



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA AMBIENTAL
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA

A UTILIZAÇÃO DE FORNOS SOLARES DO TIPO CAIXA PARA O AQUECIMENTO DE
ALIMENTOS

ALEX NEVES DE REZENDE

BELO HORIZONTE

2015

ALEX NEVES DE REZENDE

A UTILIZAÇÃO DE FORNOS SOLARES DO TIPO CAIXA PARA O AQUECIMENTO DE
ALIMENTOS

Trabalho de conclusão de curso
apresentado ao Centro Federal de
Educação Tecnológica de Minas Gerais
como requisito parcial para obtenção do
título de Engenheiro Ambiental e
Sanitarista.

Orientador: Prof. Dr. Ronaldo Marchezini

BELO HORIZONTE

2015

Rezende, Alex Neves de.

A utilização de fornos solares do tipo caixa para o aquecimento de alimentos/ Alex Neves de Rezende. – 2015.

54 f.: il.

Orientador: Ronaldo Marchezini

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, 2015.

1. Energia Solar. 2. Forno Solar. 3. Forno Solar. 4. Aquecimento de alimentos. I. Marchezini, Ronaldo. II. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. III Título.



Serviço Público Federal – Ministério da Educação
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais
**CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ENGENHARIA
AMBIENTAL E SANITÁRIA**

**ATA DE DEFESA FINAL
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO II**

Ao 01 dia do mês de Julho de 2015, no *campus* I do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, reuniram-se os professores **Andréa Rodrigues Marques Guimarães, Evandro Carrusca de Oliveria e Ronaldo Marchezini**, para participarem da banca de avaliação do Trabalho de Conclusão de Curso intitulado **“Utilização de fornos solares do tipo caixa para o aquecimento de alimentos”** de autoria do(a) aluno(a) **Alex Neves de Rezende**, do curso de Engenharia de Materiais. Uma vez avaliado, o trabalho foi declarado:

- Aprovado.
 Reprovado.

Belo Horizonte, 01 de Julho de 2015.

Banca Examinadora:

Prof. Orientador Ronaldo Marchezini

Prof. Andréa Rodrigues Marques Guimarães

Prof. Evandro Carrusca de Oliveria

REZENDE, Alex Neves de. *A utilização de fornos solares do tipo caixa para o aquecimento de alimentos*. 2015. 54 f. TCC (Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária) - Departamento de Ciência e Tecnologia Ambiental, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

Aos meus pais para quem dedico toda a minha vida.

AGRADECIMENTOS

A Deus pela vida, pela seriedade, pela dedicação aos estudos que sempre me proporcionou.

A professora Andréa Guimarães por acreditar em meu potencial.

Ao meu Orientador, Prof. Dr. Ronaldo Marchezini pelos bons momentos de estudo, e por ter contribuído para minha formação profissional e pessoal.

Aos meus pais e família pelo apoio incondicional em todos os momentos.

A todos os colegas de classe que, durante esses cinco anos, me apoiaram e direta ou indiretamente contribuíram para a elaboração deste trabalho.

“Se nós destruirmos a criação, a criação nos destruirá”.

Papa Francisco I

RESUMO

REZENDE, Alex Neves de. *A utilização de fornos solares do tipo caixa para o aquecimento de alimentos*. 2015. 54 f. TCC (Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária) –Departamento de Ciência e Tecnologia Ambiental, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

Apresenta-se nesse trabalho um estudo sobre a construção e utilização de um modelo de forno solar cuja construção baseou-se nos princípios da concentração térmica e efeito estufa e na utilização de matérias de baixo custo. Os grandes impactos causados pela utilização de fontes energéticas convencionais, tais como a hidrelétrica, a queima de combustível fóssil e queima de carvão justificam estudos para a utilização de fontes renováveis como a energia solar, como o forno solar. Além disto, existem muitos locais que ainda não possuem acesso ao fornecimento de energia elétrica e que possuem alto potencial solar, bem como construções civis que não fornecem infraestrutura para os trabalhadores aquecerem suas marmitas. Procurou-se avaliar a capacidade que fornos solares têm de aquecer alimentos acondicionados em marmitas. Como parâmetros foram adotados a facilidade de transporte, o baixo custo de produção além de ser eficiente no aquecimento dos alimentos a uma temperatura no intervalo de 60°C a 70°C. O presente trabalho foi estruturado em três etapas: revisão bibliográfica para levantamento das teorias da construção do forno solar e de outros trabalhos relativos à construção e utilização de fornos solares; construção de três protótipos em diferentes escalas com a escolha do mais eficiente mediante análises dos dados coletados; construção do forno solar, tendo como referência o protótipo de maior eficiência, para a realização de testes de aquecimento de água e de alimentos acondicionados em marmitas. A pesquisa foi realizada na cidade de Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil, no período entre Dezembro de 2012 a Junho de 2015. O forno solar apresentou resultados favoráveis para o atendimento das regiões carentes e obras civis no que se refere aos parâmetros de temperatura, custo e ergonomia.

Palavras chaves: Forno Solar. Radiação Solar. Aquecimento de Alimentos. Energia térmica.

ABSTRACT

Rezende, Alex Neves. *The use of box-type solar ovens for heating of food*. 2015. 54p. TCC (Degree in Environmental and Sanitary Engineering) - Department of Environmental Science and Technology, Federal Center of Technological Education of Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

This work presents a study on the construction and use of a solar furnace whose construction model was based on the principles of concentration and greenhouse effect and the use of low cost materials. Large impacts caused by the use of conventional energy sources such as hydropower, the burning of fossil fuel and coal burning, justify studies for the use of renewable sources such as solar energy. In addition, there are many places that do not yet have access to supply electricity and that have high solar potential, and civil works that do not provide infrastructure for the workers heat their lunchboxes. We sought to assess the ability of solar ovens in to heat food packed in lunchbox. As parameters were adopted ease of transport, low production cost, besides being efficient to heating of the food to a temperature in the range 60oC to 70oC. This study was divided into three steps: literature review to survey theories of building the solar oven and other work on the construction and use of solar ovens; construction of three prototypes in different scales, with the choice of the most efficient by analysis of collected data; construction of solar oven, with reference to the prototype of the higher efficiency, for performing water heating and food testing packaged in lunchboxes. The survey was conducted in the city of Belo Horizonte, Minas Gerais, Brazil, in the period from December 2012 to June 2015. The solar oven showed favorable results for attendance of needy regions and civil works with respect to temperature parameters, cost and ergonomics.

Key words: Solar Oven. Solar Radiation. Food warming. Thermal energy.

ÍNDICE DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|--|----|
| Figura 4.1 Radiação solar global diária - média anual típica (Wh/m ² .dia) - Fonte: Página da Aneel na Web:..... | 21 |
| Figura 4.2 Forno solar tipo olla<solarcooking.org> | 25 |
| Figura 4.3 Forno solar tipo painel –..... | 25 |
| Figura 4.4 Forno solar do tipo parabólico. Fonte: Página da Web: < http://permasolaris.pt/data/0/uploads/galleryitem54.jpg > | 26 |
| Figura 4.5 Forno solar tipo caixa – Fonte: Página da Web: | 26 |
| | |
| Figura 5. 1 Esquema de construção da parede do protótipo..... | 31 |
| Figura 5. 2 Construção parcial das paredes do protótipo..... | 31 |
| Figura 5. 3 Protótipo um construído | 32 |
| Figura 5. 4 Protótipo dois construído..... | 33 |
| Figura 5. 5 Protótipo três construído. | 33 |
| Figura 5. 6 Forno solar utilizado para o aquecimento de alimento. | 35 |
| Figura 5. 7 Marmitas utilizadas para acondicionar o alimento..... | 35 |
| Figura 5. 8 Introdução do termômetro de álcool no interior da marmita. | 36 |
| Figura 5. 9 Estação meteorológica Weather Hawk 232 utilizada no estudo..... | 37 |
| | |
| Figura 6. 1 Gráfico comparativo entre as temperaturas dos três protótipos no intervalo proposto | 38 |
| Figura 6. 2 Aquecimento de 3,6 L de água | 41 |
| Figura 6. 3 Comportamento da água no forno e na marmita durante o aquecimento atingindo a temperatura mínima ideal durante o teste em 25/05/15 em Belo Horizonte. | 41 |
| Figura 6. 4 Marmitas contendo macarrão e arroz..... | 43 |
| Figura 6. 5 Temperatura (°C) do forno e alimento no primeiro dia de teste atingindo o mínimo estabelecido para analisar a eficiência do forno solar | 44 |
| Figura 6. 6 Temperatura (°C) do forno e alimento no segundo dia de teste atingindo o mínimo estabelecido para analisar a eficiência do forno solar. | 46 |

ÍNDICE DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 6. 1 Teste das temperaturas dos protótipos de forno solar realizado em..... | 38 |
| Tabela 6. 2 Informações (10h00min) do ambiente interno e externo ao forno solar | 40 |
| Tabela 6. 3 Resultados do teste de aquecimento de 3,6 L de água nas marmitas no ... | 40 |
| Tabela 6.4 Calor específico de alguns | 42 |
| Tabela 6. 5 Condições iniciais para o primeiro teste com arroz e macarrão | 43 |
| Tabela 6. 6 Temperatura (°C) do forno e alimento no primeiro teste no dia 27/05/15 em Belo Horizonte..... | 44 |
| Tabela 6. 7 Condições iniciais para o segundo teste com arroz e macarrão | 45 |
| Tabela 6. 8 Temperatura (°C) do forno e alimento no segundo teste no dia 27/05/15 em Belo Horizonte..... | 45 |
| Tabela 6. 9 Análise econômica do forno solar..... | 47 |
| Tabela 6. 10 Tabela comparativa de análise da eficiência do forno solar em estudo em relação ao forno solar de melo (2008) e filho e Silva (2008) | 48 |

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

| | |
|--------------------|---------------------------------------|
| PVC | <i>Policloreto de Vinila</i> |
| kJ/m^2 | <i>Quilo-Joule por metro quadrado</i> |
| L | <i>Litro</i> |
| h | <i>Horas</i> |
| min | <i>Minutos</i> |
| GWh | <i>Giga-watt hora</i> |
| $^{\circ}\text{C}$ | <i>Grau Celsius</i> |
| R\$ | <i>Moeda brasileira – Real</i> |
| $^{\circ}$ | <i>Grau</i> |
| cm | <i>Centímetro</i> |
| H | <i>Fluxo de calor</i> |
| Q | <i>Quantidade de calor</i> |
| t | <i>Tempo</i> |
| K | <i>Condutividade do material</i> |
| A | <i>Área</i> |
| L | <i>Comprimento</i> |
| t_1 | <i>Temperatura corpo um</i> |
| t_2 | <i>Temperatura corpo dois</i> |
| kWh | <i>Quilo – Watt hora</i> |

SUMÁRIO

| | |
|---|----|
| 1. INTRODUÇÃO | 15 |
| 2. OBJETIVOS | 18 |
| 2.1. Geral | 18 |
| 2.2. Específicos..... | 18 |
| 3. METODOLOGIA DA PESQUISA..... | 19 |
| 4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 21 |
| 4.1. A energia solar e Calor | 21 |
| 4.1.1. Potencial solar | 22 |
| 4.1.2. Infravermelho (efeito estufa) aplicado ao forno solar..... | 22 |
| 4.1.3. Propagação da energia térmica (calor)..... | 22 |
| 4.1.4. Radiação de um corpo Negro..... | 23 |
| 4.2. Tipos de Fornos solares | 24 |
| 4.2.1. Forno solar: Estudos de caso | 27 |
| 4.2.1.1. Forno solar tipo caixa: Projeto, construção e análise de desempenho (MELO, 2008) | 27 |
| 4.2.1.2 Construção e teste de forno solar (FILHO; SILVA, 2008)..... | 28 |
| 4.3. Parâmetros de temperatura do alimento..... | 29 |
| 4.4. Calor Específico | 29 |
| 5. MATERIAIS E MÉTODOS | 30 |
| 5.1. Construção dos Protótipos | 30 |
| 5.2. Construção do forno solar para aquecimento do alimento..... | 34 |
| 5.2. Marmítas | 35 |
| 5.3 Estação meteorológica..... | 37 |
| 6. RESULTADOS E DISCUSSÕES | 38 |
| 6.1 Protótipos | 38 |
| 6.2. Forno Solar e o aquecimento das marmítas..... | 40 |
| 6.2.1 Aquecimento de água | 40 |
| 6.2.2 Aquecimento do alimento..... | 42 |
| 6.3. Eficiência Econômica | 47 |
| 6.4. Eficiência comparativa | 47 |
| 6.5. Logística do forno solar..... | 48 |
| 7. CONCLUSÕES | 49 |
| 8. SUGESTÕES | 51 |
| 9. REFERÊNCIAS | 52 |

1. INTRODUÇÃO

A grande exploração de recursos energéticos da natureza e os danos ambientais, tanto na extração quanto na utilização dessas fontes de energia, aponta para um cenário preocupante para o futuro do planeta. Isso faz com que a busca por fontes renováveis e não poluentes como eólica e solar ganhe espaço no meio científico e tecnológico, visando a atender as demandas da sociedade.

Nos últimos anos a utilização das fontes eólicas e solares cresceu e tende a crescer mais nas próximas décadas, pois são fontes que apresentam uma relação custo benefício favorável principalmente quando se leva em consideração aspectos sociais e ambientais. A demanda energética mundial baseia-se 80% na utilização de combustíveis fósseis (petróleo, gás natural, carvão mineral) que causam danos ambientais preocupantes, o que também motiva o uso de fontes alternativas não poluidoras (PEREIRA; COLLE, 1997). Como o Brasil é privilegiado quanto à incidência solar que ultrapassa a faixa de 2500 horas/ano de insolação (COMETTA, 2004) esta é uma fonte de energia a ser explorada.

O Brasil possui uma posição geográfica favorável em relação à iluminação do Sol. Como grande parte de seu território está entre os trópicos, a radiação solar incide intensamente o ano todo. Isso pode ser visto comparando o fluxo de algumas cidades brasileiras como: Porto Alegre com 1.922kJ/m^2 , Belo Horizonte com 1.678kJ/m^2 , Fortaleza com 2.039kJ/m^2 (METEONORM, 1999).

Este quadro tem favorecido a popularização do uso de equipamentos alimentados pela energia solar. Entre eles estão as células fotoelétricas, os aquecedores e fornos solares.

As células fotoelétricas se baseiam em estudos feitos por Hertz em 1887 sobre efeito fóton-emissivo e são bastante utilizadas em regiões carentes de instalações elétricas para iluminação através da transformação direta de energia solar em elétrica, denominado de efeito fotovoltaico e produção de energia elétrica para suprir parte da demanda energética de algumas indústrias ou comunidades (ROCHA FILHO, 2006; SALAMI; HILLEBRAND, 2006).

Os aquecedores solares, muito utilizados nas residências, são eficientes para a redução do consumo de energia elétrica utilizada no aquecimento de água. A placa do coletor pode ser produzida em diferentes materiais, entre eles o PVC e o polipropileno, capazes de absorverem a energia solar e transferir para a água na forma de calor (SIQUEIRA, 2009).

O forno solar também é alimentado pela energia solar. Nele a energia solar é transformada em energia térmica que fica concentrada dentro do forno, podendo ser utilizada para diferentes fins: desidratação de resíduos sólidos, aquecimento e cozimento de alimentos, aquecimento de água, etc. Segundo Ultanir (1994) a dificuldade obtenção dos combustíveis tradicionais para cozinhar, a não necessidade de conhecimentos técnicos específicos para a utilização do forno solar, o fácil acesso aos materiais necessários para a sua construção, a alta incidência de radiação solar no Brasil são fatores que favorecem a sua utilização.

Existem vários tipos de fornos solares, dentre eles os principais são: "olla", painel, parabólico e caixa. O Forno solar tipo caixa, objeto de análises deste trabalho, é de simples e fácil manuseio e não oferece riscos ao usuário. Além disso, pode ser construído com materiais recicláveis e de fácil acesso (SANTOS FILHO et al., 2008).

Um problema normalmente verificado na construção civil está relacionado com o aquecimento dos alimentos dos operários (marmitas). Nas construções situadas em locais mais distantes ou que não possuem a rede elétrica instalada, os operários têm que improvisar sistemas de aquecimento para seu alimento, como pequenos fogões a lenha. Isto pode gerar acidentes além de estragar o alimento devido a altas temperaturas obtidas pelas chamas. O forno solar tipo caixa pode configurar-se em uma boa alternativa, dada a sua segurança, facilidade de uso e de transporte, tendo a vantagem de não consumir outra forma de energia que não seja a solar.

Neste trabalho foram construídos três protótipos em escalas distintas com os mesmos materiais. A eficiência está relacionada com a capacidade que eles possuem de reter a energia térmica em seu interior. Isto demandou um estudo sobre as formas de propagação de energia térmica (calor). Assim a escolha dos materiais utilizados e a

forma de montagem basearam-se nos estudos da 1ª Lei da termodinâmica (HALLIDAY; RENISCK; WALKER, 1996) e sobre as diferentes formas de trocas de calor.

Acredita-se que o uso do forno solar tipo caixa pode ser viável para o aquecimento de refeições acondicionadas em marmitas de alumínio levando em consideração a busca por um forno ergométrico, de forma a possibilitar o transporte por uma ou duas pessoas, com tranqüilidade e segurança, um baixo custo de produção, que utilize uma fonte de energia limpa e renovável, a solar, substituindo o consumo de gás e/ou energia elétrica e que seja eficiente no aquecimento do alimento. Desta forma o forno pode ser usado por populações carentes e profissionais como operários em borás de construção civil.

2. OBJETIVOS

2.1. Geral

Avaliar a viabilidade da utilização dos fornos solares do tipo caixa para o aquecimento de refeições acondicionadas em marmitas.

2.2. Específicos

- 1- Obter informações teóricas sobre propagação de calor, relevantes para a construção dos protótipos de forno solar.
- 2- Construir os protótipos.
- 3- Analisar o protótipo de melhor eficiência.
- 4- Construir o forno solar final baseado no protótipo de melhor eficiência;
- 5- Avaliar a eficiência do forno solar para o aquecimento de três marmitas.

3. METODOLOGIA DA PESQUISA

O trabalho se divide em três etapas: Fundamentação teórica, construção e avaliação dos protótipos, construção e aplicação do forno solar.

Essa primeira etapa da pesquisa contou com o estudo teórico baseado em bibliografias que tratam da propagação de calor e da construção de fornos solares do tipo caixa para que a escolha dos materiais e a disposição dos mesmos fossem da melhor maneira possível, possibilitando a maior absorção de calor e a mínima emissão.

A segunda etapa consistiu em construir os três protótipos em diferentes escalas baseando nos estudos já realizados. No trabalho empírico, o teste de três protótipos visou identificar o de melhor eficiência. Esses protótipos foram expostos ao Sol em iguais condições ambientais. Os parâmetros adotados foram: temperatura máxima atingida, tempo para atingir essa temperatura e tempo de resfriamento.

A coleta dos três protótipos foi feita na área externa do Laboratório de Ciência, Tecnologia, Educação e Arte (LACTEA), localizado no Campus II do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG), na cidade de Belo Horizonte, MG, no período entre 2013 a 2014. As coletas de dados referentes às temperaturas dos protótipos foram feitas em um intervalo de 10 minutos entre cada medição até a estabilização da temperatura no período de 10h00min até 12h00min. Utilizou-se termômetros a álcool e cronômetro digital.

A terceira etapa, realizada no mesmo local da segunda etapa, teve início após a análise dos dados coletados e a confirmação do protótipo mais eficiente. Os resultados obtidos desta análise nortearam a construção do forno solar utilizado para testar o aquecimento do alimento condicionado em marmitas de alumínio.

As coletas de dados referentes às temperaturas do forno solar em estudo foram feitas entre os dias 25 a 27 de maio de 2015 no outono e em um intervalo de 10 minutos entre cada medição até a atingir o intervalo de temperatura adoto como referência no trabalho no período previsto entre 10h00min até 13h30min Foram avaliados: a temperatura atingida pelos alimentos, o tempo necessário para se atingir essa temperatura e o nível de desidratação.

Para medição das condições externas utilizadas como fatores que influenciam a eficiência do forno solar como a radiação solar, a temperatura do ar e a umidade relativa foi utilizada a estação meteorológica Weather hawk 232.

Há vários estudos sobre fornos solares tipo caixa em diversas partes do país. Neste trabalho foram analisados os trabalhos de Melo (2008) e Filho e Silva (2008) que se propuseram a criar fornos solares distintos e testá-los com objetivos semelhantes aos do presente trabalho.

4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

4.1. A energia solar e Calor

A radiação solar é um tipo de onda eletromagnética que é emitida pelo Sol e chega até a Terra. Essa radiação até chegar à superfície do planeta, onde é denominada de radiação global, sofre várias interferências causadas pela massa de ar presente na atmosfera, pelas condições climáticas e umidade relativa do ar. Depende também das coordenadas geográficas, altitude, entre outros fatores. A radiação solar tem alto poder energético, assim pode ser usada para a produção de energia elétrica, aquecer água, desinfecção da água etc. A radiação usada para todas essas finalidades é a global (PINHO, 2008).

Segundo Queiroz (2005) *apud* Melo (2008), os países tropicais estão em posições geográficas com alto potencial energético e, portanto, os equipamentos solares podem ser utilizados com muita eficiência. O Brasil, como mostra a figura 4.1, possui grande potencial solar, o equivalente a $1,13 \times 10^{10}$ GWh em quase todo o ano, como por exemplo no Nordeste.

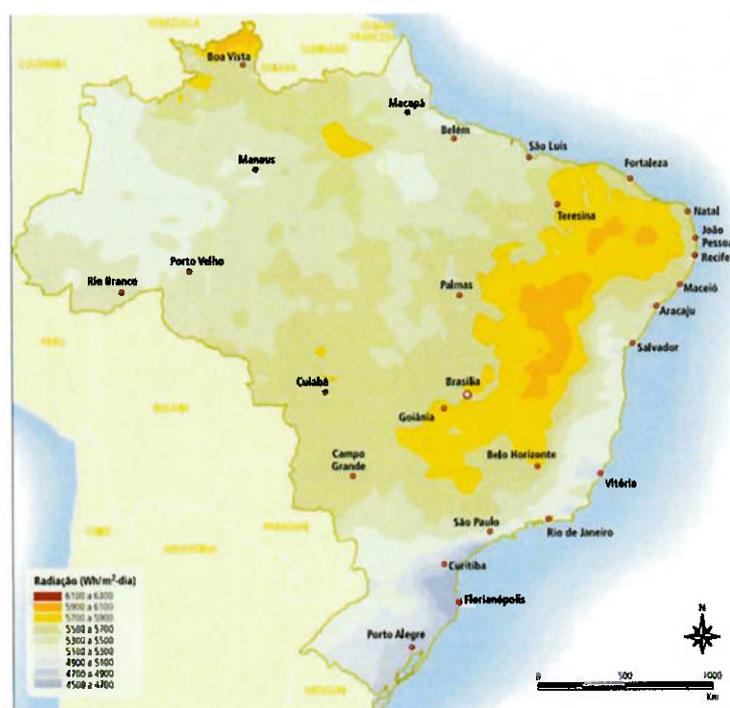


Figura 4.1 Radiação solar global diária - média anual típica (Wh/m².dia) - Fonte: Página da Aneel na Web: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/03-Energia_Solar%283%29.pdf>

4.1.1. Potencial solar

O Sol fornece uma grande quantidade de energia para o planeta, cerca de $1.5 * 10^{18}$ kWh. Isso corresponde a 10000 vezes o consumo mundial de energia (CEPEL, 2006). Esse potencial energético provindo do Sol é tão grande que Melvin Calvin – Prêmio Nobel de Química, afirmou que “A quantidade de energia solar que atinge a Terra em dez dias é equivalente a todas as reservas de combustível conhecidas.” (in COMETTA, 2004). Mas apenas uma pequena parte dessa energia é realmente aproveitada, a radiação global, cujo fluxo médio é de 1.367kJ/m^2 (METEONORM, 1999).

4.1.2. Infravermelho (efeito estufa) aplicado ao forno solar

O Sol emite radiações curtas (alta frequência) a uma vazão denominada constante solar, a qual é utilizada pelo forno. O vidro é um material transparente as essas radiações. Quando elas atravessam a tampa transparente de vidro é absorvida pelos componentes das paredes internas, pelo ar e os materiais presentes no interior do protótipo (SANTOS et al., 2014). Esses materiais emitem a energia absorvida em forma de radiações do tipo infravermelho. Ao contrário das de alta frequência emitidas pelo Sol, o infravermelho emitido pelos materiais internos não consegue ultrapassar a tampa de vidro, o que resulta em um processo de efeito estufa, gerando o aumento da temperatura interna (SANTOS et al., 2014).

4.1.3. Propagação da energia térmica (calor)

A eficiência dos protótipos está relacionada com a capacidade que eles possuem de reter a energia térmica em seu interior. Isto demandou um estudo sobre as formas de propagação de energia térmica (calor). Assim a escolha dos materiais utilizados e a forma de montagem basearam-se nos estudos da 1ª Lei da termodinâmica (HALLIDAY; RENISCK; WALKER, 1996) e sobre as diferentes formas de trocas de calor.

Halliday, Renisck e Walker apresentam da seguinte forma a transferência de calor por condução:

Se você deixar no fogo um objeto de metal que esteja segurando, sua mão começará a esquentar. A energia é transferida do fogo para a mão por **condução**, pelo objeto de metal. A amplitude da vibração de átomos e elétrons do metal no externo mais quente tem valores relativamente grandes, refletindo a elevada temperatura de seu ambiente. Essas amplitudes aumentadas de vibração são transmitidas ao longo do metal, de átomo para átomo, durante colisões entre átomos adjacentes. Dessa forma a região de temperatura em elevação se expande até a sua mão (1994, p.191).

Como definições de convecção, Halliday, Renisck e Walker (1994) apresentam:

Quando você olha para a chama de uma vela ou de um fósforo, está olhando para energia calorífica sendo transportada para cima por convecção. A transferência de calor por convecção ocorre quando um fluido, como ar ou água, está em contato com um objeto cuja temperatura é maior do que a sua. A temperatura do fluido em contato com o objeto mais quente aumenta e (na maioria das vezes) o fluido se expande (1994, p.193).

Por fim os autores apresentam o conceito de radiação:

A energia é transportada do Sol até nós por ondas eletromagnéticas que se propagam livremente através do vácuo quase perfeito do espaço. Se você ficar próximo a uma fogueira ou qualquer fonte de calor em campo aberto, se aquecerá pelo mesmo processo. Todos os objetos emitem tais radiações eletromagnéticas, simplesmente por que sua temperatura está acima do zero absoluto, e todos os objetos absorvem um pouco de radiação que chega até eles, emitida por outros objetos (1994, p.194).

4.1.4. Radiação de um corpo Negro

No intuito de estudar as características essenciais da radiação térmica, evitando-se as complicações relacionadas com a natureza específica do material utilizado nos protótipos, foi conveniente considerá-lo como um corpo negro o que implicou em estudos teóricos sobre esse tema.

O estudo do corpo negro é complexo e envolve condições, como a sua taxa de emissão de radiação demonstrada por meio de exemplos e experiências, que relacionam diretamente com o comportamento do protótipo. Portanto, a utilização do estudo do corpo negro se faz necessária para entender o comportamento de um material quanto sua capacidade de absorção máxima de radiação térmica para sua eficiência e seu potencial de radiação térmica e manter-se em uma temperatura estável durante certo período de tempo, sendo considerada como uma temperatura máxima.

Segundo estudos de Yamasoe (2006), define-se como corpo negro o meio ou substância que absorve toda a radiação incidente sobre ele, independentemente do comprimento de onda, direção de incidência ou estado de polarização. Nenhuma parte da radiação incidente é refletida ou transmitida.

O equilíbrio termodinâmico de um corpo acontece quando existe:

- ◆ Equilíbrio térmico: Não há gradientes de temperatura. A temperatura do corpo é constante e homogênea.
- ◆ Equilíbrio mecânico: Não há forças líquidas ou tensões, isto é, a pressão é constante em todas as partes do corpo.
- ◆ Equilíbrio radiativo: O campo de radiação dentro do corpo é constante, isto é, o fluxo de radiação que entra no corpo é igual ao que sai.
- ◆ Equilíbrio químico: As taxas de todas as reações químicas são balanceadas por suas reações inversas, tal que a composição química é a mesma em todo o corpo.

4.2. Tipos de Fornos solares

Existem vários tipos de fornos solares, dentre eles os principais são: “olla”, painel, parabólico e caixa:

O forno solar tipo “olla”, figura 4.2, não necessita de estrutura de apoio, como os fornos solares tipo caixa. Os alimentos são depositados em uma vasilha de cor preta envolvida por uma superfície transparente de plásticos ou tampas de vidro. A superfície transparente promove o “efeito estufa” (TEIXEIRA et al., 2007).



Figura 4.2 Forno solar tipo olla<solarcooking.org>

O forno solar tipo painel, figura 4.3, pode ser considerado uma variação do forno tipo olla, pois a vasilha fica localizada no centro do painel com superfície interna refletora. A reflexão acontece devido a utilização de papel alumínio ou espelhos (SANTOS FILHO et al., 2008).

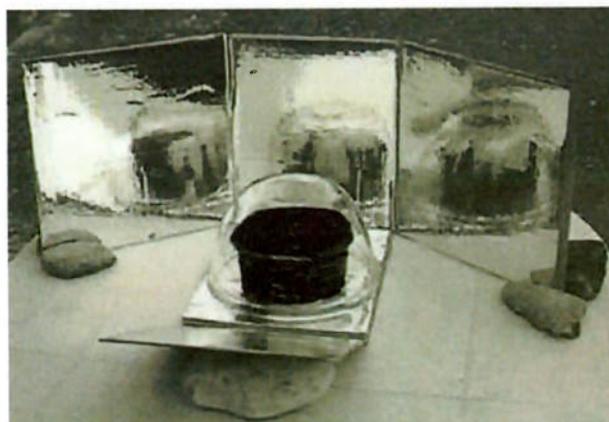


Figura 4.3 Forno solar tipo painel –
Fonte: Página da Web: <<http://solarcooking.org/images/spc.ht7.jpg>>

O forno solar tipo parabólico, figura 4.4, é constituído de parábolas ou semi-parábolas que têm como objetivo concentrar a radiação em um único ponto. A temperatura final pode alcançar valores entre 340 e 465 °C. Neles, o fenômeno do aquecimento se dá pela concentração de radiação solar e não por efeito estufa. São

utilizados em cooperativas, escolas e em cozinhas comunitárias. Por obter temperaturas finais elevadas, a construção e operação requerem mão de obra especializada em relação aos demais modelos (SANTOS FILHO et al., 2008).



Figura 4. 4 Forno solar do tipo parabólico. Fonte: Página da Web:
<<http://permasolaris.pt/data/0/uploads/galleryitem54.jpg>>

O Forno solar tipo caixa, figura 4.5 e figura4.6, é de simples e fácil manuseio e não oferece riscos ao usuário. Além disso, pode ser construído com materiais recicláveis e de fácil acesso (SANTOS FILHO et al., 2008).



Figura 4. 5 Forno solar tipo caixa – Fonte: Página da Web:
<<http://www.syntonia.com/terra/forno-solar/imagens/foto-forno-1.jpg>>

4.2.1.Forno solar: Estudos de caso

Os estudos de outras literaturas referentes aos fornos solares contribuem para analisar o desempenho do forno em estudo, para isso foram analisados dois trabalhos realizados em diferentes regiões do Brasil.

4.2.1.1. Forno solar tipo caixa: Projeto, construção e análise de desempenho (MELO, 2008)

Melo (2008) projetou um fogão/forno solar com o objetivo de estudar suas viabilidades: térmica, econômica, e de materiais, perante os problemas causados ao meio ambiente pelo desmatamento, queima de lenha gerando gases responsáveis pelo efeito estufa e também perante as precárias condições de vida em regiões do semi-árido brasileiro.

Nesse estudo foi construído um fogão/forno solar de baixo custo, tendo como estrutura uma sucata de fogão convencional a gás (figura 4.6). Foi feito o levantamento da temperatura da panela absorvedora e da temperatura interna do forno durante cinco dias de ensaio. Essas temperaturas foram obtidas entre 09h00min às 15h00min em intervalos de 15 em 15 minutos.



Figura 4.6 Forno solar confeccionado por Melo (2008).

Para a construção do fogão/forno solar, foram utilizados os seguintes materiais:

1. Compósito a base de gesso, EPS (poliestireno expandido), cimento, areia e água para criação de uma parábola na parte interna e inferior do forno para aumentar a temperatura de concentração na panela;
2. O mesmo material compósito foi utilizado nas paredes laterais, a parte traseira, a superfície inferior e a porta do fogão/forno para isolá-las termicamente, minimizando a perda de calor para o ambiente externo;
3. Espelhos para a criação da parábola refletora; e
4. Vidros para confeccionar a tampa. São transparentes para permitir a passagem da radiação solar;

4.2.1.2 Construção e teste de forno solar (FILHO; SILVA, 2008)

Filho e Silva (2008) Utilizaram materiais de baixo custo para a confecção do forno solar tipo caixa (figura 4.8). Ele foi aplicado para ser uma fonte alternativa e auxiliadora ao gás de cozinha e à eletricidade no preparo da alimentação doméstica.

Esses materiais foram classificados no trabalho de acordo com sua função:

- ◆ Estruturais: Componentes dimensionais do conjunto (madeira, plástico, cimento, papelão, etc.);
- ◆ Isolantes: Responsável pela minimização da perda de calor (lã de vidro, isopor, cortiça, etc.);
- ◆ Transparentes: Permissivos à entrada da radiação solar no interior do forno resultando no efeito estufa (vidro, plástico, acrílico, etc.);
- ◆ Refletores: Além de minimizar as perdas térmicas, concentram a energia solar no interior do forno (espelhos, folha de alumínio, metais, etc.).

A coleta de dados foi realizada nos períodos de 15 á 18 de Novembro e 10 á 15 de Dezembro de 2008 entre 09h00min e 13h00min h na cidade de Aracruz-ES e em intervalos de 10 em 10 minutos.



Figura 4.7 Forno solar tipo caixa confeccionado por Filho e Silva (2008).

4.3. Parâmetros de temperatura do alimento

Como parâmetro adotado no trabalho para se definir a temperatura ideal dos alimentos aquecidos no forno solar em estudo, utilizou-se o intervalo de temperatura de exposição dos alimentos em restaurantes, regulamentado pela Resolução nº 216, de 15 de setembro de 2004 e pela Portaria do Conselho de Vigilância Sanitária 6/99 que estabelecem valores entre 60 °C e 70 °C.

Segundo as legislações citadas, os restaurantes devem servir a refeição nesse intervalo de temperatura. Consideramos então que é entre 60°C e 70°C que os pratos quentes são consumidos pelas pessoas que se alimentam fora de casa.

4.4. Calor Específico

Uma característica física importante é o calor específico das substâncias utilizadas nos testes de aquecimento e eficiência do forno solar. Segundo Halliday (2006) a definição de calor específico se baseia na absorção de calor Q por um objeto em calorias (cal) é capaz de elevar 1°C a temperatura de cada grama (g) desse objeto.

Para matérias compostos, como os alimentos, a característica utilizada é a capacidade térmica, que é a quantidade calor necessária para se elevar a temperatura de uma determinada massa em 1 °C.

5. MATERIAIS E MÉTODOS

5.1. Construção dos Protótipos

A construção do protótipo visou minimizar a perda de calor, principalmente por meio da condução e convecção que é uma das características do corpo negro. A tampa é uma estrutura que permite a entrada da radiação na frequência do luminoso, mas também possibilita a sua troca com o meio externo através da emissão de radiação, funcionando como o orifício de um corpo negro.

Em um corpo negro o orifício é pequeno diferentemente do protótipo, o qual possui uma tampa mais ampla e, devido à presença do vidro duplo, dificulta a saída do infravermelho e obtém um no aumento da sua temperatura interna. Para que o protótipo se comporte um corpo negro, levamos em consideração o isolamento térmico, bem como a utilização do preto fosco em suas paredes internas e externas.

Os protótipos foram construídos utilizando-se MDF cru com suas estruturas laterais em forma de trapézio. No interior foi colocada uma camada de papel alumínio com a parte refletora voltada para dentro e uma camada de isopor. Sobre o isopor foram colocadas placas de zinco pintadas de preto.

O protótipo possui uma inclinação de 20° para se aproximar da latitude da cidade de Belo Horizonte. A tampa é composta de duas camadas de vidro para conter ar entre as mesmas evitando ainda mais a perda de calor.

A condução se dá pela propagação do calor devido à diferença de temperatura entre os corpos e segue a equação 1:

$$H = \frac{Q}{t} = kA \cdot \frac{t_1 - T_2}{L} \quad \text{Eq. 1}$$

O MDF, além de ser um material de baixo custo, possui baixo potencial de troca de calor com o meio através da condução e, quando pintado de preto, aumenta a absorção da radiação na parte externa da parede e proporciona uma redução na diferença entre ela e a parte interna, reduzindo a perda de calor do interior do protótipo por condução.

A figura 5.1 mostra como foram dispostos os materiais: papel alumínio, isopor e Chapa metálica preta na construção da parede interna dos protótipos.

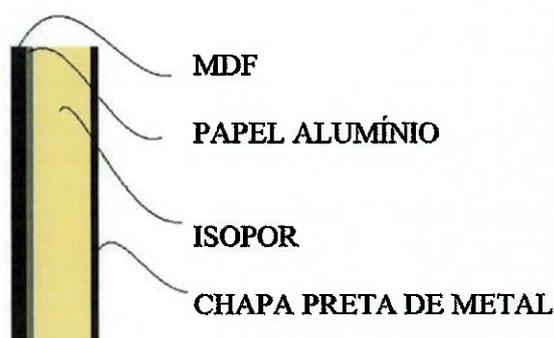


Figura 5. 1 Esquema de construção da parede do protótipo

A chapa de metal, por ter um baixo calor específico, aquece rapidamente. Para aumentar a eficiência da absorção do calor através da irradiação, utilizou-se tinta preta fosca para reduzir reflexão das ondas de luz branca e infravermelha que incidem no interior do forno.

O isopor serve de isolante térmico, retendo a energia térmica interna evitando que, por meio da condução, o calor se propague para o meio externo. Porém ele não possui uma eficiência a ponto de impedir que parte dessa energia térmica se transfira para o exterior por radiação. O papel alumínio tem a função de refletir esse calor novamente para o interior do forno solar.

A construção pode ser vista conforme mostra a figura 5. 2 abaixo:



Figura 5. 2 Construção parcial das paredes do protótipo.

A seguir são descritas as características dos três protótipos construídos:

1. O protótipo um (figura 5.3) é o de menor escala projetado seguindo as seguintes dimensões de construção:

- ◆ Paredes laterais trapezoidais: 16 x 06 x 24 (cm) (Base maior x base menor x comprimento);
- ◆ Parede do fundo: 16 x 24 (cm);
- ◆ Parede frontal: 06 x 24 (cm);
- ◆ Chão (base das paredes): 27 x 24 (cm);
- ◆ Área do vidro da tampa: $20 \times 24,5 = 490 \text{ cm}^2$;
- ◆ Ângulo de inclinação: 20° .



Figura 5. 3 Protótipo um construído

2. No protótipo dois (figura 5.4) o comprimento da lateral do forno um foi dobrado, adotando as seguintes medidas:

- ◆ Paredes laterais trapezoidais: 24 x 06 x 52 (cm)(Base maior x base menor x comprimento);
- ◆ Parede do fundo: 24 x 24 (cm);
- ◆ Parede frontal: 06 x 24 (cm);
- ◆ Chão (base das paredes): 54 x 24 (cm);
- ◆ Área do vidro da tampa: $17 \times 49 = 833 \text{ cm}^2$;
- ◆ Ângulo de inclinação: 20° .



Figura 5. 4 Protótipo dois construído.

3. Por fim, o terceiro protótipo (figura 5.5) foi construído dobrando a largura do forno um, e foram encontradas as seguintes medidas:

- ◆ Paredes laterais trapezoidais: $16 \times 06 \times 24$ (cm)(Base maior x base menor x comprimento);
- ◆ Parede do fundo: 16×48 (cm);
- ◆ Parede frontal: 06×48 (cm);
- ◆ Chão (base das paredes): 27×48 (cm);
- ◆ Área do vidro da tampa: $22 \times 40 = 880$ cm²;
- ◆ Ângulo de inclinação: 20°.



Figura 5. 5 Protótipo três construído.

5.2. Construção do forno solar para aquecimento do alimento

A partir da análise dos resultados dos três protótipos e da identificação do mais eficiente, foi dado início à construção, a partir de janeiro de 2015, do forno solar utilizado no aquecimento do alimento.

As etapas de sua construção estão listadas a seguir:

1. Dimensionamento do Forno em escala ampliada do protótipo de maior eficiência;
2. Compra da chapa de MDF para construção da estrutura externa e posterior montagem;
3. Instalação das camadas de isolamento térmico: papel alumínio, cortiça, chapa metálica, respectivamente.
4. Instalação de borrachas no topo das paredes para vedação após o fechamento da tampa;
5. Compra de dois vidros para construção da tampa;
6. Vedação de espaços indesejáveis por meio de silicone preto;
7. Pintura interna e externa do forno com tinta spray preto fosco.

A partir dessas etapas o forno solar (figura 5.6) obteve as seguintes dimensões:

- ◆ Paredes laterais trapezoidais: 24 x 12 x 37 (cm)(Base maior x base menor x comprimento);
- ◆ Parede do fundo: 24 x 60 (cm);
- ◆ Parede frontal: 12 x 60 (cm);
- ◆ Chão (base das paredes): 37 x 60 (cm);
- ◆ Área do vidro da tampa: $28 \times 48 = 1344 \text{ cm}^2$;
- ◆ Ângulo de inclinação: 20° .



Figura 5. 6 Forno solar utilizado para o aquecimento de alimento.

5.2. Marmitas

Para alocação do alimento foram adquiridas três marmitas de alumínio iguais (figura 5.7), com diâmetro igual a 18 cm e capacidade volumétrica equivalente a 1,3 L. Todas elas foram pintadas externamente com spray preto fosco para evitar a reflexão dos raios que chegam ao interior do forno e nelas incidem proporcionando maior eficiência na absorção da radiação infravermelha.



Figura 5. 7 Marmitas utilizadas para acondicionar o alimento.

Para obter a temperatura do alimento, é necessária introdução de um termômetro no interior da marmita. Para que isso ocorresse, adaptou-se a tampa de uma das marmitas (figura 5.8) da seguinte forma:

1. Foi feito um orifício a 04 cm do centro da tampa, suficiente para inserir o termômetro;
2. Tal orifício foi envolto de uma borracha para evitar perdas de calor e a perda de água por evaporação.



Figura 5. 8 Introdução do termômetro de álcool no interior da marmita.

5.3 Estação meteorológica

Os dados das condições climáticas externa foram coletados pela estação Weather Hawk 232 (figura 5.9). Ela é capaz de coletar várias informações climáticas e dentre elas as principais informações para o trabalho são a umidade relativa do ar, radiação solar e temperatura do ar.



Figura 5. 9 Estação meteorológica Weather Hawk 232 utilizada no estudo

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 Protótipos

Após os testes de eficiência dos três protótipos construídos em diferentes escalas, foram obtidos os seguintes dados de temperatura em função do tempo de exposição ao Sol, apresentados na tabela 6.1 a seguir:

Tabela 6. 1 Teste das temperaturas dos protótipos de forno solar realizado em Belo Horizonte – MG no dia 31/07/14

| TEMPO (minutos) | TEMPERATURA (°C) | | |
|--------------------|------------------|-------------------|-------------------|
| | Protótipo um | Protótipo dois | Protótipo três |
| 10:10 | 47 | 49 | 53 |
| 10:20 | 63 | 65 | 75 |
| 10:30 | 74 | 75 | 87 |
| 10:40 | 80 | 80 | 94 |
| 10:50 | 84 | 85 | 99 |
| 11:00 | 87 | 90 | 103 |
| 11:10 | 89 | 92 | 105 |
| 11:20 | 90 | 93 | 106 |
| 11:30 | 91 | 94 | 107 |
| 11:40 | 92 | 95 | 109 |
| 11:50 | 92 | 96 | 110 |
| 12:00 | 92 | 97 | 111 |

Na figura 6.1, pode-se observar um gráfico comparativo das temperaturas dos três protótipos em cada intervalo de tempo coletado.

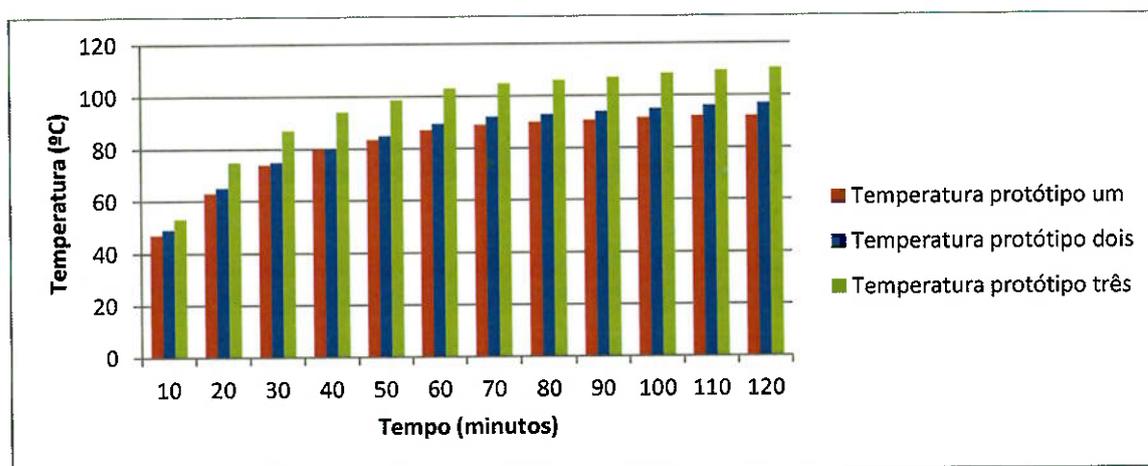


Figura 6. 1 Gráfico comparativo entre as temperaturas dos três protótipos no intervalo proposto

O protótipo um, por ter uma estrutura reduzida, apresentou ineficácia quanto à absorção (atingindo temperaturas pouco elevadas). Um dos principais fatores para esse comportamento foi a reduzida área do vidro que gerou menor incidência de radiação em seu interior.

O protótipo dois (protótipo comprido) atingiu uma temperatura final mais elevada que o um, mas a variação da temperatura no tempo foi pequena, ou seja, a temperatura elevou-se lentamente. Isto aconteceu devido às sombras formadas em seu interior, originadas de suas próprias paredes laterais.

O protótipo três se comportou como a melhor estrutura para o forno solar de grande escala, pois sua área de exposição à radiação solar foi maior e suas paredes laterais produziram menos sombra em seu interior o que fez com que atingisse uma temperatura final mais elevada e em menor intervalo de tempo.

As variações da temperatura seguiram padrões semelhantes para todos os protótipos. Notou-se um rápido aquecimento nos primeiros minutos e, posteriormente, uma estabilização da temperatura, quando as quantidades de energia absorvidas e emitidas se igualaram. No período inicial a taxa de absorção da radiação que atravessa o vidro e incide nos materiais que as compõe foi elevada e a taxa de emissão foi pequena uma vez que a temperatura interna de cada protótipo foi baixa. À medida que a temperatura interna aumentou, a taxa de emissão aumentou, reduzindo a diferença entre a absorção e a emissão. Teoricamente quando essas taxas se igualam, a temperatura dos protótipos se estabiliza.

Em relação à estrutura, observou-se que o isopor não é um bom material para se utilizar como isolante térmico em um forno solar devido ao seu ressecamento pelo aumento da temperatura, o que resulta no surgimento de espaços vazios na estrutura, além de ocupar uma grande área, a qual pode ser explorada por chapas de metais para maior absorção de calor.

O isopor foi substituído por cortiça uma vez que essa não resseca com o aumento da temperatura além de ocupar menor espaço na estrutura interna do forno.

6.2. Forno Solar e o aquecimento das marmitas.

6.2.1 Aquecimento de água

A tabela 6.2 apresenta as condições climáticas do ambiente externo como temperatura, umidade relativa do ar e radiação solar no início do teste, além das temperaturas iniciais da água na marmita e interna do forno solar.

Tabela 6. 2 Informações (10h00min) do ambiente interno e externo ao forno solar para o teste com água nas marmitas do dia 25/05/15 em Belo Horizonte

| | |
|------------------------------------|----------------------|
| TEMPERATURA AMBIENTE INICIAL | 23°C |
| TEMPERATURA INTERNA DO FORNO SOLAR | 40°C |
| TEMPERATURA DA ÁGUA | 20°C |
| UMIDADE RELATIVA DO AR | 60% |
| RADIAÇÃO SOLAR INICIAL | 594 W/m ² |

Os resultados obtidos no primeiro dia de teste estão apresentados na tabela 6.3 a seguir. A figura 6.2 retrata a situação em um dos momentos de verificação dessas temperaturas das três marmitas contendo água.

Tabela 6. 3 Resultados do teste de aquecimento de 3,6 L de água nas marmitas no dia 25/05/15 em Belo Horizonte.

| TEMPO | T Forno °C | T Água °C | TEMPO | T Forno °C | T Água °C |
|-------|------------|-----------|-------|------------|-----------|
| 10:00 | 40 | 20 | 11:50 | 46 | 46 |
| 10:10 | 37 | 23 | 12:00 | 48 | 48 |
| 10:20 | 37 | 27 | 12:10 | 49 | 50 |
| 10:30 | 38 | 30 | 12:20 | 50 | 51 |
| 10:40 | 39 | 33 | 12:30 | 51 | 53 |
| 10:50 | 39 | 35 | 12:40 | 52 | 55 |
| 11:00 | 41 | 37 | 12:50 | 53 | 56 |
| 11:10 | 41 | 38 | 13:00 | 54 | 57 |
| 11:20 | 42 | 40 | 13:10 | 55 | 58 |
| 11:30 | 44 | 42 | 13:20 | 56 | 59 |
| 11:40 | 45 | 44 | 13:30 | 57 | 60 |



Figura 6. 2 Aquecimento de 3,6 L de água

A figura 6.3 mostra o comportamento da água no forno e na marmitta durante o aquecimento, além de apresentar a temperatura mínima ideal para o alimento de 60°C e de acordo com a Resolução nº 216, de 15 de setembro de 2004, mencionada no item 4.3:

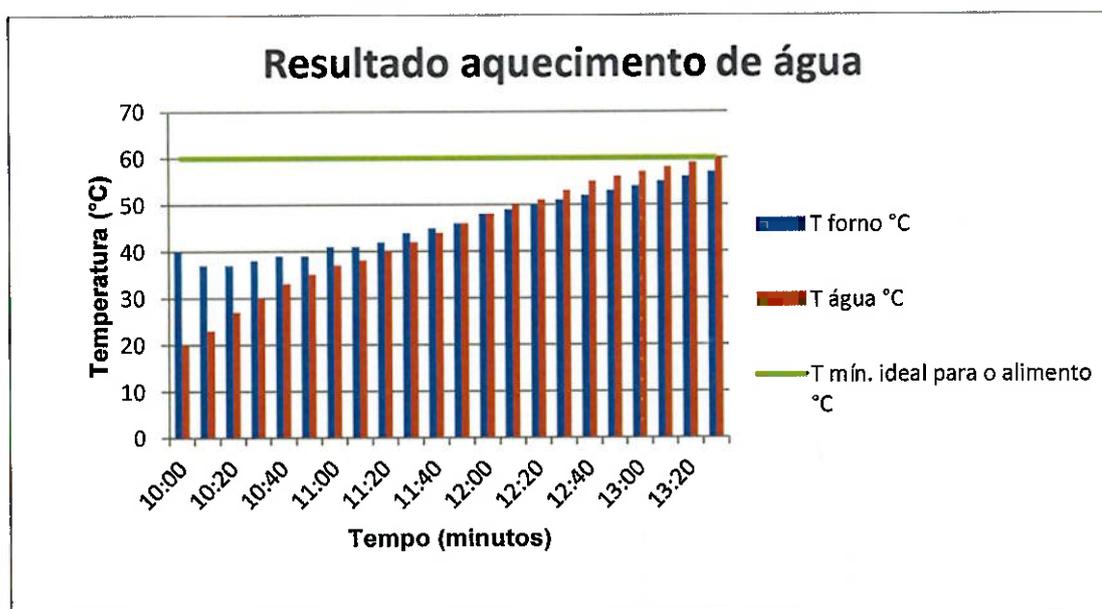


Figura 6. 3 Comportamento da água no forno e na marmitta durante o aquecimento atingindo a temperatura mínima ideal durante o teste em 25/05/15 em Belo Horizonte.

Melo (2008) também aqueceu água como teste inicial para provar a eficiência do forno. Como ela possui um alto calor específico os resultados obtidos apontaram para uma boa eficiência para se aquecer diversos outros tipos de materiais que compõe os alimentos que, em grande maioria, possuem calor específico igual ou inferior ao seu.

Na tabela 6.4 a seguir estão listadas algumas substâncias e seus respectivos calores específicos, segundo Ribeiro et al. (2002).

Tabela 6.4 Calor específico de alguns alimentos (Ribeiro et al., 2002)

| Frutas <i>In natura</i> | c (Cal/g°C) |
|------------------------------------|--------------------|
| Mangaba | 0,9275 |
| Acerola | 0,8837 |
| Uva (tipo Itália) | 0,8868 |
| Caju (Fruto) | 0,8807 |
| Seriguela | 0,7707 |
| Umbu | 0,9861 |
| Manga (espada) | 0,8232 |
| Banana (prata) | 0,7081 |
| Água | 1,0 |

A partir da análise da tabela observa-se que a água possui um calor específico mais alto em relação aos demais. Pode-se dizer que todos os alimentos possuem essa característica física inferior a 1,0 Cal/g°C. Portanto, como foi possível aquecer a água até entre 60°C se valida a hipótese de que os alimentos submetidos às mesmas condições de aquecimento atingiriam temperaturas que atendem a legislação.

6.2.2 Aquecimento do alimento

Para simular a marmita de operários nas construções civis foram utilizados macarrão e arroz como refeição. Cada marmita possuía uma tara de 192 g e foram colocados em seu interior 710 g de alimento, totalizando uma massa de 2130 g a ser aquecida (figura 6.4). O alimento foi retirado da geladeira e ficou em local não refrigerado até o horário do aquecimento para o almoço, como é a realidade da maioria dos operários de construção civil.

Foram dois dias de testes para analisar se o forno solar é eficiente para o aquecimento de marmitas. No primeiro dia as condições climáticas do ambiente externo como temperatura, umidade relativa do ar e radiação solar no início do teste, além das

temperaturas iniciais do alimento na marmita e interna do forno estão apresentadas na tabela 6.5 a seguir:

Tabela 6. 5 Condições iniciais para o primeiro teste com arroz e macarrão

| | |
|------------------------------------|----------------------|
| TEMPERATURA AMBIENTE INICIAL | 25,16°C |
| TEMPERATURA INTERNA DO FORNO SOLAR | 49°C |
| TEMPERATURA DO ALIMENTO | 16°C |
| UMIDADE RELATIVA DO AR | 57% |
| RADIAÇÃO SOLAR INICIAL | 600 W/m ² |



Figura 6. 4 Marmitas contendo macarrão e arroz

Levando em consideração que este operário retira o alimento da geladeira por volta de 06h30min e acondiciona em locais da obra sem refrigeração, o alimento fica em contato com o ambiente externo a partir desse momento até o horário de reaquecimento para o almoço, portanto tem temperatura igual à temperatura ambiente. No primeiro dia de teste a marmita contendo o alimento foi retirada da geladeira às 09h00min e no momento de ser inserida no forno solar sua temperatura era 16°C.

Os resultados obtidos no primeiro dia de teste com alimento estão apresentados na tabela 6.6 abaixo:

Tabela 6. 6 Temperatura (°C) do forno e alimento no primeiro teste no dia 27/05/15 em Belo Horizonte

| TEMPO | T Forno °C | T alimento °C | TEMPO | T Forno °C | T alimento °C |
|-------|------------|---------------|-------|------------|---------------|
| 10:05 | 49 | 16 | 11:35 | 51 | 48 |
| 10:15 | 42 | 22 | 11:45 | 53 | 50 |
| 10:25 | 41 | 25 | 11:55 | 54 | 54 |
| 10:35 | 43 | 29 | 12:05 | 55 | 56 |
| 10:45 | 45 | 32 | 12:15 | 57 | 58 |
| 10:55 | 46 | 35 | 12:25 | 58 | 59 |
| 11:05 | 48 | 39 | 12:35 | 59 | 62 |
| 11:15 | 49 | 42 | 12:45 | 59 | 63 |
| 11:25 | 50 | 45 | 12:55 | 60 | 65 |

A figura 6.5 mostra o comportamento do forno e da marmitta com o alimento durante o aquecimento, além de apresentar a temperatura mínima ideal para o alimento de 60°C de acordo com a Resolução nº 216, de 15 de setembro de 2004, mencionada no item 4.3:

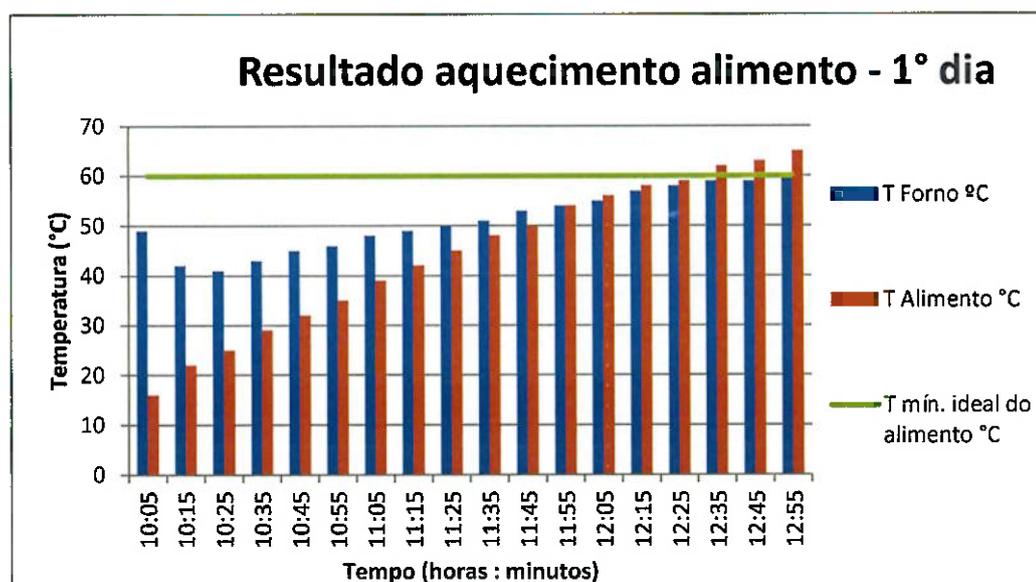


Figura 6. 5 Temperatura (°C) do forno e alimento no primeiro dia de teste atingindo o mínimo estabelecido para analisar a eficiência do forno solar

No segundo dia de teste também foi levada em consideração a rotina do operário ao retirar a marmitta da geladeira até o momento em que será reaquecida. Como situação mais crítica esse segundo teste teve a retirada às 9h45min da manhã e inserida ao forno as 10h00min. Os dados referentes a essas condições como a

temperatura inicial do forno e do alimento bem como a temperatura externa, umidade relativa do ar e radiação solar estão na tabela 6.7:

Tabela 6. 7 Condições iniciais para o segundo teste com arroz e macarrão

| | |
|------------------------------|----------------------|
| TEMPERATURA EXTERNA | 22°C |
| TEMPERATURA INTERNA DO FORNO | 36°C |
| TEMPERATURA DO ALIMENTO | 12°C |
| UMIDADE RELATIVA DO AR | 64% |
| RADIAÇÃO SOLAR | 600 W/m ² |

Os resultados obtidos no segundo dia de teste com alimento estão apresentados na tabela 6.8 abaixo:

Tabela 6. 8 Temperatura (°C) do forno e alimento no segundo teste no dia 27/05/15 em Belo Horizonte

| TEMPO | T Forno °C | T alimento °C | TEMPO | T Forno °C | T alimento °C |
|-------|------------|---------------|-------|------------|---------------|
| 10:00 | 36 | 12 | 11:40 | 52 | 48 |
| 10:10 | 36 | 17 | 11:50 | 53 | 51 |
| 10:20 | 38 | 21 | 12:00 | 53 | 53 |
| 10:30 | 40 | 24 | 12:10 | 54 | 57 |
| 10:40 | 43 | 29 | 12:20 | 54 | 58 |
| 10:50 | 44 | 31 | 12:30 | 55 | 58 |
| 11:00 | 46 | 35 | 12:40 | 55 | 59 |
| 11:10 | 48 | 39 | 12:50 | 56 | 61 |
| 11:20 | 49 | 43 | 13:00 | 56 | 62 |
| 11:30 | 50 | 45 | | | |

A figura 6.6 mostra o comportamento do forno e da marmitta com o alimento durante o aquecimento, além de apresentar a temperatura mínima ideal para o alimento de 60°C de acordo com a Resolução nº 216, de 15 de setembro de 2004, mencionada no item 4.3:

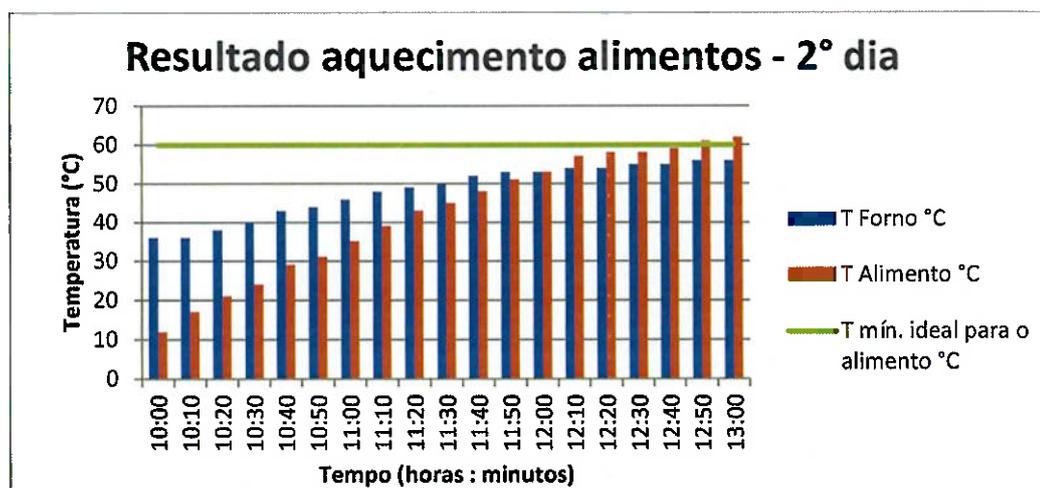


Figura 6. 6 Temperatura (°C) do forno e alimento no segundo dia de teste atingindo o mínimo estabelecido para analisar a eficiência do forno solar.

O comportamento da temperatura do forno e da marmitta para os dois dias de teste foi semelhante. Ao analisar o gráfico observou-se uma tendência das duas temperaturas em atingir o equilíbrio térmico. O forno, inicialmente a 43°C em média tendeu a fornecer calor à marmitta com temperatura média inicial de 14°C. Nos primeiros minutos a temperatura do forno caiu e da marmitta aumentou.

No segundo dia de teste houve um comportamento peculiar em relação à temperatura do forno, pois não foi alcançado um equilíbrio térmico entre o forno e as marmittas antes da temperatura começar a se levar. Considerou-se que isso se deve ao fato de que a incidência solar em determinados momentos foi alta o suficiente para que ocorresse um aquecimento direto da marmitta.

Nos minutos finais dos testes o forno adquiriu uma temperatura pouco variável e a marmitta continuou a esquentar. Uma possível explicação está no fato de a marmitta também se aquecer por absorção direta dos raios solares. .

A temperatura de 60 °C era o suficiente para confirmar a eficiência do forno, os testes terminaram assim que essas foram atingidas, ou seja, antes de 13h30min.

6.3. Análise de custo

A tabela 6.9 lista os materiais utilizados na construção do forno e seus respectivos valores cotados em Dezembro de 2014:

Tabela 6. 9 Análise econômica do forno solar

| MATERIAIS | PREÇO(R\$) |
|---------------------------------|-------------------|
| MADEIRA | 30,00 |
| PAPEL ALUMÍNIO | 0,50 |
| CORTIÇA | 16,00 |
| CHAPA METÁLICA | 11,75 |
| VIDRO | 24,00 |
| PARAFUSOS | 1,00 |
| TINTA PRETO FOSCO SPRAY | 14,00 |
| SILICONE PRETO | 12,00 |
| BORRACHAS DE VEDAÇÃO | 15,00 |
| COLA DE CONTATO (SAPATEIRO)300G | 12,90 |
| COLA BRANCA 50G | 2,00 |
| PREGOS | 0,50 |
| DOBRADIÇAS | 7,00 |
| FECHADURAS | 5,00 |
| TOTAL | 151,65 |

Considerou-se que o preço de custo da construção do forno solar foi baixo, e também que materiais como madeira, chapa metálica e borrachas de vedação podem ter origem da reciclagem o que reduz ainda mais o seu valor final, além de apresentar um bom funcionamento para diversas aplicações que, futuramente, podem ser estudadas.

6.4. Eficiência comparativa

A comparação dos dados obtidos pelos fornos solares tipo caixa em estudo e pelos de Melo (2008) e Filho e Silva (2008) estão apresentados na tabela 6.9 a seguir:

Tabela 6. 10 Tabela comparativa de análise da eficiência do forno solar em estudo em relação ao forno solar de melo (2008) e filho e Silva (2008)

| Informações | Melo (2008) | Filho e Silva (2008) | Rezende (2015) |
|--|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------|
| Local (Estação) | Natal-RN (não especificado) | Aracruz-ES (Verão) | BH-MG (Outono) |
| Medição | 15/15 min | 10/10 min | 10/10min |
| Massa de água (kg) | 1,0 | 3,0 | 3,6 |
| Água: Ti (°C); Tf (°C) | 35; 110 | 28,5; 69,5 | 20; 60 |
| Forno: Ti (°C); Tf (°C) | 95; 120 | 41,5; 73 | 40; 57 |
| Radiação média kJ/m² | 3332 | 2834 | 2388 |
| Custo | R\$ 159,80 | R\$ 85,00 | R\$ 151,65 |

Analisando as condições ambientais presentes no trabalho em estudo, no de Melo (2008) e no de Filho e Silva (2008) como a radiação e a temperatura ambiente, além dos resultados do aquecimento da água em diferentes massas, obtidos em cada trabalho, concluiu-se que o forno solar em estudo se mostrou bastante eficiente tanto em capacidade de absorção e manutenção da energia térmica em épocas frias quanto em aquecer maiores massas de água.

6.5. Ergonomia do forno solar

De acordo com o artigo 198 da Consolidação das Leis do Trabalho, aprovada pelo Decreto-Lei nº 5.452, de 1º de maio de 1943, que dispõe sobre o peso máximo que um trabalhador pode remover individualmente que é de 60 kg. Agahnejad, Leite e Oliveira (2014), utiliza em seus estudos o método NIOSH (National Institute of Occupational Safety and Health), o qual recomenda o peso de 23 kg como o peso máximo para transporte manual sem comprometer a saúde do trabalhador.

O forno solar apresentou o peso de 12,3 kg e, portanto, possui características adequadas às legislações vigentes tanto para o transporte quanto para o aquecimento de alimentos.

7. CONCLUSÕES

A escolha do melhor protótipo construído se baseou na sua eficiência, que teve como parâmetros de comparação a temperatura máxima atingida, o tempo de aquecimento e a capacidade de retenção da energia térmica em cada um.

A utilização de isopor ou cortiça foi importante no isolamento térmico, evitando a perda de calor por condução. Mesmo com a utilização do isopor há perdas, e para aumentar ainda mais essa eficiência de isolamento, utilizou-se papel alumínio em contato direto com as paredes de madeira proporcionando a reflexão dessa energia térmica para o interior do forno.

Outro fator importante para a manutenção da energia térmica foi a construção da tampa com duas camadas de vidro. A presença de ar (bom isolante térmico) entre elas proporciona maior eficiência contra a perda de calor em relação a uma tampa que possui um único vidro.

O protótipo três se mostrou como o mais eficiente dentre todos por ter características estruturais que otimizam essa escolha como: a construção de paredes laterais que reduzem a formação de sombras em seu interior; a tampa de vidro com grande área, o que possibilita uma maior entrada de radiação solar e consequente maior absorção interna.

Esse protótipo atendeu aos resultados esperados quanto ao fácil transporte devido ao baixo peso, baixo custo de produção devido à utilização de materiais como MDF, vidro, isopor e papel alumínio e ausência de gastos com energia como gás e/ou energia elétrica, devido à utilização de uma energia limpa e renovável.

O forno solar construído a partir do terceiro protótipo se mostrou eficiente aquecendo a marmitta a temperaturas ideais adotadas como parâmetros, em tempos inferiores aos pré-definidos para a coleta de dados (10h00min às 13h30min).

Na sua construção foram utilizados materiais de baixo custo demonstrando sua viabilidade econômica. O forno também se mostra viável por utilizar outra fonte de energia que não a elétrica ou o gás.

Portanto ele pode ser utilizado no aquecimento de refeições em construções civis ou em outros locais em que o acesso à energia elétrica e equipamentos como fornos elétricos ou a gás, micro-ondas e afins é difícil tanto por questões financeiras quanto por inexistência de serviços fornecidos por companhia energética.

8. SUGESTÕES

1. Construir o forno com as paredes: frontal e traseira com uma inclinação de 20° para fora do forno para aumentar a energia absorvida pelo forno reduzindo o tempo de aquecimento das marmitas e as sombras formadas em seu interior;

2. Construir um novo forno com outros materiais que possam ser mais eficientes quanto ao isolamento térmico, à economia e ao peso final do forno.

9. REFERÊNCIAS

AGAHNEJAD, Payman; LEITE, Jandecy Cabral; OLIVEIRA, Roberto Celio Limao de. ANÁLISE ERGONÔMICA DE UM POSTO DE TRABALHO NUMA LINHA DE PRODUÇÃO UTILIZANDO O METODO NIOSH – UM ESTUDO DE CASO NO POLO INDUSTRIAL DE MANAUS. *Inovae - Journal Of Engineering And Technology Innovation*. São Paulo, p. 100-118. 23 maio 2014.

BRASIL. Constituição (1999). **Portaria Nº 6, de 29 de Janeiro de 1999**. Brasília, Disponível em: <<http://www.anvisa.gov.br/scriptsweb/anvisaegis/VisualizaDocumento.asp?ID=684&VerSao=2>>. Acesso em: 22 fev. 2015.

BRASIL. Constituição (2004). **Resolução-rdc Nº 216, de 15 de Setembro de 2004**. Brasília, Disponível em: <<http://portal.anvisa.gov.br/wps/portal/anvisa/home>>. Acesso em: 22 fev. 2015.

BRASIL. **Decreto-lei N.º 5.452, de 1º de Maio de 1943**. Rio de Janeiro, 01 jan. 1943. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto-lei/del5452.htm>. Acesso em: 10 jun. 2015.

CEPEL CRESEB. *Energiasolar princípios e aplicações*. Rio de Janeiro, 2008.

COMETTA, Emilio. *Energia solar - utilização e empregos práticos*. Goiânia: Hemus, 2004.

HALLIDAY, David; RENISCK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos de física 2: Gravitação, Ondas e Termodinâmica**. 4. ed. Pittsburgh: Ltc, 1996. 288 p.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (Ed.). **Estações Automáticas**. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesAutomaticas>>. Acesso em: 27 maio 2015.

MELO, Aroldo Vieira de. **Projeto, construção e análise de desempenho de um forno solar alternativo tipo caixa a baixo custo**. 2008. 85 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2008.

METEONORM (1999). "Global Meteorological Database for Solar Energy and Applied Climatology", V. 4.0, Swiss Federal Office of Energy.

MOURA, Johnson Pontes de. - **Construção e avaliação térmica de um fogão solar tipo caixa**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - UFRN. Natal.

PANZERA, Arjuna C.; MOURA, Dácio G.. **Efeito estufa e o clima na terra**. , 2006.

Disponível em:

<http://crv.educacao.mg.gov.br/aveonline40/banco_objetos_crv/Efeito_Estufa_e_o_clima_na_terra.pdf>. Acesso em: 10 abr. 2012.

PEREIRA, Enio Bueno e COLLE, Sérgio. **A energia que vem do sol**. 1997. Dissertação (Mestrado em Divisão de Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Santa Catarina.

PINHO, João Tavares. *etal. Sistemas híbridos: Soluções energéticas para Amazônia*. 1. ed. Belém: Brasília, 2008. 396 p.

RIBEIRO, Valéria S. et al. **PROPRIEDADES FÍSICAS DE PRODUTOS AGRÍCOLAS**. *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*, Campina Grade, v. 4, n. 1, p.1-6, jan. 2002.

ROCHA FILHO, João Bernardes da; SALAMI, Marcos Alfredo; HILLEBRAND, Vicente. **Construção e caracterização de uma célula fotoelétrica para fins didáticos**. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, Porto Alegre, v. 28, n. 4, p.555-561, set. 2006.

SANTOS, Alcir dos et al. **EFEITO ESTUFA**. Disponível em:

<<http://www.fc.unesp.br/~lavarda/procie/dez14/luciana/>>. Acesso em: 05 dez. 2014.

SANTOS FILHO, Edésio Anunciação; DA SILVA, Valdemir Conceição. **Construção e Teste de Forno Solar**. 2008. Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Aracruz – FAACZ. Orientador: Profº. MSc Johnson Pontes de Moura.

SIQUEIRA, Débora Abrahão. Estudo de desempenho do aquecedor solar de baixo custo. 2009. 125 f. Dissertação (Mestrado)-Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2009.

TECNOLOGIA VERDE. Forno utiliza energia solar para aquecer refeições. 12 abril 2010. Acesso em 29 junho. 2011. Disponível em:<http://ciclovivo.com.br/noticia/forno_utiliza_energia_solar_para_aquecer_refeicoes>

ÜLTANIR, M.,1994. Recipientencial of new and renewable energy sources in long-term utilisation for Turkish rural áreas. Proceedings of AGEND 94, 29th August-1st September, Milano, Italy, pp. 822-828.

YAMASOE, Márcia Akemi. **Apostila da Disciplina Meteorologia Física II**. São Paulo: Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo, 2006.