



FACULDADE DE ARACRUZ

CONSTRUÇÃO E TESTE DE FORNO SOLAR

EDÉSIO ANUNCIAÇÃO SANTOS FILHO
VALDEMIR CONCEIÇÃO DA SILVA

Orientador: Prof^o. M.Sc Johnson Pontes de Moura

Aracruz-ES

Novembro de 2008

EDÉSIO ANUNCIAÇÃO SANTOS FILHO
VALDEMIR CONCEIÇÃO DA SILVA

CONSTRUÇÃO E TESTE DE FORNO SOLAR

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Aracruz – FAACZ, como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: *Professor M.Sc Johnson Pontes de Moura*

Aracruz-ES

Novembro de 2008

EDÉSIO ANUNCIAÇÃO SANTOS FILHO
VALDEMIR CONCEIÇÃO DA SILVA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Aracruz – FAACZ, como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovado em _____ de _____

Comissão examinadora

Orientador: MSc Johnson Pontes de Moura

Examinador: Profº Dr. Rodolfo Jesús R. Silvério

Examinador: Profº Dr. Marcos Roberto T. Halasz

SANTOS FILHO, Edésio Anuniação;

DA SILVA, Valdemir Conceição. – Construção e Teste de Forno Solar.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Aracruz – FAACZ.

Orientador: Profº. MSc Johnson Pontes de Moura

RESUMO

O Sol é fonte gratuita e limpa de energia e ainda apenas na metade de sua existência que se cogita seja no total cerca de onze bilhões de anos. Sua energia banha o planeta Terra com força energética equivalente a quase 4.000 vezes toda a energia que se consome de outras origens. Diante dessa realidade e da gama de conhecimentos desenvolvidos pela ciência e criatividade humanas, propostas alternativas vêm surgindo para o melhor aproveitamento da energia solar disponível. Apresenta-se a seguir um quadro potencial de aplicação da energia solar no Brasil e a utilização de um forno solar de baixo custo para aplicações domésticas, com o intuito de conscientização da viabilidade do uso da energia solar.

Palavras-chaves: Abastecimento Energético; Energia limpa; Forno Solar

**SANTOS FILHO, Edésio Anunciação;
DA CONCEIÇÃO, Valdemir – Construction e tests de of solar oven.**

ABSTRACT

The sun energy cover the Earth with an energetic power equivalent to almost four thousand times all the energy consumed from another sources. Before this reality and the quantity of knowledge developed by all the science and human creativity, some alternative proposals have been developed to get a better use of the solar energy available. Show below a place potential of solar energy application in Brazil and the utilization of solar oven household applications, with the objective to sensetize of the local community of the viability of the use of solar energy.

Keywords: Energetic Supplying; Clean Energy; Solar Oven

DEDICATÓRIA

Á Deus, por sua graça sempre presente em nossas vidas;

Aos pais, esposas e familiares de ambos;

*Aos amigos e companheiros de classe da Engenharia
Mecânica;*

Á minha mãe, D. Carlota Pereira de Souza, te amo!

*Á minha querida namorada Josiane e sua filha Emily,
super companheiras em todos os momentos. Amo vocês!*

Edésio Anunciação Santos Filho

Á meus pais, Valdeir e Irene, e irmãos!

*Á minha esposa e filhos, Cláudia, Guilherme e Vinícius
pela compreensão e apoio. Amo vocês!*

Valdemir Conceição da Silva

In memoriam:

Alex Devens da Silva;

Isaac Vivaldi dos Santos.

AGRADECIMENTOS

Ao professor MSc Johnson Pontes de Moura por sua orientação;

Ao professor Dr. Rodolfo Jesús R. Silvério pelo compromisso e colaboração;

A Coordenação do Departamento de Pesquisas e Pós-Graduação na pessoa do Professor Dr. Marcos Roberto T. Halasz;

À Coordenação do Departamento de Engenharia Mecânica na pessoa do Professor Dr. Wisley Falco Sales;

A todos os companheiros de sala de aula do Departamento de Engenharia Mecânica da FAACZ;

A Coordenação do Departamento de Engenharia Química na pessoa da Professora Dra. Flávia Pereira Puget;

Aos todos os funcionários da FAACZ, em especial aos que nos acompanharam e nos deram suporte para a realização desse projeto.

ÍNDICE

RESUMO	I
ABSTRACT	II
DEDICATÓRIA	III
AGRADECIMENTOS	IV
LISTA DE FIGURAS	VII
LISTA DE TABELAS	VIII
Capítulo 1 – Introdução	01
1.1. Contextualização	02
1.2. Justificativa	03
1.3. Objetivos	03
Capítulo 2 – Fundamentação Teórica	04
2.1. A Energia Solar	05
2.2. Aplicações da Energia Solar	06
2.2.1. Energia Solar Fototérmica	06
2.2.2. Energia Fotovoltaica	07
2.2.3. Energia Bioclimática	07
2.3. Viabilidade do Uso de Energia Solar no Brasil	07
2.3.1. Disponibilidade Solar no Estado do Espírito Santo	09

ÍNDICE

Capítulo 3 – Estado da Arte	10
3.1. Os Fornos Solares	11
3.1.1. Forno Solar Tipo Caixa	11
3.1.2. Forno Solar Tipo Olla	12
3.1.3. Forno Solar Tipo Painel	12
3.1.4. Forno Solar Tipo Parabólico	13
3.2. Princípio de Funcionamento	14
3.2.1. Ganho de Calor	14
3.3. Materiais Construtivos	18
3.4. Mecanismos de Transferência de Calor	19
3.5. Viabilidade de Uso do Forno Solar Proposto	26
Capítulo 4 – Materiais e Métodos	28
4.1. Materiais	29
4.2. Aplicação dos Conceitos Teóricos	32
4.3. Métodos e testes	34
Capítulo 5 – Análise dos Resultados	39
5.1. Análise dos Resultados Experimentais	40
5.2. Análise da Eficiência do Forno Solar Proposto	45
Capítulo 6 – Conclusão	50
Apêndices	52
REFERÊNCIAS	56

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Radiação solar global diária- média anual típica (MJ/m ² . Dia).	08
--	-----------

(TIBA, 2000).

- Figura 2.2.** Insolação média anual diária (h) no território brasileiro (TIBA,2000). **09**
- Figura 3.1.** Forno solar com e sem refletor. **11**
 Fonte: <http://www.energyquest.ca.gov/projects/index.html#solar>
- Figura 3.2.** A radiação sobre diferentes superfícies. **11**
 Fonte: (<http://solarcooking.org/solar-l.htm>)
- Figura 3.3.** Forno Tipo Olla. **12**
 Fonte: (<http://solarcooking.org/solar-l.htm>)
- Figura 3.4.** Fornos Tipo Painéis Solares. **12**
 Fonte: <http://solarcooking.org/solar-l.htm>
- Figura 3.5.** Cozinha solar comunitária Scheffler, a primeira desse tipo no México. Fonte:<http://www.sunoven.de/Scheffler-Jiutepec.html> **13**
- Figura 3.6.** Fogões parabólicos e semi-parabólicos. **13**
 Fonte: <http://solarcooking.org/images/scr/nov04/photou.jpg>
- Figura 3.7.** Estrutura básica de um forno solar tipo caixa **14**
 Fonte: Pedro Horta (Guia da Energia Solar, 2004)
- Figura 3.8.** Influencia da geometria da área coletora na captação da energia solar. Fonte: <http://solarcooking.org/portugues/sbcdes-pt.htm> **15**
- Figura 3.9.** Refletores laterais. **15**
 Fonte: <http://solarcooking.org/portugues/sbcdes-pt.htm>
- Figura 3.10(a).** Incidência típica no verão **16**
- Figura 3.10(b).** Espelho auxiliar para o inverno **16**
- Figura 3.11.** Espelhos refletores com ângulo de 90° na vertical. **16**
- Figura 3.12.** Espelhos refletores aplicados á caixa inclinada. **17**
 Fonte: (JOHNSON, 2007)
- Figura 3.13.** Arranjo utilizando dois espelhos refletores. **17**
- Figura 3.14.** Materiais construtivos. **18**
 Fonte: <http://solarcooking.org/portugues/sbcdes-pt.htm>
- Fig. 3.15.** Tipos de ondas eletromagnéticas utilizadas no cotidiano. **22**
 Fonte: (JOHNSON, 200)
- Figura 3.16.** A curva de radiação para diferentes temperaturas. **23**
- Figura 3.17.** Efeito da convecção entre o ar uma parede plana. **25**

LISTA DE FIGURAS

- Figura 4.1.** Materiais coletados para construção do forno solar. Fonte própria. **29**

Figura 4.2. Ferramentas utilizadas na montagem. Fonte própria.	29
Figura 4.3. Protótipo forno proposto. Fonte própria.	30
Figura 4.4. Forno posicionado de acordo com a trajetória do Sol.	31
Figura 4.5. Elaboração e aplicação do compósito isolante. Fonte própria.	32
Figura 4.6. Fixação dos espelhos refletores. Fonte própria.	33
Figura 4.7. Superfície coletora. Área total 0,2016 m ² .	33
Figura 4.8. Forno Solar proposto. Fonte própria.	34
Figura 5.1. Banana assada no forno Proposto. Fonte própria.	41
Figura 5.2. Torradas preparadas no forno solar proposto. Fonte própria.	42
Figura 5.3. Assando biscoitinhos no forno solar proposto. Fonte própria.	43
Figura 5.4. Assando bolo de massa pronta, no forno solar proposto. Fonte própria.	44
Figura 5.5. Temperaturas iniciais e finais da água em teste.	47
Figura 5.5. Gráfico da radiação solar média no período de 10 a 12 de Dezembro de 2008.	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1. Dimensões do forno solar proposto.	31
Tabela 5.1. Tempo x Temperatura (Experimento do dia 15/11/2008).	41
Tabela 5.2. Tempo x Temperatura Experimento do dia 16/11/2008)	42
Tabela 5.3. Tempo x temperatura (Experimento do dia 17/11/2008).	43
Tabela 5.4. Tempo x temperatura (Experimento do dia 13/12/2008).	44
Tabela 5.5. Radiação média horária dos dias 10 á 12 de Dezembro de 2008	46
Tabela 5.6. Temperaturas médias horária dos dias 10 á de Dezembro de 2008.	46
Tabela 5.7. Eficiência média do forno proposto.	47
Tabela I.1. Aquecimento de água. (Experimento do dia 10/12/2008).	52
Tabela II.1 – Aquecimento de água. (Experimento do dia 10/12/2008).	53
Tabela III.1 – Aquecimento de água. (Experimento do dia 10/12/2008).	54

Capítulo 1

Introdução

1. Introdução

1.1. Contextualização

A utilização da energia solar vem de longa data sendo mencionado em trabalhos científicos; registros históricos mencionam o uso de espelhos solares utilizados como armamento bélico já na época do império Romano, isso, a pelo menos dois séculos antes de Cristo. Segundo a ABRAVA (Associação Brasileira de Ar Condicionado, Ventilação e Aquecimento), desde 1960 a tecnologia do aquecedor solar já vem sendo utilizada em nosso país, foi quando surgiram as primeiras pesquisas no Brasil e que a partir de 1973 já era empregada de forma comercial. Atualmente estimam-se acima de 600.000 coletores solares instalados no Brasil distribuídos em residências, hotéis, motéis, hospitais, restaurantes industriais, aquecimento de piscinas e outros (ABRAVA 2001).

Experimentos com fogões solares segundo Beyer et al. (2004) remontam a mais de 230 anos atrás, quando Horace de Saussure utilizou os conhecimentos da Física em sua época (por volta de 1776) para a construção de uma caixa preta retangular com a parte superior composta de um tampo de vidro, com três lâminas afastadas umas das outras e uma tampa refletora como concentrador de radiação solar no interior dessa caixa, batizada de “caixa quente”. Tal equipamento obteve temperaturas em torno de 118 °C.

Outro experimento clássico que foi realizado pelo astrônomo inglês John Herschel (1837) também consistia de uma caixa de interior enegrecido, inserida na areia como isolante térmico e seu tampo possuía camada dupla de vidro. O conceito comum nesses casos é a absorção da radiação solar para o interior do dispositivo.

No Brasil e demais países do continente americano há um potencial invejável de irradiância solar. Seu uso proporciona conforto térmico com economia de energia elétrica, diminui a retirada de madeira para cocção de alimentos e constitui fonte de renda com a secagem e comercialização de alimentos.

1.2. Justificativa

Este trabalho busca avaliar o uso da Energia Solar como fonte alternativa e auxiliadora ao gás de cozinha (GLP - Gás Liquefeito de Petróleo) e à eletricidade (Forno de micro-ondas, fornos elétricos, etc) no preparo de alimentação doméstica.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo Geral

Construir um forno solar utilizando materiais de baixo custo que possa ser utilizado na cozinha doméstica, auxiliando outros métodos de cocção de alimentos.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Utilizar conceitos de transferência de calor para determinar a construção e eficiência do forno solar proposto;
- Reaproveitar materiais considerados resíduos sólidos destinados a aterro sanitário para construção do forno proposto;
- Realizar testes de cocção e desidratação de alimentos.

Capítulo 2

Fundamentação Teórica

2. Fundamentação Teórica

2.1. A Energia Solar.

A energia do Sol provém da fusão termonuclear de elementos leves, principalmente o hidrogênio, que num processo complexo origina hélio e transforma parte da massa das partículas que interagem em energia térmica, ou solar, como normalmente chamamos e que chega até a Terra na forma de energia eletromagnética, especialmente luz visível (<http://www.creaes.org.br/balancoenergetico/1/11.htm>).

De acordo com Duffie e Beckman (1991, p. 4): a radiação solar que atinge o topo da atmosfera terrestre provém da região da fotosfera solar com aproximadamente 300 km de espessura e temperatura superficial da ordem de 5800 K (aproximadamente 5.527 °C).

Segundo artigo divulgado pelo CRESESB (Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito – Energia Solar Princípios e Aplicações, pg. 7), dados recentes da WMO (World Meteorological Organization) indicam um valor médio de 1.367 W/m² para a radiação extraterrestre. Fórmulas matemáticas permitem o cálculo, a partir da “Constante Solar”, da radiação extraterrestre ao longo do ano, fazendo a correção pela órbita elíptica. A radiação solar é radiação eletromagnética que se propaga a uma velocidade de 300.000 km/s.

De acordo com Oliveira Filho e Saraiva (2005), “a constante solar varia, dependendo da época no ciclo de 11 anos, de 1.364,55 a 1.367,86 W/m²”. O valor adotado para verificação do rendimento de coletores solares planos é de 1353 W/m².

Segundo ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica - 2005, p. 29), quase todas as fontes de energia – hidráulicas, biomassas, eólicas, combustíveis fósseis e

energia dos oceanos – são formas indiretas de energia solar que vão desde a realização da fotossíntese até a evaporação das águas criando energia potencial.

2.2. Aplicações da Energia Solar

Historicamente, o homem faz uso da energia solar de maneira intuitiva desde simples aplicações como conservação de alimentos através da secagem ao ar livre, beneficiamento de couro de animais para confecção de vestimentas e utensílios á aplicações mais elaboradas do tipo utilizá-la como artefato bélico.

Atualmente, com o desenvolvimento das ciências e pesquisas voltadas para a necessidade de obtenção de novas fontes de energia renováveis, o homem vem buscando formas alternativas e eficientes para melhor aplicação da energia solar. Dessa maneira, classifica-se a utilização da energia solar com Ativa e Passiva, sendo a Ativa definida como Energia Solar Fototérmica e Fotovoltaica e a Passiva como Energia Solar Bioclimática.

2.2.1. Energia Solar Fototérmica

A radiação solar pode ser utilizada diretamente como fonte de energia térmica, O aproveitamento térmico para aquecimento de fluidos é feito com o uso de coletores ou concentradores solares. Os coletores solares são classificados como Concentradores e Planos, sendo mais usados em aplicações residenciais e comerciais (hotéis, restaurantes, clubes, hospitais etc.) para o aquecimento de água (higiene pessoal e para lavar utensílios e ambientes) proporcionando redução no consumo de energia elétrica (CRESESB, 2003).

Os concentradores solares destinam-se a aplicações que requerem temperaturas mais elevadas, como a secagem de grãos e a produção de vapor para acionamento de turbinas geradoras de eletricidade.

2.2.2. Energia Solar Fotovoltaica

É a energia obtida através da conversão direta da luz em eletricidade (Efeito Fotovoltaico). Relatado por Edmond Becquerel, em 1839, é o aparecimento de uma diferença de potencial nos extremos de uma estrutura de material semicondutor, produzida pela absorção da luz. A célula fotovoltaica é a unidade fundamental do processo de conversão, são normalmente produzidas em Silício amorfo e possuem custo elevado para aquisição residencial (GREEN et al., 2000)

2.2.3. Energia Solar Bioclimática

Chamada de forma passiva, onde harmoniza as construções ao clima e características locais, pensando no homem que habitará ou trabalhará nelas, tirando partido da energia solar através de correntes convectivas luminosidade naturais.

2.2.4. Viabilidade do Uso de Energia Solar no Brasil

Segundo Martins (Ciência Hoje, Nov. 2003), “o mapeamento da distribuição do recurso solar permite reconhecer áreas em que o aproveitamento dessa energia é potencialmente significativo”. Uma contribuição importantíssima é o Atlas Solarimétrico do Brasil, uma iniciativa da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) e a CHESF (Companhia Hidrelétrica do São Francisco) em parceria com o CRESESB. Na Fig. 2.1 visualiza-se a distribuição da radiação global solar diária no Brasil.

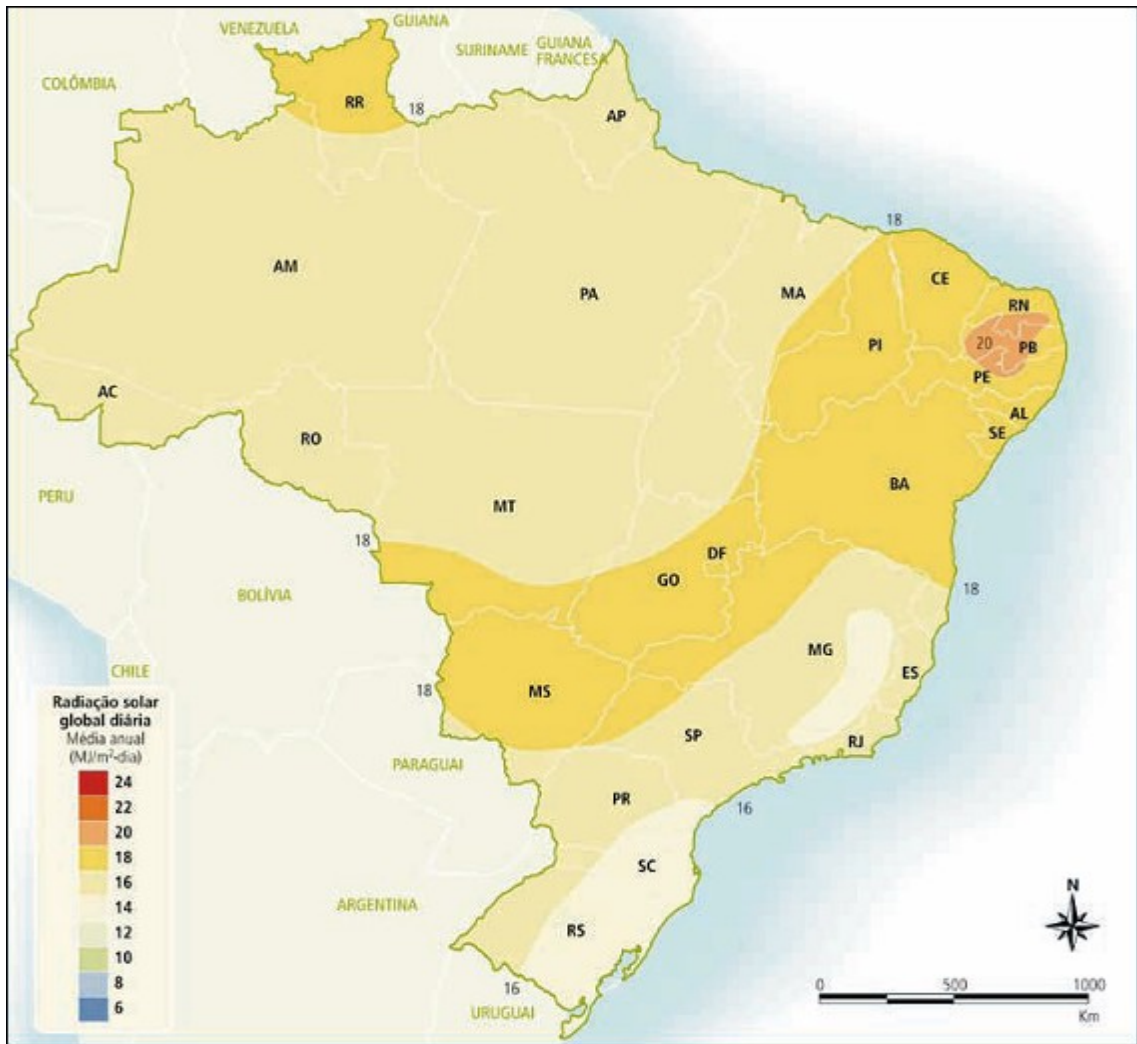


FIGURA 2.1 - Radiação solar global diária- média anual típica (MJ/m². Dia) (tiba, 2000)

A possibilidade da utilização de equipamentos solares depende primeiramente do potencial de energia solar da região. O potencial de energia solar de uma região é uma característica que está relacionada fundamentalmente a quantidade de radiação disponível no local durante o ano e a quantidade de horas de insolação por dia.

Essas informações são disponibilizadas pelo Atlas de Irradiação Solar no Brasil elaborado pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) em parceria com o Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal de Santa Catarina

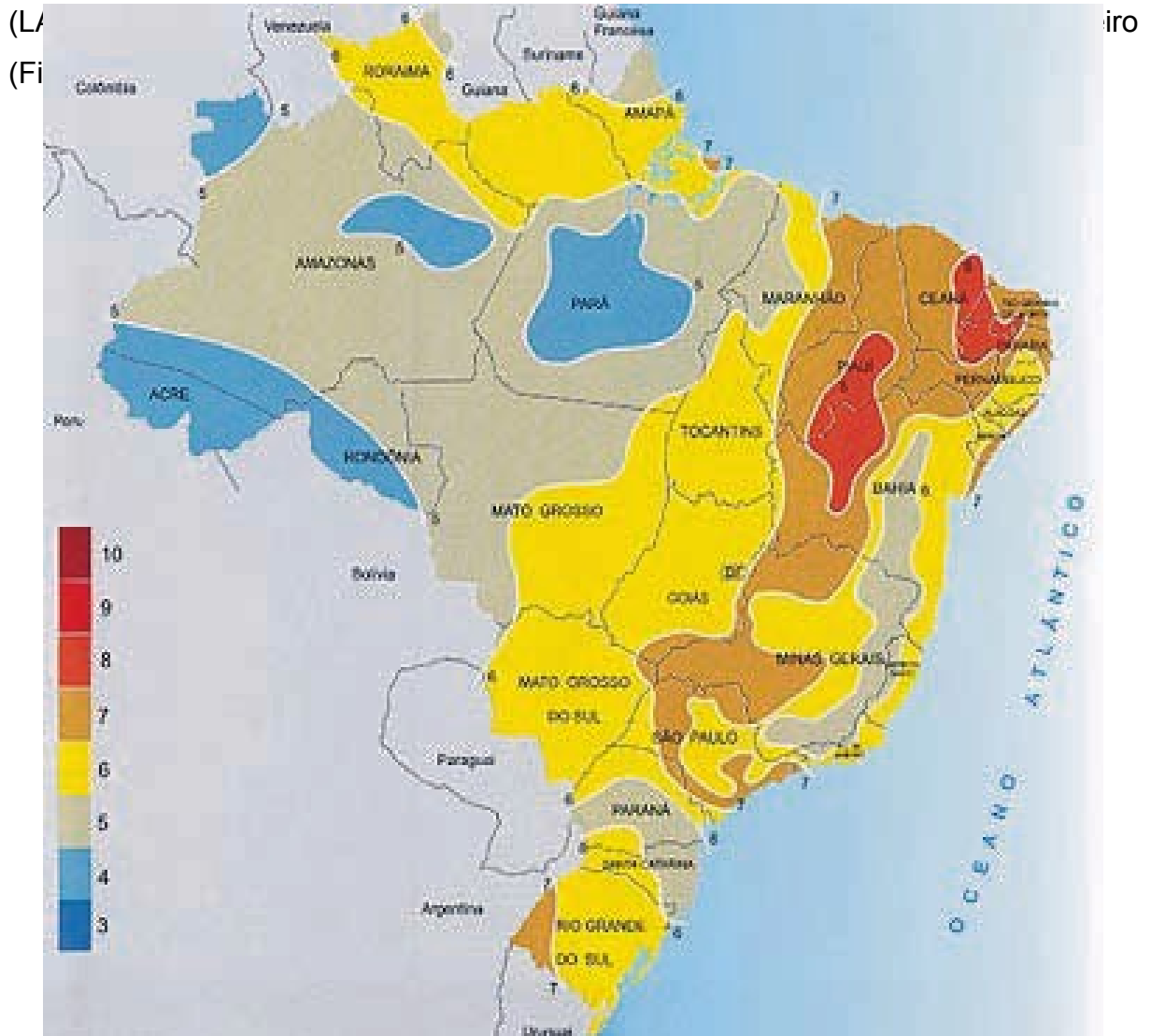


Figura 2.2 - Insolação média anual diária [h] no território Brasileiro (Tiba, 2000)

2.2.5. Disponibilidade Solar no Estado do Espírito Santo

O Espírito Santo figura entre os estados onde a insolação diária está na faixa de 6 h diárias com irradiância da ordem de $16 \text{ MJ/m}^2 \cdot \text{dia}$ (Fig. 2.2 e 2.3). Apesar dessa condição o uso da energia solar limita-se a sistemas de aquecimento direto de água para uso doméstico. A ausência estatística desse setor no Estado demonstra pouca

difusão dessa tecnologia, cabendo assim iniciativas que o insiram nessa realidade energética crescente no Brasil, que segundo Alessandra Batista (Apud FARIA, 2004) até o ano de 2004 registrava entre 650.000 e 700.000 m² instalados por todo o país.

Capítulo 3

Estado da Arte

3. Estado da Arte

3.1. Os Fornos Solares

Os fornos solares são utilizados na conversão térmica da radiação solar para cozer alimentos ou para produzir água destilada, através do “efeito estufa”. Dentre os tipos mais utilizados atualmente, este trabalho apresenta quatro tipos, a saber:

3.1.1. Forno Solar Tipo Caixa:

De construção simples e fácil manuseio; pode ser dotado de espelho refletor auxiliar (Fig. 3.1). Sua operação não oferece riscos de segurança ao usuário. Tem como principal atrativo o fato de poder ser construído com material de fácil aquisição e abundante em cada região onde pretende ser utilizado. Pode ser dimensionado para atender famílias de quatro ou mais pessoas.

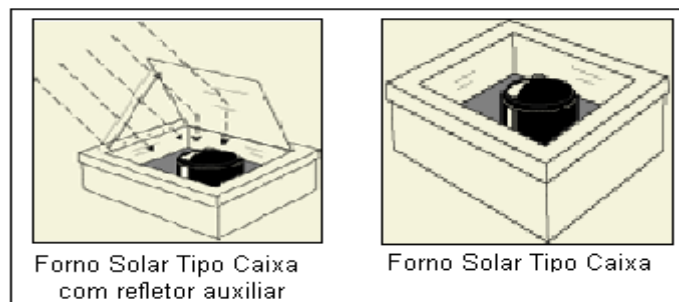


Figura 3.1 – Forno com e sem refletor.
 Fonte: (<http://solarcooking.org/solar-1.htm>)

O processo de cozimento, pasteurização ou outros é mais eficaz com utensílios de cor preta do que aqueles prateados tais como alumínio e aço, conforme mostra a Figura 3.2 abaixo:

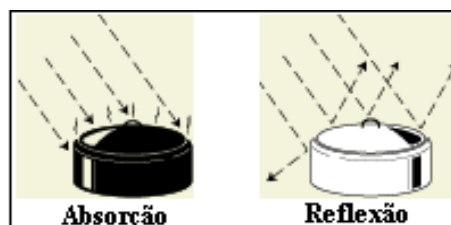


Figura 3.2 – A radiação sobre diferentes superfícies.

Fonte: (<http://solarcooking.org/solar-l.htm>)

3.1.2. Forno Solar Tipo Olla

Difere do forno tipo caixa basicamente por não necessitar de estrutura de apoio, os alimentos são depositados numa panela ou utensílio de cor preta envoltos por uma superfície transparente tal como sacos plásticos ou recipientes de vidro. Como mostra a figura 3, a superfície transparente promove o “efeito estufa” (TEIXEIRA et al., 2007).



Figura 3.3 – Forno Tipo Olla

Fonte: (<http://solarcooking.org/solar-l.htm>)

Atende ao cozimento limitado de um recipiente por vez, devendo ser repetido o procedimento para tantos recipientes quanto forem necessários.

3.1.3. Forno Solar Tipo Painel

Trata-se de uma variação do forno tipo Olla, com diferença de estar situado no centro de um “painel” com superfície interna refletora. O material refletor em geral é composto de folhas de alumínio ou espelhos quando houver disponibilidade, na figura abaixo (Fig. 3.4) visualiza-se alguns modelos.



Fornos Tipo Painel Solar em uso na cidade de Lilongwe no Malawi



Fornos Tipo Painel Solar assando pão

Figura 3.4 – Fornos Tipo Painéis Solares – Fonte: <http://solarcooking.org/solar-l.htm>

3.1.4. Forno Solar Tipo Parabólico

São constituídos de parábolas ou semi-parábolas que concentram e direcionam a radiação solar para um ponto onde se localiza o recipiente de cozimento. São utilizados onde se requer temperaturas muito altas. Neles, não ocorre o efeito estufa e sim, alta concentração de radiação solar. Sua construção é um pouco mais complexa. Pode ser utilizado em cozinhas comunitárias, escolas e cooperativas. Um exemplo disso ocorre no México, onde o Grupo Scheffler (<http://www.sunoven.de/Scheffler-Jiutepec.html>) divulga e constrói fogões como na cidade de Matutina Juana de Asbaje no México, onde alimenta 150 alunos numa escola primária (Fig. 3.5).



Figura 3.5 - Cozinha solar comunitária Scheffler, a primeira desse tipo no México.

Requer mão de obra um pouco mais especializada para construção e operação, por se tratar de um equipamento onde se obtêm temperaturas muito altas, da ordem de 340 á 465 ° C (<http://digilander.iol.it/giannicrovatto>). Como mostra a figura 3.6

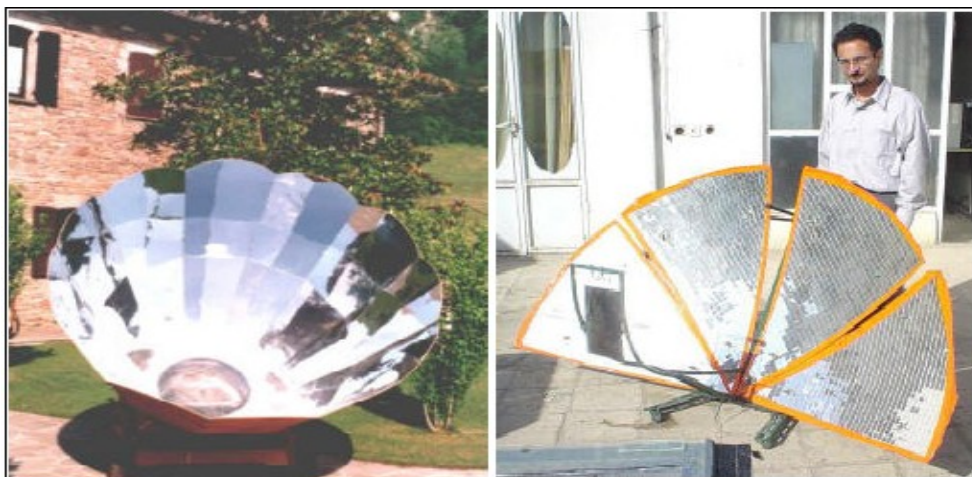


Figura 3.6 – Fogões parabólicos e semi-parabólicos.
 Fonte: <http://solarcooking.org/images/scr/nov04/photou.jpg>

3.2. Princípio de Funcionamento

As relações entre ganho e perda de calor são fatores determinantes para o bom funcionamento dos fornos solares. Torna-se necessário então conhecer e aplicar de maneira adequada conceitos da Física e da Engenharia como parâmetros para se obter melhores resultados possíveis. Relaciona-se a seguir:

3.2.1. Ganho de Calor

- **Efeito estufa:**

Esse efeito resulta do aquecimento em espaços fechados nos quais a luz solar atravessa um material transparente tal como vidro ou plástico. A luz visível facilmente passa através do vidro (figura 3.7) onde é absorvida e refletida por materiais dentro do espaço fechado.

Essa energia luminosa é convertida em energia calorífica, que possui maior comprimento de onda e não consegue passar de volta através do vidro ficando presa no espaço fechado. O calor coletado pelo prato absorvente de metal preto e as vasilhas é conduzido através desses materiais para aquecer e cozinhar a comida (Mark Aalfs, <http://solarcooking.org/portugues/sbcdes-pt.htm>).

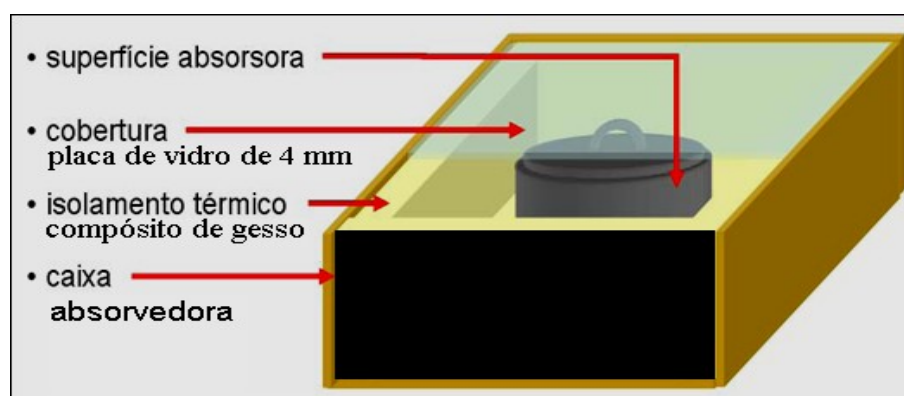


Figura 3.7 - Estrutura básica de um forno solar tipo caixa
 Fonte: Pedro Horta (Guia da Energia Solar, 2004)

- **Orientação do vidro:**

Quanto mais diretamente o vidro estiver voltado para o sol (figura 3.8), maior será o ganho de calor solar. Embora o vidro seja o mesmo na caixa 1 e 2, mais luz solar passa pelo vidro na caixa 2, porque ele está voltado mais diretamente para o sol. Porém, a caixa 2 também tem uma maior área de parede através da qual o calor é perdido.

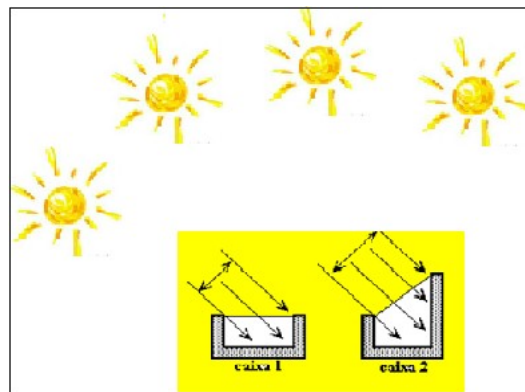


Figura 3.8 - Influência da geometria da área coletora na captação da energia solar
 Fonte: <http://solarcooking.org/portugues/sbcdes-pt.htm>

- **Refletores, ganho adicional:**

Um refletor simples ou múltiplos refletores refletem luz solar adicional através do vidro e dentro da caixa solar. Essa energia solar adicional resulta em maior tempo de uso e temperaturas mais altas conforme é ilustrado na figura 3.10.

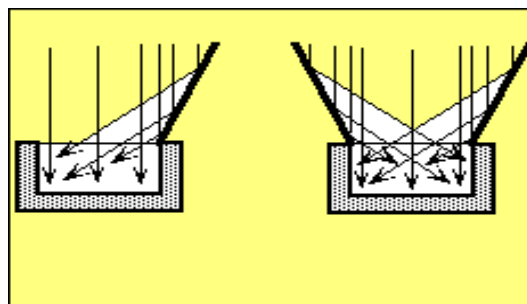


Figura 3.9 – Refletores laterais.

Fonte: <http://solarcooking.org/portugues/sbcdes-pt.htm>

Segundo JOHNSON (Apud TABOR,1966) o uso de espelhos auxiliares contribui para o aproveitamento da radiação na mudança de pico ao meio dia. Uma deficiência de captação ocorre no inverno, mas o espelho auxiliar pode compensar esse fator, este tipo de aplicação ilustra-se comparando a **figura 3.10(a)** que mostra a a incidência da radiação solar no verão e a **figura 3.10(b)** com o refletor auxiliar sendo utilizado no inverno. O espelho auxiliar pode também servir como tampa para o forno, protegendo-o quando estiver fora de operação.

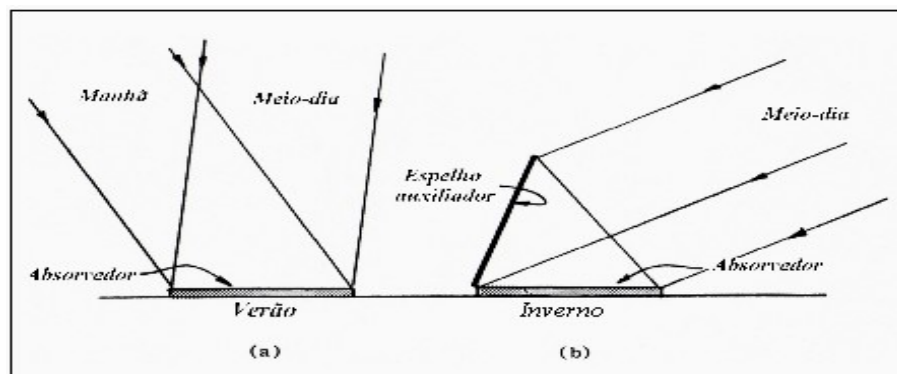


Figura 3.10(a) – Incidência típica no verão e **3.10(b)** – Espelho auxiliar para o inverno
Fonte: (JOHNSON, 2007)

Dentre os arranjos possíveis ainda segundo JOHNSON (Apud TABOR,1996) inclui a configuração do refletor em ângulo de 90° na vertical com a caixa absorvedora na horizontal (**Fig. 3.11**) e inclinada em direção ao sol (**Fig. 3.12**). Considerando que pela manhã a radiação do Sol está concentrada no absorvedor e ao meio-dia não, á tarde o espelho é ajustado para o lado oposto, novamente em direção ao do Sol.

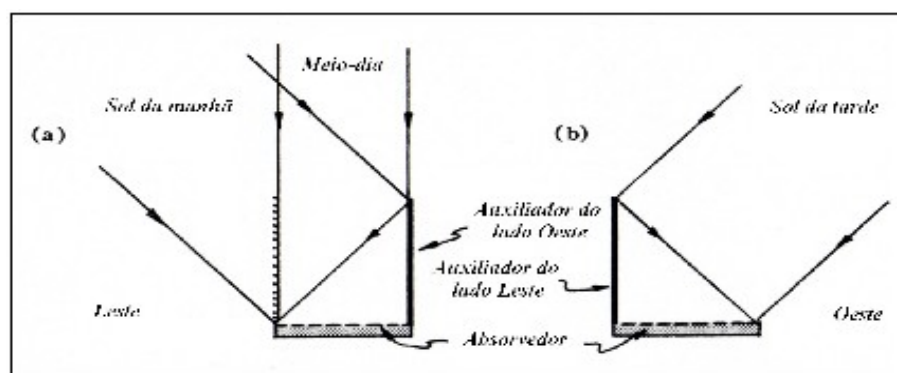


Figura 3.11 – Espelhos refletores com ângulo de 90° na vertical.

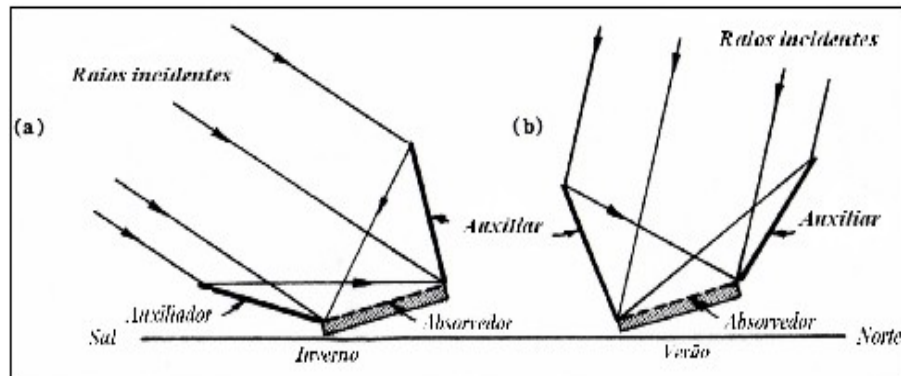


Figura 3.12 – Espelhos refletores aplicados á caixa inclinada.
Fonte: (JOHNSON, 2007)

A posição relativa e o perfil da curva de concentração perto do meio-dia podem ser modificados pela rotação dos espelhos auxiliares horizontais para a vertical. O problema básico deste modelo está na complicação de mudar o espelho de um lado do coletor para o outro ao meio-dia.

Como possível solução JOHNSON (Apud TABOR, 1996) apresenta uma configuração contendo dois espelho planos conforme a **figura 3.13**. Como o ângulo solar aumenta com a inclinação, quando este excede o semi-ângulo formado entre os espelhos, ocorre a projeção da sombra do refletor no interior da caixa absorvedora e isso diminui a eficiência do forno.

Apesar de oferecer maior captação da radiação, o sistema perde eficiência por não acompanhar a inclinação solar,

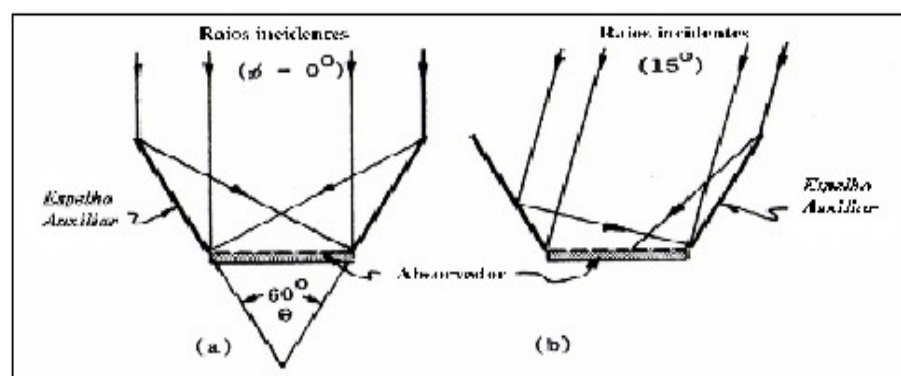


Figura 3.13 – Arranjo utilizando dois espelhos refletores.

3.3. Materiais Construtivos

Os materiais utilizados na construção de fornos solares devem ser resistentes à umidade, dado que durante a cocção dos alimentos é libertado vapor de água, bem como às temperaturas que se possam atingir no seu interior. Num forno temos essencialmente quatro tipos de materiais que são especificados na figura 3.14 relacionando a cor dos materiais com sua posição na construção do forno:

- **Estruturais** – garantem a estabilidade dimensional do conjunto (madeira, plástico, cimento, etc.)
- **Isolantes** – minimizam as perdas térmicas do conjunto (lã de vidro, isopor, papel de jornal, etc.)
- **Transparentes** – permitem a criação do efeito de estufa no interior da caixa (vidro, plástico para alta temperatura, etc.)
- **Refletores** – minimizam as perdas térmicas no interior do forno e podem concentrar a radiação solar no interior (folha de alumínio, espelhos, etc.)

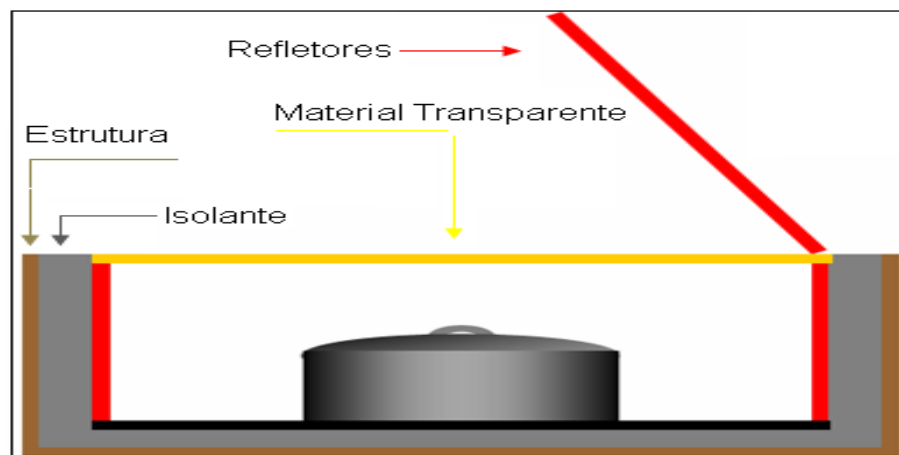


Figura 3.14 – Materiais construtivos.

Fonte: <http://solarcooking.org/portugues/sbcdes-pt.htm>

3.3.1. Cálculo da Eficiência de Fornos Solares

De acordo com HORTA (2004, pg. 7), a relação entre a radiação disponível em um dado intervalo de tempo e o aumento da temperatura da água de um certo volume no interior de um recipiente de cocção, fornece o rendimento, ou, a eficiência de um forno solar e calcula-se segundo a equação dada:

$$\eta = \frac{m \cdot c_p (T_f - T_i)}{I \cdot A_c \cdot dt} \quad (1)$$

Onde:

- m_a = Massa de água; [Kg]
- C_p = Calor específico da água; [J.kg⁻¹. °C⁻¹]
- T_f = Temperatura final; [K]
- T_i = Temperatura inicial; [K]
- $H_{i,média}$ = Radiação média do intervalo [w.m⁻²]
- A_c = Área coletora da radiação. [m²]

3.4. Mecanismos de Transferência de Calor

Por experiência, sabe-se que a transferência de energia sob a forma de calor ocorre da diferença de temperatura entre um sistema e sua vizinhança, e somente na direção decrescente de temperatura (**Moran e Shapiro**, Princípios de Termodinâmica Para Engenharia, pág. 34, 2002). Logo, para um sistema onde se pretende absorver calor e utilizá-lo durante o maior tempo possível, necessita-se

conhecer os mecanismos de transporte de calor, tanto para alcançar as temperaturas desejadas, quanto para não perdê-las durante o processo.

São três os métodos utilizados para avaliação de transferência de energia sob a forma de calor, a saber:

- Transferência de Calor por Condução;
- Transferência de Calor por Radiação;
- Transferência de Calor por Convecção;

3.4.1. Transferência de Calor por Condução

Pode ocorrer em sólidos, líquidos ou gases. A interação entre as moléculas em estados de vibração ou estados energéticos diferentes resulta em uma transferência de parte dessa energia na direção da molécula com menor grau de agitação. E assim ocorre por toda vizinhança desse corpo e os que estiverem também em contato com ele (MORAN e SHAPIRO, 2002).

O ar e a maior parte dos líquidos e gases não são bons condutores de calor e são chamados de isolantes. O ar principalmente, devido ao fato de que as moléculas dos gases que o compõe não apresentarem contato entre si. Os materiais isolantes como o Poliestireno expandido ou “isopor®” (nome comercial), lãs e etc., devem sua boa propriedade entre outras coisas a seus espaços “vazios” onde contêm ar.

Os metais por sua vez possuem seus elétrons externos mais “fracamente” ligados tornando-os livres para o transporte de energia por meio de colisões, por essa razão são melhores condutores de eletricidade e calor.

O modelo matemático que quantifica esse mecanismo obedece à lei de Fourier (MORAN E SHAPIRO, 2002) onde a Temperatura $T(x)$ varia linearmente com a

$$\dot{Q}_{(x)}$$

posição x e a taxa de transferência através do plano normal a essa direção é dada por:

$$\dot{Q}_x = -kA \frac{dT}{dx} \quad (2)$$

Sendo:

k = Constante de proporcionalidade chamada de Condutividade térmica, que é própria de cada material. O sinal negativo indica que o sentido da transferência é decrescente.

A = Área da parede ou do plano onde ocorre o fluxo.

$\frac{dT}{dX}$ = Gradiente de temperatura na direção x

No entanto, com o gradiente da temperatura variando linearmente podemos escrever:

$$\frac{dT}{dx} = \left[\frac{T_2 - T_1}{L} \right] \quad (3)$$

Onde:

T_1 = Temperatura da superfície externa

T_2 = Temperatura da superfície interna

L = Espessura da placa plana ou parede

Que nos leva a equação da taxa de transferência de calor por condução, onde o sinal negativo indica decréscimo da temperatura:

$$\dot{Q}_{(x)} = -kA \left[\frac{T_2 - T_1}{L} \right] \quad [\text{J}] \quad (4)$$

3.4.2. Transferência de Calor por Radiação

A energia vinda do Sol atravessa o espaço, depois a atmosfera terrestre para então, aquecer a superfície da Terra. Essa energia não é transferida por condução, uma vez

que, o ar é mau condutor de calor. O mecanismo presente nesse processo se chama radiação, mais especificamente radiação eletromagnética, “incluindo a luz visível”.

A energia radiante está na forma de ondas eletromagnéticas. O comprimento de onda da radiação está relacionado com a sua frequência. A frequência é a taxa de vibração de uma onda. Na figura 3.15 observam-se alguns tipos de ondas eletromagnéticas utilizadas no cotidiano.

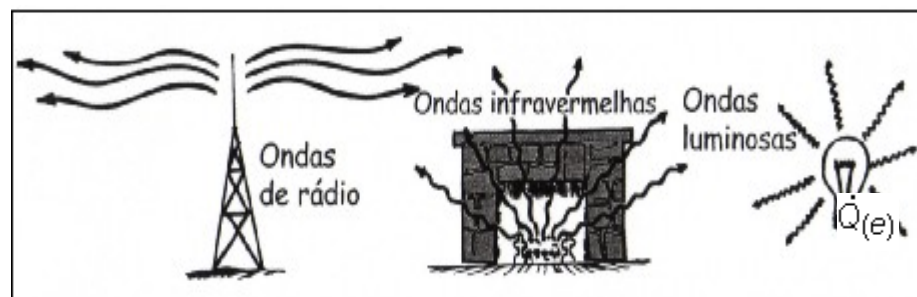


Fig. 3.15 – Tipos de ondas eletromagnéticas utilizadas no cotidiano.
Fonte: (JOHNSON, 200)

O modelo matemático que quantifica a taxa de transferência de calor por radiação vem da Lei de Stefan Boltzmann que mostra que radiação térmica está associada á quarta potência da temperatura absoluta da superfície T_s e está representado abaixo:

$$\dot{Q}_{(e)} = \varepsilon \sigma A T_s^4 \quad (5)$$

Onde:

T_s = Temperatura da superfície

ε = Emissividade, e é uma propriedade que indica a eficiência da superfície irradiante, sendo:
($0 \leq \varepsilon \leq 1,0$)

σ = Constante de Stefan Boltzmann = $5,67 \cdot 10^{-8}$ [W.m⁻².k⁻⁴]

A = Área da superfície radiante

Esse mecanismo de transferência de calor apresenta algumas peculiaridades, dentre elas, o fato de emitir luz em várias faixas de visualização e comprimento de onda.

Sendo assim pode ser gerada, obtida e retida conforme as descrições que se aborda a seguir.

- **Emissão de Energia Radiante:**

Todas as substâncias a qualquer temperatura acima do zero absoluto emitem energia radiante. A frequência de pico \bar{f} da energia radiante é diretamente proporcional à temperatura absoluta T do emissor como o apresentado na figura 3.16.

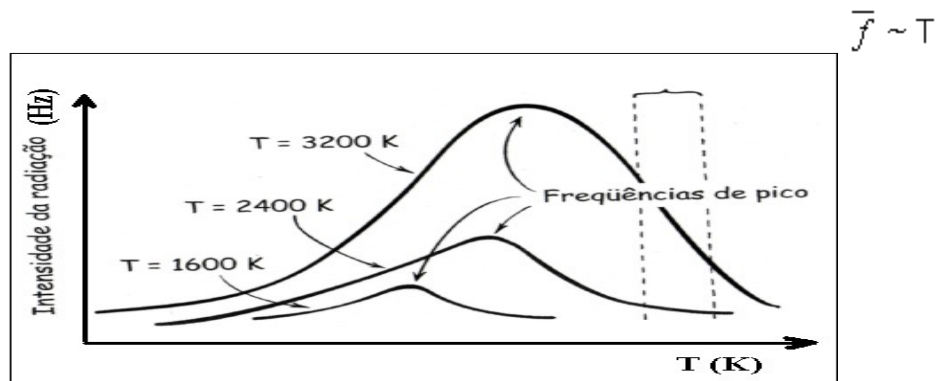


Figura 3.16. A curva de radiação para diferentes temperaturas.

Quando essa energia radiante encontra um objeto, parte dela é absorvida e parte é refletida. A parte que é absorvida aumenta a energia térmica do objeto. Se esse objeto é a sua própria pele, você sente a radiação como calor. Quando um objeto está bastante quente, certa parte da energia radiante emitida está na faixa da luz visível.

- **Absorção de Energia Radiante**

Bons emissores de energia radiante são também bons absorvedores dela; maus emissores são maus absorvedores. Toda superfície, quente ou fria, tanto absorve como emite energia radiante.

Se a superfície absorve mais do que emite, como é o caso das roupas de cores escuras, ela é predominantemente um absorvedor e sua temperatura se eleva.

De modo que um bom absorvedor parece escuro e um absorvedor perfeito não reflete qualquer energia radiante e parece completamente negro.

- **Reflexão de Energia Radiante**

A absorção e a reflexão são processos que se opõem. Bons refletores são maus absorvedores. Roupas e ambientes de cores mais claras são mais confortáveis sob condições de temperatura elevada justamente por refletirem a radiação solar. Portanto, uma superfície que reflete muito pouco ou nada de energia radiante aparece como escura.

- **Resfriamento Noturno por Radiação**

Existem corpos que irradiam mais energia do que recebem e tornam-se mais frios. Isso acontece à noite, quando a radiação solar está ausente. Um objeto que é deixado fora de casa durante a noite irradia energia para o espaço e, devido à ausência de quaisquer corpos quentes em sua vizinhança, recebe muito pouca energia de volta.

Quando esses corpos perdem mais energia do que ganham, tornam-se mais frios. Mas se o objeto for um bom condutor de calor haverá condução de calor para ele vindo do solo, o que às vezes estabiliza sua temperatura.

3.4.3. Transferência de Calor por Convecção

A transferência de energia entre uma superfície sólida a uma temperatura $T_{\text{superfície}}$ e um gás ou líquido adjacente em movimento a uma temperatura $T_{\text{adjacente}}$, desempenha um

papel muito importante na eficiência de muitos dispositivos de interesse prático. Esse mecanismo de transferência de calor é denominado de Convecção.

Quando se coloca uma superfície plana, por exemplo, uma parede como na figura 3.17, em contacto com um fluído a diferentes temperaturas (supondo o ar) o fluxo de energia térmica ou calor transmitido por unidade de tempo, é dado pela lei de Newton para o arrefecimento, descrita a seguir.

- **A Lei de Newton do Esfriamento**

Um objeto relativamente quente perde calor enquanto este é transferido á sua vizinhança, a taxa de esfriamento de um objeto depende de quanto mais quente ele está em relação a sua vizinhança.

A parede (Fig. 3.17) de uma casa aquecida perderá calor para o exterior frio a uma taxa maior quando existir uma grande diferença entre as temperaturas do interior da casa e do exterior. Manter o interior de sua casa a uma temperatura alta em um dia frio custa mais caro do que mantê-la a uma temperatura mais baixa.

A taxa de esfriamento de um objeto seja por condução ou convecção é aproximadamente proporcional à diferença de temperatura ΔT entre o objeto e sua vizinhança.

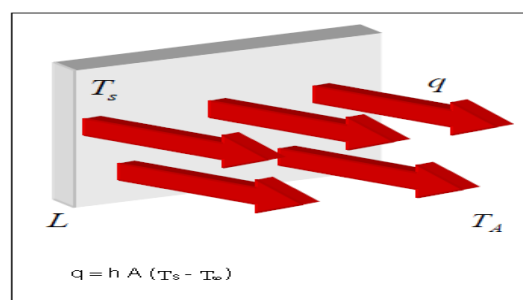


Figura 3.17- Efeito da convecção entre o ar e uma parede plana.

Segundo Moran e Shapiro (Princípios de Termodinâmica Para Engenharia, pg. 35),

A Lei do resfriamento de Newton é dada por:

$$q = h A (T_s - T_\infty) \quad (6)$$

Onde:

h = é o coeficiente de transferência de calor por convecção e não é uma propriedade termodinâmica, é um parâmetro empírico relacionado com a natureza do escoamento, propriedades do fluido e a geometria. Sua unidade é dada por:

$$\left[\frac{W}{m^2 K} \right] \text{ no SI}$$

A = é a área da superfície da parede;

T_s = a temperatura da superfície da parede em contato com o fluido

T_∞ = temperatura do fluido num ponto afastado da parede.

Sendo:

$$Q = \frac{q}{A} \quad (7)$$

Temos o fluxo de calor dado por:

$$\dot{Q} = h (T_s - T_\infty) \quad (8)$$

Se um objeto está mais frio do que sua vizinhança, sua taxa de aquecimento será também proporcional a ΔT .

3.5. Viabilidade de Uso do Forno Solar Proposto

No Brasil utiliza-se ainda muito pouco a energia solar para cocção de alimentos, considerando o grande potencial solar disponível. Sua aplicação nos dias modernos possui limitações tais como a impossibilidade de utilizá-la em períodos chuvosos e o tempo relativamente longo gasto na cocção dos alimentos.

Em contrapartida, vários fatores positivos como a economia do gás de cozinha e diminuição do uso de madeira como combustível, já constituem pontos fortes para sua aplicação de forma mais efetiva. Aliado a esses fatores destaca-se por se tratar de uma fonte limpa e renovável de energia, além do que, em sua construção podem ser utilizados materiais que normalmente são descartados para serem conduzidos a aterros sanitários.

Capítulo 4

Materiais e Métodos

4. Materiais e Métodos

4.1. Materiais

A construção do forno solar foi á base de materiais recolhidos em diversos pontos da cidade (figura 4.1); reaproveitados de caçambas municipais de coleta de entulhos e encontrados em terrenos baldios, evidenciando assim a viabilidade de uso de resíduos sólidos em sua construção.



Figura 4.1 – Materiais coletados para construção do forno solar.
Fonte própria.

4.1.2 Ferramentas

Na fase de construção foram empregadas ferramentas comuns normalmente utilizadas em pequenos serviços domésticos (Fig. 4.2). No entanto, deve ser considerada a segurança na manobra das ferramentas em todas as etapas da construção.



Figura 4.2 – Ferramentas utilizadas na montagem.
Fonte própria.

4.1.3. Modelo Adotado

O modelo escolhido para construção foi o forno solar tipo caixa. O critério foi baseado na facilidade de aquisição de material, de construção e manuseio pelo usuário final. Consiste em uma “gaveta” de madeira revestida de tinta preta e encaixada numa estrutura metálica de uma “carteira” escolar de formato retangular com pintura em branco, como mostra a figura 4.3



Figura 4.3 – Protótipo forno proposto.
Fonte própria.

4.1.4. Detalhes de Projeto, Influência das Dimensões e Operação

4.1.5. Capacidade e manuseio da caixa

O forno foi dimensionado considerando os seguintes fatores:

- Tamanho que permita uma boa capacidade volumétrica (m^3) de alimentos ou materiais a serem cozidos;

- Facilidade para ser transportado;
- Facilidade de adaptação aos utensílios domésticos (panelas, formas de bolo, etc.)

4.1.6. Influência das dimensões

Observando a trajetória do Sol, conclui-se que a caixa absorvedora do forno deve possuir uma dimensão maior que possa ser coberta por quantidade maior da radiação solar e fazer melhor uso do refletor. Como o apresentado na figura 4.4.

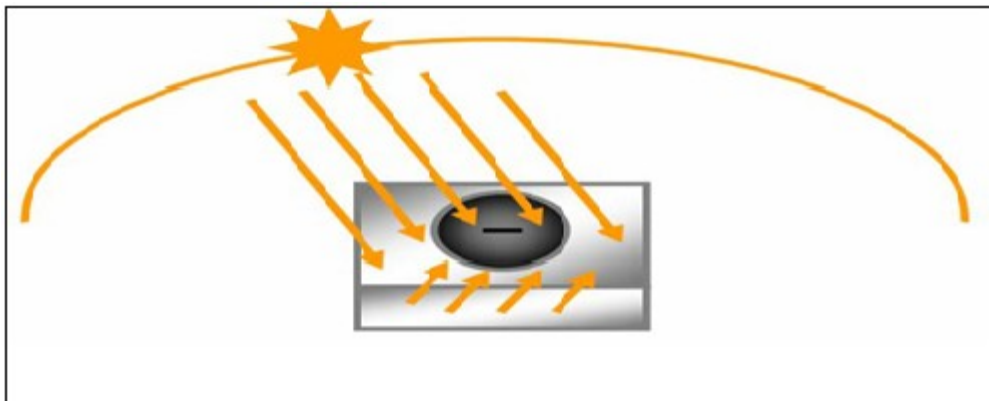


Figura 4.4 - Forno posicionado de acordo com a trajetória do Sol.

Com caixas quadradas, um maior percentual da luz solar do começo da manhã e do final da tarde é refletida do refletor para o chão, não atingindo a área de coleta de luz da caixa, por esse detalhe escolheu-se uma estrutura retangular já existente, nesse caso, uma carteira escolar sucateada.

4.1.6.1. Dimensões do forno proposto

Descritas na Tabela 4.1 constam as dimensões do forno proposto.

Tabela 4.1 – Dimensões do forno solar proposto.

	Altura [mm]	Largura [mm]	Comprimento [mm]
Estrutura metálica	710,0	600,0	400,0
Caixa absorvedora	140,0	560,0	360,0
Tampo de vidro	4,0	560,0	360,0

4.2. Aplicação dos Conceitos Teóricos

4.2.1. Isolamento Térmico

De acordo com a literatura já apresentada as perdas de calor podem ser evitadas com uso de materiais isolantes, dessa forma, para o modelo proposto de forno solar foi desenvolvido um compósito a base de gesso e isopor. As perdas térmicas ficaram na ordem de 15% (JOHNSON, 2007).

Foram realizados ensaios experimentais para se obter a melhor composição de mistura, com o intuito de obtenção de um compósito que apresentasse propriedades satisfatórias de engenharia dos materiais : baixa permeabilidade, boa resistência às intempéries (radiação solar, chuva, vento, etc.) e leveza para manuseio do forno solar proposto.

O material foi levado ao fogo nas seguintes proporções 60 % de gesso, 20% de água e 20% de isopor granulado juntamente. A temperatura da composição foi de aproximadamente de 50 °C e em seguida aplicado às paredes da caixa absorvedora do forno (Fig. 4.5)



Figura 4.5 – Elaboração e aplicação do compósito isolante.
Fonte própria.

4.2.2. Refletores

No modelo de forno solar proposto foram consideradas as questões de reposicionamento dos refletores em função da trajetória solar e estética. Dessa forma, foram aplicados dois refletores (Fig. 4.6) fixados por dobradiças reguláveis, garantindo a mobilidade para acompanhar o deslocamento do sol e servindo como tampa superior do forno proposto. Os refletores foram formados por espelhos planos obtidos como sucata numa vidraçaria local.



Figura 4.6 – Fixação dos espelhos refletores.
Fonte própria.

4.2.2.1. Superfície Coletora

Como montagem final dando assim as características de um forno solar, a superfície coletora utilizada foi uma placa de vidro com as seguintes dimensões 0,004 m de

espessura. A área coletora possui as seguintes dimensões 0,56 m de comprimento por 0,360 m de profundidade, totalizando 0,2016 m², como apresentado na figura 4.7 abaixo.



Figura 4.7 - Superfície coletora. Área total 0,2016 m².

4.3. Métodos e Testes

O teste do forno solar proposto (Fig. 4.8) foi realizado durante vários dias dos meses de Novembro e Dezembro do ano corrente. Apesar do período ter sido marcado por chuvas intensas, os teste foram conduzidos de maneira satisfatória.



Figura 4.8 – Forno Solar proposto.
Fonte própria.

Limitados aos equipamentos disponíveis, as seguintes medições foram realizadas:

- * Radiação solar total na superfície - H_i
- * ;

- * Temperatura ambiente do ar – T_a ;
- * Temperatura interna do forno – T_i ;
- * Temperatura da parede interna – T_{pi} ;
- * Temperatura da parede externa – T_{pe} ;

Foi considerado:

- Medição das temperaturas a cada 10 minutos.
- A radiação solar na superfície horizontal obtida on line via Estação Meteorológica da CEUNES (Centro Universitário do Norte do Espírito Santo).
- A velocidade do vento desprezível.
- Localização geográfica em área aberta, de forma a obter melhor exposição e focalização da radiação solar no interior do forno (CLARK, 1996).

4.3.1. Procedimento Padrão de Teste de Fornos Solares Analisando o Desempenho.

Segundo JOHNSON (2007) os procedimentos de teste existentes tais como o Indiano baseado em Mullick et. al. (1987) (JONSON, Apud), é mais complicado, ainda que seja um bom parâmetro. Resolveu-se então aplicar o formato definido em 09 de janeiro de 1997 pelo Comitê de Indiano de Procedimento Experimental (JOHNSON, 2007) onde reconheceu-se que uma das figuras que melhor representa o desempenho térmico é a força efetiva de cozimento.

A unidade de força com que maioria das pessoas é familiar é o Watt. A influência das condições do teste nos resultados pode ser minimizada se as variáveis não controláveis estiverem no alcance certo. Segundo o comitê (JOHNSON, Apud) para condições experimentais mais condizentes é importante observar:

4.3.2. Variáveis não-controláveis (tempo)

- **Vento** – Os testes do forno solar proposto foi conduzidos quando o vento estava a a velocidades variando entre mínima de 0 m/s e máxima de 6,1 m/s, o que deu

uma média de 4,2 m/s. O desperdício de calor é fortemente influenciado pela velocidade do vento, em função disso os dados tabulados onde a velocidade ultrapassou 2,5 m/s por mais que 10 minutos, foram desconsiderados (JOHNSON, 2007). As velocidades menores que 1,0 m/s ajudam a manter o coeficiente de perda de calor perto do coeficiente de perda por convecção natural. Dessa forma os resultados positivos são mais consistentes e repetíveis. Desde que o vento não interfira na radiação total incidente.

- **Temperatura Ambiente** – Os testes do Forno Solar proposto foram conduzidos quando a temperatura ambiente estava entre 23,0 e 33,0 °C.
- **Insolação** – Os melhores valores foram obtidos com médias diárias de insolação por volta de 25,66 MJ/m² considerando a presença de nuvens na maior parte do tempo.
- **Altitude solar** – Os teste seguiram a recomendação que fossem conduzidos entre 10 e 14 horas (solar) (JOHNSON, 2007), no entanto considerando a disponibilidade para a realização dos teste, decidiu-se realizá-los á partir das 9:00 e 14:0 h.

4.3.3. Variáveis controláveis (forno).

- **Rota** – A determinação da rota escolhida experimentalmente, uma vez que os fornos tipo caixa geralmente requerem ajustes a cada 30 minutos ou 1 hora, o protótipo foi posicionado utilizando a radiação do nascente do Sol refletindo nas linhas limites do fundo da caixa absorvedora.
- **Temperatura percebida** – Foram utilizados termômetros de bulbo metálico e com haste metálica do tipo usado em refrigeração.

4.3.4. Protocolo de teste

- **Registro** - A média da temperatura de todos os recipientes em um forno é para ser registrada a cada 10 minutos, para um décimo da medida se possível. A insolação (MJ/m^2) e a temperatura ambiente são registradas freqüentemente.
- **Calculando a potencia de cozimento** - A mudança na temperatura interna para cada intervalo de 10 minutos pode ser multiplicado pela massa e capacidade de calor específico do alimento contido no interior do forno. Dividindo este produto pelos 600 segundos correspondentes ao intervalo de dez minutos resulta na potencia em Watts.
- **Calculando a média dos intervalos** - A insolação média, temperatura ambiente média e a temperatura média devem ser encontradas para cada intervalo.

4.3.4.1. Método de Ensaio do Forno Solar Proposto

Para ensaiar protótipo em questão buscando avaliar seu rendimento, procurou-se estabelecer as grandezas diretamente relacionadas com a eficiência dos fornos solares e delimitar parâmetros para cada uma delas para os experimentos seguintes com cocção de alimentos. Por exemplo:

(a) **Equipamentos Utilizados nos testes:**

- Termômetros;
- Cronômetro;

- Trena;
- Recipiente graduado de 3L;
- Panela de alumínio: diâmetro 250 mm, espessura 0,5mm, preto teflon (absortividade $\geq 0,86$) – (JOHNSON, 2007);
- Fôrma de vidro.

(b) Procedimentos Preliminares

- Posicionar o forno solar proposto em local aberto, onde haja a melhor captação da radiação solar pelo maior espaço de tempo possível;
- Posicionar os termômetros de maneira favorável para a obtenção das leituras;
- Inserir o recipiente contendo o líquido padrão para avaliação da eficiência no caso, um volume de 3 litros de água.

(c) Procedimento Operacional

- Ajustar os refletores para as posições iniciais visando obter o máximo de radiação solar no interior do forno proposto
- Ler e anotar as temperaturas ambiente e da água.
- Iniciar primeira corrida de leituras a partir do valor mínimo de 35°C que é ligeiramente maior que a temperatura máxima ambiente (aproximadamente 33 °C)
- Ler e anotar com intervalo de tempo de 10 minutos as temperaturas ambiente, da água, da parede interna do forno e da parede externa do forno.
- Acompanhar os valores de irradiação e velocidade do vento conectados ao site da Estação Meteorológica da CEUNES.

Restrições:

Para efeito de cálculo da eficiência do forno, serão desprezados:

- Valores de temperatura ambiente fora do intervalo entre 25 e 35 °C porque abaixo desse limite inferior os resultados preliminares não foram satisfatórios e acima do limite superior desse intervalo, os fenômenos de transporte de massa interferem na avaliação da eficiência.

- Valores de insolação inferiores a 50,0 MJ.m⁻².

Capítulo 5

Análise dos Resultados

5. Análise dos Resultados

5.1. Análise dos Resultados Experimentais e Práticos

A parte experimental deste Trabalho de Conclusão de Curso foi realizada durante os períodos de 15 á 18 de Novembro e 10 á 15 de Dezembro de 2008 entre 9:00 e 13:00 h na cidade de Aracruz-ES. Nesse período diversos outros testes foram realizados, infelizmente essa época do ano não ofereceu condições climáticas para que melhores resultados fossem obtidos

Para efeito de avaliação da eficiência do forno solar proposto HORTA (2004, pg. 7), foram realizados teste com evaporação de água á um volume inicial conhecido. As medições de temperatura forar realizadas com intervalo de 10 minutos, mas, foram extraídos os valores horários médios para cálculo do rendimento, uma vez que, não se dispunha de recurso para aquisição dos valores da radiação solar com intervalo menor de tempo.

Dados da parte experimental:

Local:

Aracruz-ES, Brasil.

Latitude: -19° 49' 13"

Longitude: 40° 16' 24"

Altitude: 60 metros

Temperaturas (°C):

10/12/2008 Min. 25,4 – Máx. 29,9

11/12/2008 Min. 27,2 – Máx. 30,8

12/12/2008 Min. 28,4 – Máx. 32,8

Umidade relativa do ar variando na média de: 56,6 á 61 %

Velocidade do vento variando na média de: 2,4 á 6,1 m.s⁻¹

Radiação global: 506,2 á 901,9 W.m⁻²

Uma vez que o objetivo principal desse trabalho de conclusão de curso é oferecer uma alternativa de cozimento utilizando o forno solar proposto, uma bateria de testes foi efetuada com alimentos comuns como se descreve abaixo.

Data do Experimento: 15/11/2008

Dados:

- Banana do tipo cultivar prata = 2 unidades
- Temperatura ambiente: 33,0 °C às 10:45 horas (inicial)
- $H_i = 604,4 \text{ W/m}^2$ às 10 horas

O primeiro experimento foi realizado utilizando bananas (Fig. 5.1) do cultivar prata, que é um fruto comestível muito apreciado pelas famílias brasileiras. A temperatura T_c no interior do fruto (Tabela 5.2) foi tomada utilizando um termômetro próprio para alimentos.

Tabela 5.1 Tempo x Temperatura
(Experimento do dia 15/11/2008).

T (horas)	T_c (°C)
10:45	42,0
11:00	48,0
11:15	55,0
11:30	58,0

Tempo total: 45 minutos



Figura 5.1 – Banana assada no forno Proposto.
Fonte própria.

- Utilizou-se uma bandeja de aço inoxidável afastada do fundo da caixa, não contribuindo com perda térmica por condução de calor.
- Período de chuvas no ES - houve nebulosidade em vários momentos.

No experimento seguinte procurou-se testar a performance do forno solar proposto, no preparo de torradas, foi utilizado pão de forma, conforme a figura 5.2 abaixo:

Data do Experimento: 16/11/2008

Dados:

- Pão de forma = 4 unidades
- Temperatura ambiente: 29,0 °C às 10:00 horas (inicial)
- $H_i = 582,2 \text{ W/m}^2$ às 10 horas

Tabela 5.2. Tempo x Temperatura
Experimento do dia 16/11/2008.

T (horas)	T _c (°C)
10:00	33,0
10:15	38,0
10:30	41,0
10:35	55,0
10:50	58

Torradas prontas

Tempo total: 50 minutos

Como observa-se na figura 5.1 abaixo, apesar do tempo gasto, pode-se preparar torradas sem a necessidade do consumo de GLP ou energia elétrica.



Figura 5.2 – Torradas preparadas no forno solar proposto.

Data do Experimento: 17/11/2008

Biscoito “Beijinho de freira”

Dados:

- Massa da mistura para preparo dos biscoitos: 200g
- Temperatura ambiente: 28,5 °C às 10:30 horas (inicial)
- $H_i = 725,6 \text{ W/m}^2$ às 10 horas

Tabela 5.3 – Tempo x temperatura
(Experimento do dia 17/11/2008).

Tempo (h)	T _c (°C)
10 : 30	44,0
10 : 45	52,0
11 : 00	55,0
11 : 15	58,0
11 : 30	61,5
11: 45	65,0
12 : 15	76,0

Tempo total: 1 horas e 45 minutos



FIGURA 5.3 – Assando biscoitinhos.
Fonte própria.

Observação:

- Antes de introduzir a massa do biscoito, o forno solar permaneceu exposto ao Sol á partir das 7:00 h da manhã, a fim de alcançar uma temperatura elevada (em torno de 44 °C) para o início da operação.

Data do Experimento: 13/12/2008

Bolo de “massa pronta”

Dados:

- Massa pronta para bolos, sabor baunilha: 400g
- Temperatura ambiente: 29,5 °C às 11 horas (inicial)
- $I = 105,4 \text{ W/m}^2$ às 11 horas

Tabela 5.4 – Tempo x temperatura
(Experimento do dia 13/12/2008).

Tempo (h)	T _c (°C)
11:00	44,0
11:30	52,0
12:00	55,0
12:30	58,0
13:00	61,5
13:30	65,0
13:40	76,0

Tempo total: 2 horas e 40 minutos



FIGURA 5.4 – Assando bolo de massa pronta, no forno solar proposto. Fonte própria.

Observação:

- O bolo foi assado com a fôrma fechada, nos dias que se seguiram outros testes foram realizados, e, descobriu-se que melhor resultado para bolos se obtém com a fôrma aberta.

5.2. Análise da Eficiência do Forno Solar Proposto

Utilizando os dados experimentais obtidos através do aquecimento de água (**APÊNDICE I**), onde as temperatura foram medidas entre o intervalo de 9:00 da manhã às 15:00 da tarde durante 3 dias consecutivos, calculou-se a eficiência do forno solar proposto como segue abaixo:

Datas do teste de Eficiência:

10/12/2008

11/12/2008

12/12/2008

Para:

m_a = Massa de água = 3 litros = 3 Kg

C_p = Calor específico da água = 4.186,0 J.kg⁻¹. °C⁻¹

T_2 = Temperatura final

T_1 = Temperatura inicial

$H_{i,média}$ = Radiação média do intervalo [W.m⁻²]

A_c = Área coletora da radiação = 0,2016 m²

η = Eficiência do forno solar proposto = $\frac{m.c_p(T_f - T_i)}{H_i.A_c.dt}$

Onde:

- A variação da perda de massa durante o processo foi considerada linear e foi dividida ao longo do tempo experimental;
- A radiação global foi obtida com intervalo de 1 hora;

Seguem abaixo os resultados da radiação média horária (Tabela 5.5) obtidos nos período de testes.

Tabela 5.5 – Radiação média horária dos dias 10, 11 e 12 de Dezembro de 2008.

Hora do dia	Radiação solar [W.m ²]			Radiação Média [W.m ²]
	10/12/2008	11/12/2008	12/12/2008	
9:00	665,9	575,3	749,5	663,6
10:00	901,9	881,7	930,2	904,6
11:00	788,9	997,7	981,4	922,7

12:00	632,7	860,7	1.002,4	832,2
13:00	821,5	739,4	822,5	794,5
14:00	722,3	731,2	696,9	716,8
15:00	577,8	807,9	653,4	79,7
Média diária	730,1	799,1	833,7	

Segue também abaixo as temperaturas médias da água em teste (Tabela 5.6 e Fig. 5.6) compreendidos no período de 10 à 12 de Dezembro do corrente ano para cálculo do rendimento do Forno Solar proposto.

Tabela 5.6 – Temperaturas médias horária dos dias 10,11 e 12 de Dezembro de 2008.

Hora do dia	Temperatura [K]	
	T_f	T_i
9:00	326,65	300,75
10:00	332,98	316,01
11:00	338,31	326,63
12:00	333,48	332,53
13:00	335,48	331,9
14:00	332,65	333,03

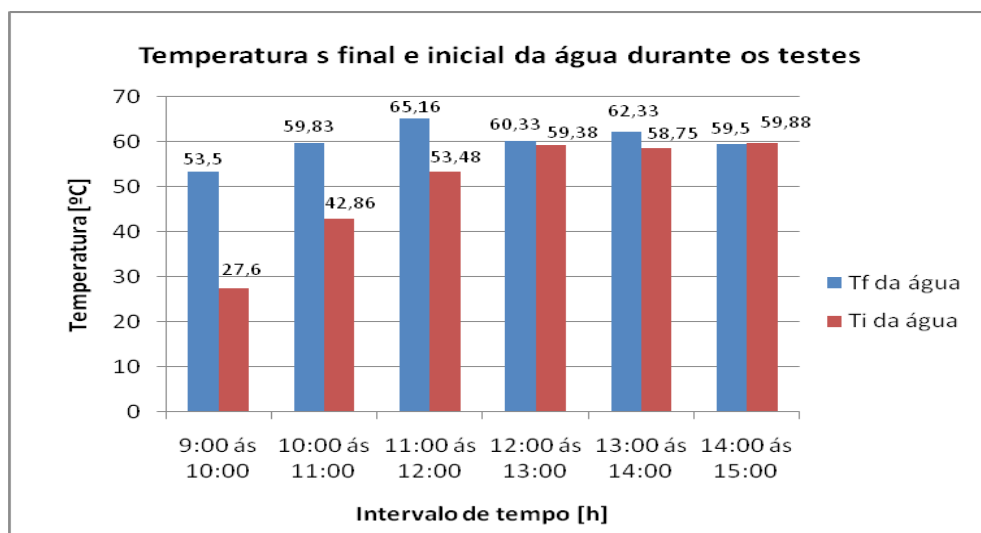


Figura 5.5 – Temperaturas iniciais e finais da água em teste.

O cálculo das eficiências médias é apresentado na Tabela 5.7, foram considerados os valores médios do **APÊNDICE I, II e II**.

Tabela 5.7 – Eficiência média do forno proposto.

t [h]	$H_{i\text{média}}$ [W.m ⁻²]	m [kg]	T_f [K]	T_i [K]	$\eta = \frac{m \cdot c_p \cdot (T_f - T_i)}{H_i \cdot A_C \cdot dt} \times 100$ [%]
9:00	663,6	3,0	326,65	300,75	67,75
10:00	904,6	3,0	332,98	316,01	32,00
11:00	922,7	2,90	338,31	326,63	21,90
12:00	832,2	2,970	333,48	332,53	0,95
13:00	794,5	2,970	335,48	331,9	3,58
14:00	716,8	2,970	332,65	333,03	-0,38

Comparando os resultados com a literatura já apresentada chega-se á conclusão de que o Forno Solar proposto neste trabalho apresenta padrões de rendimento muito próximo se comparado a outros protótipos tais como o do Laboratório de Máquinas Hidráulicas e Energia Solar (LMHES) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) que segundo JOHNSON (2007), alcançou temperatura máxima de 105°C contra os 87 °C em condições climáticas desfavoráveis do Forno Solar proposto neste trabalho.

O tempo em que foi assado o bolo nos experimentos deste trabalho (Capítulo 5, Tabela 5.1) que foi de 2 h e 40 min contra 50 minutos do protótipo do LMHES/UFRN auxiliado por três espelhos refletores (JOHNSON, 2007) pode ser melhorado em se considerando a baixa insolação incidente do período de testes conforme o gráfico da Figura 5.6.

A necessidade de instrumentos de maior confiabilidade e precisão certamente limita a eficiência da

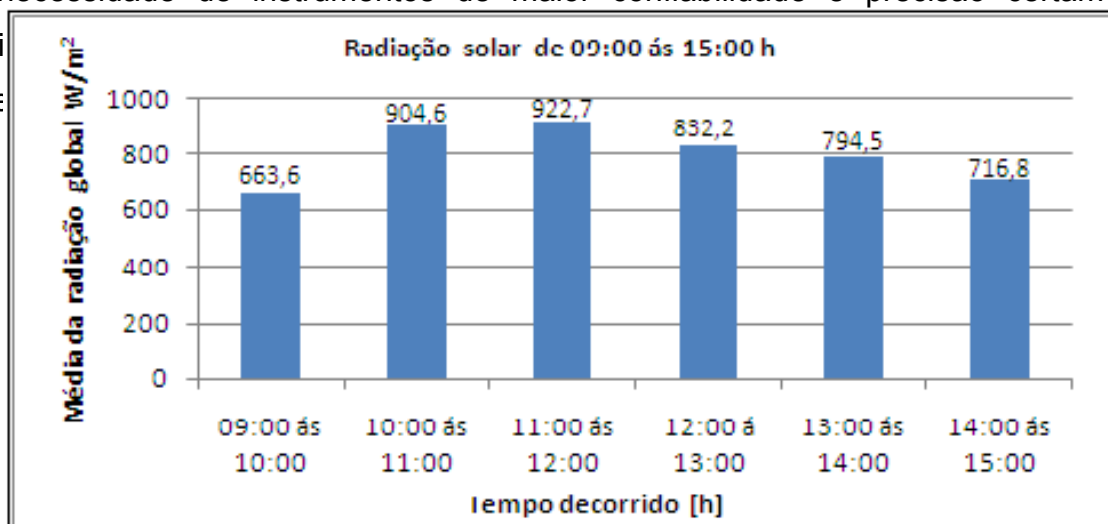


Figura 5.6 – Gráfico da radiação solar média no período de 10 a 12 de Dezembro de 2008.

Pode-se atestar que o protótipo apresentado apesar de ter oferecido menor desempenho térmico para as condições do presente trabalho, é viável de ser aplicado em programas sociais, associações comunitárias, cooperativas e no meio acadêmico para estudos mais avançados.

Capítulo 6

Conclusão

6. Conclusão

Mediante o que foi exposto acerca das possibilidades de aproveitamento da energia no uso doméstico, onde se especulou que o forno poderia vir a ser um auxiliador de outras fontes energéticas, pôde-se comprovar que tal aplicação foi validada através dos testes práticos apresentados.

O forno solar proposto confirmou ser uma boa alternativa na cocção de alimentos para os quais fora utilizado neste trabalho. Apesar de exigir um tempo longo para seu funcionamento, a questão financeira e a qualidade de vida em relação ao uso de fogões á lenha superam esses obstáculos.

Com criatividade e disposição o forno solar proposto pode servir como complementação de renda, o mercado de frutas e legumes desidratados oferece boas perspectivas.

Quanto á viabilidade econômica o baixo custo de fabricação do forno solar proposto (em torno de R\$ 85,00) pelo uso de energia limpa e gratuita permite que o forno seja implementado inclusive em programas sociais governamentais.

Ainda sobre os materiais e métodos o forno proposto demonstrou ser de fácil fabricação e manuseio, além do que, novas implementações podem melhorar ainda mais outros aspectos tais como design e novas dimensões.

Sobre as considerações acerca da continuidade do projeto, sugere-se mais estudos de eficiência térmica e o levantamento das temperaturas médias internas do forno solar.

Apêndice

APÊNDICE I

Data do Experimento: 10/12/2008

Tipo de ensaio: Aquecimento de água

**Tabela I.1 – Aquecimento de água.
(Experimento do dia 10/12/2008).**

Centro, externo

Dados :

Massa inicial de água = 3,0 kg

Massa final de água = 2,950 kg

$$\bar{H}_i = 730,1 \text{ W.m}^{-2}$$

$$\bar{V}_{\text{vento}} = 2,6 \text{ m.s}^{-1}$$

Cálculo das Temperaturas médias

Temperatura ambiente:

$$\bar{T}_a = \frac{\sum_{i=1}^n T_{a,i}}{n} = 27,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Temperatura parede interna do forno

$$\bar{T}_{pi} = \frac{\sum_{i=1}^n T_{pi,i}}{n} = 67,9 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Temperatura da Água

$$\bar{T}_{\text{Ág}} = \frac{\sum_{i=1}^n T_{\text{Ág},i}}{n} = 55,6 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Horário	T _a [°C]	T _{pi} [°C]	T _{água} [°C]
9:00	26,0	38,0	26,0
9:10	26,0	44,0	32,0
9:10	26,0	46,0	48,5
9:30	26,0	48,5	49,5
9:40	27,0	54,0	50,0
9:50	26,0	56,5	50,5
10:00	27,0	57,5	51,5
10:10	26,5	63,5	53,0
10:20	27,5	65,0	53,5
10:30	27,0	66,0	54,0
10:40	26,5	67,0	54,5
10:50	27,0	68,5	55,5
11:00	27,5	73,0	57,0
11:10	27,0	75,5	58,0
11:20	28,5	77,0	59,5
11:30	28,5	80,5	59,5
11:40	29,5	74,0	58,0
11:50	28,5	71,5	56,5
12:00	27,5	78,0	56,5
12:10	27,5	77,0	57,5
12:20	28,5	79,0	58,0
12:30	29,0	82,0	59,0
12:40	29,0	82,0	59,0
12:50	28,5	78,5	58,5
13:00	27,5	69,0	56,0
13:10	27,0	78,0	58,5
13:20	27,0	72,0	58,5
13:30	26,0	72,0	56,5
13:40	26,5	80,5	57,0
13:50	26,0	74,0	56,5
14:00	26,0	69,0	56,5
14:10	27,0	70,5	58,5
14:20	27,0	71,0	59,0
14:30	27,0	65,5	58,0
14:40	27,0	64,0	58,0
14:50	27,0	65,0	56,5
15:00	27,0	60,0	55,0

APÊNDICE II

Data do Experimento: 11/12/2008

Tipo de ensaio: Aquecimento de água.

Tabela II.1 – Aquecimento de água
(Experimento do dia 11/12/2008).

Dados :

Massa inicial de água = 3,0 kg

Massa final de água = 2,970 kg

$$\bar{H}_i = 799,1 \text{ W.m}^2$$

$$\bar{V}_{\text{vento}} = 2,8 \text{ m.s}^{-1}$$

Cálculo das Temperaturas médias

Temperatura ambiente:

$$\bar{T}_a = \frac{\sum_{i=1}^n T_{a,i}}{n} = 29,2 \text{ }^\circ\text{C}$$

Temperatura parede interna do forno

$$\bar{T}_{pi} = \frac{\sum_{i=1}^n T_{pi,i}}{n} = 74,7 \text{ }^\circ\text{C}$$

Temperatura da Água

$$\bar{T}_{\text{Ág}} = \frac{\sum_{i=1}^n T_{\text{Ág},i}}{n} = 57,7 \text{ }^\circ\text{C}$$

Horário	T _a [°C]	T _{pi} [°C]	T _{água} [°C]
9:00	26,5	40,0	28,5
9:10	26,0	44,5	35,5
9:20	26,5	48,0	42,5
9:30	26,5	54,0	46,5
9:40	26,5	60,5	51,0
9:50	26,0	65,0	52,5
10:00	27,0	68,5	54,0
10:10	27,5	72,5	58,5
10:20	28,0	74,0	58,5
10:30	30,0	78,0	59,5
10:40	27,5	79,0	60,5
10:50	29,0	80,5	61,5
11:00	30,5	80,5	62,0
11:10	27,0	79,0	61,0
11:20	28,0	75,0	59,0
11:30	30,0	80,5	60,0
11:40	28,0	82,0	61,5
11:50	31,0	85,5	64,5
12:00	30,0	85,5	69,0
12:10	27,0	78,0	59,0
12:20	30,0	74,0	58,5
12:30	30,0	72,5	59,0
12:40	29,5	76,0	59,0
12:50	32,0	74,5	62,0
13:00	31,0	69,0	63,0
13:10	31,0	68,0	58,0
13:20	30,0	78,0	60,5
13:30	31,0	85,0	61,5
13:40	30,0	85,0	62,0
13:50	29,0	83,0	60,5
14:00	31,0	84,5	62,0
14:10	31,5	81,5	59,0
14:20	32,0	87,0	62,0
14:30	30,0	87,0	61,5
14:40	32,0	85,0	61,0
14:50	31,5	84,5	61,0
15:00	30,5	79,0	59,0

APÊNDICE III

Data do Experimento: 12/12/2008

Tipo de ensaio: Aquecimento de água.

Tabela III.1 – Aquecimento de água.
Experimento do dia 12/12/2008.

Dados :

Massa inicial de água = 3,0 kg

Massa final de água = 2,940 kg

$$\bar{H}_i = 833,7 \text{ W.m}^{-2}$$

$$\bar{V}_{\text{vento}} = 3,1 \text{ m.s}^{-1}$$

Cálculo das Temperaturas médias

Temperatura ambiente:

$$\bar{T}_a = \frac{\sum_{i=1}^n T_a^j}{n} = 29,5 \text{ }^\circ\text{C}$$

Temperatura parede interna do forno

$$\bar{T}_{pi} = \frac{\sum_{i=1}^n T_{pi}^j}{n} = 75,2 \text{ }^\circ\text{C}$$

Temperatura da Água

$$T_{\acute{A}g} = \frac{\sum_{i=1}^n T_{\acute{A}g}^j}{n} = 60,5 \text{ }^\circ\text{C}$$

Horário	T _a [°C]	T _{pi} [°C]	T _{água} [°C]
9:00	26,5	41,5	28,5
9:10	26,0	44,5	37,5
9:20	27,0	49,5	42,5
9:30	26,5	55,0	46,5
9:40	27,0	60,5	51,0
9:50	26,5	65,0	52,5
10:00	27,0	68,5	55,0
10:10	27,5	72,5	58,5
10:20	28,0	74,0	58,5
10:30	30,0	78,0	59,5
10:40	28,5	79,0	60,5
10:50	29,0	80,5	61,5
11:00	30,5	80,5	66,0
11:10	29,5	79,0	61,0
11:20	28,0	77,0	59,0
11:30	30,0	80,5	64,0
11:40	28,0	83,0	68,5
11:50	31,0	85,5	69,5
12:00	30,0	85,5	69,5
12:10	28,5	79,0	67,0
12:20	30,0	78,0	65,5
12:30	30,0	76,5	63,0
12:40	29,5	76,0	62,0
12:50	32,0	75,5	62,0
13:00	31,5	69,0	61,5
13:10	31,0	70,5	59,0
13:20	30,0	78,0	61,5
13:30	31,0	85,0	61,5
13:40	30,0	85,0	68,0
13:50	29,5	83,0	69,5
14:00	31,0	84,5	69,0
14:10	31,5	81,5	66,5
14:20	32,0	87,0	67,0
14:30	31,5	87,0	69,5
14:40	32,0	85,0	68,0
14:50	31,5	84,5	67,0
15:00	30,5	79,0	63,0

Referências

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Atlas de Energia Elétrica do Brasil: 2.^a Ed. Brasília: 2005.

Disponível em:

[http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/03- Energia_Solar\(3\).pdf](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/03- Energia_Solar(3).pdf)

Acesso em: 08 out. 2008.

BEYER, H. G., PEREIRA, E. B., MARTINS, F. R., ABREU, S. L., COLLE, S.,

CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE SALVO BRITO (CRESESB/CEPEL). Brasília: 2003. [Homepage Institucional]. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/tutorial/solar/apstenergiasolar.htm>. Energia Solar Princípios e aplicações, pg. 7, Acesso em: 25 out. 2008.

CLARK, J., 1996. Solar powered/multiple fuel cooking device. Solar Energy 57 (3).

DUFFIE, J.A.; BECKMAN, W.A. Solar engineering of thermal processes. 2 Ed. New York: John Wiley & Sons, 1991.

GREEN, M. A. et al. Solar cell efficiency tables: version 16. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, Sydney, v. 8, p. 377-384, 2000.

<http://www.solarcooking.org/portugues/sbcdes-pt.htm>. Princípios dos Fogões Solares de Caixa, pg. 2, acesso em: 21 out. 2008.

<http://www.apolo11.com/latlon.php?uf=es&cityid=830>

MOURA, Johnson Pontes de. Construção e Testes de Fogões Solares para as Comunidades Carentes do Rio Grande do Norte - Brasil.

HORTA, Pedro. Guia da Energia Solar, Cap. 7, 2004, disponível em: <http://www.concursosolarhimalaia.com.pt.htm>. Acesso em: 10 out. 2008

MORAN, Michael J.; SHAPIRO, Howard N. Princípios de Termodinâmica para Engenharia, 4ª Ed. Livros Técnicos e Científicos, Rio de Janeiro. (2002)

MARTINS, E. Panorama de um país ensolarado. Ciência Hoje, 09 jan. 2003. Exemplar do assinante.

MULLICK, S.C., KANDPAL, T.C. AND SAXENA A. K (1987) Thermal test procedure for box-type solar cooker. Solar Energy 39(4), 353.

OLIVEIRA FILHO, K.S.; SARAIVA, M.F.O. O Sol: a nossa estrela. Porto Alegre: Departamento de Astronomia do Instituto de Física da UFRGS, 2005. Disponível em: <http://astro.if.ufrgs.br/esol/esol.htm>. Acesso em: 11 out. 2008.

RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE PESQUISA. “Desenvolvimento e adaptação de fogões solares aplicados à comunidade da Revoada no Bairro Luiz Alves (São Cristóvão-SE)”. Disponível em:

<<http://www.fapitec.se.gov.br/modules/wfdownloads/visit.php?cid=11&lid=248>

SHAPIRO, A., The Dynamics and Thermodynamics of Compressible Fluid Flow. Ronald Press, N Y, 1954.

TEIXEIRA, Olívio Alberto, PASSOS, L. A., ARAÚJO, Paulo Mário, SILVA, L. ”Utilização do Fogão Solar Tipo Caixa Para Secagem de Alimentos em Comunidades de Baixa-Renda”, In: *Anais do I Congresso Brasileiro de Energia Solar*. Fortaleza: Editora da UFCE, 2007.

TIBA,C. et al. Atlas solarimétrico do Brasil: banco de dados terrestres. Recife: Editora Universitária da UFPE, 2000.

www.abrava.com.br

Licença do Creative Commons

```

<a rel="license"
  href="http://creativecommons.org/licenses/by/2.5/br/"></a><br
  /><span xmlns:dc="http://purl.org/dc/elements/1.1/"
    href="http://purl.org/dc/dcmitype/Text" property="dc:title"
    rel="dc:type">CONSTRU&#199;&#195;0 E TESTE DE FORNO SOLAR</span> is
    licensed under a <a rel="license"
  href="http://creativecommons.org/licenses/by/2.5/br/">Creative Commons
    Atribui&#231;&#227;o 2.5 Brasil License</a>.

```