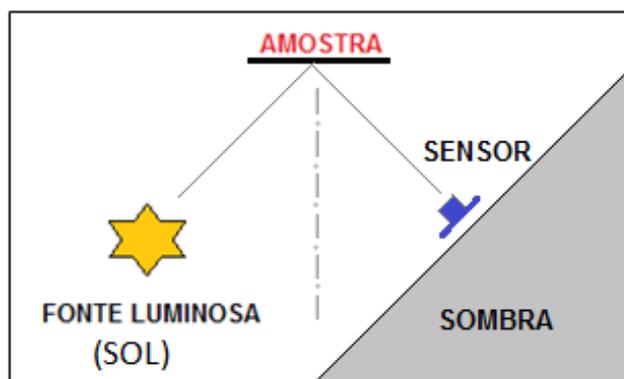


Figura 5.1 – Esquemática de obtenção das medidas de refletividade, qualitativa, das amostras.

O valor medido para cada uma das amostras foi normalizado em relação ao valor medido para a amostra que obteve o maior valor, o espelho. Este teste possibilitou avaliar, qualitativamente, a refletividade dos materiais. As Tabelas 5.3 e 5.4 apresentam os valores medidos e normalizados, respectivamente.

Tabela 5.3 - Valores obtidos para cada amostra analisada

Amostra	V ₁ (mV)	V ₂ (mV)	V ₃ (mV)	V ₄ (mV)	V _{Média} (mV)
Espelho	1,40	1,50	1,60	1,50	1,50
Aço polido	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
Aço polido com verniz	0,20	0,30	0,30	0,03	0,28
Alumínio polido	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Papel Dourado	0,90	1,00	1,20	1,10	1,05
Cobre	1,00	0,90	0,90	1,00	0,95

Tabela 5.4 - Valores normalizados com base no resultado do espelho

Amostra	V _{média} /V _{média espelho}
Espelho	1,000
Aço polido	0,533
Aço polido com verniz	0,183
Alumínio polido	0,300
Papel Dourado	0,713
Cobre	0,633

Avaliando o resultado dos testes realizados, temos que o papel dourado, o cobre e o aço polido são, respectivamente, os materiais com maior valor normalizado. Contudo, a escolha final recai sobre o aço polido, uma vez que o papel dourado não possui a resistência necessária para a função e os custos envolvendo o recobrimento com cobre são 41% superiores ao aço polido.

Para fins de utilização no modelo matemático, vamos assumir que a refletividade do material de recobrimento escolhido é equivalente a 53,3% da refletividade do espelho, 0,95 (Ramos Filho, 2011), sendo então igual a 0,506.

5.2. Projeto e construção do fogão solar

O fogão solar pode ser dividido em 3 partes. São elas: a estrutura, os concentradores e o recipiente de cozimento. Cada uma delas possui sua particularidade de desenvolvimento e de projeto, sendo aclaradas nesta Seção.

5.2.1. Projeto da estrutura

A estrutura foi projetada em ferramenta tipo CAD, seguindo os padrões utilizados por Ramos Filho, 2011. Contudo, acrescentou-se ao projeto três diretrizes a serem seguidas: facilidade de transporte e de armazenagem, ajustabilidade e a possibilidade de intercambiar segmentos para estudos futuros. Todo o projeto foi desenhado em software SolidWorks®, Figura 5.2.



Figura 5.2 – Desenho do fogão em SOLIDWORKS® e projeto executado.

Para permitir a facilidade de transporte e de armazenagem, projetou-se a estrutura com a maior quantidade de juntas, tipo parafusadas, possíveis. Esta característica permite que o mesmo seja facilmente desmontado, no caso de necessidade de transporte. Além disso, permite que se ajustem pontos importantes do fogão, a fim de maximizar os resultados obtidos, isto é, realizando-se o acompanhamento do movimento aparente do Sol no decorrer do dia, Figura 5.3.

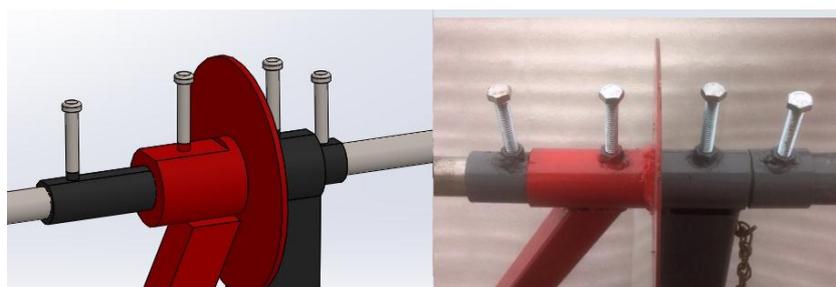


Figura 5.3 – Parafusos de fixação e ajustes.

Não obstante, o uso de uniões parafusadas permite ainda o câmbio de partes do fogão para análises futuras, como, por exemplo, a troca do concentrador de duas antenas banda *ku* para um tipo parabólico, ou ainda, alterar-se o tipo de recipiente que absorve a radiação solar, conforme sugestões do Apêndice II.

5.2.2. Concentradores

Conforme indicado no trabalho de Ramos Filho, 2011, os concentradores foram elaborados utilizando-se duas antenas tipo banda *ku*. As mesmas serviram de base para a aplicação do recobrimento, no caso do autor referenciado. Entretanto, para este trabalho, as mesmas passaram apenas por processos de lixamento mecânico, lixamento manual e polimento, conforme Apêndice I.

A aplicação de polimento nos concentradores apresentou algumas particularidades, em comparação à aplicação do mesmo processo aos corpos de prova. São elas: necessidade de remoção de camada de proteção por zincamento da superfície do metal e dificuldades no processo de lixamento manual. Estas foram desprezadas nos cálculos de custo por metro quadrado de aplicação do recobrimento, Subseção 5.1.2. Estas particularidades devem-se ao fato das antenas serem materiais reaproveitados, e não gerados a partir de chapas de metal novas, as quais são utilizadas como parâmetro de valores na referida subseção.

5.2.3. Isolamento do recipiente de cozimento

O recipiente de cozimento (panela) foi desenvolvido baseando-se no modelo utilizado em Ramos Filho, 2011, devido ao baixo custo do isolante proposto pelo mesmo. Conforme o referido autor, este isolante apresenta condutividade térmica, *k*, em torno de 0,32 W/mk. A mistura é feita com os seguintes materiais: cimento, gesso, EPS triturado, borracha triturada, areia e água, em proporções iguais em volume. Utilizou-se um molde para revestir o absorvedor com homogeneidade. Imagens e detalhamento do processo encontram-se no Apêndice III.

Optou-se por isolar o recipiente de cozimento em sua totalidade, excluindo-se apenas o fundo, o qual após instrumentação recebeu recobrimento de tinta preta, fosca, a qual segundo Ramos Filho, 2011, possui absorvidade de 0,9. A opção de isolamento na tampa e nas laterais visa direcionar o estudo única e exclusivamente ao fluxo de calor através do fundo do recipiente de cozimento (panela).

5.3. Instrumentação

A fim de proceder a análise térmica do fogão solar, instrumentou-se o mesmo utilizando-se sete sensores termopar do tipo T (cobre/constatam), sendo 4 sensores distribuídos ao longo do fundo do recipiente de cozimento (panela), Figura 5.4 (a) e (b). Durante os testes, procurou-se ajustar as antenas para que o foco permanecesse no centro do recipiente, possibilitando assim o estudo das temperaturas ao longo do raio.

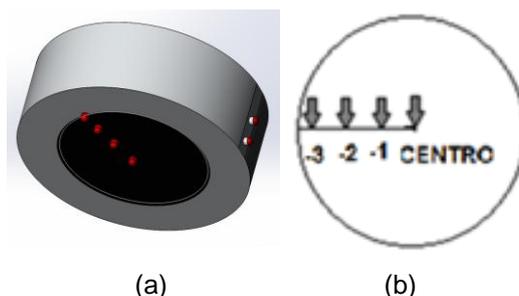


Figura 5.4 – (a) Posicionamento termopares3D. (b)Diagrama 2D de posicionamento dos sensores termopares no fundo do absorvedor

Com a intenção de monitorar a temperatura externa (T_A) do recipiente de cozimento, dois sensores foram dispostos ao longo da parede externa do recipiente, um na altura do líquido e outro acima da zona do líquido. Utilizou-se ainda um sensor tipo PT100 para medição da temperatura da água, a diagramação dos sensores pode ser observada na Figura 5.5.

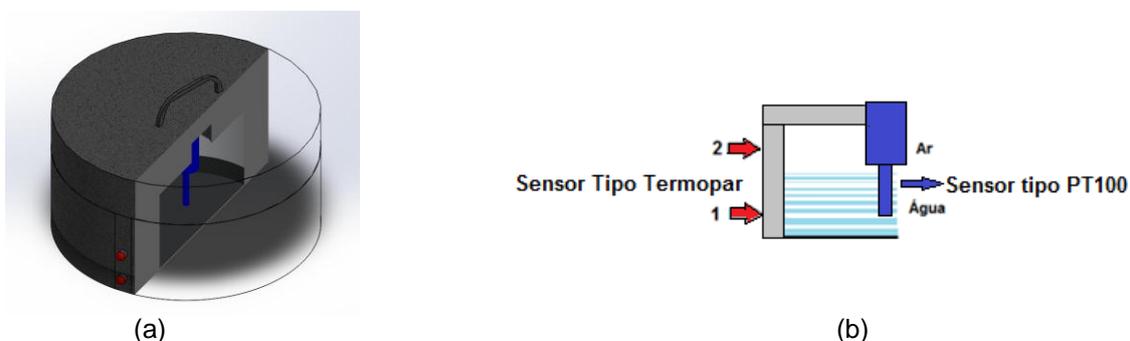


Figura 5.5 - (a) Desenho de posicionamento dos termopares laterais (em vermelho) e do sensor tipo PT100 (azul). (b) esquemática em corte 2D.

Além dos sensores acima descritos, utilizou-se um sensor termopar na parte traseira de um dos concentradores, a fim de avaliar a temperatura do disco. Um piranômetro mediu a radiação solar incidente no entorno do experimento e um sensor tipo fotossensível mediu a radiação incidente no fundo do recipiente de cozimento. Os dados medidos para o fundo foram utilizados na confecção de um mapa de fluxo de radiação incidente no fundo do absorvedor conforme fotos 5.6 (a) e (b).

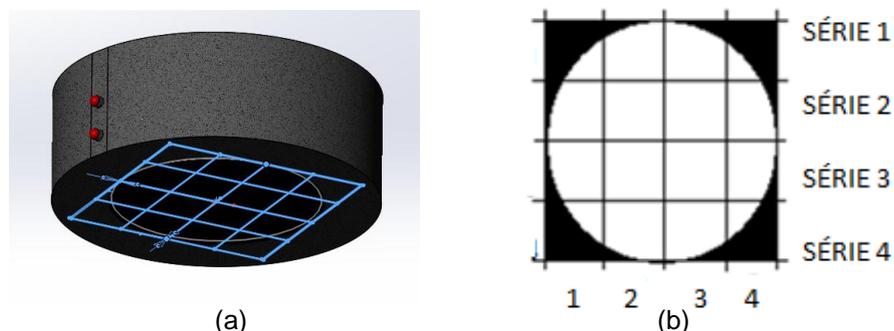


Figura 5.6 – (a) Desenho de posicionamento de obtenção do mapa realizado no fundo externo do absorvedor. (b) Diagrama 2D do mapa utilizado para avaliar o fluxo incidente no fundo externo do recipiente.

O recipiente de cozimento possui 0,195 m de diâmetro e foi dividido em 16 partes para coleta, cada uma contendo em média 0,0018 m² de área de recepção, Figura 5.6. Assim, pode-se avaliar o fluxo incidente em cada parte da panela, gerar gráficos e confrontá-los com imagens obtidas de uma câmera termográfica.

5.3.1. Calibração dos sensores

O sensor tipo PT 100 foi calibrado através do uso de um equipamento de banho termostático Lauda[®], Figura 5.7a, o qual possui incerteza de medição de + ou - 0,05 K. Foram realizadas medidas de 35°C a 95°C. Após geraram-se os gráficos de calibração e operação, Apêndice IV. Não obstante, os termopares foram avaliados no banho termostático, comparando-se a tensão medida com os dados do *datasheet* fornecido pelo fabricante. Todos apresentaram concordância entre os dados medidos e os correspondentes valores tabelados.

A calibração do sensor fotossensível deu-se através da exposição do mesmo à irradiação solar, junto ao piranômetro, Figura 5.7b, cuja constante é fornecida pelo fabricante, e equivale a $4,75 \cdot 10^{-6} \text{ V}/(\text{Wm}^{-2})$. Após quatro horas de exposição solar, chegou-se a constante de $1,36 \cdot 10^{-6} \text{ V}/(\text{Wm}^{-2})$ para o sensor fotossensível, Apêndice IV.



Figura 5.7 – (a) Calibração dos sensores em banho termostático. (b) Calibração do sensor fotossensível, através de comparação direta com o piranômetro.

5.4. Procedimento de medição dos dados

Os testes foram conduzidos, em um dia de céu limpo, durante a primeira metade dos testes, e parcialmente nublado no restante. Este fato, embora tenha culminado em um menor desempenho para o fogão, possibilitou a comparação de funcionamento com o céu limpo e na passagem de nuvens, e o quanto isto altera a performance do mesmo.

A temperatura média no dia do teste foi de 28°C e a velocidade do vento de $3,1\text{m/s}$, em velocidade de pico. As medições ocorreram das 10 horas e 34 minutos às 14 horas e 08 minutos, horário oficial de verão correspondendo ao período entre 09:25 e 12:59 em hora solar verdadeira. Os dados foram medidos utilizando-se o *datalogger* Agilent 74972A, realizando-se 4295 medidas por variável no período especificado.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os dados de temperatura média, da leitura de cada sensor tipo termopar, da parede externa e do fundo do recipiente de cozimento podem ser vistos nas Figuras 6.1 e 6.2, respectivamente.



Figura 6.1 – Resultados para temperatura externa do absorvedor.

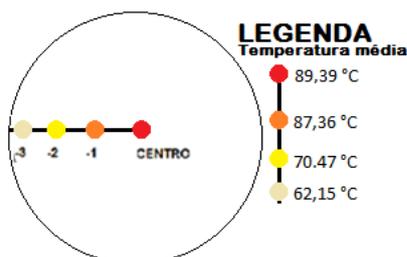


Figura 6.2 – Temperatura média dos termopares

Com as medidas obtidas pelo sensor fotossensível, foram construídos dois mapas de dados representativos de fluxos recebidos por região, Figura 6.3. Conforme comentado na Subseção 5.3, os mesmos foram comparados com imagens da câmera termográfica, Figura 6.4. Os mapas construídos com base nos dados referentes às 10:50 e 11:52 no horário oficial de verão, que correspondem às 09:41 e às 10:43 em hora solar verdadeira.

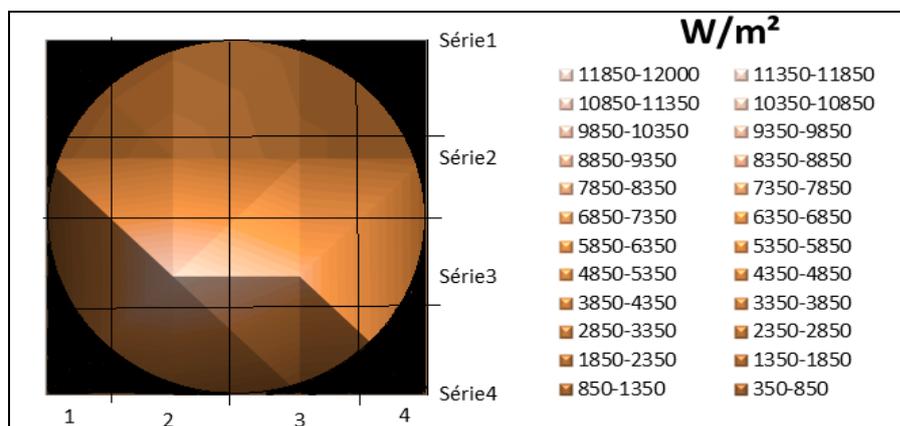


Figura 6.3 – Mapa do fundo do absorvedor construído com os dados medidos às 10:43, hora solar verdadeira.

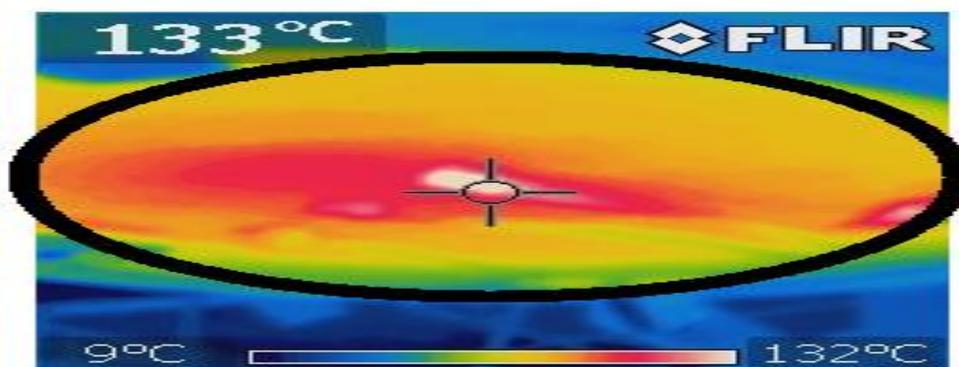


Figura 6.4 – Foto termográfica do fundo do absorvedor, evidenciado na elipse, tirada às 10:43, hora solar verdadeira,

Ramos Filho, 2011, entre outros autores, evidencia uma das características negativas do sistema concentradores, a falta de um suporte energético. Ou seja, variações da radiação são rapidamente verificadas em diminuições de temperatura no sistema absorvedor. O presente trabalho pôde verificar esta situação através do estudo isolado de duas baterias de 30 minutos de coleta de dados, uma no período de céu limpo e outra em período parcialmente nublado, Figuras 6.7 e 6.8, respectivamente, em escala de minuto a minuto. O gráfico da figura 6.9 demonstra o comportamento geral ao longo do experimento, de escala de dez minutos, visualiza-se o comportamento da irradiação ao longo do dia.

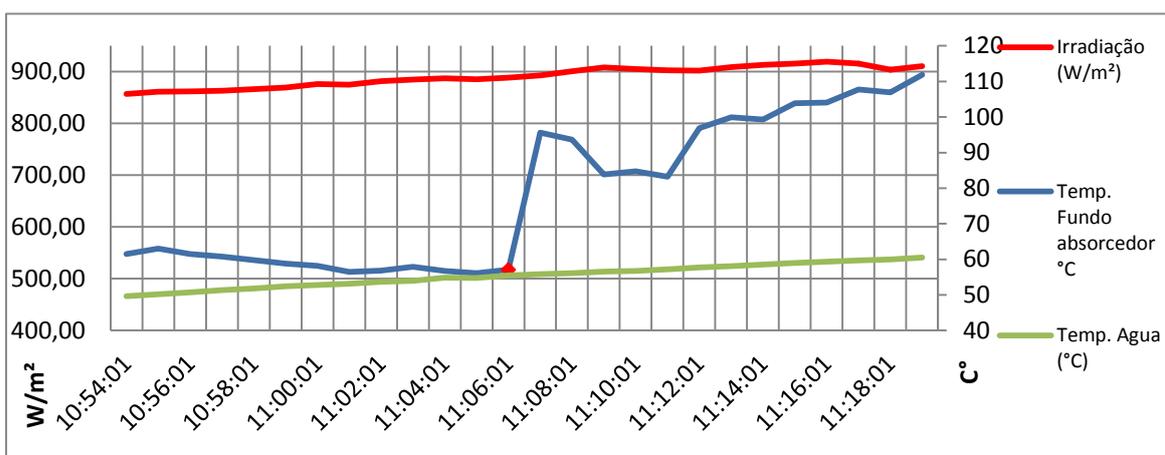


Figura 6.7 – Testes realizados em condições de céu limpo, sem nuvens - escala minuto.

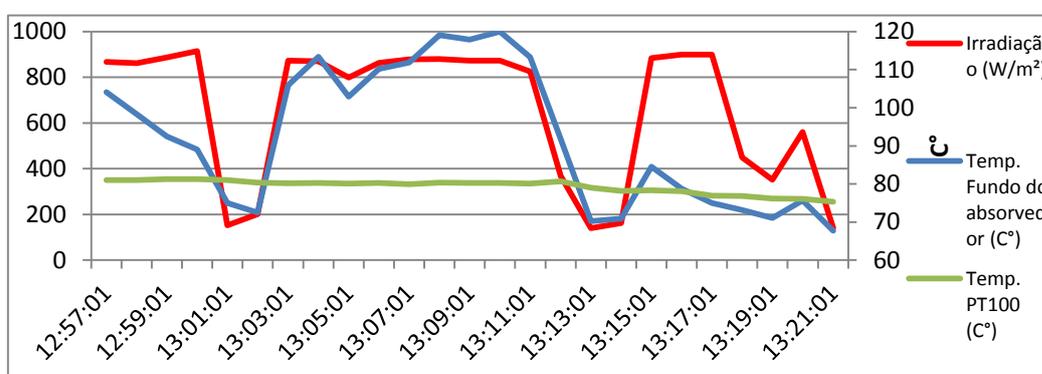


Figura 6.8 – Testes realizados em condições de céu nublado – escala minuto

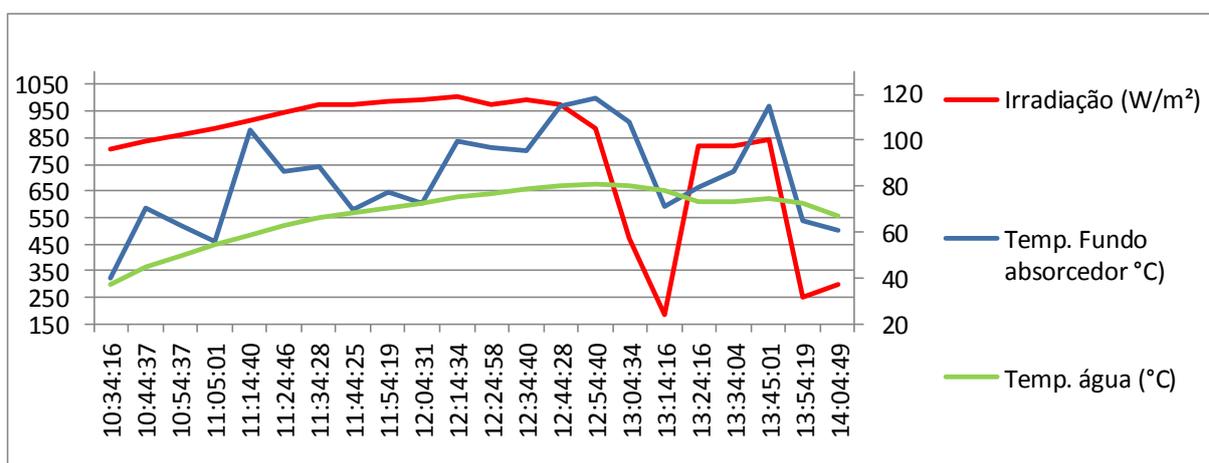


Figura 6.9 – Testes realizados em condições de céu nublado – escala 10 minutos.

Numa segunda etapa, foram calculados os valores teóricos, Apêndice IV, utilizando o modelamento matemático de Queiroz, 2005, com as devidas considerações. Os valores encontrados são apresentados na Tabela 6.1. Dada a amplitude dos valores, optou-se por apresentar os dados resumidos, destacando os valores máximos e mínimos

Tabela 6.1. Resultados teóricos.

Parâmetro	Unidade	Mínimo	Máximo
Coeficiente de convecção externo (h) (Eq. 4.5)	W/m ² K	12,10 (valor único)	
Eficiência óptica (Eq. 4.7)	-	0,41	0,41
Eficiência térmica (Eq. 4.8)	-	0,50	0,94
Eficiência útil (Eq. 4.1)	-	0,20	0,38
Fator de concentração	-	56 (valor único)	
Temperatura máxima do foco (Eq. 4.9)	°C	141,07	441,07
Taxa máxima absorvida pela panela (Eq. 4.3)	W	26,79	236,92
Taxa dissipada pela panela para externo (Eq. 4.4)	W	13,38(valor único)	
Taxa térmica útil (Eq. 4.2)	W	13,41	223,54

6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Os objetivos propostos pelo presente trabalho foram alcançados. A análise de dados, a elaboração de um mapa do fluxo no absorvedor, e o estudo do comportamento do fogão solar em diferentes horas do dia e em situações de exposição solar diferentes, permitiram inferir o segue.

A água no interior do recipiente de cozimento atingiu 82°C, temperatura relativamente baixa se comparada a temperatura verificada em outros coletores concentradores. Este fato possui relevância uma vez que um dos objetivos era avaliar o funcionamento de recobrimentos que diferissem do espelho, material com maior refletividade. Assim, tem-se que o recobrimento de aço polido à mão não se mostra como uma boa opção custo-benefício e eficiência para esta aplicação.

Através da análise do mapa de fluxo (no fundo do recipiente de cozimento), pôde-se verificar que pequenas variações na regulação de ângulo dos concentradores gera grande variação na distribuição de fluxo de 350 W/m²k a 12000 W/m²k ao longo do sistema, podendo gerar diferenças significativas de performance, se não realizada de acordo.

A temperatura máxima verificada no fundo do absorvedor foi de 178,676 ± 1,34 °C, esta diferença entre a temperatura máxima medida e a calculada, da-se entre outros fatores devido as dificuldades de polimento da superfície dos concentradores, não conseguindo-se o mesmo acabamento, fato esse que diminui a performance do fogão solar.

Os gráficos gerados a partir das baterias de dados permitiram verificar que, mesmo para variações significativas de irradiação solar, quando o sistema já está aquecido, não ocorrem perdas de temperatura significativas para o líquido em aquecimento. Este fato era esperado devido a grande inércia térmica do recipiente de recozimento e da sua espessa camada de revestimento isolante.

Assim, para trabalhos futuros sugere-se a elaboração de um dispositivo que permita analisar a refletividade de corpos de prova, utilizando-se os equipamentos do LabSol. O recobrimento dos concentradores deste fogão solar com espelho e comparação direta da performance, valendo-se da mesma metodologia. A elaboração de um sistema para ajustes do ponto focal de sistema concentradores, utilizando-se laser, garantindo assim a melhor performance do sistema (Apêndice II). A elaboração de um modelo de fogão/coletor solar isolado das ações de convecção (Apêndice II). O estudo e elaboração de um sistema automatizado de acompanhamento do movimento do sol, através do uso de arduino e sensor fotossensível. O estudo de inserção de outros recipientes absorvedores no ponto focal. O estudo da viabilidade econômica no uso destes dispositivos em sistemas mistos de aquecimento solar/gás, para utilização em outras aplicações que não o cozimento de alimentos.

7. REFERÊNCIAS

Brundtlan, Comissão. **“Comissão mundial sobre meio ambiente e desenvolvimento: O nosso futuro comum**. Universidade de Oxford, Nova Iorque, EUA, 1987.

Duffie, J.A. e Beckman, W.A. **“Solar engineering of thermal process”**. 3th ed., New York: Jonh Wiley & Sons, 2006.

FIPE - Fundação Instituto de Pesquisas Econômicas. **“Indicadores e cargos”**. Disponível em: <<http://www.fipe.org.br>>. Acesso em: 30/08/2015

Holman, J.P. **“Experimental methods for engineers”**. 6th ed., New York: McGraw-Hill, 1994.

IEA – *International Energy Agency*. **“Energy perspective”**. Disponível em: <<http://www.iea.org>>. Acesso em: 05/09/2015.

Incropera, F.P., Dewitt, D.P., Bergaman T.L. e Lavine, A.S. **“Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa”**, 6ª edição, Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2008.

Krenzinger, A. **“Desempenho térmico de coletor solar.”** Certificado 013/2001. LabSol - Laboratório de Energia Solar, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001

Panwar, N.L., Kaushik, S.C., Kothari, S. **“A review on energy and exergy analysis of solar drying systems”**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v.16, issue 5, p. 2812-2819, 2012.

Queiroz, W. F. de. **“Construção de um fogão solar à concentração para cozimento direto e indireto”**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Departamento de Engenharia Mecânica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2005.

Ramos Filho, R.E.B. **“Análise de desempenho de um fogão solar construído a partir de sucatas de antena de TV.”** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Departamento de Engenharia Mecânica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2011.

Souza L.G.M, dos Santos, R.D., Batista Segundo, J. de M.L., Pinheiro, G., Rocha, A. da S., Gomes, J.W.. e Palma, A.J.R. **“Solar Cooking built in composite material”**. Proceedings of 20th Cobem - International Congresss of Mechanical Engineering. Gramado/RS, Brazil, 2009.

WMO – *World Meteorological Organization*. **“The world radiation data center”**. Disponível em <<https://www.wmo.int>>. Acesso em: 12/09/2015

Apêndice I- Elaboração dos corpos de prova.

A técnica empregada no polimento, tanto das amostras quanto dos discos concentradores, é a mesma utilizada em polimento de amostras para metalografia, onde através da alternância de granulometria das lixas e da posição de lixamento (alternando entre 1 e 2, conforme Figura A1.1) minimizam-se as imperfeições da superfície.

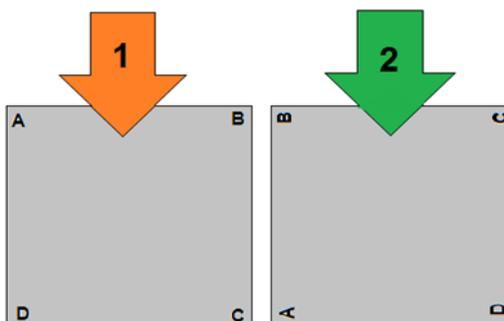


Figura A1.1 – Esquemática de lixamento dos corpos de prova para polimento.

Das amostras:

1. Recobrimento de espelhos

Utilizou-se uma fita de espelhos, bastante comum ao artesanato, composta de pequenos espelhos de 10x10 mm

2. Aço Polido

Através do método de polimento anteriormente descrito, utilizando jogo de lixas com granulometria de 150 a 1200, chegou-se ao polimento desejado, referenciado apenas de forma visual.

3. Aço SAE 1020 com polimento e recoberto com verniz e polimento

Mesmo processo do item 2, somado ao recobrimento com verniz e posterior polimento até a granulometria 3000.

4. Recobrimento com folha dourada encerada

Para esta amostra utilizou-se um recobrimento com folha dourada de PVC, esta é comumente utilizada na confecção de itens para artesanato.

5. Recobrimento com filme aluminizado polimento.

Utilizou-se a fita de alumínio de 0,12 micrometros para recobrir o corpo de prova, esta fita possui 50 mm de largura, e é vendida em rolos de 30 metros.

6. Cobre com polimento

Esta amostra fora realizada conforme o item 2, diferindo-se apenas no quesito material, sendo esta confeccionada em cobre.

Apêndice II- Sugestões para trabalhos futuros.

Para trabalhos futuros sugeriram-se vários estudos acerca dos fogões solares. Nessa etapa do trabalho mostra-se o layout e propostas de criação de dispositivos para análise e controle para o mesmo.

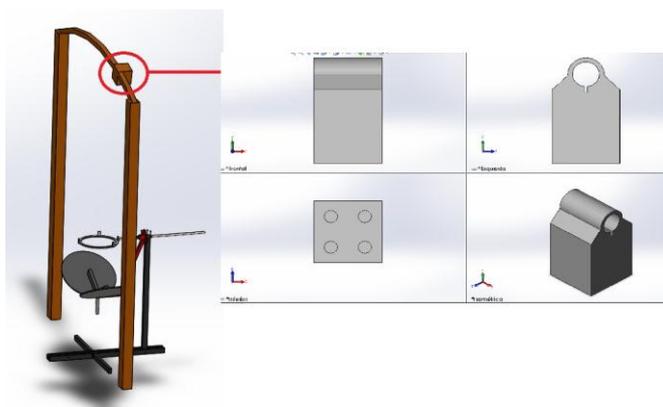


Figura A2.1 –Desenho de proposta de sistema a laser para maximizar o desempenho do fogão.

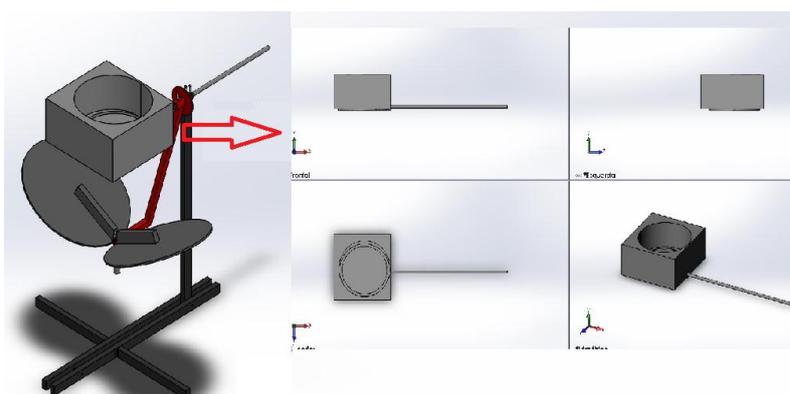


Figura A2.2 – Desenho de proposta de absorvedor inserido em forno com tampa de vidro, afim utilizar os efeitos de retenção do calor

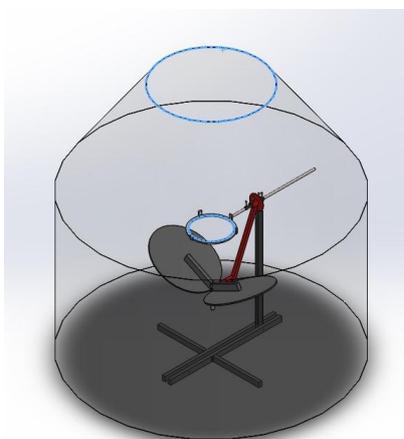


Figura A2.3 – Proposta de redoma em policarbonato para minimizar efeitos de perdas por convecção.

Apêndice III- Construção do recipiente de absorvedor.

O recipiente absorvedor fora construído seguindo o conceito proposto por Ramos Filho, 2011, utilizou-se uma panela de alumínio, Figura A3.1, com o esqueleto envolvendo-a no isolamento térmico. Elaborou-se um molde, Figura A3.2, com a finalidade de garantir a homogeneidade da espessura da parede de isolamento térmico em 50 mm. Os materiais necessários para a confecção do mesmo foram separados em vasilhames com o mesmo volume, Figura A3.3, e após misturados com o auxílio de uma pá misturadora, Figura A3.4.



Figura A3.1 –Panela utilizada como base para o recipiente de cozimento.



Figura A3.2 – Molde utilizado para construção do recipiente de cozimento.



Figura A3.3 – Materiais separados para confecção do isolante térmico (água, areia, cimento, gesso, borrracha triturada, EPS triturado).



Figura A3.4 – Dispositivo utilizado para auxiliar na mistura do material de recobrimento (isolante térmico).

Apêndice IV – Curvas de Calibração e Operação

As curvas de calibração e operação do sensor tipo PT100 são observadas nas Figuras A4.1 e A4.2, respectivamente. As curvas de calibração e operação do sensor fotossensível podem ser observadas nas Figuras A4.3 e A4.4, respectivamente.

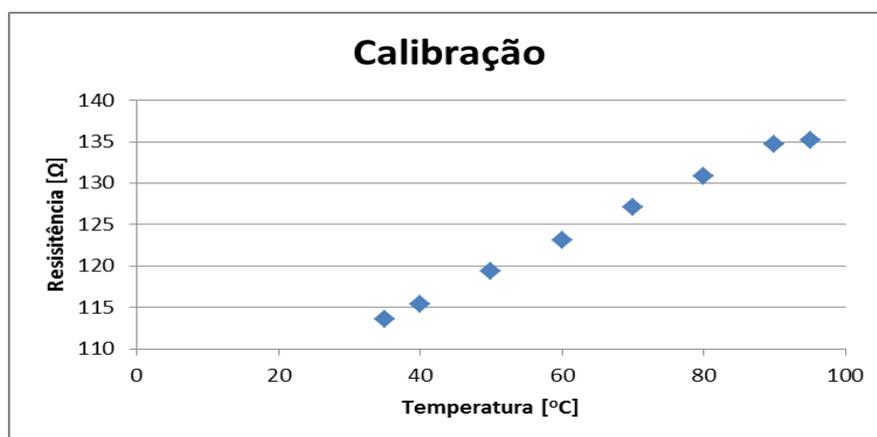


Figura A4.1 – Curva de calibração do sensor tipo PT100.

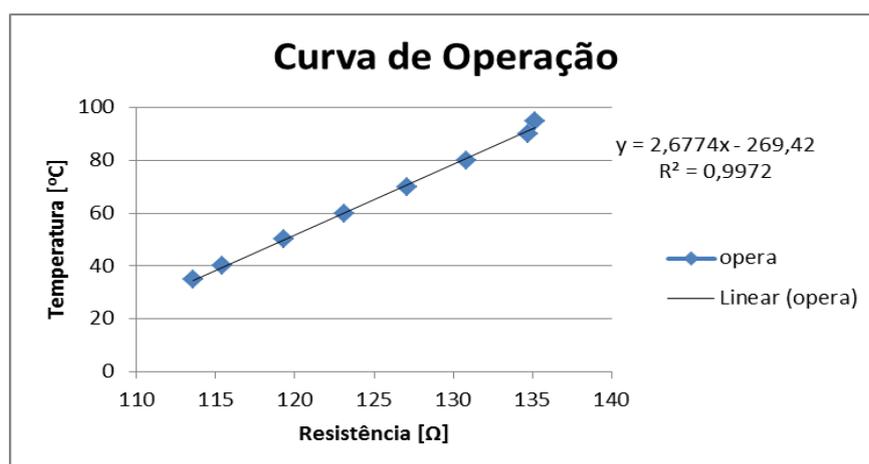


Figura A4.2 – Curva de operação do sensor tipo PT100.

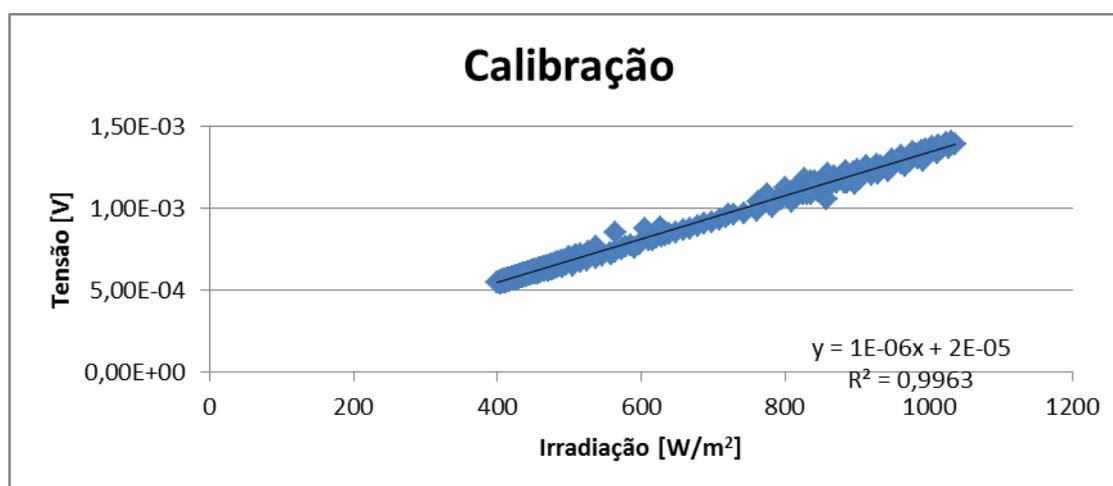


Figura A4.3 – Curva de calibração do sensor fotossensível.

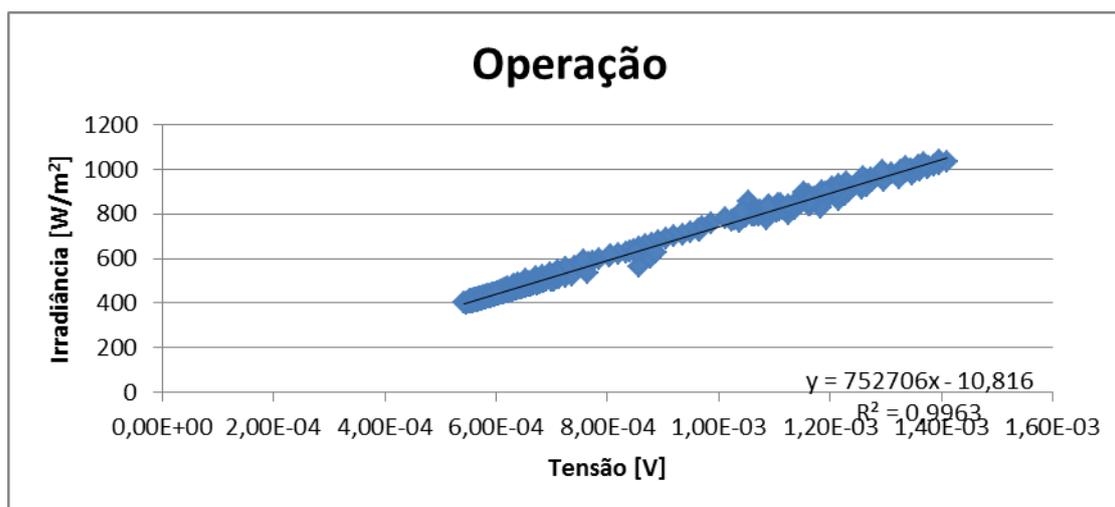


Figura A4.4 – Curva de operação sensor fotossensível.

As incertezas de medição foram consideradas por intermédio da fórmula de propagação de incertezas de Kline e McClintock (Holman, 1994).

$$U_r = \left(\left(\frac{\partial V}{\partial x_1} u_1 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial V}{\partial x_n} u_n \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{A4.1})$$