



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**ESTUDO DE VIABILIDADE TÉRMICA DE UM FORNO SOLAR FABRICADO A
PARTIR DE UMA GELADEIRA EM DESUSO.**

**Dissertação submetida à
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
Como parte dos requisitos para a obtenção do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA**

Wesley Gomes da Silva

Orientador: Prof. Dr. Luiz Guilherme Meira de Sousa

Natal, dezembro de 2017

WESLEY GOMES DA SILVA

**ESTUDO DE VIABILIDADE TÉRMICA DE UM FORNO SOLAR FABRICADO A
PARTIR DE UMA GELADEIRA EM DESUSO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof^o Dr. Luiz Guilherme Meira de Souza

Natal – RN

Dezembro de 2017

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN
Sistema de Bibliotecas - SISBI
Catalogação de Publicação na Fonte. UFRN - Biblioteca Central Zila Mamede

Silva, Wesley Gomes da.

Estudo de viabilidade térmica de um forno solar fabricado a partir de uma geladeira em desuso / Wesley Gomes da Silva. - 2017.

93 f.: il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Natal, RN, 2017.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Guilherme Meira de Sousa.

1. Engenharia mecânica - Dissertação. 2. Forno solar - Dissertação. 3. Assamento de alimentos - Dissertação. 4. Recicláveis - Dissertação. 5. Problemas ecológicos - Dissertação. 6. Geração de renda - Dissertação. I. Sousa, Luiz Guilherme Meira de. II. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 621

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA

**ESTUDO DE VIABILIDADE TÉRMICA DE UM FORNO SOLAR FABRICADO A
PARTIR DE UMA GELADEIRA EM DESUSO.**

WESLEY GOMES DA SILVA

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de
MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA
Sendo aprovada em sua forma final

Orientador: Prof. Dr. Luiz Guilherme Meira de Sousa

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Luiz Guilherme Meira de Souza

Prof. Dr. Marcos Silva de Aquino

Prof. Dr. Natanaelyfle Randemberg Gomes dos Santos

Prof. Dr. Pedro Henrique de Almeida Varela

Dedico:

A minha esposa Luciana, aos meus filhos Lilian e Wenzel, aos meus pais Severino José e Maria das Neves, aos meus irmãos Gerlane, Walney e Girlene, com amor e gratidão, por todo apoio que deram ao longo deste trabalho e por serem a minha família.

Ao meu orientador Prof. Dr. Luiz Guilherme pela ininterrupta busca do uso da energia solar como uma tecnologia de acesso social.

AGRADECIMENTOS

Ao meu Deus, pelo dom da vida e por tudo que representa em minha vida.

A minha esposa Luciana e aos meus filhos Lilian e Wenzel pelo amor, dedicação, compreensão e por acreditarem no meu sonho.

Aos meus pais, Severino José e Maria das Neves, pelo amor e dedicação que me deram durante todo este tempo de vida, proporcionando a oportunidade de conquista de minha formação acadêmica.

Aos meus irmãos pelo apoio e incentivo.

Ao meu orientador Prof. Dr. Luiz Guilherme Meira de Souza, pela oportunidade de realizar este trabalho, por sua criatividade, paciência e orientação, transmitidas através de seus ensinamentos e experiências vividas.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, por possibilitar-me a realização deste curso de mestrado.

Ao Laboratório de Máquinas Hidráulicas e Energia Solar – LMHES/UFRN pelo apoio estrutural e contribuição para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao MSc. Aldo Paulino pela ajuda nas etapas de elaboração deste trabalho.

Aos Professores da UFRN que contribuíram para realização deste trabalho.

Ao Sr. Luiz Henrique, secretário acadêmico, pela competência e dedicação.

Ao Instituto Federal do Rio Grande do Norte – IFRN, em especial aos servidores dos *Campi* Mossoró e Canguaretama, que contribuíram direta e indiretamente para a realização desta conquista.

À banca pelas contribuições indispensáveis para melhoria deste trabalho.

RESUMO

São apresentados os processos de fabricação e montagem de um forno solar tipo caixa que teve como elemento base uma geladeira em desuso, destinado ao assamento de alimentos. A principal característica desse forno foi sua capacidade de assar vários alimentos simultaneamente, além de seu baixo custo, pois pode ser fabricado a partir de elementos recicláveis. Foi apresentado um balanço de energia do forno solar proposto, determinando-se sua perda e rendimento térmicos. O forno solar proposto foi ensaiado para produzir o assamento de vários tipos de alimentos. O forno solar mostrou-se viável para produzir o assamento de cinco bolos, com carga de 3,62 quilos, em apenas 70 minutos, apresentando superioridade em relação ao forno convencional a gás, com capacidade de assamento de apenas dois bolos, em cerca de 50 minutos. A eficiência do forno sob boas condições solarimétricas, entre às 10:00 e 16:00 horas, foi de 66,5%, competitiva com outros fornos solares já estudados no LMHES e apresentados pela literatura solar para cocção de alimentos, entre 40 – 70 %. Foi também abordada a viabilidade econômica do forno solar estudado objetivando-se verificar a possibilidade de uso em comunidades carentes, podendo tornar-se fonte de geração de renda e emprego, bem como difundir e massificar o uso da energia solar para o assamento de alimentos, minimizando-se os graves problemas ecológicos gerados pelo uso da lenha como fonte de energia para cocção.

Palavras chaves: forno solar, assamento de alimentos, recicláveis, problemas ecológicos, geração de renda.

ABSTRACT

The processes of manufacturing and assembling a solar box-type oven with the base element of a disused refrigerator for food baking are presented. The main feature of this oven was its ability to bake various foods simultaneously, in addition to its low cost, as it can be manufactured from recyclable elements. An energy balance of the proposed solar oven was presented, determining its thermal loss and yield. The proposed solar oven was tested to produce the baking of various types of food. The solar oven proved to be feasible to produce the five-bolus bake, with a load of 3.62 kilos, in only 70 minutes, presenting superiority over the conventional gas-fired oven, with a capacity of only two baking cakes, in about 50 minutes. The efficiency of the furnace under good solarimetric conditions, between 10:00 am and 4:00 p.m., was 66.5%, competitive with other solar furnaces already studied in the LMHES and presented by the solar literature for food cooking, between 40 - 70 %. The economic feasibility of the studied solar furnace was also approached aiming at verifying the possibility of use in poor communities, being able to become a source of generation income and employment, as well as diffusing and massifying the use of solar energy for the roasting of food, minimizing the serious ecological problems generated by the use of firewood as a source of energy for cooking.

Keywords: solar oven, food baking, recyclable, ecological problems, income generation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Percentual da população que utiliza lenha para cozinhar.....	16
Figura 2 – Distribuição do consumo residencial de energia – Brasil (ano base 2015).....	17
Figura 3 – Consumo final no setor residencial – Brasil 2015	18
Figura 4 – Forno tipo caixa.....	22
Figura 5 – Fogão com parábola fabricada em compósito de poliéster e juta.	23
Figura 6 – Forno tipo refletivo: a) poliédrico; b) semicilíndrico; c) bi-retangular; d)parabólico.	23
Figura 7 – Cozinha solar. a) aquecimento indireto e com armazenamento térmico; b) aquecimento indireto e sem armazenamento térmico.....	24
Figura 8 – Efeito estufa gerado no forno solar tipo caixa.	26
Figura 9 – Orientação do vidro em fornos solares.	26
Figura 10 – Refletores para aumento da energia de entrada no forno.	27
Figura 11 – Calor da panela transferido para o cabo.....	27
Figura 12 – Calor irradiado em forno tipo caixa aquecido.....	27
Figura 13 – Ar aquecido escapando por frestas do forno solar.	28
Figura 14 – Massa térmica dentro do fogão.	28
Figura 15 – Fornos solares mais largos captam mais luz solar no sentido Leste-Oeste.....	30
Figura 16 – Primeiro Forno solar fabricado na UFRN.....	37
Figura 17 – Fornos solares fabricados na UFRN.	38
Figura 18 – Forno solar fabricado a partir de uma sucata de fogão convencional a gás.....	38
Figura 19 – Forno solar estudado por Souza.	39
Figura 20 – Forno solar tipo caixa fabricado em material compósito.	40
Figura 21 – Forno solar estudado por Gomes.	40
Figura 22 – Forno solar fabricado a partir de uma sucata de tambor de polietileno.	41
Figura 23 – Forno solar fabricado a partir de uma caixa de EPS.....	41
Figura 24 – Forno solar estudado por Varela.	42
Figura 25 – Forno solar fabricado a partir de chapas de material compósito de baixa condutividade térmica.....	42
Figura 26 – Forno solar estudado por Batista.....	43
Figura 27 – Forno solar fabricado com chapas de PVC utilizadas em forro de ambientes.....	43
Figura 28 – Forno solar fabricado com chapas de gesso acartonado.	44
Figura 29 – Forno solar estudado por Gomes.	45
Figura 30 – Forno solar estudado por Araújo.....	45

Figura 31 – Forno solar estudado por De Araújo.	46
Figura 32 – Forno solar estudado por Spinelli.	46
Figura 33 – Vista explodida do forno proposto.	47
Figura 34 – Cobertura do forno: a) vidros reutilizados, b) corte das tampas e alças,	48
Figura 35 – Colagem dos espelhos na porta da geladeira.....	49
Figura 36 – Base : a) perfis metálicos (seta) b) soldagem c) base soldada com rodízios.....	49
Figura 37 – Detalhe da fixação do forno à base.	50
Figura 38 – Pintura externa do forno proposto (segunda demão).	50
Figura 39 – Forno solar proposto: a) em uso; b) fora de uso.....	51
Figura 40 – Equipamentos: a) termômetro; b) termopar e c) termômetro infravermelho.....	52
Figura 41 – Equipamento Davis - Weather Envoy.....	52
Figura 42 – Receptor do Equipamento acoplado a um computador no LMHES.....	53
Figura 43 – Programa de medição de dados meteorológicos.	53
Figura 44 – Produto usado para os bolos e massa misturada na assadeira.....	54
Figura 45 – Embalagens das pizzas utilizada no ensaio 2.....	55
Figura 46 – Embalagem do empanado de frango.	55
Figura 47 – Embalagem do pão francês pré-assado destacando as instruções.....	56
Figura 48 – Bifes de contrafilé temperados.....	56
Figura 49 – Camarão cinza sem cabeça em sacos próprios para uso em micro-ondas.	57
Figura 50 – Pontos de medição de temperaturas externas do forno.	57
Figura 51 – Pontos de medição de temperaturas internas do forno.....	58
Figura 52 – Temperatura máxima na chapa do absorvedor do forno solar estudado.....	64
Figura 53 – Comportamento assumido pelos parâmetros medidos no ensaio.....	65
Figura 54 – Temperatura do ar interno do forno e da radiação global em intervalos de 5 minutos.	66
Figura 55 – Cinco bolos durante o processo de assamento no forno solar estudado.	68
Figura 56 – Cinco bolos prontos (desenformados) sobre bandejas para o consumo.....	68
Figura 57 – Comportamento dos parâmetros medidos no ensaio com carga 01.	68
Figura 58 – Efeito do condensado formado no vidro do forno solar estudado	70
Figura 59 – Comportamento dos parâmetros medidos no ensaio 2.....	71
Figura 60 – Diversos alimentos durante o ensaio de assamento no forno solar.....	72
Figura 61 – Alimentos prontos para consumo.....	72
Figura 62 – Comportamento dos parâmetros medidos no ensaio 3.....	74
Figura 63 – Ensaio com pães: a) Em assamento; b) prontos para o consumo.....	75
Figura 64 – Comportamento dos parâmetros medidos no ensaio 4.....	76

Figura 65 – Condensação durante o ensaio com carne.....	77
Figura 66 – Carne: a) No início do processo; b) Bife pronto para o consumo.....	77
Figura 67 – Camarão condicionado e detalhe da embalagem.	78
Figura 68 – Comportamento dos parâmetros medidos no ensaio 5.....	79
Figura 69 – Camarão durante assamento com uso de sacos plásticos.....	79
Figura 70 – Camarões prontos para o consumo (sobre o forno solar).....	80
Figura 71 – Efeito da condensação dentro do saco plástico.....	80
Figura 72 – Taxa de energia perdida e temperaturas médias externas do forno.	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Oferta de energia interna do Brasil referente à Lenha e Carvão Vegetal.	17
Tabela 2 – Materiais e custos do Forno solar proposto.	51
Tabela 3 – Dimensões do forno em metros e volume em litros.	58
Tabela 4 – Resultados do ensaio sem carga.	64
Tabela 5 – Temperaturas máximas fornos estudados no LMHES (ensaio em vazio).	66
Tabela 6 – Resultados médios do ensaio para assamento de cinco bolos.	67
Tabela 7 – Resultados médios do ensaio com carga 2.	71
Tabela 8 – Resultados médios do ensaio para assamento de pães tipo francês.	73
Tabela 9 – Resultados médios do ensaio para assamento de carne bovina.	76
Tabela 10 – Temperaturas médias do ensaio para assamento de Camarão.	78
Tabela 11 – Taxa de energia térmica perdida pelo perímetro do forno.	81
Tabela 12 – Balanço térmico e eficiência do forno solar estudado.	84
Tabela 13 – Comparativos de eficiências de alguns fornos estudados no LMHES.	85

LISTA DE SIGLAS

A_{espelho}	Área do espelho (m^2).
A_{fun}	Área do fundo do forno (m^2).
A_{lat}	Área lateral do forno (m^2).
A_v	Área do vidro (m^2).
A_{vidro}	Área do vidro (m^2).
E_{abs}	Taxa de energia absorvida pelo forno (W).
E_{ef}	Taxa de Energia que entra no forno solar (W).
E_{fun}	Taxa de energia perdida pelo fundo do forno (W).
E_{fun}	Taxa de energia perdida pelo fundo do forno (W).
E_g	Taxa de Energia oriunda da radiação solar global (W).
E_{lat}	Taxa de energia perdida pelas laterais (W).
E_{pf}	Taxa de energia total perdida pelo forno (W).
E_{re}	Taxa de Energia da reflexão dos espelhos (W).
E_v	Taxa de energia perdida pelo vidro (W).
E_v	Taxa de energia perdida pelo vidro (W).
e_{EPS}	Espessura da chapa de EPS (m).
e_{MDF}	Espessura da chapa de MDF (m).
e_{PU}	Espessura da camada isolante de Poliuretano (m).
$e_{\text{aço}}$	Espessura da chapa de aço (m).
e_{al}	Espessura da chapa de alumínio(m).
$e_{\text{poliondas}}$	Espessura da chapa de poliondas (m).
h_c	Coefficiente de troca térmica convectiva.
$h_{r(\text{ve-a})}$	Coefficiente de troca térmica radiativa (entre o vidro e o ambiente).
I_d	Radiação instantânea direta que entra no forno solar (W/m^2).
I_g	Radiação instantânea global que entra no forno solar (W/m^2).
K_{EPS}	Condutividade térmica da madeira EPS (W/mK).
K_{MDF}	Condutividade térmica da madeira MDF (W/mK).
K_{PU}	Condutividade térmica do Poliuretano (W/mK).
$K_{\text{aço}}$	Condutividade térmica do aço (W/mK).
K_{al}	Condutividade térmica do alumino (W/mK).

$K_{poliiondas}$	Condutividade térmica do plástico corrugado - Copolímero e Homopolímero de Polipropileno (W/mK).
T_a	Temperatura ambiente (K).
T_e	Media da temperatura externa do vidro (K).
T_{mext}	Temperatura média externa na lateral do forno (K).
T_{mext}	Temperatura média externa na lateral do forno (K).
T_{mint}	Temperatura média interna na lateral do forno (K).
T_{mint}	Temperatura média interna na lateral do forno (K).
T_{sky}	Temperatura da abóbada celeste (K).
T_{ve}	Temperatura externa do vidro (K).
U_{fun}	Coefficiente global de perdas pelo fundo do forno (W/m ² K).
U_{lat}	Coefficiente global de perdas pela lateral do forno (W/m ² K).
U_{lat}	Coefficiente global de perdas pelas laterais do forno (W/m ² K).
U_v	Coefficiente global de perdas do vidro (W/m ² K).
v_v	Velocidade do vento (m/s).
η_{forno}	Rendimento do forno solar (%).
ρ_e	Refletividade do espelho (0,95).
τ_v	Transmissividade do vidro (0,85).

LISTA DE ABREVIACOES

ANP	Agência Nacional de Petróleo, Gás e Biocombustíveis.
Abs	Chapa absorvedora do forno.
COBEM	Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica.
CONEM	Congresso Nacional de Engenharia Mecânica.
EPS	Poliestireno expandido.
GLP	Gás liquefeito de petróleo.
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.
IEO	International Energy Outlook.
IFRN	Instituto Federal do Rio Grande do Norte.
LED	Diodo emissor de luz.
LMHES	Laboratório de máquinas hidráulicas e energia solar.
MDF	Medium density fiberboard.
OMS	Organização Mundial de Saúde.
PPGEM	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.
PVC	Policloreto de Vinila.
RSG	Radiação solar Global.
CS	Cocção solar.
UFCE	Universidade Federal do Ceará.
UFRN	Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
WEO	World Energy Outlook.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	15
1.1 Apresentação do Trabalho	15
1.2. Objetivos.....	20
1.2.1. Objetivo Geral	20
1.2.2. Objetivos Específicos	20
CAPÍTULO 2 – ASPECTOS TEÓRICOS E ESTADOS DA ARTE	21
2.1. A Energia Solar	21
2.2. Os fornos e fogões solares	21
2.2.1. Fornos tipo caixa	22
2.2.2. Fogões parabólicos	22
2.2.3. Forno de refletores planos	23
2.2.4. Forno com cocção indireta	23
2.3. Teoria do forno tipo caixa	25
2.3.1. Princípios de aquecimento.....	25
2.3.2. Projeto.....	29
2.4. Estado da Arte dos fornos solares	30
2.5. Os fornos/fogões solares do LMHES	37
CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS	47
3.1. Processos de fabricação e montagem do forno proposto.....	47
3.2. Equipamentos para medição	52
3.3. Procedimento experimental	53
3.4. Balanço de energia do forno solar tipo caixa proposto	58
3.4.1 Taxa de Energia que entra no forno (Eef)	59
3.4.2. TAXA DE ENERGIA PERDIDA PELO FORNO (EPF).....	59
3.4.3. Rendimento térmico do forno solar	63
CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES	64
4.1. Ensaio sem carga	64
4.2. Ensaio com carga	67
4.2.1. Ensaio com carga 1: Bolos	67
4.2.2. Ensaio com carga 2: Alimentos variados.	70
4.2.3. Ensaio com carga 3: Mini-pães francês.....	73
4.2.4. Ensaio com carga 4: Bifes de carne bovina.	75
4.2.5. Ensaio com carga 5: Camarão cinza sem cabeça.	77

4.3. Balanço de energia do forno solar proposto	80
4.3.1. Perdas pelas laterais.....	80
4.3.2. Perdas pelo fundo	81
4.3.3. Perdas pela tampa de vidro	82
4.3.4. Taxa de energia total perdida.....	83
4.3.5. Taxa de energia absorvida pelo forno.....	83
4.3.6. Rendimento térmico do forno.....	84
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES	86
5.1. Conclusões.....	86
5.2. Sugestões	86
REFERÊNCIAS	87

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

Neste capítulo será apresentada a importância do uso da energia solar, especificamente, através da utilização de fornos como forma de redução da degradação ambiental, da atual participação do uso de lenha nas residências no mundo e no Brasil para produção de alimentos.

1.1 Apresentação do Trabalho

As fontes de energia são de extrema importância para o mundo atual, uma vez que o crescimento urbano e industrial gera a necessidade cada vez maior do uso destas fontes. A consequência é o aumento da emissão de poluentes no meio ambiente, o que provoca uma insegurança energética associada às mudanças climáticas. Neste cenário, a inserção e o uso de energias renováveis são capazes de promover essa segurança, contribuindo para o desenvolvimento social e econômico, a universalização do acesso à energia e redução de efeitos nocivos ao meio ambiente e à saúde.

As perspectivas de uso de energia mundial apresentadas no *International Energy Outlook 2016* continuam a mostrar níveis crescentes de demanda nas próximas três décadas. E as energias renováveis são a fonte de energia de crescimento mais rápido do mundo durante o período de projeção, aumenta em média 2,6% ao ano entre 2012 e 2040. Mesmo que o consumo de combustíveis não fósseis cresça mais rapidamente do que o consumo de combustíveis fósseis, os combustíveis fósseis ainda representam 78% do consumo de energia em 2040 (IEO, 2016).

No campo energético, a madeira é tradicionalmente chamada de lenha e, nessa forma, sempre ofereceu histórica contribuição para o desenvolvimento da humanidade, tendo sido sua primeira fonte de energia, inicialmente empregada para aquecimento e cocção de alimentos. Ao longo dos tempos, passou a ser utilizada como combustível sólido, líquido e gasoso, em processos para a geração de energia térmica, mecânica e elétrica (BRITO, 2007).

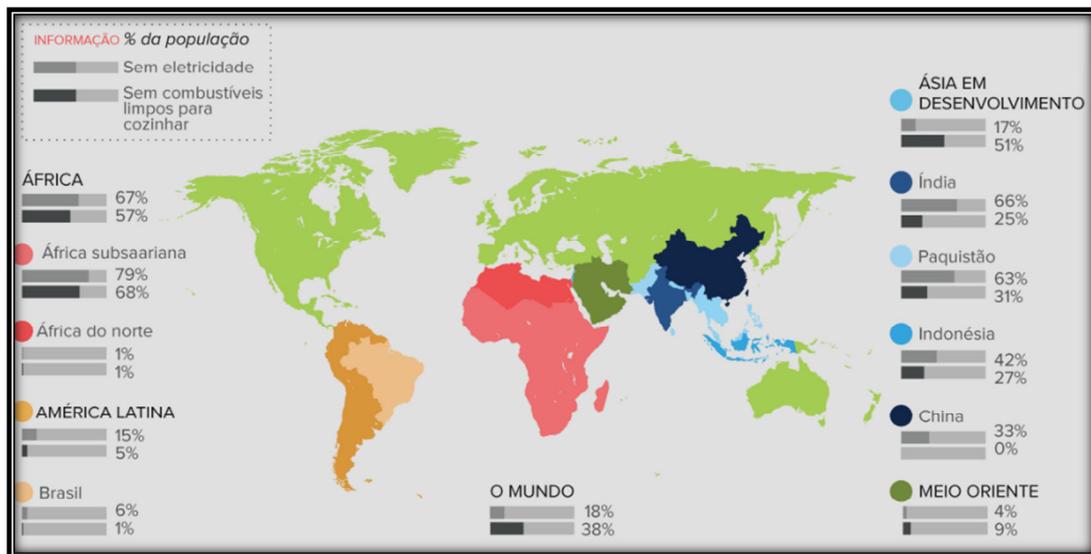
Hoje ainda observamos a utilização da lenha em matrizes energéticas de muitos países, com participações maiores ou menores, dependendo do grau de desenvolvimento e também ligadas a questões de disponibilidade, questões econômicas e as outras fontes de energias disponíveis.

Apesar dos sérios esforços já realizados, hoje se estima que 1,2 bilhões pessoas – 17% da população global – permanecem sem eletricidade e 2,7 bilhões de pessoas – cerca de 38% da população mundial – coloca sua saúde em risco através da dependência em relação à

tradicional utilização de biomassa sólida para cozinhar (WEO, 2015). Ou seja, duas a cada cinco pessoas no mundo utilizam lenha para cozinhar seus alimentos.

A Figura 1 mostra a situação da população que utiliza lenha nos continentes da África, Ásia, Oriente, América Latina e o Brasil. Sendo o Brasil com cerca de 1% da população ou 2,0 bilhões habitantes nestas condições, considerando a ultima estimativa populacional de 206 Milhões de habitantes (IBGE, 2016).

Figura 1 – Percentual da população que utiliza lenha para cozinhar.



Fonte: action4energy (2017).

O uso da lenha como combustível doméstico está normalmente associado a três principais aspectos negativos. O primeiro relaciona-se aos danos devido à extração de madeira nas florestas, quando a lenha é proveniente de vegetação nativa, proporcionando a abertura de trilhas e clareiras artificiais e remoção de biomassa florestal.

O segundo está relacionado aos danos na saúde dos usuários diretos deste combustível, uma vez que o uso da lenha ocorre normalmente em fornos/fogões tradicionais pouco eficientes e que lançam muita fumaça no interior das residências. Por fim, o uso de madeira como combustível doméstico é responsável por uma parte significativa das emissões de gases que proporcionam o efeito estufa (SPECHT, 2012).

Segundo Batista, 2013, uma família de oito pessoas necessita de, aproximadamente, 2,0 m³ de lenha por mês para preparar suas refeições.

Neste contexto, o Brasil não é diferente do mundo, a lenha tem a sua importância nos segmentos da indústria, comércio e em domicílios. Representa 8,2% da matriz energética do país, sendo deste total, o setor residencial consumiu cerca de 25,8%, em geral para a cocção dos alimentos nas regiões rurais, seguido da agropecuária (11,5%), indústrias de cerâmica (9,4%), bebidas e alimentos (8,9%) e papel e celulose (7,5%) (BEN 2016).

Para efeitos comparativos entre as diversas fontes de energia, as quantidades consumidas são mensuradas utilizando a unidade tep – tonelada equivalente de petróleo – ou seja, 01(hum) unidade de tep equivalente à energia de calor liberada pela queima de uma tonelada de petróleo.

Desta forma, a Tab. 1 apresenta a evolução do consumo de lenha de 2005 até 2015 no país, onde observamos uma redução de sua participação percentual na matriz energética ao longo dos últimos 10 anos. Mas, em valores absolutos, ainda apresenta valores altos, e não acompanhou a redução do consumo relativo, visto que houve um aumento de consumo total de energia no país durante mesmo o período.

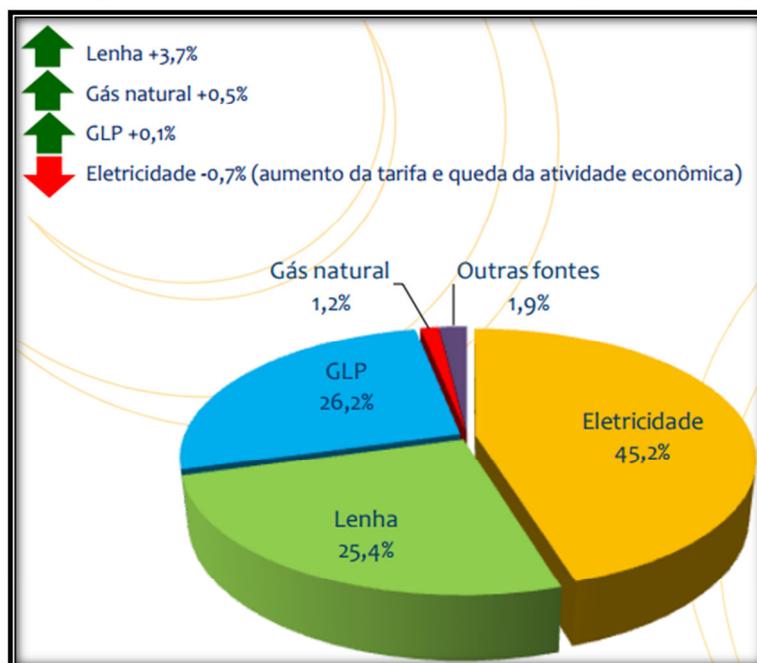
Tabela 1 – Oferta de energia interna do Brasil referente à Lenha e Carvão Vegetal.

Ano	2005	2007	2009	2011	2013	2015
% lenha	13,1%	12,0%	10,1%	9,5%	8,3%	8,2%
Quant. de lenha [10 ³ tep]	28.468	28.628	24.610	25.997	24.580	24.519
Energia total [10 ³ tep]	217.936	238.011	243.218	272.338	296.215	299.211

Fonte: BEN 2016.

Relativo ao cenário das fontes de energia consumidas no setor residencial no Brasil, da Fig.2 apresenta a participação das principais fontes, observando-se que o consumo de lenha ocupa a terceira posição em 2015, atrás da eletricidade e GLP, com aumento de +3,7% em relação ao ano anterior.

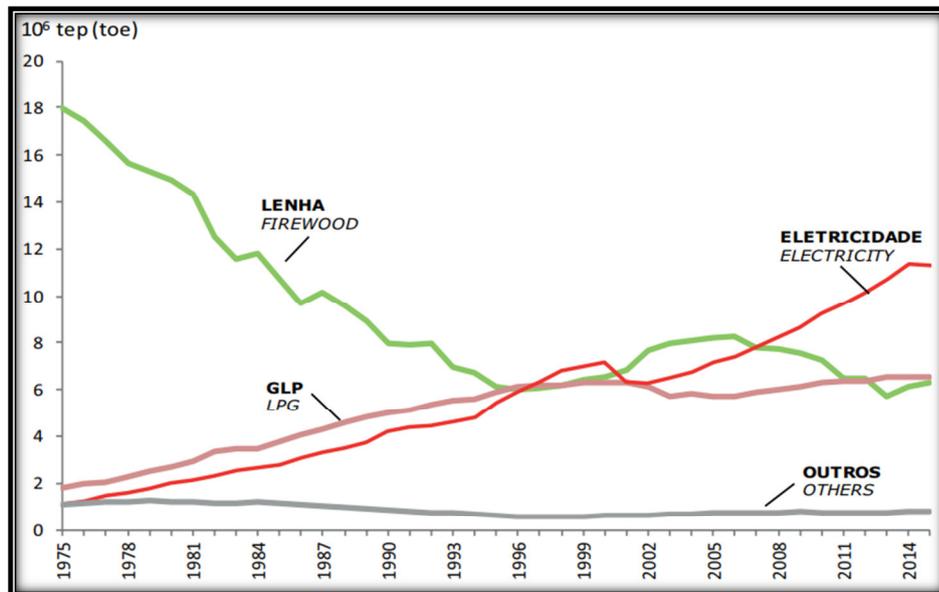
Figura 2 – Distribuição do consumo residencial de energia – Brasil (ano base 2015).



Fonte: Relatório final BEN 2016.

Relativamente, faz pouco tempo que a lenha deixou de ser a principal fonte de energia consumida pelo setor residencial no país, pois em meados da década de 1970 começou a cair o consumo até, praticamente, empatar com o consumo de GLP, como mostra a evolução dos consumos nos últimos 40 anos na Fig.3, com o aumento do consumo de energia elétrica e redução da participação da lenha. O que chama atenção nestes dados é a proximidade do consumo de lenha e GLP nos dias atuais.

Figura 3 – Consumo final no setor residencial – Brasil 2015



Fonte: Relatório final BEN 2016.

No uso residencial da lenha, especialmente, em áreas rurais onde ainda há uma grande utilização de fornos/fogões à lenha, que em alguns casos é um backup para quando há falta de GLP. Este aspecto pode ter vários fatores que influenciam, como por exemplo, o cultural em determinadas regiões. Mas os fatores socioeconômicos e a falta de opção de outra fonte de energia são determinantes, fazendo que o uso da lenha na cocção de alimentos apresente-se como um dos mais importantes emissores de carbono quando comparado a outras fontes de energia.

O uso de precários fogões a lenha persiste nas regiões mais pobres e responde por 50% das mortes por poluição no Brasil. E a queima de lenha e carvão para cozinhar é uma das maiores preocupações de saúde globais, segundo a OMS. Esses combustíveis liberam monóxido de carbono e micropartículas invisíveis, absorvidas pelos pulmões, causando problemas respiratórios que podem levar à morte (SCHELLER, 2017).

É como se cada habitante de uma casa com fogão a lenha fumasse dois maços de cigarro por dia, segundo a organização não governamental dinamarquesa Copenhagen Consensus. O efeito causado ao organismo por essa poluição interna é oito vezes maior do que o de toda a poluição do ar da cidade de São Paulo (SCHELLER, 2017).

Recorrendo ao uso de fogão à lenha, uma dona de casa em Natal/RN não utiliza o fogão a gás há quatro meses porque não tem dinheiro para comprar o botijão de gás, que está caro e está aumentando todo mês. Esses aumentos refletiram no preço médio do gás de cozinha no país, que acumula alta de 15,58% em 2017 (FIGUEREDO, 2017).

Estes dados reforçam a larga utilização de fogões a lenha para cocção de alimentos em muitas residências no país, contribuindo para degradação de matas, problemas de saúde e poluição ambiental como citados anteriormente.

O Brasil tem um potencial de energia solar médio de, aproximadamente, $700\text{W}/\text{m}^2$, podendo alcançar picos de até $1.200\text{W}/\text{m}^2$. Esse imenso potencial solar é extremamente importante para ser utilizado como alternativa energética, portanto, tem que ter seu uso massificado por todas as nações da terra. Conforme banco de dados da estação solarimétrica do LMHES/UFRN (SILVA, 2016).

O potencial brasileiro para energia solar é enorme. O Nordeste apresenta os maiores valores de irradiação solar global, com a maior média e a menor variabilidade anual, dentre todas as regiões geográficas. Os valores máximos de irradiação solar são observados na região central da Bahia e no noroeste de Minas Gerais (PORTAL BRASIL, 2016.).

Desta forma, o Brasil está habilitando para utilizar este potencial de energia, seja na forma térmica ou fotovoltaica. Contudo, ainda apresenta dificuldades na utilização e difusão do uso deste potencial solar existente.

No caso do uso para geração de energia elétrica, o custo é um aspecto importante que dificulta a utilização por ainda ser alto, quando comparado a outras formas de obtenção de energia elétrica.

Mas, na contra mão dos custos, o uso da energia solar para a cocção de alimentos pode ser muito reduzido e acessível para grande parte da população, principalmente, as mais carentes, utilizando-se de uma energia abundante e limpa.

À vista disso, no âmbito social, temos a necessidade de uma política para a disseminação de fornos/fogões solares a serem utilizados na cocção de alimentos, que além de reduzir os esforços das famílias em buscar lenha, ajuda a preservar o meio ambiente, reduzir a emissão de gases poluentes – redução do efeito estufa – e contribuir para redução do desequilíbrio ecológico pelo uso indiscriminado da lenha que causa desmatamento e desertificação de áreas. Pois o uso da tecnologia do fogão solar, considerada relativamente simples, voltado para o social, pode promover a substituição do consumo de lenha, mesmo que ocorra de forma parcial.

Este trabalho apresenta o estudo de um forno solar tipo caixa de baixo custo, fabricado a partir de uma geladeira em desuso, no qual são apresentados os processos de fabricação, montagem e resultados de ensaios para assamento de vários tipos de alimentos.

Sendo demonstrada a capacidade de assamento do forno estudado para utilização doméstica em zonas rurais e urbanas, no período de 10:00 às 14:00 horas e sua maior qualidade: a capacidade de assar ao mesmo tempo vários alimentos, em função de seu amplo espaço para o assamento de alimentos, que o diferencia dos inúmeros modelos de fornos solares já estudados e disponibilizados pela literatura solar.

Foi também apresentado um balanço de energia do forno solar estudado para a determinação das perdas térmicas e de sua eficiência térmica. Bem como demonstrada a competitividade do forno solar proposto em relação aos outros fornos solares já estudados, analisando-se os tempos de assamento dos alimentos testados. Também comparados os tempos de assamento do forno projetado e fabricado em relação ao forno solar convencional e a gás.

Fabricado a partir de materiais de baixo custo e da reutilização de outros materiais em desuso, viabilizando o seu uso pelas camadas menos favorecidas da população, tornando-o um elemento de promoção social e combate ao desequilíbrio ecológico. O repasse tecnológico dos processos de fabricação e montagem de tal forno pode ser visto como uma opção de geração de emprego e renda para comunidades pobres, socializando o uso de uma fonte energética limpa e renovável.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo Geral

Mostrar a capacidade simultânea de assamento de vários alimentos de um forno solar alternativo de baixo custo de fabricação a partir de uma geladeira em desuso.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Fabricar um forno solar tipo caixa;
- Demonstrar a viabilidade de assamento do forno para todos os alimentos testados;
- Realizar um balanço de energia para o forno fabricado;
- Demonstrar suas viabilidades térmica, funcional e econômica;
- Demonstrar a competitividade do forno solar estudado em relação a outros fornos já testados e apontados pela literatura solar para assamento de alimentos;
- Comparar os resultados obtidos com o forno convencional a gás.

CAPÍTULO 2 – ASPECTOS TEÓRICOS E ESTADOS DA ARTE

Neste capítulo serão esclarecidos temas relacionados com o estudo desenvolvido deste trabalho, através de revisão bibliográfica que abrange trabalhos similares desenvolvidos em áreas afins ao tema proposto. Inicialmente, são apresentados os conceitos básicos sobre tipos de fornos/fogões solares, compreendendo o princípio de aquecimento, as exigências dos materiais para sua fabricação, aspectos do projeto de construção e, para finalizar, o estudo do estado da arte dos fornos/fogões solares construídos no Laboratório de Máquinas Hidráulicas e Energia Solar – LMHES/UFRN e no mundo.

2.1. A Energia Solar

O sol é considerado com fonte de energia renovável, podendo ser utilizado tanto como fonte de luz quanto de calor, com futuro mais promissor dentre as alternativas energéticas. A energia solar por não ser poluente, disponibiliza fonte de energia limpa, inesgotável e gratuita.

A radiação solar, também denominada energia total incidente sobre a superfície terrestre, depende de fatores como: condições climáticas e atmosféricas (nebulosidade, umidade relativa do ar etc.), da latitude local e da posição no tempo (hora do dia e dia do ano). Isso se deve à inclinação do eixo imaginário em torno do qual a Terra gira diariamente (movimento de rotação) e à trajetória elíptica que a Terra descreve ao redor do Sol (translação ou revolução). Estima-se que a energia solar incidente sobre a superfície terrestre seja da ordem de 10 mil vezes o consumo energético mundial (ANEEL, 2005).

2.2. Os fornos e fogões solares

A cocção de alimentos pode ser realizada com o uso da energia solar através da utilização de equipamentos conhecidos como fornos e fogões, apresentando configurações específicas para ter a desempenho satisfatório. Os principais dispositivos térmicos para a cocção de alimentos, assamento e cozimento, são os fornos tipo caixa, os fogões concentradores com refletores curvos ou planos e fogões com coletores de chapas planas.

Geralmente, os fornos solares são utilizados para a cocção em meio não aquoso e os fogões solares para o cozimento de alimentos em meio aquoso, embora se encontre na literatura solar para cocção de alimentos inúmeros exemplos de cozimento em fornos e fogões solares.

2.2.1. Fornos tipo caixa

São os mais difundidos para o uso residencial, apresentando, quando comparado ao tipo parabólico, temperaturas menores e mais constantes. Também são pouco afetado com rápidas variações da incidência solar devido passagem de nuvens.

Podem ser construídos de vários materiais e todos são dotados de uma superfície superior de material transparente como o vidro, normalmente, para permitir a passagem dos raios solares para o interior do forno e preservar boa parte do calor interno usado para a cocção do alimento. Também se utiliza o artifício de pintar todas as superfícies internas na cor preta para auxiliar no armazenamento de calor, utilizando o princípio do corpo negro. A Figura 4 mostra um modelo de forno tipo caixa.

Outra característica importante é a utilização de refletores externos que auxiliam na aceleração da temperatura interna, podendo ser planos ou sutilmente côncavos.

Figura 4 – Forno tipo caixa



Fonte: Souza *et al.* (2013).

2.2.2. Fogões parabólicos

Os fogões parabólicos atingem temperaturas elevadas, semelhante ao fogo, resultando em tempos menores de cozimento quando comparado ao anterior. Isto graças à capacidade de captar a radiação solar e a concentrar em uma região focal, onde se localiza o absorvedor ou panela para cocção dos alimentos. Para isto, geralmente, são utilizados espelhos dispostos em uma superfície com forma côncava.

Mas apresentam as desvantagens da necessidade de monitoramento constante para o ajuste do foco devido ao movimento relativo do sol e atenção quanto à segurança durante sua operação devido aos reflexos solares e altas temperaturas atingidas. Bem como, necessita de

luz solar direta, podendo causar esfriamento rápido do alimento na ocorrência de nebulosidade acentuada ou desvio do foco. A Figura 5 mostra um fogão parabólico.

Figura 5 – Fogão com parábola fabricada em compósito de poliéster e juté.



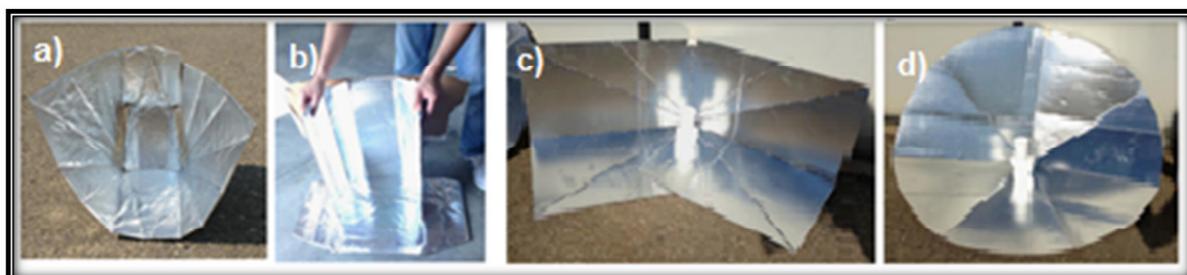
Fonte: Acervo técnico do LMHES/UFRN (2016).

2.2.3. Forno de refletores planos

Sua configuração associa os dois tipos de forno anteriores, atingindo menores temperaturas, não necessitam de um monitoramento e com reflexos solares menos danosos aos olhos do operador. As suas vantagens estão no custo baixo, alguns modelos são flexíveis para facilitar o transporte e permitir a montagem e desmontagem de maneira muito prática.

Seu formato permite que a radiação solar seja concentrada para uma panela posicionada no centro do mesmo e pode ser usado para assar pães e bolos. Alguns modelos de forno do tipo refletivo são mostrados na Fig.6.

Figura 6 – Forno tipo refletivo: a) poliédrico; b) semicilíndrico; c) bi-retangular; d)parabólico.



Fonte: Regattieri (2016).

2.2.4. Fogão com cocção indireta

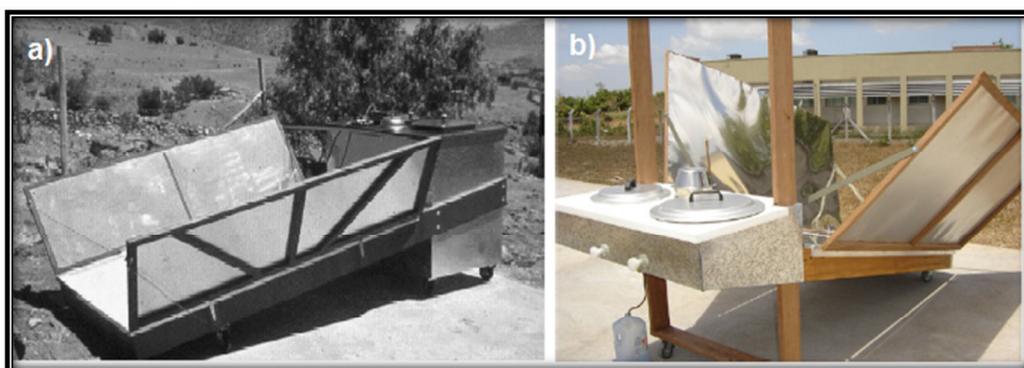
O cozimento do alimento é obtido através da utilização de uma cozinha, que proporcionam o aquecimento, através de coletores de chapa plana associado a algum fluido de trabalho como o óleo ou ar.

Os fogões equipados com coletores de chapas planas são cozinhas aquecidas por meio de coletores desse tipo. Existem modelos que têm dois ou três refletores planos, podem operar com óleo ou ar como fluido de trabalho e podem ter até duas panelas cada uma. Podem contar com sistema acumulador de calor. (JUNIOR, 2016.).

Tem como desvantagens a grande estrutura, peso, dificuldade de transporte e custos. As vantagens residem no fato da facilidade de uso e a possibilidade de poder cozinhar na sombra. Não é necessária sua reorientação; funcionam sem a intervenção do usuário, mantendo quente o alimento durante longo tempo; não produzem chama; são estáveis e não oferecem riscos de fogo ou queimaduras. Podem ser feitas de grandes tamanhos, para atender até instituições, hotéis, hospitais, etc. (DE ARAÚJO, 2015).

A Figura 7 mostra exemplos de cozinhas de cocção indireta ao ar livre, sendo uma cozinha com armazenamento térmico, instalada em uma escola primária do norte do Chile, e outra sem armazenamento térmico, instalada na UFCE.

Figura 7 – Cozinha solar. a) aquecimento indireto e com armazenamento térmico; b) aquecimento indireto e sem armazenamento térmico.



Fonte: Schwarzer e Silva, (2003 e 2007).

A principal função dos fornos/fogões solares para a população, atualmente, é a cocção de alimentos, cozimento e assamento. Podem-se considerar diversos fatores que afetam a aceitabilidade do cozimento solar, são eles: a disponibilidade de combustíveis tradicionais para cozinhar, o clima, as preferências culinárias, os fatores culturais, a capacidade técnica etc. (AALFS, 2015).

Embora existam inúmeras pesquisas sobre fornos e fogões solares no mundo, não há modelos específicos aceitos pela população, pois não existe uma padronização na fabricação dos projetos estudados e apresentados na literatura especializada.

2.3. Teoria do forno tipo caixa

As configurações dos fornos/fogões tipo caixa podem apresentar variações na quantidade de refletores externos, podendo variar de 0 a 4, com superfícies planas ou levemente côncavas. Assim a temperatura de trabalho deste tipo de forno pode atingir até 150°C, com aquecimento lento, mas de fácil operação. Este aspecto colabora para que o alimento mantenha-se aquecido por longo período de tempo sem a presença do operador.

Também é importante ressaltar que são mínimos os riscos de operação devida a não concentração de reflexos de luz solar e não apresentar riscos a geração de chama durante o cozimento dos alimentos.

Normalmente, os projetos tendem para utilização de materiais de baixo custo, de fácil transporte e de dimensões reduzidas.

Esse tipo de forno encontra ampla aplicação em todo mundo, principalmente, na Ásia e na África, destacando-se a Índia e a China, como sendo os países que mais tem investido em programas sociais que viabilizam a construção de fornos/fogões solares a baixo custo, para uma utilização significativa por parte de seu povo (ARAÚJO, 2015).

2.3.1. Princípios de aquecimento

Segundo Aalfs (2015) o propósito básico de um fogão de caixa solar é aquecer as coisas - cozinhar alimentos, purificar água e esterilizar instrumentos - para mencionar alguns.

Sendo possível com uma caixa solar graças ao seu aquecimento interno devido à radiação solar, ou seja, a energia sol. A radiação solar que incide sobre o forno, diretamente ou refletida, entram na caixa pela tampa de vidro ou outro material transparente, transformando-se em energia de calor que é absorvida por uma chapa preta (absorvedor) e pelo recipiente que contém o alimento (panela ou forma de bolo).

O aumento de temperatura interna do forno acontece até que o ganho de calor iguale-se as perdas de energia do mesmo. Assim, um forno tipo caixa terá uma temperatura interna mais elevada, quando ocorra uma incidência de raios solares, com adicional dos raios com auxílio de um refletor ou com um melhor isolamento térmico.

Este tópico e os dois seguintes serão baseados nas observações feitas por AALFS (2015), DE ARAÚJO (2015), ARAÚJO (2015) e SPINELLI (2016).

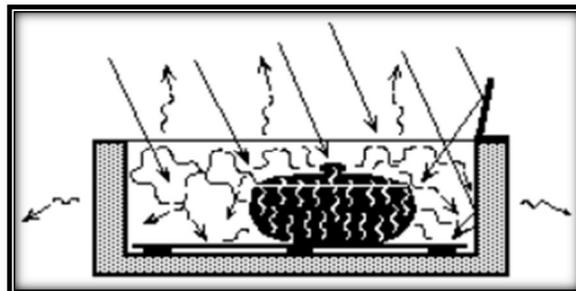
a) Ganho de Calor - Efeito estufa

Baseado no efeito estufa, que acontece em ambientes fechados devidos seu aquecimento interno devido à incidência de luz solar através de uma superfície transparente, como plástico ou vidro. Esta luz solar é formada por duas partes: luz do espectro visível e raios infravermelho. A luz visível passa tranquilamente pelo vidro, sendo absorvida pela panela e chapa absorvedora do forno e refletida para dentro do ambiente fechado.

A energia absorvida converte-se em energia de calor com comprimento de onda mais longa também é irradiada no interior do forno, como grande parte desta energia é radiante, com comprimento de onda maior, não consegue passar pelo vidro para o lado externo, ficando aprisionada no ambiente. Quanto à luz refletida também é absorvida dentro do forno ou passa de volta para fora do ambiente por não sofre alteração no comprimento de onda.

Portanto, o desempenho do fogão solar está diretamente associado ao calor absorvido pela chapa absorvedora e pela panela, que serão conduzidos para aquecer e cozinhar os alimentos. A Figura 8 mostra o efeito estufa.

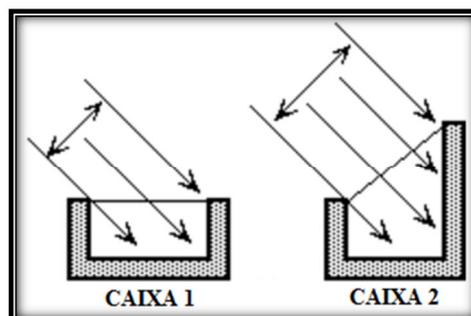
Figura 8 – Efeito estufa gerado no forno solar tipo caixa.



Fonte: Aalfs, 2015.

A orientação do vidro em relação aos raios solares influencia no ganho de calor. A Figura 9 mostra duas caixas, 1 e 2, onde a caixa 2 recebe a luz solar de forma mais direta que na caixa 1, favorecendo o aquecimento.

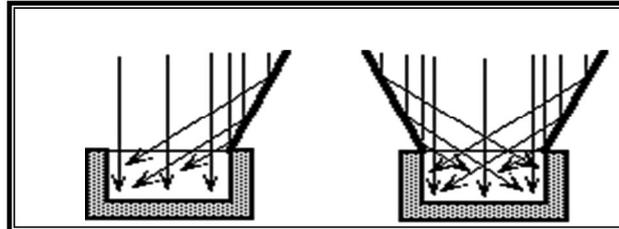
Figura 9 – Orientação do vidro em fornos solares.



Fonte: Aalfs, 2015.

A Figura 10 mostra a utilização de refletores simples ou múltiplos que ajudam a direcionar um adicional de luz solar através do vidro, na caixa solar. Também contribuindo para temperatura mais alta do forno solar devido à entrada extra de energia solar.

Figura 10 – Refletores para aumento da energia de entrada no forno.



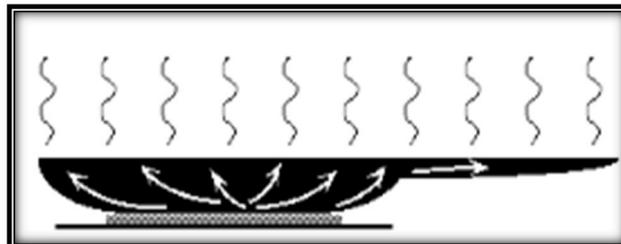
Fonte: Aalfs, 2015.

b) Perda de Calor

A perda de calor em um forno solar tipo caixa ocorre por condução, radiação e convecção.

A Figura 11 mostra um exemplo de transferência de calor onde o fogo transfere calor para o material da panela e para o material do cabo. Este tipo de transferência de calor ocorre no forno solar tipo caixa, causando perdas por condução pelo vidro, pelos isolamentos laterais e de fundo, pelo ar, entre outros.

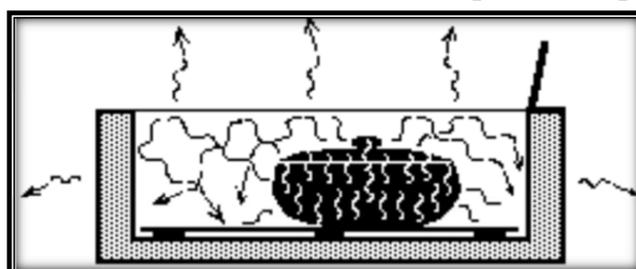
Figura 11 – Calor da panela transferido para o cabo.



Fonte: Aalfs, 2015.

Elevar o anteparo do fundo do forno é uma forma comum de proporcionar um espaço isolante e minimizar a perda de calor por condução entre ambos. A Figura 12 mostra a irradiação do calor.

Figura 12 – Calor irradiado em forno tipo caixa aquecido.

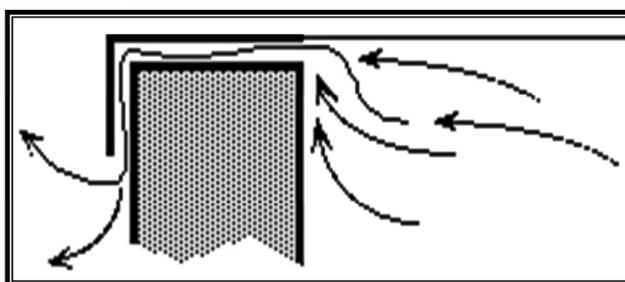


Fonte: Aalfs, 2015.

Com o ganho de calor no interior do forno, tanto as superfícies aquecidas e a panela passam a liberar calor, irradiando calor nas suas redondezas. Uma grande parte do calor irradiado fica retida dentro do forno solar porque é refletido pelo vidro e paredes, mas uma parte consegue atravessar o vidro (obstáculo translúcido) em destino ao ambiente externo, ocorrendo assim a perda de calor por radiação.

As moléculas de ar movem-se para fora e para dentro do forno pelas frestas, sofrendo convecção. As frestas são em decorrência de rachaduras ou imperfeições de construção, por isto devem ser minimizados na fase de projeto para reduzir este tipo de perda. A Figura 13 mostra a perda de calor.

Figura 13 – Ar aquecido escapando por frestas do forno solar.

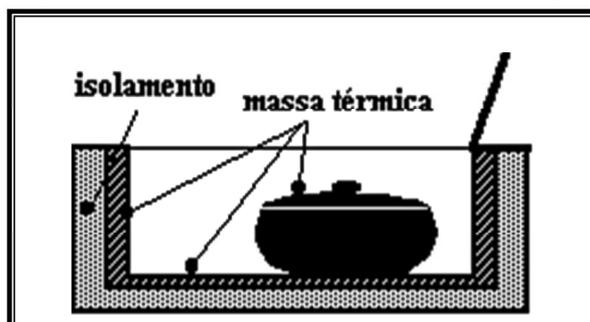


Fonte: Aalfs, 2015.

c) Armazenamento de Calor

Segundo Aalfs (2015), à medida que a densidade e o peso dos materiais dentro do invólucro isolado de um fogão de caixa solar aumentam, a capacidade da caixa para manter o calor aumenta. O interior de uma caixa, incluindo materiais pesados, como pedras, tijolos, panelas pesadas, água ou alimentos pesados, levará mais tempo a aquecer devido a essa capacidade adicional de armazenamento de calor. A energia entrante é armazenada como calor nesses materiais pesados, diminuindo o aquecimento do ar na caixa. Esses materiais densos, carregados com calor, irão irradiar esse calor dentro da caixa, mantendo-o quente durante um período mais longo no final do dia (Fig.14).

Figura 14 – Massa térmica dentro do fogão.



Fonte: Aalfs, 2015.

2.3.2. Projeto

Os fatores importantes para um projeto de um fogão solar tipo caixa são: Materiais, o tamanho da caixa, a razão entre a área de coleta e o volume da caixa, as dimensões e a quantidade de refletores.

a) Materiais

Para um projeto de um forno solar uma propriedade que deve ser considerada na seleção de materiais é a resistência à umidade. Pois a maioria dos alimentos utilizados em forno solar tipo caixa contém umidade, criando pressão de vapor que conduz umidade de dentro para fora do forno. Parte desta umidade pode ficar aprisionada dentro e, caso não tenha uma boa barreira interna, pode agredir os materiais de isolamento e estruturais.

Materiais da estrutura são usados para dar forma, devem ser duráveis e por serem materiais densos não servem como isolante térmico.

Assim deve-se utilizar outro material como isolante que envolva o espaço interno destinado para o assamento em todos os lados, exceto o lado da tampa. Existem vários materiais que podem ser utilizados como isolante, o importante que permita uma condução mínima de calor de dentro para fora do forno. Pois quanto menor a perda pelo isolamento maior será a temperatura de cozimento.

O material utilizado na parte superior deve ser transparente e encarar o sol para garantir aquecimento pelo “efeito estufa”, sendo o vidro e plásticos são os mais comuns. Dependendo do material o ganho de calor pode ser reduzido em 5-15%.

b) Tamanho da caixa

Segundo Aafsl (2015), um forno tipo caixa deve ser dimensionado em função dos seguintes fatores:

- O tamanho deve permitir a maior quantidade de alimentos comumente cozidos.
- Se a caixa precisa ser movida com frequência, não deve ser tão grande que esta tarefa é difícil.
- O design da caixa deve acomodar o utensílio de cozinha disponível ou comumente usado.

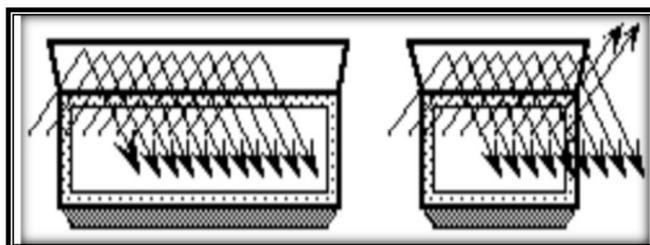
c) Razão entre a área de coleta e o volume da caixa

Aumentando a área de coleta de luz em relação à área de perda serão atingidas temperaturas mais altas de cozimentos. Como exemplo, ao comparar duas caixas com mesma área e dimensão de coleta de luz solar, a caixa com menor profundidade é a que apresentará a maior capacidade de reter calor, pois apresenta menor área de perda de calor.

d) Dimensões da caixa solar

Um forno tipo caixa solar sob o sol ao meio dia deve ter a sua dimensão mais longa no sentido leste/oeste. Assim faz melhor uso do refletor durante o assamento por várias horas, pois à medida que o sol se move no céu, resulta em temperatura mais consistente. Já em fornos/fogões quadrados ou de maior dimensão no sentido norte/sul uma maior parte do sol da manhã e entardecer é refletida para o chão, reduzindo a energia incidente no forno. A Figura 15 mostra o uso do refletor no intervalo de várias horas.

Figura 15 – Fornos solares mais largos captam mais luz solar no sentido Leste-Oeste.



Fonte: Aalfs, 2015.

e) Refletores

O uso de um ou mais refletores para direcionar luz solar adicional ao forno aumenta as temperaturas internas. Ainda que exista a possibilidade de utilizar o forno solar sem refletores em zonas equatoriais, onde a radiação solar é bastante uniforme e intenso, tais refletores contribuem, significativamente, no aumento da temperatura nas zonas temperadas do mundo contribuindo para ganhos na eficiência do forno.

2.4. Estado da Arte dos fornos solares

São apresentados alguns trabalhos publicados nas maiores revistas sobre a utilização de fornos/fogões solares nos últimos anos e alguns estudos balizadores de procedimentos de ensaios com tais protótipos solares.

Otte (2013) ressaltou que o uso insustentável da biomassa gerava sérios impactos negativos à saúde e o meio ambiente. Defendia o uso da energia solar para a cocção de alimentos, porém constatou que essa utilização ainda era ínfima, defendendo como medida principal a melhoria da eficiência de tais fogões. Apresentou ainda uma lista de fatores principais que exerciam influência na cocção de alimentos: econômico, social, cultural, ambiental, político e técnico. Concluiu que não bastam apenas os estudos se centrarem em alguns desses fatores. Considerou, portanto, que para o sucesso do uso de fogões solares para a cocção de alimentos, todos esses fatores deveriam ser levados em consideração.

Khatod, *et al.* (2013) abordaram a grande preocupação dos consumidores e gestores políticos da Índia com a energia para cocção de alimentos. Afirmaram que a maior parte da energia utilizada para esse fim vinha do uso da lenha, com efeitos danosos ao meio ambiente, principalmente a geração de gases de efeito estufa. No artigo, analisaram os desenvolvimentos ocorridos nas áreas rurais do setor culinário no contexto indiano. O trabalho foi realizado para diferentes combustíveis e fogões para cozinhar. Apresentaram vários modelos de fogões solares e abordaram algumas questões que impediam a massificação do uso de tais fogões pelo povo indiano. O status do setor de culinária na Índia e as iniciativas tomadas pelo governo da Índia também foram discutidas e apresentadas. Ressaltaram que o governo da Índia está executando vários programas para a promoção de energia solar e biogás como combustíveis de culinária em áreas rurais e conseguiu até certo ponto.

Cuce e Cuce (2013) apresentaram uma revisão completa da literatura disponível sobre fogões solares. A revisão permitiu uma comparação, discussão e avaliação mais factíveis das descobertas obtidas pelos pesquisadores, principalmente em relação aos parâmetros que afetam seus desempenhos. Abrangeu uma visão geral histórica da tecnologia da cocção solar, descrição detalhada de vários tipos de fogões solares, parâmetros geométricos que afetam o desempenho de fogões solares, como espelhos refletores concentradores, vidros, chapas absorvedoras, painéis, materiais para armazenamento de calor e isolamento térmico. Foram também analisadas, de forma significativa, a termodinâmica dos sistemas de cocção e uma quantificação da produção térmica de cada modelo. Os projetos complexos de fogões/fornos solares com e sem material de armazenamento de calor foram ilustrados e também apresentados métodos para reduzir as perdas térmicas dos sistemas de cozimento solar. Foi também abordada a viabilidade de tais protótipos, para a cocção de alimentos, levando-se em consideração os impactos. Foram também ressaltados uma análise de viabilidade, os impactos ambientais e o potencial futuro dos fogões solares.

Otte (2014) ressaltou que a África subsaariana caracterizava-se por ter um acesso insuficiente à modernização energética. Defendeu como possível solução o uso de energia

solar para satisfazer a demanda atual de energia. Enfatizou, porém, que até hoje tecnologias de energia solar têm mostrado um sucesso limitado e que os estudos encontrados na literatura sobre a utilização de fogões solares estão desconectados das reais necessidades dos usuários. Buscou contribuir para o debate investigando os padrões de energia, os perfis de cozinha das instituições públicas e a possível implementação de fogões solares no em Moçambique. Entrevistas foram realizadas com 12 instituições de saúde em Maputo e província de Sofala, em Moçambique. Concluiu que a cocção solar representava uma alternativa para superar a crise da energia na África subsaariana, mas não a única solução. Ressaltou que os fogões solares poderiam melhorar a situação de cozimento atual se combinados com armazenamento de calor, backup ou um sistema híbrido que garanta a confiabilidade também durante as horas da noite e dias chuvosos. Enfatizou, ainda, que os fogões solares deveriam atender a uma variedade de requisitos relacionados aos hábitos de cozimento, cronograma de rotina diária e desempenho que necessitariam ser considerados para aumentar a eficiência da utilização desses protótipos solares.

Yettou, *et al.* (2014) demonstraram que atualmente as fontes fósseis ainda dominam o setor doméstico, que é o maior setor de consumo de energia primária no mundo. Enfatizaram que a energia para cozinhar é considerada o uso final mais importante no setor, e sua demanda está aumentando continuamente. Defenderam o uso da energia solar como solução para diminuir o uso dessas fontes fósseis, porém concluíram que a sua disseminação e divulgação em larga escala continuavam limitadas. Relataram que uma série de tecnologias utilizando energia solar existe em todo o mundo, mas muito poucas estão realmente em uso. Abordaram os recentes avanços nos desenvolvimentos e a análise de desempenho das tecnologias de um fogão solar. A revisão metódica sobre essas tecnologias forneceu uma visão geral sobre os fogões solares existentes desenvolvidos nas últimas duas décadas, especialmente os principais componentes de geometria que afetam seus desempenhos. Abordaram também parâmetros de desempenho térmico, utilizados para testar e avaliar o desempenho da análise solar de cozimento, principalmente em relação ao tempo de cozimento dos alimentos testados. Apresentaram também um balanço energético para fornos solares. O desempenho dos mecanismos de rastreamento para acompanhamento do movimento aparente do sol pelos fornos também foi discutido. Ressaltaram ainda o potencial de mitigação de CO₂ pelo uso desses sistemas alternativos de cocção de alimentos.

Harmim, *et al.* (2014) apresentaram uma série de trabalhos de pesquisa e estudos utilizando energia solar no Saara argelino. A revisão foi realizada com o objetivo mostrar os vários modelos de fogões solares tipo caixa estudados pela equipe de pesquisa de aquecimento solar na Unidade de Pesquisa em Energias Renováveis do Sahara Argelino. Foram comparados um fogão solar tipo caixa com chapa de absorção inclinada, um fogão

solar de dupla exposição e um novo fogão de caixa solar não rastreador, equipado com um concentrador parabólico composto assimétrico fixo. Demonstraram que o último, e mais complexo modelo, poderia ser fixado em uma parede do prédio sul com sua abertura traseira na cozinha; o que facilitaria seu uso, não exigindo do usuário do fogão solar sua exposição aos raios solares. Concluíram que essa possibilidade de cocção à sombra pelo usuário traria uma maior viabilidade de uso desses dispositivos solares, tornando-os socialmente aceitáveis.

Otte (2014) definiu que uma cozinha solar geralmente pode ser descrita como uma maneira de usar a energia do sol para cozinhar. Afirmou que apesar de seus múltiplos benefícios como uma fonte de energia limpa, modular e simples, a implementação de fogões solares não é tão generalizada como seria de esperar. Ressaltou que na literatura, argumenta-se que os fogões solares não são adotados porque são, frequentemente, considerados como perturbadores da cultura de cada povo. Este artigo teve como principal objetivo abrir um novo olhar sobre a dinâmica cultural da culinária, mostrando a aceitação social dos fogões solares. Seis casos foram apresentados em dois países, Burkina Faso e Índia, onde um tipo particular de fogão solar (refletores Scheffler) foi instalado entre padarias, produtores de manteiga de castanha de karité e cozinhas a vapor. Esses casos demonstraram como os fatores culturais podem ser adotados ou limitativos em diferentes contextos. Concluiu que os fogões solares são implementados com sucesso onde eles se adequam a fatores culturais subjacentes. O estudo concluiu também que ao implementar fogões solares como parte de um quadro sociocultural existente, os fogões solares afastam-se da imagem de uma mera tecnologia estrangeira para uma parte integrada da sociedade que o utilizará.

Geddam, *et al.* (2015) defenderam que nos últimos anos houve um considerável interesse no projeto, desenvolvimento e teste de vários tipos de fornos e fogões solares, principalmente, do tipo caixa, e concentrador. Ressaltaram que os fornos/fogões tipo caixa são os mais disseminados no mundo, principalmente, pela sua fácil operacionalidade e simples processos de fabricação e montagem. Apesar dessas características tal fogão pode deixar de cozinhar ou levar mais tempo para cozinhar uma carga significativa de alimentos. Defenderam que para analisar o desempenho térmico de um fogão solar de tipo caixa de uma forma melhor qualitativa, é necessário ter o conhecimento dos parâmetros de projeto, eficiência óptica e capacidade de calor do fogão para fornecer uma base para a seleção de materiais adequados para a sua fabricação. Descreveram um estudo para procedimentos de testes para determinar esses parâmetros térmicos usando os dados obtidos experimentalmente para variadas carga de água. Fizeram uma comparação entre os dados experimentais e dados de simulação e concluíram que houve boa compatibilidade entre os dois métodos utilizados.

Kumaresan, *et al.* (2016) apresentaram uma avaliação de desempenho de uma nova unidade de cozimento de parede dupla, apropriada para uma aplicação de cocção solar

indireta integrada com sistema de armazenamento de energia térmica. A configuração experimental consistia em uma unidade de cocção, um tanque de armazenamento e uma bomba de deslocamento positivo. Therminol 55 e D-Mannitol foram utilizados como fluido de transferência de calor (HTF) e meio de armazenamento, respectivamente. Durante a experiência de cozimento, a temperatura máxima atingida pelo óleo de oliva na unidade foi de 152°C dentro de uma duração de 15 min, que era comparativamente menor do que o tempo gasto pelo fogão GLP. Um balanço de energia para a unidade de cozimento desenvolvida foi proposto. Um experimento também foi conduzido para avaliar a perda média de calor encontrada no sistema sob condição de carga e verificou-se que houve perda de calor considerável no circuito de fluxo durante o processo de descarga. Concluíram que os resultados do presente estudo seriam muito úteis para o projeto de unidades de cozimento solar indoor.

Jebsingh e Herbert (2016) ressaltaram que a energia solar é uma das formas limpa e livremente disponíveis de energia renovável. Demonstraram que muitas tecnologias foram desenvolvidas na Índia para extrair energia de diversas fontes de energia renováveis, mas a máxima extração de energia térmica da energia solar foi o desafio mais promissor. Enfocaram o desempenho e a eficiência de um concentrador cilindro parabólico solar. Também analisaram as aplicações pertinentes da energia solar, como sistema de aquecimento de ar, dessalinização, refrigeração, aquecimento industrial e usinas de energia. Priorizou neste estudo a utilização dos concentradores, principalmente o cilindro-parabólico.

Regattieri, *et al.* (2016) defenderam que as instalações de culinária estavam entre as commodities mais necessárias para as pessoas que vivem e experimentam emergências. Afirmaram que dentro do campo humanitário a gestão de resíduos é um dos problemas mais críticos. Apresentaram um fogão solar portátil de fácil utilização, fabricado a partir de resíduos de embalagens de papelão reciclado. O dispositivo desenvolvido está totalmente integrado a uma caixa de cozinha, tornando-se um sistema de cozinha completamente independente que não requer fontes externas de energia tradicionais. O fogão permitia o aquecimento de água para cozimento de alimentos e purificação de água bruta, de rios e lagos. Projetaram, fabricaram e testaram vários protótipos de fogões solares para definir a melhor geometria e maior eficiência. Concluíram que os resultados em testes de laboratório foram encorajadores e, que num futuro próximo, vários protótipos estarão em funcionamento principalmente em zonas rurais.

Bauer (2016) defendeu que a tecnologia de cozimento solar representa uma solução para a pobreza global e a degradação ambiental, mas relativamente pouca pesquisa existe sobre o impacto do uso do forno solar no consumo de combustível de biomassa. Avaliou o uso do forno solar e o consumo de madeira no norte da Nicarágua durante as estações

chuvosas e secas. Ressaltou que os proprietários de forno solar relataram uso em 79% dos dias durante a estação seca e 41% dos dias durante a estação chuvosa. A comparação com registros de temperatura do forno confirmou o uso em 50% dos dias durante a estação seca e 16% dos dias durante a estação chuvosa. Porém enfatizou que as medidas de consumo de madeira não mostraram diferença estatisticamente significativa entre os dias com o uso do forno solar e os dias sem. Concluiu que os fornos solares não foram utilizados para substituírem a queima da lenha, mas apenas como uma energia complementar. Defendeu a necessidade de um estudo mais aprofundado do consumo de madeira e da contribuição da energia solar na substituição da lenha para a cocção.

Iessa, *et al.* (2017) relataram que os fogões solares têm sido testados e estudados em várias configurações, mas apesar dos benefícios previstos, redução de desmatamento, benefícios econômicos e melhoria da saúde, os resultados foram modestos, mesmo para o mais eficiente. Realizaram uma revisão crítica da literatura sobre cocção solar (CS). A revisão da literatura abrangeu 32 artigos sobre fogões solares na África Subsaariana, onde a maioria dos projetos CS podiam ser encontrados. Enfatizaram a imperiosidade de que questões como necessidades locais e práticas existentes de culinária, deveriam ser fatores na análise de viabilidade do uso de fogões solares, e que tais fatores não estariam presentes na maioria dos estudos analisados. Concluíram que os métodos etnográficos podem fornecer evidências novas e fundamentadas e permitir um maior foco nas necessidades locais. Ressaltaram que essas abordagens podem fornecer uma base consistente para analisar o papel da cocção solar na obtenção de benefícios de desenvolvimento sustentáveis e de longo prazo.

Zubi, *et al.* (2017) mostraram que cerca de 1,2 bilhão de pessoas no mundo não tem acesso à eletricidade, enquanto muitas outras têm oferta de baixa qualidade. Afirmaram que a pobreza de energia doméstica era mais grave nas áreas rurais do sul da Ásia, do Sudeste Asiático e da África Subsaariana. Mostraram que as necessidades básicas de energia, para a cocção de alimentos e iluminação, eram supridas pela utilização de biomassa tradicional e combustíveis fósseis. Afirmaram que esta situação dificultava o crescimento econômico e o desenvolvimento social e implicava em um estresse severo nos recursos e no meio ambiente. Defenderam que a energia fotovoltaica poderia desempenhar um papel importante na superação da pobreza energética doméstica, especialmente porque a maioria das regiões afetadas apresentam excelentes índices de radiação solar. Apresentaram uma solução sob a forma de um sistema de casa solar com bateria de íon de lítio, em combinação com um fogão solar e lâmpadas de LED para cobrir as necessidades de cozimento e iluminação para uma família. Um layout do sistema de casa solar foi fornecido e avaliado em termos de custo e benefícios em contraste com as práticas existentes para cozinhar e iluminar em regiões em

desenvolvimento. Desta forma, os aspectos evolutivos foram levados em consideração para determinar o retorno do investimento do sistema solar doméstico ao longo do tempo.

Nkhonjera, *et al.* (2017) discutiram sobre unidades de armazenamento de energia térmica, materiais de armazenamento de calor e desempenho de cozimento de fogões solares com armazenamento de calor apresentados pela literatura. Mostraram que os recipientes retangulares e cilíndricos são amplamente utilizados nos dispositivos de armazenamento de calor dos fogões solares. E que a geometria das unidades de armazenamento dependia do modo de transporte de calor para o meio de armazenamento e para o recipiente de cozimento. Descreveram que os óleos e os materiais de mudança de fase orgânica dominavam nas unidades de armazenamento de calor sensível e latente, respectivamente. A inclusão de material altamente térmico no meio de armazenamento era a principal técnica para melhorar a condutividade térmica efetiva. Mostraram que não havia diferença significativa entre o poder de cozimento de fogões equipados com unidades de armazenamento de calor sensível e latente. Demonstraram que os parâmetros de design dos fogões, bem como a difusividade térmica do meio de armazenamento influenciaram muito o poder de cocção. Por outro lado, a menor difusividade térmica do meio de armazenamento aumentou a capacidade de cozimento em fogões com armazenamento de calor sensível, mas diminuiu o poder de cozedura em fogões com armazenamento de calor latente. Finalmente, demonstraram que a busca pelo desenvolvimento de unidades de armazenamento térmico de alta temperatura e a otimização da geometria, bem como as características de transferência de calor das unidades de armazenamento de energia térmica, continuam sendo as áreas potenciais de pesquisa em armazenamento de calor para cozinhar.

Kumar, *et al.* (2017) apresentaram um coletor Scheffler, que é um concentrador de radiação solar de foco fixo que tem capacidade para aumentar a temperatura do receptor até 200° C. Atualmente está sendo amplamente utilizado para cozinhar alimentos e gerar energia na central térmica solar. Apresentaram uma revisão completa do coletor Scheffler. Na primeira parte analisaram o desenho completo de um coletor Scheffler em relação ao equinócio selecionando uma parte lateral específica de um paraboloide. Na segunda parte fizeram uma análise energética e exergética do coletor Scheffler, e finalmente abordaram as várias aplicações do coletor Scheffler e seus recentes desenvolvimentos.

Herez, *et al.*, em artigo aprovado para ser publicado em 2018, apresentaram uma revisão sobre fogões solares que incluiu uma abordagem sobre os parâmetros que influenciam o desempenho de um fogão solar e propuseram um balanço de energia para a determinação da eficiência dos fogões solares no processo de cocção de alimentos, com ênfase nas energias absorvida perdida e útil. Além disso, um estudo econômico foi realizado para diferentes cenários no Líbano (casa, hotel, restaurante e lanchonete) e para várias categorias de fogões

solares (fogão de caixa solar, tipo painel solar, fogão solar parabólico e fogão solar de tubo evacuado com armazenamento térmico). A ideia principal do estudo econômico foi estimar o período de recuperação do investimento para cada fogão solar em cada cenário estudado. Demonstraram que a maior dependência do fogão solar diminuía o período de recuperação do investimento. Realizaram uma análise ambiental para calcular a quantidade de redução nas emissões de dióxido de carbono nos diferentes cenários. Comprovaram que a utilização de fogões solares produzia a redução na quantidade de emissão de dióxido de carbono para todos os cenários analisados, casa, restaurante, hotel e lanchonete.

2.5. Os fornos/fogões solares do LMHES

O cozimento de alimentos utilizando a energia solar é uma das principais linhas de pesquisa feitas no LMHES/UFRN, com vários trabalhos científicos publicados em congressos nacionais e internacionais.

A seguir listamos alguns trabalhos realizados no LMHES nesta mesma linha de pesquisa ao longo de mais de trinta anos.

No Acervo técnico do LMHES/UFRN há o registro do primeiro forno solar em madeira com quatro seguimentos de inox unidos constituindo a superfície refletora que concentrava a radiação solar e a enviava para o recinto de assamento. Construído em 1986, os ensaios demonstraram a baixa eficiência do forno em função de um nível de absorvidade do inox muito maior que o espelho, apesar de sua boa refletividade. A Figura 16 mostra o primeiro forno solar fabricado na UFRN.

Figura 16 – Primeiro Forno solar fabricado na UFRN.

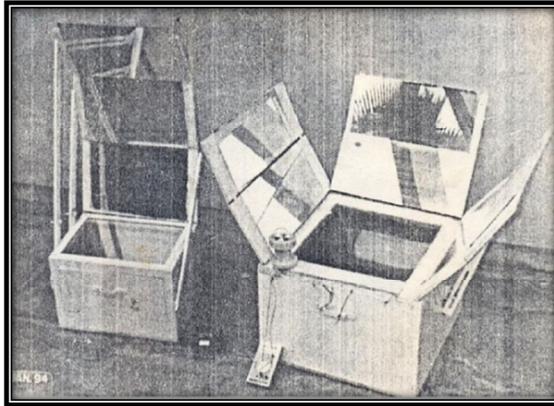


Fonte: Acervo técnico do LMHES/UFRN (2016).

Ainda no Acervo Técnico do LMHES/UFRN, há o registro da construção e estudo de dois fornos solares de madeira com superfícies refletoras de espelhos planos. O primeiro

forno era quadrado tendo em três de seus lados dois segmentos de espelhos e o outro era também quadrado com três segmentos de espelho, com variação de ângulo manual. Os ensaios mostraram a viabilidade dos fornos construídos pela obtenção de níveis de temperatura nas superfícies absorvedoras superiores a 100°C , alcançando máximas de 160°C para o forno 1 e 133°C no forno 2. A Figura 17 mostra os dois fornos solares fabricados.

Figura 17 – Fornos solares fabricados na UFRN.



Fonte: Acervo técnico do LMHES/UFRN (2016).

Melo (2008) fabricou e estudou um forno solar a partir de uma sucata de fogão convencional a gás. O forno do fogão convencional foi utilizado como recinto de cozimento onde o absorvedor (panela) do forno solar ficou localizado, sendo recoberto por uma lâmina de vidro para a geração do efeito estufa e tendo fundos e laterais isolados por um compósito à base de gesso e isopor. Segmentos de espelhos planos foram colocados nas laterais do forno para prover a concentração da radiação e uma parábola refletora foi introduzida no recinto de cozimento para o aproveitamento da radiação refletida incidente no interior do forno. Foram demonstradas as viabilidades térmicas, econômica e de materiais do fogão em estudo. A temperatura interna média do absorvedor ficou em torno de 150°C e a temperatura interna do forno em torno de 120°C . A Figura 18 mostra o forno estudado.

Figura 18 – Forno solar fabricado a partir de uma sucata de fogão convencional a gás.



Fonte: Melo, 2008.

Souza, *et al.* (2009) construíram um modelo de forno solar destinado a assar alimentos, utilizando um material compósito, que apresenta em sua composição o EPS triturado, um material reciclado. O forno proposto é um protótipo solar de média concentração destinado ao uso doméstico em zonas rurais e urbanas, no período de 9:00 às 16:00 h. Destina-se, principalmente, a operação de assar alimentos, tais como pães, bolos, pizzas entre outros. A principal inovação do trabalho foi a utilização de um material compósito a base de gesso, EPS triturado, cimento, areia e água para a construção da caixa do forno solar. Foram assados vários alimentos, dentre eles, um bolo que se encontra mostrado na Fig. 19, demonstrando-se a eficiência do forno proposto e sua consequente viabilidade de utilização.

Figura 19 – Forno solar estudado por Souza.



Fonte: Souza, 2009.

Souza, *et al.* (2009) apresentaram forno solar de baixo custo fabricado com blocos confeccionados em material compósito, a partir de EPS em pó, gesso e cimento. O forno proposto tinha como superfície interna no fundo uma parábola moldada por processo anual e revestida com espelhos de pequenas dimensões para um aumento da sua temperatura interna. Os blocos que constituem o fogão apresentavam baixa condutividade térmica, eram leves e apresentavam boa resistência mecânica. Acima da caixa do forno localizava-se uma parábola refletora para concentrar os raios incidentes, enviando-os ao interior do forno. O forno solar proposto mostrou-se viável para produzir o assamento de pizzas, bolos e lasanhas, podendo trazer economia e minimizar problemas de ataque ao equilíbrio ecológico, principalmente no que diz respeito ao desmatamento para o uso de lenha. O custo de fabricação do forno proposto ficou em torno de 100 reais, estando abaixo da faixa média para tais protótipos entre 150 e 300 reais, para fins que não visam lucro. A Figura 20 mostra o forno tipo caixa.

Figura 20 – Forno solar tipo caixa fabricado em material compósito.



Fonte: Souza *et al.*, 2009.

Gomes (2009) fabricou e estudou sobre um forno solar alternativo de baixo custo para ser utilizado nas operações de assar e cozinhar, construído a partir de uma sucata de pneu. Foram estudadas três configurações, com dois tipos de parábolas refletoras. Uma confeccionada a partir de uma tampa de proteção de uma sucata de ventilador e outra a partir de uma urupema (peneira usada para comidas de milho). A estrutura de sustentação do forno solar, com os movimentos necessários ao acompanhamento do movimento aparente do sol, foi confeccionada utilizando uma sucata de cadeira giratória. Obteve-se uma temperatura máxima no absorvedor em torno de 160° e interna em torno de 120°C . Demonstrou-se a eficiência do forno para as operações de cozimento e assamento de alimentos, com maior viabilidade para o assamento. A Figura 21 demonstra o forno solar estudado por Gomes.

Figura 21 – Forno solar estudado por Gomes.

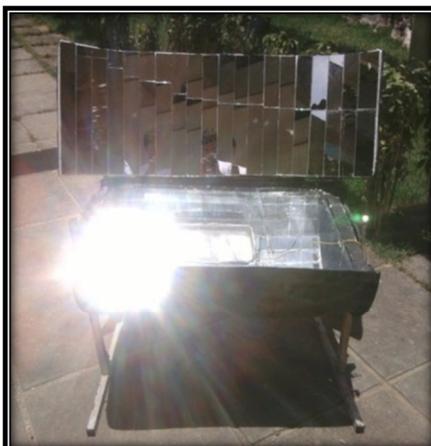


Fonte: Gomes, 2009.

Souza, *et al.*(2011a) apresentaram um modelo de um forno solar destinado a assar alimentos, construído a partir de uma sucata de tambor de polietileno utilizada para depósito de lixo ou água. Por apresentar perfil cilindro-parabólico o foco da superfície refletora é linear, permitindo a utilização de até três painéis no seu interior. Uma inovação do projeto foi a construção de um novo perfil parabólico de sistema refletor, a partir de um segmento do próprio tambor, para direcionar os raios solares para o interior do forno. Este se mostrou viável para a operação de assar alimentos, tais como pães, bolos, pizzas, lasanhas, entre outros

no período de 9:00 às 14:00 horas. A Figura 22 mostra o forno solar fabricado a partir de uma sucata de tambor de polietileno.

Figura 22 – Forno solar fabricado a partir de uma sucata de tambor de polietileno.



Fonte: Souza *et al.*, 2011a.

Souza, *et al.* (2011b) apresentaram forno solar destinado a assar alimentos, construído a partir de uma caixa térmica de EPS. A principal inovação do trabalho foi à utilização da caixa térmica de isopor, largamente disponível no mercado, de baixo custo e com uma estrutura já definida e construída, evitando-se a confecção de molde para a obtenção da caixa. Ressalte-se que a caixa de isopor já é um isolante térmico de grande eficiência, pela condutividade do EPS corresponder a $0,03 \text{ W/m}^\circ\text{C}$. Os tempos de assamento para pizza e lasanha mostraram-se competitivos com outros modelos já ensaiados e mostrados na literatura solar para cocção de alimentos. A Figura 23 mostra o forno solar fabricado a partir de uma caixa de EPS.

Figura 23 – Forno solar fabricado a partir de uma caixa de EPS.



Fonte: Souza *et al.*, 2011b.

Varela (2013), em sua dissertação de mestrado, estudou um forno solar destinado a assar alimentos, no período de 9:00 às 14:00 horas, construído a partir da utilização de três pneus usados. A principal inovação do trabalho foi a utilização de pneus usados que passam

por um processo de viramento para propiciar um aumento do volume do forno, facilitar a operação de fixação de espelhos no seu interior e proporcionar um melhor isolamento térmico, no caso uma camada de ar confinado. Outra inovação foi o projeto e a fabricação de um novo perfil de sistema refletor para direcionar os raios solares para o interior do forno. Foram testados os assamentos para pizza e lasanha, obtendo-se tempos competitivos com outros modelos de fornos/fogões solares testados no mundo. A Figura 24 mostra o forno estudado por Varela.

Figura 24 – Forno solar estudado por Varela.



Fonte: Varela, 2013.

Sousa, *et al.* (2013) apresentaram um forno solar de baixo custo fabricado com blocos de material compósito, a partir de EPS em pó, gesso e cimento. Acima da caixa do forno localizava-se uma superfície refletora para concentrar os raios incidentes, enviando-os ao seu interior. Os blocos que constituíam o forno apresentavam baixa condutividade térmica, eram leves e apresentavam boa resistência mecânica. Foram realizados ensaios para assamento de pizzas, bolos, empanados e quibes, com boa eficiência. O bolo foi assado em apenas cinquenta minutos. O forno proposto pode ajudar a população mais carente de nossa região, podendo constituir-se numa opção de geração de emprego e renda. A Figura 25 mostra o forno solar fabricado em material compósito.

Figura 25 – Forno solar fabricado a partir de chapas de material compósito de baixa condutividade térmica.



Fonte: Souza *et al.*, 2013.

Batista (2013) apresentou dissertação de Mestrado no PPGEM – UFRN sobre um modelo de um forno solar destinado a assar alimentos, construído a partir de um tambor de polietileno utilizado para depósito de lixo ou água. O tambor foi cortado ao meio e as metades foram encaixadas e a interna revestida com uma chapa metálica, que se constituiu no absorvedor. O forno apresentava significativas áreas e volume, podendo propiciar o assamento de dois alimentos simultâneos. Uma lâmina de espelho colocada numa estrutura metálica acima do forno direcionava e concentrava os raios solares no interior do recinto de assamento. Foram realizados ensaios para assamento de pizzas, bolos, pães de queijo, empanados, cujos resultados demonstraram a eficiência do forno proposto para o fim desejado. A Figura 26 mostra o forno solar estudado por Batista.

Figura 26 – Forno solar estudado por Batista.



Fonte: Batista, 2013.

Souza, *et al.* (2014a) apresentaram os processos de ensaios e análise de desempenho de um forno alternativo de baixo custo que utiliza energia proveniente do sol para preparo de alimentos. O forno solar foi confeccionado em forma de caixa, sendo sua tampa de vidro e suas paredes constituídas de placas de PVC. Acima da caixa do forno estava localizada uma superfície refletora para concentrar os raios incidentes, enviando-os ao interior do forno, aumentando sua eficiência. Foram realizados ensaios para assamento pizzas, bolos, pães de queijo, empanados, cujos resultados demonstraram a eficiência do forno proposto para o fim desejado. A Figura 27 mostra o forno solar fabricado com placas de PVC utilizadas em forro de ambientes.

Figura 27 – Forno solar fabricado com chapas de PVC utilizadas em forro de ambientes.



Fonte: Souza *et al.*, 2014a.

Souza, *et al.* (2014b) apresentou forno solar de baixo custo fabricado com restos de chapas de gesso acartonado utilizadas na construção civil. Apresentou os processos de fabricação e montagem do forno, que tinha como principal característica o baixo custo de produção. Acima da caixa do forno está localizada uma superfície refletora para concentrar os raios incidentes, enviando-os ao interior do forno. As chapas de gesso que constituem o forno apresentavam baixa condutividade térmica, eram leves e apresentavam boa resistência mecânica. Foram testadas duas configurações no interior do forno: configuração I – laterais e fundo recobertos com chapa metálica e pintadas de preto e Configuração II – laterais recobertas com espelho. Foram apresentados resultados de ensaios de assamento de alguns alimentos, que demonstraram a viabilidade de utilização do forno, cuja utilização pode contribuir para minimizar o uso da lenha, que traz prejuízos significativos ao meio ambiente. O forno proposto pode ajudar a população mais carente de nossa região, podendo constituir-se numa opção de geração de emprego e renda. A Figura 28 mostra o forno estudado.

Figura 28 – Forno solar fabricado com chapas de gesso acartonado.



Fonte: Souza *et al.*, 2014b.

Gomes (2015), em sua Tese de Doutorado do PPGEM, estudou um forno solar destinado a assar alimentos, construído a partir de resíduos de *Medium Density Fiberboard* (MDF). A principal inovação do trabalho foi a fabricação do forno utilizando resíduos de MDF da indústria moveleira. O MDF, por ser um derivado da madeira, apresenta uma baixa condutividade térmica, se mostrando um bom isolante térmico, propriedade importante para a minimização das perdas térmicas, e se apresenta como um material sustentável. Os resultados de ensaios de assamento para vários alimentos demonstraram a viabilidade do forno fabricado para esse fim. A Figura 29 mostra o forno solar estudado.

Figura 29 – Forno solar estudado por Gomes.



Fonte: Gomes, 2015.

Araújo (2015), em sua Dissertação de Mestrado do PPGEM, apresentou um estudo comparativo da capacidade de assamento de dois fornos solares tipo caixa, fabricados a partir de um caixote para transporte de equipamentos. Os dois fornos tinham configurações internas diferentes, predominando o efeito estufa ou a concentração da radiação solar incidente. As principais características dos fornos fabricados eram seu baixo custo, o reaproveitamento de materiais, os fáceis processos de fabricação e montagem, a simples operacionalidade e a capacidade de assamento de vários alimentos simultaneamente. A fabricação e a operacionalidade dos fornos estudados podem ser repassadas para pessoas de quaisquer níveis sociais e intelectuais. Foi demonstrada a viabilidade de utilização dos dois fornos para produzir o assamento dos alimentos testados, comprovando-se a supremacia do forno espelhado. Os resultados obtidos para as duas configurações testadas foram competitivos até mesmo com o forno convencional a gás. Produziu-se o assamento de três bolos de 750g cada em apenas 80 minutos. A Figura 30 mostra o forno solar estudado por Araújo.

Figura 30 – Forno solar estudado por Araújo.



Fonte: Araújo, 2015.

De Araújo (2015), em sua Dissertação de Mestrado estudou um forno solar fabricado a partir de chapas de MDF destinado ao assamento de alimentos, tais como pizzas, bolos, pães, hambúrgueres e outros. Foram apresentados os processos de fabricação e montagem de tal forno, que tem baixo custo de fabricação. A principal característica do forno proposto é que

pode ser transportado para quaisquer localidades, pois fica assentado em um dispositivo de transporte. Foram realizados ensaios para o assamento de vários alimentos e seus resultados comparados com os vários tipos de fornos solares já existentes mostrados pela literatura especializada. Foram analisadas as viabilidades térmica e econômica de tal forno, que pode proporcionar a socialização do uso da energia solar por comunidades carentes, podendo se tornar uma fonte de geração de emprego e renda. A Figura 31 mostra o forno solar estudado por Araújo.

Figura 31 – Forno solar estudado por De Araújo.



Fonte: Araújo, 2015.

Spinelli (2016), em sua Dissertação de Mestrado, estudou um forno solar fabricado a partir de chapas de MDF com capacidade de assar vários alimentos simultaneamente. Foram realizados ensaios para o assamento de vários alimentos, com variadas cargas. Em um desses ensaios foi produzido o assamento de oito bolos em apenas oitenta minutos e seus resultados comparados com os vários tipos de fornos solares já existentes mostrados pela literatura especializada. Foram analisadas a viabilidade térmica, onde foram alcançadas temperaturas máximas de 140,5°C, e econômica de tal forno, que pode proporcionar a socialização do uso da energia solar por comunidades carentes, podendo se tornar uma fonte de geração de emprego e renda. A Figura 32 mostra o forno estudado por Spinelli.

Figura 32 – Forno solar estudado por Spinelli.



Fonte: Spinelli, 2016.

CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados às etapas e processos de fabricação e montagem do forno solar proposto, os procedimentos de seus ensaios e seu balanço de energia.

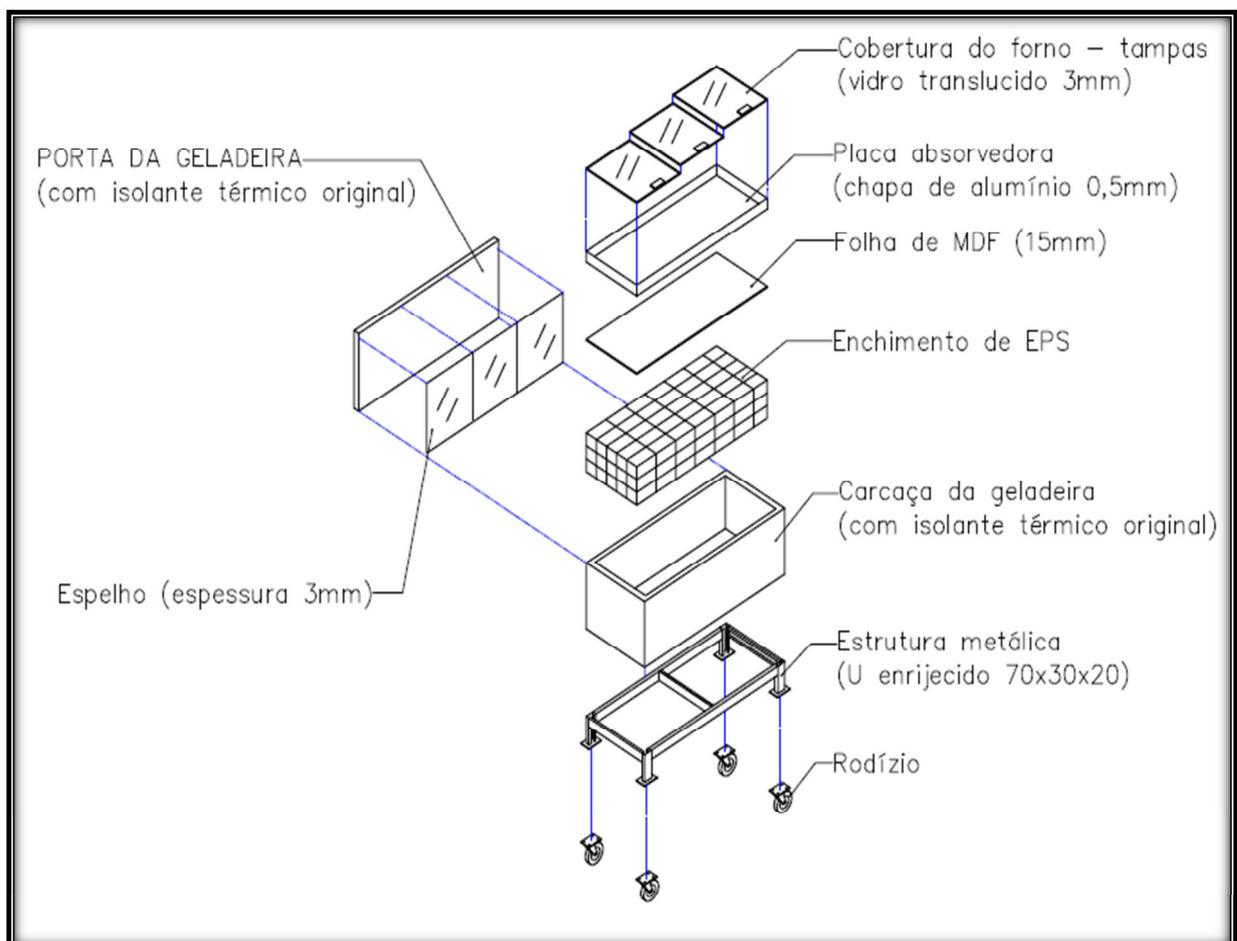
3.1. Processos de fabricação e montagem do forno proposto

A construção do forno solar proposto foi a partir de uma geladeira em desuso, que recebeu alguns elementos para transformar em forno.

Observando a estrutura de uma geladeira Consul Praticce 30 sem uso, com dimensões externas de 144x60x57cm e volume interno útil de 261 litros, verificou-se presença de condições dimensionais e estruturais para serem aproveitadas na fabricação de um forno solar tipo caixa, como o isolamento térmico próprio e a porta que possibilitava utilizar como uma superfície refletora com o emprego de espelhos.

A Figura 33 mostra a vista explodida do forno proposto.

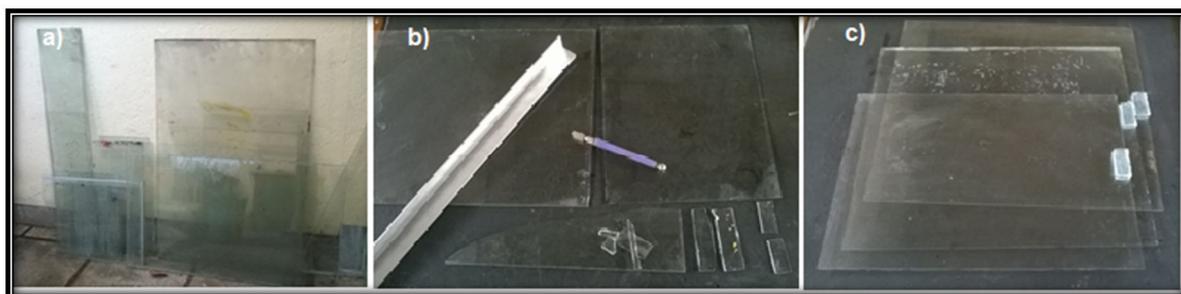
Figura 33 – Vista explodida do forno proposto.



Os processos de fabricação e montagem do forno solar proposto compreenderam as seguintes etapas:

- a) Retirada de partes mecânicas e elétricas: Como a geladeira já estava sem o motor, foram retiradas as partes mecânica e elétrica remanescentes para reduzir o peso e por serem inúteis a este projeto;
- b) Retirada do acabamento interno: todas as prateleiras e acabamento interno, tanto do compartimento principal, quanto da porta foram removidos sem alterar o material do isolamento térmico da geladeira;
- c) Preenchimento do compartimento principal: foi utilizado EPS para preencher e reduzir o volume interno da geladeira, deixando apenas o volume necessário para cozimento dos alimentos. O EPS além de servir de enchimento do espaço desnecessário, também serviu como isolamento térmico adicional ao forno;
- d) Apoio para chapa absorvedora: Como forma de servir de apoio para chapa absorvedora e evitar seu contato direto desta com o EPS, foi colocada uma chapa de MDF de 15mm de espessura, deixando uma distância 84mm até a borda da geladeira, em toda sua extensão, definindo-se a altura útil do compartimento de cozimento do forno;
- e) Chapa absorvedora: Utilizou-se uma chapa de alumínio adquirida por doação, com espessura de 0,5mm, que foi fixada sobre a chapa de MDF com pregos, configurando o fundo do compartimento de cozimento;
- f) Superfícies laterais internas: foram fixadas, com adesivo silicone, tiras da mesma chapa utilizada no item anterior, para recobrir o isolamento lateral da geladeira;
- g) Pintura interna: Todas as chapas de alumínio foram pintadas na cor preta fosca para auxiliar na absorção de calor;
- h) Cobertura do forno: Para facilitar o manuseio e reduzir as perdas de calor durante a abertura do forno, o vidro de cobertura foi dividido em três segmentos, com espessura de 3mm, sendo duas com 500x580mm e outra com 390x580mm. A Figura 34 mostra os vidros utilizados, os seguimentos cortados e as tampas prontas;

Figura 34 – Cobertura do forno: a) vidros reutilizados, b) corte das tampas e alças, c) tampas prontas com alças.



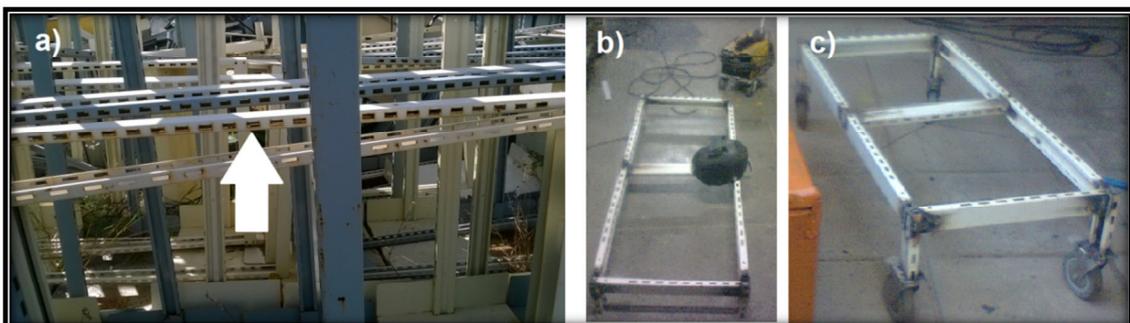
- i) Superfície refletora do forno: A porta da geladeira foi transformada em superfície refletora, que com a retirada do acabamento, deixando aparente o isolamento térmico da porta, para receber os espelhos. A porta disponibilizou uma área de $0,66\text{m}^2$;
- j) Colagem dos espelhos: Os espelhos foram adquiridos de materiais em desuso, do próprio LMHES, e utilizados três segmentos, de espessura 3mm, fixados com adesivo de silicone sobre o isolamento térmico original da porta da geladeira. Dois segmentos medindo $550\times 500\text{mm}$ e outro de $700\times 550\text{mm}$. A Figura 35 mostram os espelhos durante o processo de colagem;

Figura 35 – Colagem dos espelhos na porta da geladeira.



- k) Base com rodízios: Para proporcionar altura ergonômica e facilidade no manuseio e do forno, foi confeccionado uma base dotada de rodízios. Foram utilizados perfis metálicos, em U enrijecido $70\times 30\times 20\times 2\text{mm}$, retirados de estantes e rodízios retirados de uma de cama hospitalar. Todos estes itens foram adquiridos no próprio depósito de materiais em desuso da UFRN, conforme mostra a Figura 36;

Figura 36 – Base : a) perfis metálicos (seta) b) soldagem c) base soldada com rodízios.



- l) Fixação do forno à base: Com o forno concluído foi colocado sobre a base e fixado com auxílios de pedaços de cantoneiras e o uso de rebites de repuxo (Figura 37);

Figura 37 – Detalhe da fixação do forno à base.



- m) Pintura externa: Foi realizada a pintura de todo conjunto com tinta esmalte sintético, na cor laranja, para proteção das intempéries e reduzir os efeitos do desgaste peculiares a sua exposição aos fenômenos naturais. A primeira demão foi realizada com o forno e a base separadas, sendo a segunda demão feita com o forno já fixado sobre a base (Figura 38).

Figura 38 – Pintura externa do forno proposto (segunda demão).



O forno solar proposto ficou com espaço destinado para o cozimento – espaço entre a chapa absorvedora e cobertura de vidro – com as seguintes dimensões: (0,520X1,340X0,084)m, resultando em um volume útil de 58,5 litros. A Figura 39 mostra o forno aberto posicionado para o emprego e fechado quando fora de uso.

Figura 39 – Forno solar proposto: a) em uso; b) fora de uso.



Visando o baixo custo, na construção do forno foram utilizados materiais em desuso e outros adquiridos em lojas de materiais de construção. A Tabela 2 apresenta os materiais comprados, respectivo custo e o custo total para montagem do forno solar.

Tabela 2 – Materiais e custos do Forno solar proposto.

Item	Descrição	Quant.	Valor und.	Total
1	Esmalte sintético, cor preto fosco.	900ml	R\$20,00	R\$20,00
2	Esmalte sintético, cor laranja.	900ml	R\$20,00	R\$20,00
3	Solvente	2 litros	R\$30,00	R\$30,50
4	Rolo de pintura (lã)	01 und	R\$6,50	R\$6,50
5	Pincel ½”	01 und	R\$3,50	R\$3,50
6	Cola silicone transparente, 280g	02 und	R\$17,50	R\$35,00
7	Eletrodo revestido 6013E 2,5mm	0,5 kg	R\$30,00	R\$15,00
8	Prego sem cabeça, 12x12mm, 1kg	0,5 kg	R\$20,00	R\$10,00
9	Rebite de repuxo, alumínio, 4,0x10mm	100 und	R\$15,00	R\$15,00
10	Disco de corte 115x3,0x22,5mm	02 und	R\$3,50	R\$7,00
			TOTAL	R\$162,50

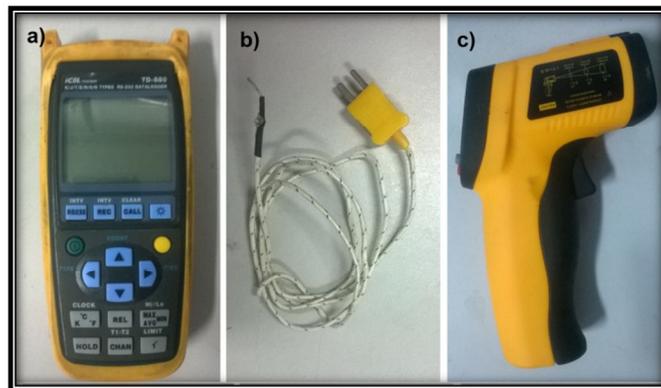
Quanto os outros materiais também utilizados como: chapa de alumínio, vidros da cobertura, espelhos, chapa de MDF, rodízios e perfis metálicos não foram listados na tabela anterior porque foram adquiridos através da reciclagem de materiais em desuso, visando buscar a redução dos custos de fabricação do forno.

3.2. Equipamentos para medição

Para as medições de temperaturas das superfícies internas e do ar interno do forno foi utilizado um termômetro digital TD-880 ICEL, com faixa de leitura compreendida de -50°C a 1.300°C (para termopar tipo K) e resolução de $0,1^{\circ}\text{C}$, acoplado com termopares de cromel-alumel, tipo K, fixados em locais estratégicos por todo o forno.

Para as medições de temperaturas das superfícies externas do forno foi utilizado um termômetro a laser infravermelho, TI-870 INSTRUTHERM, com faixa de leitura entre -50°C a 550°C e resolução de $0,1^{\circ}\text{C}$. Os equipamentos utilizados são mostrados na Figura 40.

Figura 40 – Equipamentos: a) termômetro; b) termopar e c) termômetro infravermelho.



Para as medições da radiação solar global foi utilizada a estação meteorológica Davis – Weather Envoy instalada no LMHES da UFRN, mostrado na Figura 41 – , na qual se visualiza o equipamento instalado sobre o LMHES/UFRN e na Fig. 42 o receptor do equipamento que transfere os dados medidos a um computador.

Figura 41 – Equipamento Davis - Weather Envoy.

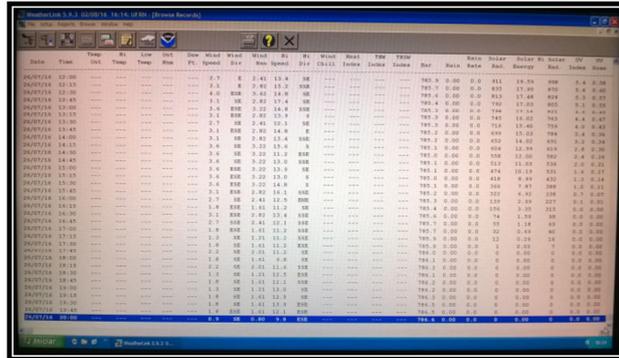


Figura 42 – Receptor do Equipamento acoplado a um computador no LMHES.



A Figura 43 mostra a tela do computador que mostra o programa de medição de dados meteorológicos Davis Weather Envoy dos quais foram extraídos os dados da radiação solar.

Figura 43 – Programa de medição de dados meteorológicos.



3.3. Procedimento experimental

Para o forno solar proposto foram realizados ensaios seguindo as metodologias utilizadas por MELO, 2008; GOMES, 2009, VARELA, 2013, BATISTA, 2013, DE ARAÚJO, 2015 E DUDFFIE & BECKMAN, 1991.

Para determinação da capacidade de assamento do forno solar proposto foram realizados ensaios sem carga e com carga, sendo apenas um sem carga e cinco com carga de alimentos (bolos, queijos, pães, empanados de frango, pizzas, carne bovina e camarão cinza sem cabeça). E em todos os ensaios o forno estava em “repouso” a sombra com 24h de antecedência. No caso dos ensaios com carga o forno foi colocado exposto ao sol antes do início do mesmo e os alimentos postos no seu interior após o ar e a chapa absorvedora apresentarem temperaturas estáveis.

O ensaio sem carga foi realizado para observarmos o comportamento do forno sem qualquer alimento no compartimento de cozimento. Assim foi possível registrar as

temperaturas ao longo do ensaio, verificando as temperaturas máximas alcançadas pelo ar interno e pela chapa absorvedora.

A verificação da viabilidade funcional do forno proposto foi realizada através dos ensaios com carga 1, 2, 3, 4 e 5, sendo as cargas todas de alimentos adquiridos em supermercados. Quanto ao acondicionamento dos alimentos dentro do forno, para as pizzas foram utilizadas assadeiras para pizzas de 30cm e para as demais assadeiras retangulares, com dimensões 27X18X4 cm, espessura de 0,8mm, em alumínio e com revestimento interno e externo antiaderente.

No ensaio 1 a carga de alimento foi composta de cinco bolos, utilizando mistura para bolo de 400g, marca Sarandi, sabor chocolate. Sendo o preparo e a mistura dos ingredientes conforme as instruções da embalagem do produto, o qual indicava o uso de 150ml de leite, três ovos e duas colheres de sopa de margarina. Para a mistura foi utilizada batedeira, agitando os ingredientes por três minutos. Cada massa dos cinco bolos foi preparada e despejada na assadeira retangular uma de cada vez. O peso total líquido das massas misturadas para os cinco bolos foi de 3,619Kg. A Figura 44 mostram a embalagem do produto utilizado e uma forma com a massa misturada, pronta para ser levada para o forno.

Figura 44 – Produto usado para os bolos e massa misturada na assadeira.



Para o ensaio 2 foi utilizada carga de alimentos variados, formada por: bolos, pizzas, queijo de qualho e empanados de frango. Todos os alimentos refrigerados envolvidos neste ensaio, como pizzas, queijo e empanados, permaneceram cerca de 30 minutos em “repouso” fora de refrigeração antes de serem colocados dentro do forno solar. A preparação dos dois bolos utilizados obedeceu mesma metodologia do ensaio anterior. As duas pizzas foram da marca Seara, 440g, uma sabor mussarela e a outra quatro queijos. A Figura 45 mostra as embalagens das pizzas utilizadas.

Figura 45 – Embalagens das pizzas utilizada no ensaio 2.



Já o queijo de coalho, num total de 0,566Kg, foi fatiado em oito pedaços com espessura média de 1,0cm. E referente ao empanado de frango foram utilizados quatro unidades da marca Seara, de 100g. A Figura 46 mostra a embalagem do empanado de frango utilizado no ensaio.

Figura 46 – Embalagem do empanado de frango.



Todos os alimentos foram colocados no interior do forno ao mesmo tempo. E peso líquido total foi de 3,345Kg, conforme contribuição de cada tipo de alimento descrito abaixo:

- Bolos.....1,467Kg;
- Empanados...0,421Kg;
- Queijo.....0,566Kg;
- Pizzas.....0,891Kg.

O ensaio 3 foi realizado utilizando carga de 0,994Kg de pão francês, pré-assados, com peso médio verificado em 25g, os quais são ofertados em supermercados, em embalagem plásticas e congelados prontos para o processamento de assamento e consumo. Os pães foram distribuídos em cinco assadeiras e dispostas dentro do forno ao mesmo tempo, obedecendo ao tempo de “repouso” sem refrigeração de 30 minutos. A Figura 47 mostra a embalagem do produto, destacando as instruções para utilização de forno convencional a gás.

Figura 47 – Embalagem do pão francês pré-assado destacando as instruções.



Para o ensaio 4, como todos os ensaios anteriores com carga foram realizados com produtos industrializados, optou-se em realizar utilizando carga de alimento de origem animal. Assim foi preparada carne bovina, tipo contrafilé, facilmente encontrada em frigoríficos de supermercados. A carga ensaiada foi de 1,399Kg de carne, cortada em nove bifés, distribuídas em três assadeiras retangulares. A colocação do alimento no forno aconteceu quando o mesmo atingiu temperaturas estáveis tanto no ar interno quanto na chapa absorvedora, após ter sido exposto ao sol. A Figura 48 mostra os bifés temperados e prontos para serem acondicionados nas assadeiras.

Figura 48 – Bifés de contrafilé temperados.



O ensaio 5 também foi realizado com carga utilizando alimento de origem animal: camarão cinza sem cabeça, temperado com sal, azeite de oliva e alho. Foi utilizado um peso líquido de 0,885Kg de camarão distribuídos em seis sacos plásticos próprios para uso em micro-ondas e colocadas em seis assadeiras retangulares. Após atingir temperaturas estáveis dentro do forno, após sua exposição ao sol, as formas foram colocadas ao mesmo tempo, dando início ao cozimento. A Figura 49 mostra os sacos plásticos com os camarões distribuídos nas formas antes da colocação no forno solar.

Figura 49 – Camarão cinza sem cabeça em sacos próprios para uso em micro-ondas.



Para cada ensaio foram medidas as condições meteorológicas iniciais, registrando temperatura ambiente, umidade relativa do ar, radiação solar global e direta.

As temperaturas alcançadas pelo forno foram registradas em intervalos de cinco minutos para cada ponto de medição. Os pontos mais importantes para o monitoramento das temperaturas foram na chapa absorvedora, no ar interno forno e nas superfícies das paredes internas e externas, incluindo o vidro de cobertura do forno. Também foi registrado o comportamento da radiação solar global e da radiação solar direta, durante todo período de realização do ensaio. A Figura 50 mostra os pontos de medição de temperaturas externas e a Fig. 51 as temperaturas internas.

Figura 50 – Pontos de medição de temperaturas externas do forno.

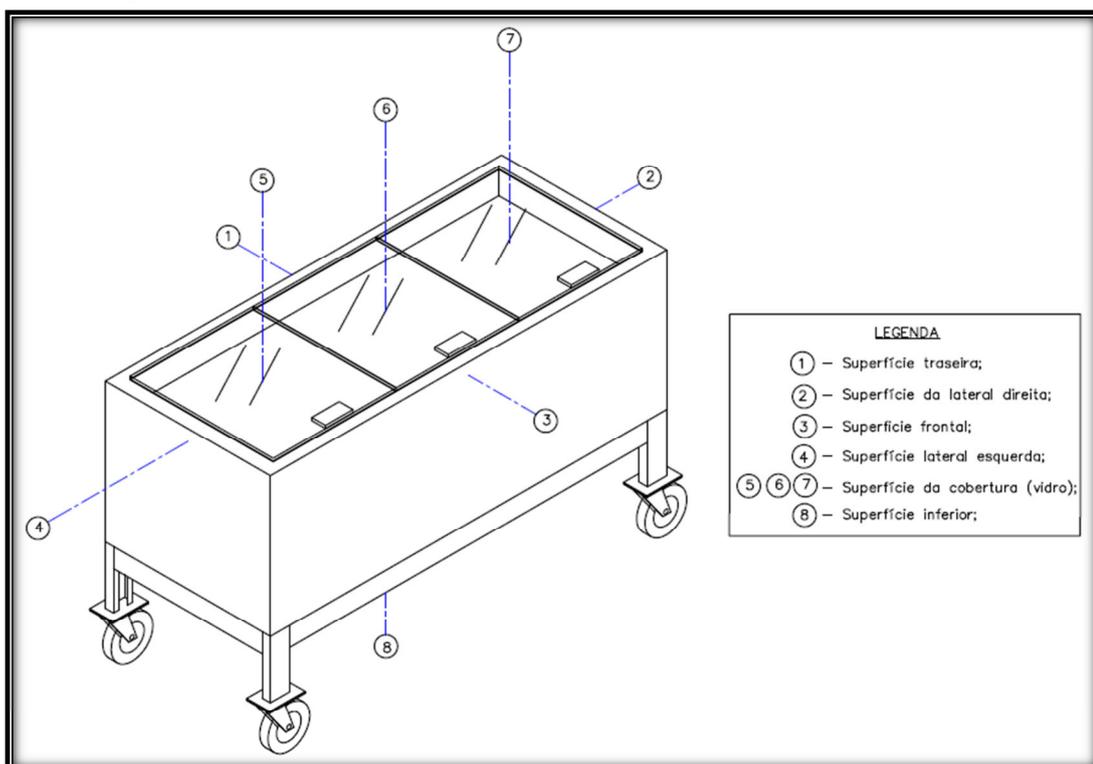
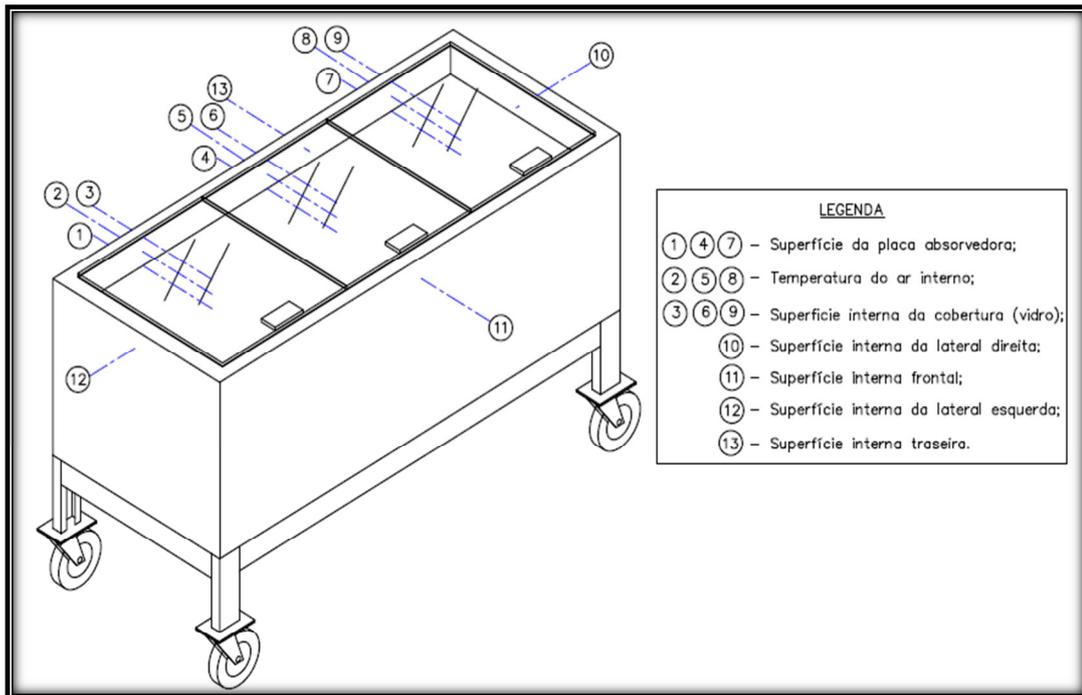


Figura 51 – Pontos de medição de temperaturas internas do forno.



Com o registro do comportamento das temperaturas e demais parâmetros durante os ensaios foi possível verificar a funcionalidade, níveis de perda térmica do forno proposto, bem como estabelecer sua eficiência térmica.

É importante ressaltar que em todos os ensaios realizados o forno encontrava-se em repouso à sombra com mais de 24 horas de antecedência.

3.4. Balanço de energia do forno solar tipo caixa proposto

A energia de entrada no forno devido às radiações solares incidentes deu-se de duas formas: através da radiação solar global incidente sobre a tampa de vidro e radiação solar direta refletida pelos espelhos da superfície refletora (porta da geladeira), que tem as radiações refletidas direcionadas para incidirem sobre área interna do forno. As dimensões do forno são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Dimensões do forno em metros e volume em litros.

Dimensões	Comprimento	Largura	Altura	Volume
Interna	1,34	0,52	0,08	58,5
Externa	1,38	0,56	0,85	656,9

Para determinação do balanço energético do forno são utilizadas as equações a seguir.

3.4.1 Taxa de Energia que entra no forno (E_{ef})

A taxa de energia total que entra no forno solar é formada da radiação solar global incidente na cobertura do forno solar e da radiação solar direta refletida nos espelhos externos situados no topo do forno solar, expressada pela equação 1.

$$E_{ef} = E_g + E_{re} \quad (1)$$

Onde:

E_{ef} = Taxa de energia que entra no forno solar (W);

E_g = Taxa de energia oriunda da radiação solar global que incide diretamente no forno solar (W);

E_{re} = Taxa de energia oriunda da reflexão dos espelhos da parte superior do forno solar (W).

Para determinação da taxa de energia de entrada, os valores de E_g e E_{re} são obtidos através das equações 2 e 3 a seguir.

$$E_g = I_g \cdot \tau_v \cdot A_{vidro} \quad (2)$$

$$E_{re} = I_d \cdot \rho_e \cdot \tau_v \cdot A_{espelho} \quad (3)$$

Onde:

I_g = Radiação instantânea global que entra no forno solar (W/m²);

τ_v = Transmissividade do vidro = 0,85;

A_{vidro} = Área do vidro (m²);

I_d = Radiação instantânea direta que entra no forno solar (W/m²);

ρ_e = Refletividade do espelho = 0,95;

$A_{espelho}$ = Área do espelho (m²).

3.4.2. Taxa de Energia perdida pelo forno (E_{pf})

A taxa energia perdida pelo forno estudado ocorreu pelas superfícies externa e calculadas com base na média das medições de suas temperaturas, considerando que as perdas ocorreram forma convectiva e a radiativa, entre superfícies externas e o ar ambiente. Podendo ser expressa pela equação 4, que contempla as perdas contribuídas por cada superfície do forno (laterais, fundo e pela tampa de vidro).

$$E_{pf} = E_{lat} + E_{fun} + E_v \quad (4)$$

Onde:

E_{pf} = Taxa de energia total perdida (W);

E_{lat} = Taxa de energia perdida pelas laterais (W);

E_{fun} = Taxa de energia perdida pelo fundo do forno (W);

E_v = Taxa de energia perdida pelo vidro (W);

a) Perda térmica pelas laterais do forno

A taxa de energia perdida pelas laterais do forno é dada pela equação 5 e o coeficiente global de perdas pelas laterais foi calculado através da equação 6.

$$E_{lat} = U_{lat} \cdot A_{lat} \cdot (T_{mint} - T_{mext}) \quad (5)$$

Onde:

U_{lat} = Taxa de energia perdida pelas laterais do forno (W/m²K);

A_{lat} = Área lateral do forno (m²);

T_{mint} = Temperatura média interna na lateral do forno (K);

T_{mext} = Temperatura média externa na lateral do forno (K).

$$U_{lat} = \frac{1}{\frac{e_{al}}{K_{al}} + \frac{e_{PU}}{K_{PU}} + \frac{e_{aço}}{K_{aço}}} \quad (6)$$

Onde:

U_{lat} = Coeficiente global de perdas pela lateral do forno (W/m²K);

e_{al} = Espessura da chapa de alumínio (m);

K_{al} = Condutividade térmica do alumínio (W/m.K);

e_{PU} = Espessura da camada isolante de Poliuretano (m);

K_{PU} = Condutividade térmica do Poliuretano (W/m.K);

$e_{aço}$ = Espessura da chapa de aço (m);

$K_{aço}$ = Condutividade térmica do aço (W/m.K)

b) Perda térmica pelo fundo do forno

No cálculo da taxa de energia perdida pelo fundo do forno utilizou-se de um coeficiente global de perdas específico através da equação 7. Devido ao fato do isolamento térmico ser distinto das laterais, sendo composto e disposto, na ordem de cima para baixo, nas seguintes camadas de materiais: chapa de alumínio, chapa de MDF, preenchimento de chapas de isopor, chapa de PU e chapa poliondas.

$$U_{fun} = \frac{1}{\frac{e_{al}}{K_{al}} + \frac{e_{MDF}}{K_{MDF}} + \frac{e_{EPS}}{K_{EPS}} + \frac{e_{PU}}{K_{PU}} + \frac{e_{poliondas}}{K_{poliondas}}} \quad (7)$$

Onde:

U_{fun} = Coeficiente global de perdas pelo fundo do forno (W/m²K);

e_{al} = Espessura da chapa de alumínio(m);

K_{al} = Condutividade térmica do alumínio (W/m.K);

e_{MDF} = Espessura da chapa de MDF (m);

K_{MDF} = Condutividade térmica da madeira MDF (W/mK);

e_{EPS} = Espessura da chapa de EPS (m);

K_{EPS} = Condutividade térmica da madeira EPS (m)

e_{PU} = Espessura da camada isolante de Poliuretano (m);

K_{PU} = Condutividade térmica do Poliuretano (m);

$e_{poliondas}$ = Espessura da chapa de poliondas (m);

$K_{poliondas}$ = Condutividade térmica do plástico (m).

Assim, a taxa de energia perdida foi determinada pela equação 8.

$$E_{fun} = U_{fun} \cdot A_{fun} \cdot (T_{mint} - T_{mext}) \quad (8)$$

Onde:

E_{fun} = Taxa de energia perdida pelo fundo do forno (W);

A_{fun} = Área do fundo do forno (m²);

T_{mint} = Temperatura média interna na lateral do forno (K);

T_{mext} = Temperatura média externa na lateral do forno (K).

c) Perda térmica pelo vidro da tampa do forno

O coeficiente de transferência de calor, por convecção, entre a superfície externa do vidro e o ar ambiente, pode segundo Duffie&Beckman (1991), ser determinado pela eq. 9.

$$h_{c(ve-a)} = 2,8 + 3 \cdot v_v \quad (9)$$

Onde:

h_c = coeficiente de troca térmica convectiva;

v_v = velocidade do vento, em m/s.

Esta equação é válida para velocidades de vento compreendidas entre 0 e 7 m/s. No local onde foram realizados os ensaios, de acordo com a central meteorológica do LMHES, a velocidade média situava-se entre 0 e 2,0 m/s.

O coeficiente de troca térmica radiativa entre a superfície externa da cobertura e o ambiente, conforme Duffie&Beckman (1991), é função das condições climáticas do local considerado podendo ser determinado através da equação 10.

$$h_{r(ve-a)} = 5,16 \cdot 10^{-8} \frac{(T_{ve}^4 - T_{sky}^4)}{(T_{ve} - T_a)} \quad (10)$$

Onde:

$h_{r(ve-a)}$ = coeficiente de troca térmica radiativa entre a superfície externa do vidro e o ambiente;

T_{ve} = temperatura externa do vidro (K);

T_{sky} = temperatura da abóbada celeste (K);

T_a = temperatura ambiente (K).

A partir do valor T_a o valor de T_{sky} pode ser obtido através da equação 11 sem implicar em erros significativos.

$$T_{sky} = 0,0552 \cdot T_a^{1,5} \quad (11)$$

O cálculo do coeficiente global de perdas pelo vidro é dado pela equação 12 e a taxa de energia perdida pelo vidro de cobertura foi determinada pela equação 13.

$$U_v = \frac{1}{\frac{1}{(h_{c(ve-a)} + h_{r(ve-a)})}} \quad (12)$$

$$E_v = U_v \cdot A_v \cdot (T_{ve} - T_a) \quad (13)$$

Onde:

E_v = taxa de energia perdida pelo vidro (W);

U_v = coeficiente global de perdas do vidro;

A_v = área do vidro (m²);

T_e = media da temperatura externa do vidro (K).

3.4.3. Rendimento térmico do forno solar

A taxa de energia absorvida pelo forno é dada pela equação 14.

$$E_{abs} = E_{ef} - E_{pf} \quad (14)$$

Onde:

E_{ef} = Taxa de energia que entra no forno solar (W);

E_{pf} = Taxa de energia perdida pelo forno (W).

Logo o rendimento térmico do forno solar é dado pela razão da energia absorvida e a energia total que entra no forno solar, descrita pela equação 15.

$$\eta_{forno} = \frac{E_{abs}}{E_{ef}} \quad (15)$$

Onde:

η_{forno} = rendimento do forno solar;

E_{abs} = Taxa de energia absorvida pelo forno (W);

E_{ef} = Taxa de energia que entra no forno (W).

CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, serão apresentados os resultados obtidos durante os ensaios, bem como suas discussões relativas ao processo de assamento dos alimentos testados, que demonstrou a viabilidade do forno solar proposto.

4.1. Ensaio sem carga

O ensaio sem carga foi iniciado às 11:15h e teve duração de 3h25min. Em vazio foi possível se obter as temperaturas máximas atingidas dentro do espaço destinado ao assamento dos alimentos. As condições ambientais no início do ensaio eram: 28,9°C de temperatura ambiente e 60% de umidade relativa, radiação solar global de 987 W/m² e radiação solar direta 789 W/m².

Com os dados de temperatura e radiação solar tomados a cada cinco minutos, a Tab. 4 apresenta as temperaturas médias registradas nos respectivos intervalos de realização do ensaio, especificamente, do vidro – externo/interno, do ar interno e na chapa absorvedora. O valor máximo da temperatura no ar interno foi de 117,2°C e da chapa absorvedora de 135,5°C, alcançado às 12:20h como mostra a Figura 52.

Tabela 4 – Resultados do ensaio sem carga.

Período	Dados de Temperatura médias observadas (°C)				Radiação Global solar Média (W/m ²)
	superfície externa do vidro	superfície interna do vidro	do ar interno	na chapa absorvedora	
11:15 - 12:00	77,7	56,9	90,3	108,5	960,0
12:01 - 13:00	90,2	66,7	105,3	124,9	833,1
13:01 - 14:00	89,1	67,1	104,8	120,8	727,4
14:01 - 14:40	92,3	61,6	108,9	127,2	645,8

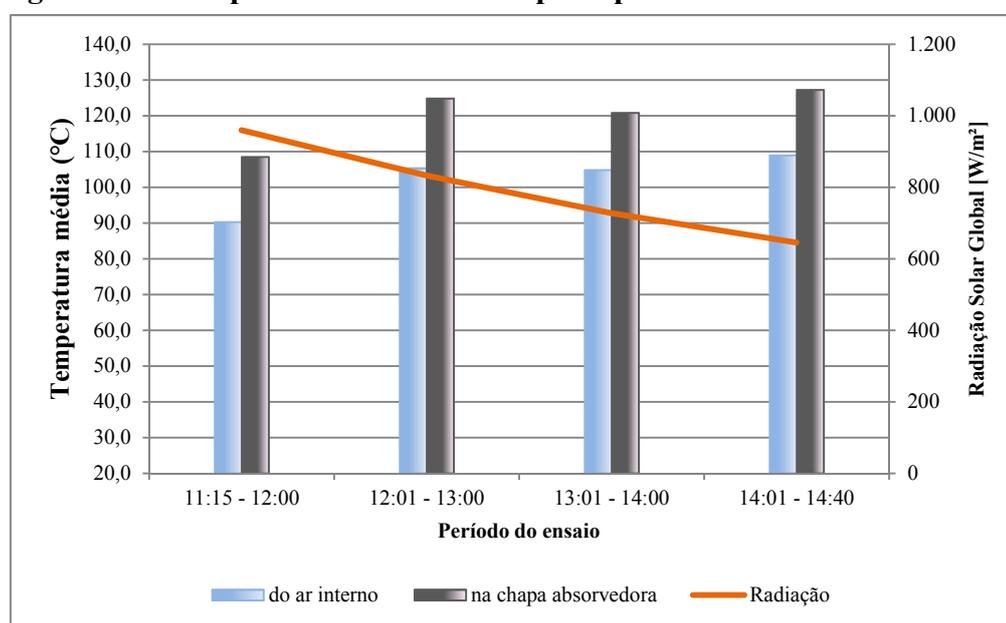
Figura 52 – Temperatura máxima na chapa do absorvedor do forno solar estudado.



A Figura 53 mostra o comportamento das temperaturas do ar interno e da chapa absorvedora do forno estudado apresentado pela Tab. 4. Pode-se observar que a radiação solar global apresenta curva descendente, em função do movimento do sol, enquanto as temperaturas médias do ar e da chapa absorvedora aumentaram durante a realização do ensaio.

Também é possível verificar que durante o intervalo das 13:01 às 14:00, observa-se que houve uma estabilização da temperatura média do ar e pequena queda na temperatura média da chapa absorvedora, fato decorrente da passagens de nuvens durante este período, tornado a aumentar no intervalo posterior.

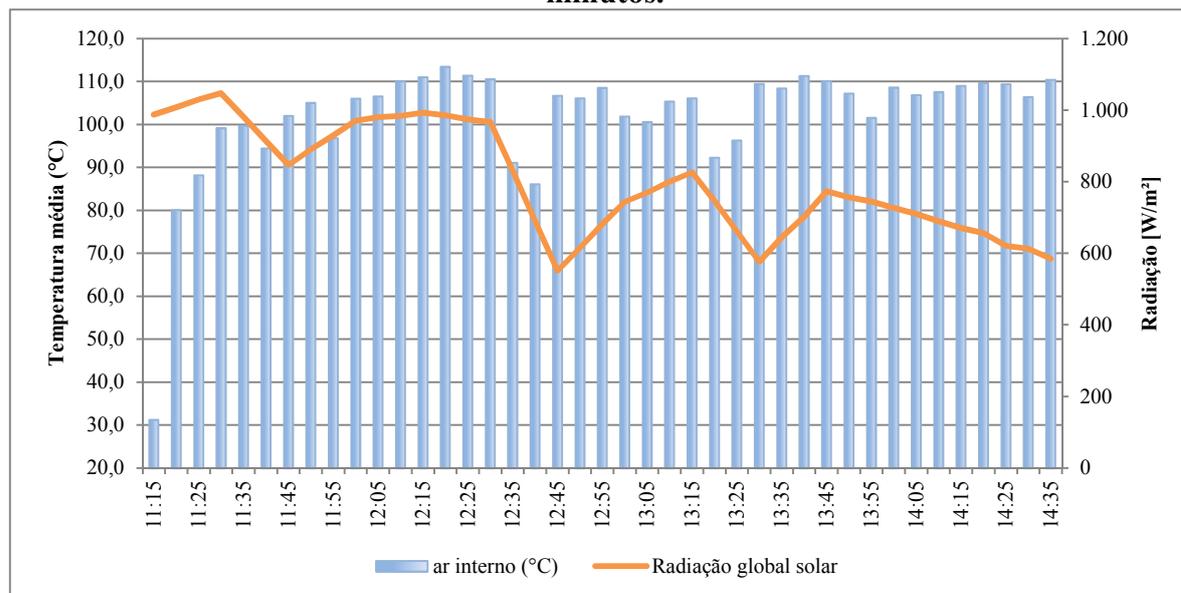
Figura 53 – Comportamento assumido pelos parâmetros medidos no ensaio.



A Figura 54 mostra o comportamento da temperatura do ar interno e da radiação global, em intervalos de cinco minutos. Assim é possível perceber a ocorrência de três quedas na radiação global em virtude da ocasião de céu encoberto e com retomada da radiação solar às 11:45, 12:45 e 13:30, logo após cada passagem de nuvens.

Também se observa que o ar interno sofre queda de temperatura na ocorrência do céu encoberto e, no intervalo seguinte, logo após o retorno do aumento da radiação global, esta apresenta rápida recuperação, retornando a patamares próximos aos que estava antes da ocorrência da queda da radiação global. Isto demonstra que este modelo de forno, tipo caixa, tem impactos reduzidos referentes à queda de temperatura em decorrência de nuvens passageiras, quando comparado aos fogões solares parabólicos que dependem de radiação solar direta durante sua operação.

Figura 54 – Temperatura do ar interno do forno e da radiação global em intervalos de 5 minutos.



Com este ensaio em vazio obtive o registro das temperaturas máximas alcançadas pelo forno solar com níveis próximos aos já alcançadas por outros fornos estudados no LMHES da UFRN como mostra a Tabela 5.

Tabela 5 – Temperaturas máximas fornos estudados no LMHES (ensaio em vazio).

Autor do Forno	Temp.máx. do ar (°C)	Temp.máx. do Abs. (°C)
Araujo (2015)	130,0	160,0
Spinelli (2016)	122,5	140,5
Forno solar proposto	117,2	135,5
Varela (2013)	108,2	123,8
Batista (2013)	80,4	120,8
De Araujo (2015)	97,4	117,8

Dos fornos comparados na Tab. 05, apenas o de Spinelli (2015) apresenta compartimento para processamento dos alimentos com volume superior ao forno solar proposto, os demais têm capacidade menor, que limitada a um ou dois tipos de alimentos processados por vez.

Salienta-se que os resultados foram obtidos sob condições solarimétricas satisfatórias, visto que ocorreram apenas três momentos de céu coberto por passagem de nuvens.

Apresentando níveis de temperatura adequados para utilização no assamento de alimentos e competitivo com outros fornos estudados no LMHES e na literatura solar para assamento de alimentos. Sendo extremamente adequados para a operação de assamento de alimentos (VARELA, 2013; BATISTA, 2013; ARAUJO, 2015; DE ARAÚJO, 2015).

4.2. Ensaio com carga

4.2.1. Ensaio com carga 1: Bolos

Neste ensaio o forno foi exposto ao sol e ao atingir as temperaturas do ar interno e absorvedor em 100,0°C e 125,2°C, respectivamente, quando às 10h55min foram colocados cinco bolos para o início do assamento e o tempo total do ensaio foi de 1h05min. Os parâmetros ambientais iniciais do ensaio foram: temperatura ambiente de 28,2°C, umidade relativa de 73%, radiação solar global 925W/m², radiação solar direta de 740W/m².

A temperatura máxima observada no interior do forno, ainda com os bolos, foi de 116,6°C no ar interno (bem próximo a máxima) e de 133,1°C na chapa absorvedora.

Às 11:55h foram retirados dois bolos para confirmação do “ponto de assamento” e, em seguida, às 12:00h foram retirados os outros três restantes, totalizando um tempo total de assamento de 65 minutos. É importante destacar que às 11:35h o forno foi aberto para verificação do “ponto de assamento” dos bolos e limpeza da condensação no vidro da cobertura do forno, causando internamente a perda de ar quente. Mesmo assim, o forno mostrou-se viável para assar cinco bolos ao mesmo tempo.

A Tabela 6 apresenta as temperaturas médias obtidas no ar interno e na chapa absorvedora. As figuras 56 e 57 mostram os bolos durante e ao final do ensaio.

Tabela 6 – Resultados médios do ensaio para assamento de cinco bolos.

Hora	T_{méd} Ar	T_{méd} Abs	RSG
10:55	75,8	73,8	925
11:00	78,2	75,3	940
11:05	82,3	80,8	940
11:10	86,5	85,3	915
11:15	90,6	87,9	935
11:20	94,0	92,5	938
11:30	99,4	98,7	938
11:35	101,7	101,3	939
11:40	91,2	102,1	940
11:45	96,8	103,8	920
11:50	96,2	115,6	912
11:55	107,7	122,4	925
12:00	112,0	125,7	940
Média	93,3	97,3	931

Figura 55 – Cinco bolos durante o processo de assamento no forno solar estudado.

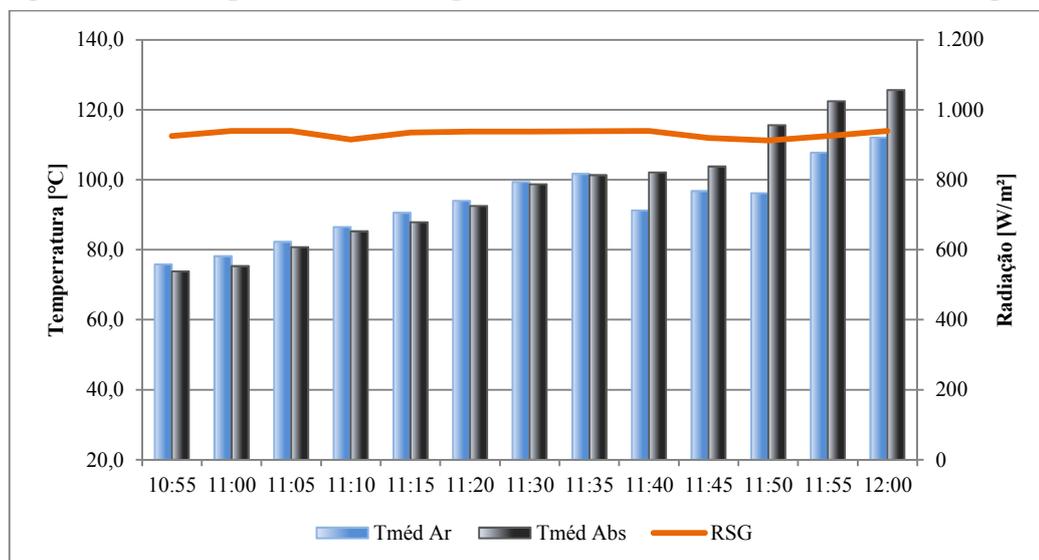


Figura 56 – Cinco bolos prontos (desenformados) sobre bandejas para o consumo.



A Figura 57 mostra o comportamento da temperatura do ar interno, chapa absorvedora e radiação solar global observados durante o ensaio.

Figura 57 – Comportamento dos parâmetros medidos no ensaio com carga 01.



Na Figura 57 observou-se que as condições solarimétricas foram satisfatórias, pois a radiação global variou em torno dos 900W/m². Também é possível verificar uma queda na temperatura do ar interno após as 11:35 devido a ocorrência de abertura do forno para verificação dos bolos, como citado anteriormente, não provocando queda significativa na temperatura da chapa absorvedora e posterior aumento em ambas.

Tendo em vista que o forno solar proposto não foi o maior, em termos de capacidade de volume interno útil, já estudo no LMHES (idealizados para o assamento de vários alimentos ao mesmo tempo). Comparando, de forma relativa, com o forno estudado por SPINELLI (2016), que apresentava 74,8litros de volume interno, assou 6,0Kg de massa (oito bolos) em 90 minutos, resultando uma capacidade relativa de assamento de 15min/Kg de massa.

Neste ensaio obtivemos uma capacidade relativa de assamento de 18min/Kg de massa, menor em -16%, para um volume interno de apenas 58,5litros, que comparado ao forno estudado por SPINELLI, é menor em -22%. Podendo-se concluir que, mesmo tendo um volume interno útil menor, o forno estudado apresentou uma capacidade relativa acima dos -22% se comparado em volume útil.

Na literatura de fornos solares para assamento de alimentos, apenas o de SPINELLI (2016) tem capacidade de assamento em quantidades maiores simultaneamente. Muitos outros fornos solares como de VARELA (2013), GOMES (2009) e MELO (2008), tem capacidade assar vários alimentos por vez, os fornos de DE ARAÚJO (2015), GOMES (2015) e SOUZA (2014) tem capacidade de assar dois alimentos por vez.

Neste ensaio conseguimos a comprovação de uma das finalidades deste forno: sua utilização na fabricação de bolos em série para comercialização, tornando-se uma opção para gerar emprego e renda em comunidades carentes.

Também é importante evidenciar que apresenta processo de fabricação e operação muito simples, além do baixo custo, viabiliza a propagação de uma tecnologia social para população carente.

Outro aspecto é quando comparado ao fogão convencional, a gás, de quatro bocas. Este apresenta capacidade de carga no compartimento do forno inferior ao apresentado por este forno proposto.

O efeito da condensação na cobertura do forno é mostrado na Fig. 58, devido à umidade da presente na massa dos bolos. Isto motivou a necessidade da remoção deste condensado através da abertura e limpeza do vidro, assim, evitar uma maior perda de eficiência do forno.

Figura 58 – Efeito do condensado formado no vidro do forno solar estudado



4.2.2. Ensaio com carga 2: Alimentos variados.

Neste ensaio o forno proposto foi colocado exposto ao sol, às 11:17h. A carga de alimentos foi colocada dentro às 11:35h, quando o mesmo atingiu as temperaturas máximas de 106,7°C e 124,2°C no ar interno e no absorvedor, respectivamente.

Referente à carga de alimentos a ser cozida, simultaneamente, num total de 3,345Kg foi a seguinte:

- Empanados de frango – 04 unidades;
- Bolos – 02 unidades;
- Queijo de coalho – 08 fatias;
- Pizzas de mussarela e quatro queijos (Seara) – 02 unidades;

Os parâmetros ambientais iniciais do ensaio foram: temperatura ambiente de 29,0°C, umidade relativa de 70%, radiação solar global 979W/m², radiação solar direta de 783W/m².

Após 30 minutos de início da cocção dos alimentos foi necessário abrir para limpeza do condensado que se formou na tampa do forno (vidro).

As pizzas foram retiradas às 12:15h, com tempo de 35 minutos. Posteriormente, ao degustá-las ficou constatado que estavam muito crocantes, indicando que excederam o tempo ideal, passando do ponto de assamento.

Às 12:25h os empanados de frango foram virados e às 12:40h os bolos foram verificados, causando a abertura do forno por duas vezes no intervalo de 15 minutos. Às

12h45min foram retirados os empanados de frango e o queijo de coalho. Novas verificações dos bolos ocorreram às 13:35h e às 13:45h, e retirados às 13:55h.

Entre o período das 12:50h até às 13:30h houve ocorrência de nuvens, tendo a maior ocorrência de cobertura às 13:00h. Sendo o registro das temperaturas máximas do ar interno foi de 116,2°C e do absorvedor de 135,2°C, ocorrendo às 13:20h.

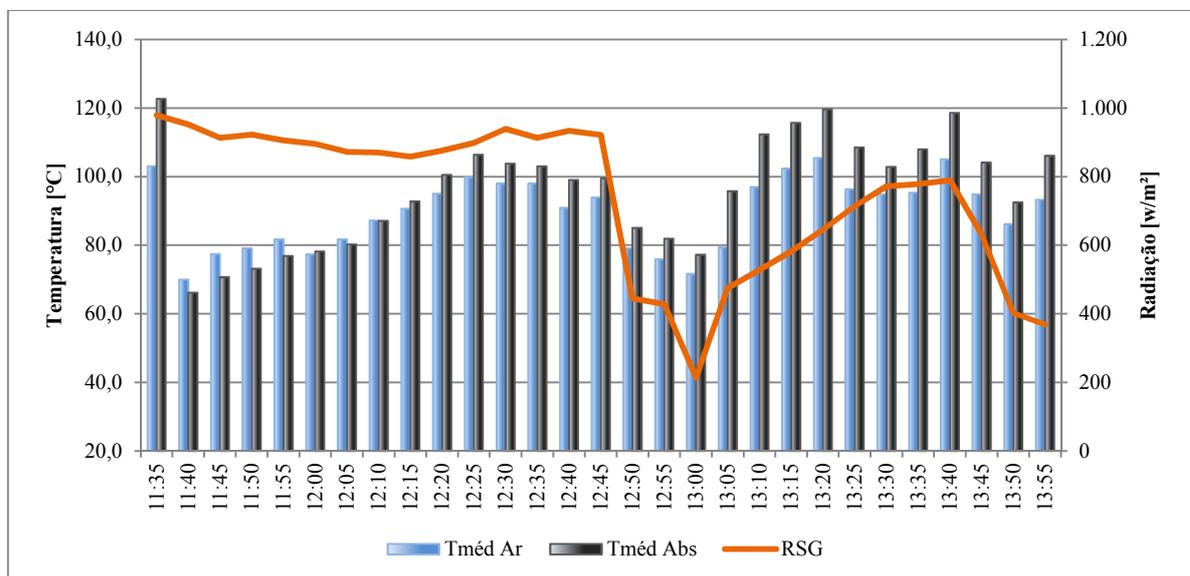
Com estas ocorrências de varias aberturas do forno e associada ao período de presença de nuvens, causaram perdas de calor do ar interno a cada abertura e, conseqüentemente, diminuição de temperatura do absorvedor. Isto contribuiu para um maior tempo de cocção dos alimentos. A Tabela 7 apresenta as temperaturas médias obtidas no ar interno e na chapa absorvedora agrupados em intervalos de 20 minutos.

Tabela 7 – Resultados médios do ensaio com carga 2.

Hora	T _{méd} Ar	T _{méd} Abs	RSG
11:35 (início)	103,1	122,6	979
11:36 - 11:55	77,0	71,7	923
11:56 - 12:15	84,2	84,6	874
12:16 - 12:35	97,7	103,4	907
12:36 - 12:55	85,0	91,4	682
12:56 - 13:15	87,6	100,2	449
13:16 - 13:35	98,0	109,7	727
13:36 - 13:55	94,8	105,3	548

A Figura 59 mostra o comportamento dos parâmetros durante o ensaio realizado com intervalos de medição de 5 minutos.

Figura 59 – Comportamento dos parâmetros medidos no ensaio 2.



Observou-se que a radiação solar global permaneceu acima de $900\text{W}/\text{m}^2$ até às 12:50h. A partir deste momento ocorreram passagens de nuvens, deixando o céu encoberto durante todo o restante de tempo que durou o ensaio. Sendo os momentos de máxima cobertura de nuvens ocorrendo às 13:00h e 13:55h. Estes eventos contribuíram para a queda de temperaturas no intervalo entre 12:50h até 13:05h. A partir deste ponto a temperatura do ar conseguiu permanecer com média de 90°C mesmo com permanência das passagens de nuvens.

Estas ocorrências também afetaram a temperatura da chapa absorvedora, que partir das 13:10 até o final do ensaio permaneceu acima de 100°C , tendo apenas uma ocorrência abaixo deste nível próximo ao fim do ensaio.

A Figura 60 mostra os alimentos no forno durante o ensaio e na Fig. 61, prontos para consumo.

Figura 60 – Diversos alimentos durante o ensaio de assamento no forno solar



Figura 61 – Alimentos prontos para consumo.



Neste ensaio os tempos obtidos para cada alimento foram:

- Pizza 40min;
- Empanados de frango..... 1h10min;
- Queijo de coalho 1h10min;
- Bolos..... 2h20min.

Além da ocorrência de céu encoberto, utilização de alimentos variados juntos contribuiu para os resultados. Pois esta variedade provocou abertura do forno por sete vezes, entre verificações do “ponto” ou retirada dos alimentos prontos.

Os tempos de assamento obtidos neste ensaio não ficaram competitivos quando comparado a outros fornos estudados no LMHES/UFRN e nem aos convencionais a gás. Sendo um aspecto importante a destacar é que o forno proposto teve melhor desempenho quando foi utilizado com apenas único tipo de alimento, pois aperfeiçoa o ganho de temperatura e evita aberturas frequentes para verificação do “ponto de assamento”.

4.2.3. Ensaio com carga 3: Pães tipo francês

Neste ensaio o forno foi colocado exposto ao sol às 11:11h e às 11:55h atingiu a temperatura máxima de 107,0°C no ar interno e 138,4°C no absorvedor, quando foi colocada uma carga de 0,994Kg de pães tipo francês, pré-assado.

Os parâmetros ambientais iniciais do ensaio foram: temperatura ambiente de 30°C, umidade relativa de 70%, radiação solar global 901 W/m² e radiação solar direta de 720W/m².

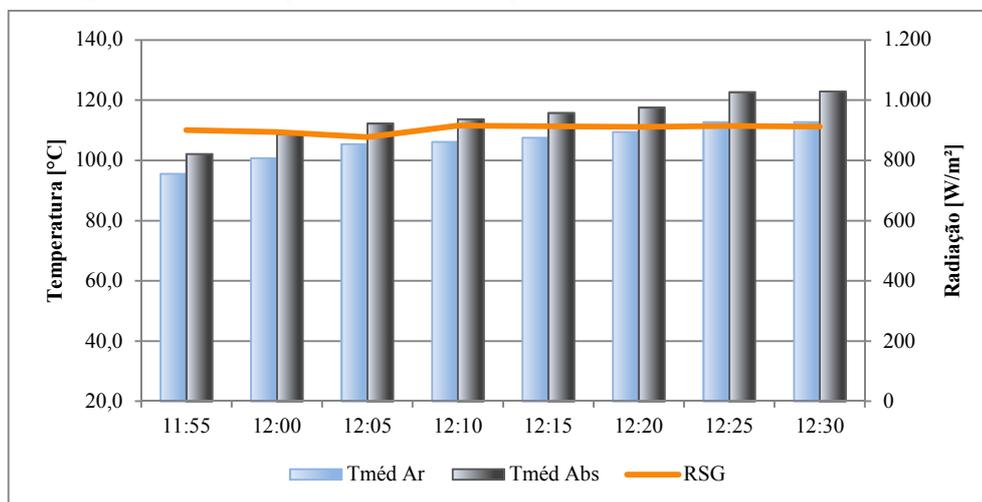
A Tabela 8 apresenta as temperaturas médias obtidas no ar interno e na chapa absorvedora durante o ensaio.

Tabela 8 – Resultados médios do ensaio para assamento de pães tipo francês.

Hora	T_{méd} Ar	T_{méd} Abs	RSG
11:55	95,5	102,1	901
12:00	100,8	108,7	894
12:05	105,4	112,2	877
12:10	106,1	113,7	915
12:15	107,5	115,7	913
12:20	109,4	117,5	911
12:25	112,7	122,6	914
12:30	112,7	122,9	912
Média	106,3	114,4	905

A Figura 62 mostra o comportamento dos parâmetros observados durante o ensaio, tanto quanto a Tab. 8, apresenta regularidade da radiação solar global em torno de 900W/m^2 , que contribuiu para o crescimento constante das temperaturas do ar e da chapa absorvedora, mesmo sendo registra a passagens de poucas nuvens nos primeiros 10 minutos de ensaio.

Figura 62 – Comportamento dos parâmetros medidos no ensaio 3.



O primeiro pão foi retirado às 12:25h para verificação do “ponto de assamento” e, finalmente, às 12:30h retirada toda a carga de alimento, totalizando 35 minutos. Comparando com as instruções da embalagem do produto, para uso em fogão convencional seria necessário pré-aquecer o forno a 180°C e assar entre 10 a 12 minutos um total de $0,690\text{Kg}$ de pão. Considerando esta informação e a quantidade de pão que foi utilizada neste ensaio de $0,995\text{Kg}$, seriam necessários entre 15 a 17 minutos em fogão convencional. Assim, comparando o tempo transcorrido com o uso do forno solar proposto neste ensaio, o resultado do tempo total para o assamento da carga apresentou variação de $118,7\%$, ou seja, foi um pouco maior que o dobro do tempo.

Apesar deste resultado, é importante registrar dois aspectos: a degustação e a capacidade do forno solar proposto. A capacidade de assar este tipo de alimento foi demonstrada, através do uso de uma energia limpa, inesgotável, largamente disponível e ambientalmente correta.

Quanto às temperaturas máximas alcançadas pelo forno proposto durante este ensaio foram de $117,6^{\circ}\text{C}$ no ar interno e de $126,3^{\circ}\text{C}$ no absorvedor às 12:25h.

A Figura 63 mostra a carga de pães tipo francês durante e após o processo de assamento.

Figura 63 – Ensaio com pães: a) Em assamento; b) prontos para o consumo.



Também é possível verificar na Fig.63 a ocorrência de condensação na cobertura do forno devido à presença de umidade no alimento.

4.2.4. Ensaio com carga 4: Bifes de carne bovina.

Como todos os ensaios anteriores foram realizados com cargas de alimentos industrializados, para este ensaio resolvemos utilizar alimento de origem animal sem processamento industrial para também comprovar a capacidade de utilização do forno com neste tipo de alimento. Assim, foi escolhida a carne bovina, sem osso, tipo contrafilé, cortada em bifes, disposta em três assadeiras, totalizando uma carga de 1,399Kg.

Sendo exposto ao sol às 10:30, os bifes de carne foram colocados no forno às 11:20h, quando estavam estáveis as temperaturas do ar interno e absorvedor, 119,2°C e 142,9°C, respectivamente. Os parâmetros ambientais iniciais do ensaio foram: temperatura ambiente de 29,1°C, umidade relativa de 69%, radiação solar global 942W/m² e radiação solar direta de 754W/m².

Então às 11:40h, 20 minutos após o início do assamento, foi necessário abrir o forno para realizar limpeza do condensado no vidro de cobertura do forno e, também, 4 minutos depois. Isto chamou a atenção pela rapidez e quantidade de condensado formado, concluindo-se que a elevada umidade presente na carne acarretaria na necessidade de limpeza a cada 5 minutos. Como este procedimento iria ter um impacto elevado na redução da eficiência e aumento no tempo de assamento do forno, foi optado em não mais fazer as limpezas e permanecer assim até o momento de virar os bifes, fato ocorrido apenas às 12:00h.

As temperaturas máximas atingidas pelo forno foram de 108,8°C no ar interno e 107,6°C no absorvedor, exatamente, às 12:20h quando foi retirada a carne do forno. O fato das temperaturas máximas apresentarem muito próximas foi devido as três assadeiras utilizadas terem sido posicionadas, coincidentemente, sobre os três sensores de temperatura da

chapa, registrando temperatura mais baixas nestas que nos ensaios anteriores. Nesta região ocorre maior troca de calor entre a chapa absorvedora e as assadeiras por condução.

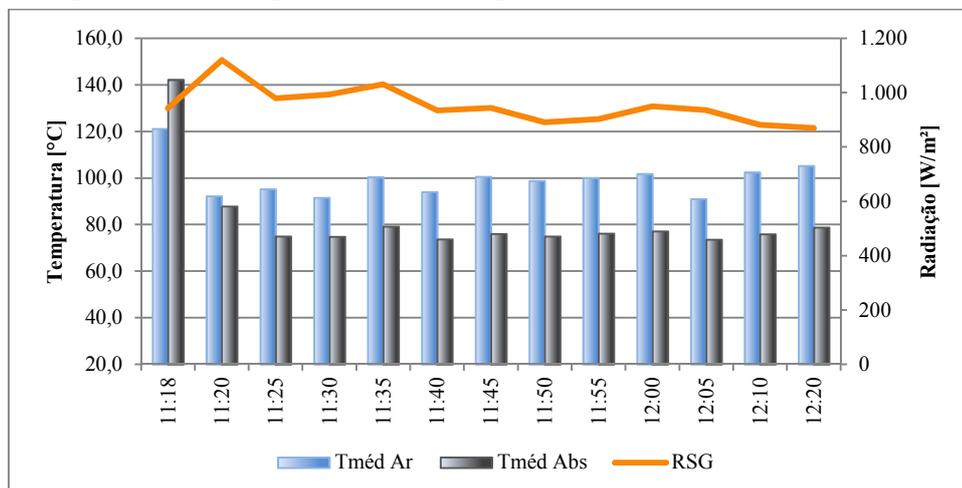
A Tabela 9 apresenta as temperaturas médias obtidas no ar interno e na chapa absorvedora.

Tabela 9 – Resultados médios do ensaio para assamento de carne bovina.

Hora	T_{méd} Ar	T_{méd} Abs	RSG
11:18	121,2	142,2	942
11:20	92,3	87,9	1.120
11:25	95,2	75,0	979
11:30	91,6	74,9	993
11:35	100,4	79,2	1.030
11:40	94,0	73,7	934
11:45	100,6	76,0	943
11:50	98,8	75,0	891
11:55	100,1	76,2	903
12:00	101,8	77,2	950
12:05	91,0	73,6	935
12:10	102,5	76,0	881
12:20	105,2	78,8	869
Média	99,2	75,8	913

Tanto na Tab. 9 quanto na Fig. 64 foi possível observar o comportamento dos parâmetros ao longo do ensaio, destacando a regularidade da radiação solar global, com poucas variações, devido a pouca ocorrência de passagem de nuvens, que contribuíram para poucas variações durante o ensaio.

Figura 64 – Comportamento dos parâmetros medidos no ensaio 4.



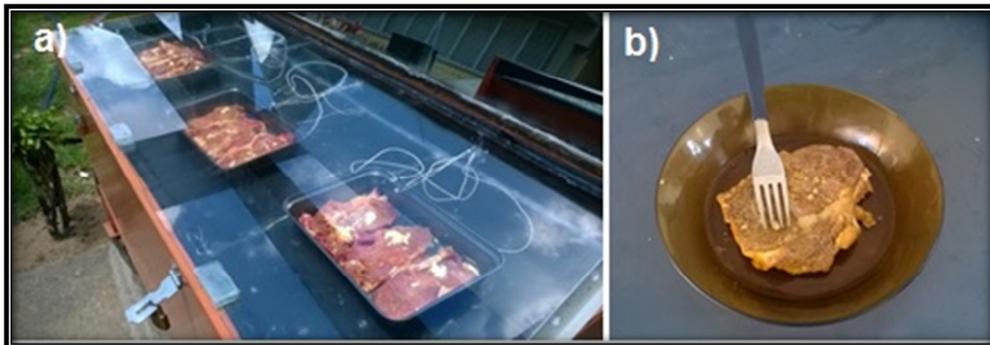
A carne foi retirada após 60 minutos de assamento, às 12:20h. Conforme instruções do fabricante, para um fogão convencional a gás, quatro bocas, o tempo é de 10 minutos de pré-aquecimento mais 50 minutos por quilograma de bife sem osso, totalizando 60min/Kg de bife (ELETROLUX, 2017). Ou seja, o forno solar proposto apresentou tempo muito satisfatório quanto a esta comparação.

Um fator negativo neste ensaio que prejudicou o aquecimento do forno solar foi o excesso de umidade da carne, reduzindo a eficiência devido a grande quantidade de condensado que se formou na cobertura do forno, dificultando a passagem da radiação solar direta para o interior do mesmo. A Figura 65 mostra este problema durante o ensaio e Fig. 66 mostra o forno no início do ensaio e um bife pronto para o consumo.

Figura 65 – Condensação durante o ensaio com carne.



Figura 66 – Carne: a) No início do processo; b) Bife pronto para o consumo.



4.2.5. Ensaio com carga 5: Camarão cinza sem cabeça.

Neste ensaio utilizamos outro alimento de origem animal, o camarão cinza sem cabeça, na quantidade de 0,885Kg.

Com a experiência do ensaio anterior com o assamento da carne ficou constatado problema de condensação na cobertura superior do forno proposto (vidro), devido à presença de umidade no alimento. Desta forma, resolveu acondicionar os camarões em sacos plásticos

transparentes, utilizados para usos em micro-ondas, para restringir o problema da condensação dentro desta embalagem, visto que o processo de assamento do camarão não seria diferente. Este artifício contribuiu para redução das perdas da radiação solar direta e refletida pela superfície de espelhos.

A Figura 67 mostra os camarões divididos em sacos, dentro das assadeiras, prontos para ir para o forno, bem como o detalhe do acondicionamento dentro do saco plástico.

Figura 67 – Camarão condicionado e detalhe da embalagem.



O forno foi exposto ao sol às 11h50min e às 12h15min atingiu a temperatura do ar interno era 110°C e 133,3°C a do absorvedor, quando foram colocadas as formas com o camarão. Os parâmetros ambientais iniciais do ensaio foram: temperatura ambiente de 29,3°C, umidade relativa de 67%, radiação solar global 930W/m² e radiação solar direta de 744W/m².

A Tabela 10 apresenta as temperaturas médias obtidas no ar interno e na chapa absorvedora, que apresenta boa regularidade nestes parâmetros devido a boas condições solarimétricas durante o ensaio.

Tabela 10 – Temperaturas médias do ensaio para assamento de Camarão.

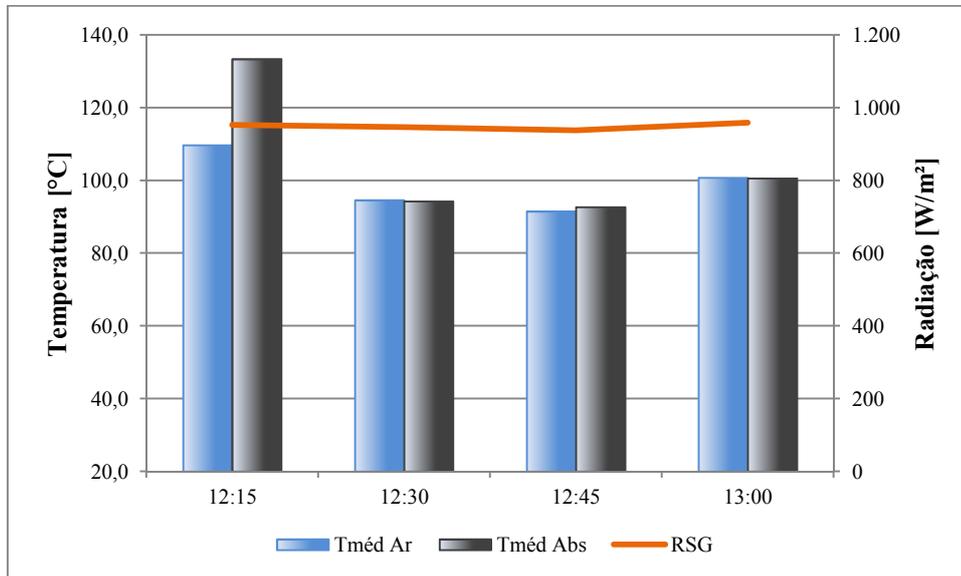
Hora	T_{méd} Ar	T_{méd} Abs	RSG
12:15	109,7	133,3	952
12:30	94,5	94,3	946
12:45	91,5	72,7	937
13:00	100,7	100,5	958
Média	99,1	100,2	948

As temperaturas máximas registradas foram de 103,1°C no ar interno e de 106°C no absorvedor, ocorrido as 13h00min.

A Figura 68 mostra o comportamento dos parâmetros observados durante o ensaio realizado, apresentando ligeira queda nas temperaturas do ar e da chapa absorvedora às 12:45,

após 34min. de ensaio, quando os camarões foram retirados dos sacos, recolocados nas assadeiras para dourar e reduzir a umidade do alimento.

Figura 68 – Comportamento dos parâmetros medidos no ensaio 5.



Sendo às 13:00h os camarões foram retirados definitivamente do forno, encerrando o ensaio e estando prontos para o consumo. Resultando um tempo total de 40 minutos de assamento. As figuras 69 e 70 mostram os camarões durante o assamento e prontos para consumo, respectivamente.

Figura 69 – Camarão durante assamento com uso de sacos plásticos.



Figura 70 – Camarões prontos para o consumo (sobre o forno solar).



A utilização de sacos plásticos, próprios para uso em micro-ondas, resultou conforme esperado quanto à retenção da umidade dentro da embalagem, sem afetar a cobertura do forno (vidro), bem como interferir na incidência da radiação solar direta e refletida para dentro do forno. A Figura 71 mostra o saco plástico com condensado.

Figura 71 – Efeito da condensação dentro do saco plástico.



4.3. Balanço de energia do forno solar proposto

4.3.1. Perdas pelas laterais

Utilizando a equação 6, determina-se o coeficiente global de perdas pelas laterais.

$$U_{lat} = \frac{1}{\frac{e_{al}}{K_{al}} + \frac{e_{PU}}{K_{PU}} + \frac{e_{aço}}{K_{aço}}} = \frac{1}{\frac{0,0005}{204} + \frac{0,03}{0,035} + \frac{0,0012}{52}} \quad (6)$$

$$U_{lat} = 1,167W/m^2K$$

Lembrando que a camada de material que forma todas as laterais é formada por: por alumínio, poliuretano (PU) e aço, com espessuras de 0,5mm, 30mm e 1,2mm respectivamente.

A equação 5 define a taxa energia perdida pelas laterais.

$$E_{lat} = U_{lat} \cdot A_{lat} \cdot (T_{mint} - T_{mext}) \quad (5)$$

Para tal, e com objetivo de minimizar a ocorrência de erros no cálculo, não foi considerada a média das temperaturas das laterais, e sim, realizado o cálculo para cada uma. Desta forma, a Tabela 11 apresenta os resultados de $Q_{lat(i)}$, para cada lateral e o Q_{lat} (total), pois utilizar uma média da diferença de temperatura entre as quatro laterais implicaria em erros ainda maiores.

Tabela 11 – Taxa de energia térmica perdida pelo perímetro do forno.

lateral	Dimensões do forno				$Q_{lat(i)}$ [W]
	L[m]	H[m]	A [m ²]	ΔT [°C]	
frontal	1,340	0,084	0,113	41,3	5,4
esquerda	0,520	0,084	0,044	37,9	1,9
traseira	1,340	0,084	0,113	51,6	6,8
direita	0,520	0,084	0,044	49,4	2,5
$E_{lat} =$					16,7 W

$$E_{lat} = 16,7W$$

4.3.2. Perdas pelo fundo

Para determinação do coeficiente global de perdas pelo fundo, utiliza-se a equação 7, conforme a camada formada por chapa de alumínio, folha de MDF, camada de isopor e chapa de poliondas.

$$U_{fun} = \frac{1}{\frac{e_{al}}{K_{al}} + \frac{e_{MDF}}{K_{MDF}} + \frac{e_{EPS}}{K_{EPS}} + \frac{e_{PU}}{K_{PU}} + \frac{e_{poliondas}}{K_{poliondas}}}$$

$$U_{fun} = \frac{1}{\frac{0,5 \times 10^{-3}}{204} + \frac{15 \times 10^{-3}}{0,017} + \frac{411 \times 10^{-3}}{0,036} + \frac{30 \times 10^{-3}}{0,035} + \frac{3 \times 10^{-3}}{0,22}} = 0,08 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Pela equação 8, determina-se a taxa de energia perdida pelo fundo.

$$E_{fun} = U_{fun} \cdot A_{fun} \cdot (T_{mint} - T_{mext}) \quad (8)$$

$$E_{fun} = 0,08 \cdot 0,697 \cdot (95,2 - 28,2) = 3,5W$$

4.3.3. Perdas pela tampa de vidro

O coeficiente de troca térmica por convecção, entre o vidro e o ar ambiente foi determinado pela equação 9, abaixo:

$$h_{c(ve-a)} = 2,8 + 3 \cdot v_v \quad (9)$$

Para obtenção do coeficiente de troca térmica radiativa entre a superfície externa do vidro e o ambiente utiliza-se a equação 10, abaixo:

$$h_{r(ve-a)} = 5,16 \cdot 10^{-8} \frac{(T_{ve}^4 - T_{sky}^4)}{(T_{ve} - T_a)} \quad (10)$$

Onde o valor de T_{sky} obtém com a equação 11, abaixo:

$$T_{sky} = 0,0552 \cdot T_a^{1,5} \quad (11)$$

$$T_{sky} = 0,0552 \cdot 301,3^{1,5} = 281,4K \text{ (} 8,2^\circ C \text{)}$$

$$h_{c(ve-a)} = 2,8 + 3 \cdot 0,5 = 4,3W/m^2K$$

$$h_{r(ve-a)} = 5,16 \times 10^{-8} \cdot \frac{(325,7^4 - 281,4^4)}{(325,7^4 - 301,3^4)} = 10,54 W/m^2K$$

Então obteve com a equação 12 o coeficiente global de perdas pelo vidro (tampa do forno), conforme a seguir:

$$U_v = \frac{1}{\frac{1}{(h_{c(ve-a)} + h_{r(ve-a)})}} = \frac{1}{\frac{1}{(4,3 + 10,54)}} = 14,8W \quad (12)$$

Com a equação 13, abaixo, determina-se o coeficiente global de perdas pelo vidro (tampa do forno).

$$E_v = U_v \cdot A_v \cdot (T_{ve} - T_a) \quad (13)$$

$$E_v = 14,8 \cdot 0,697 \cdot (325,7 - 301,3) = 252,5 W$$

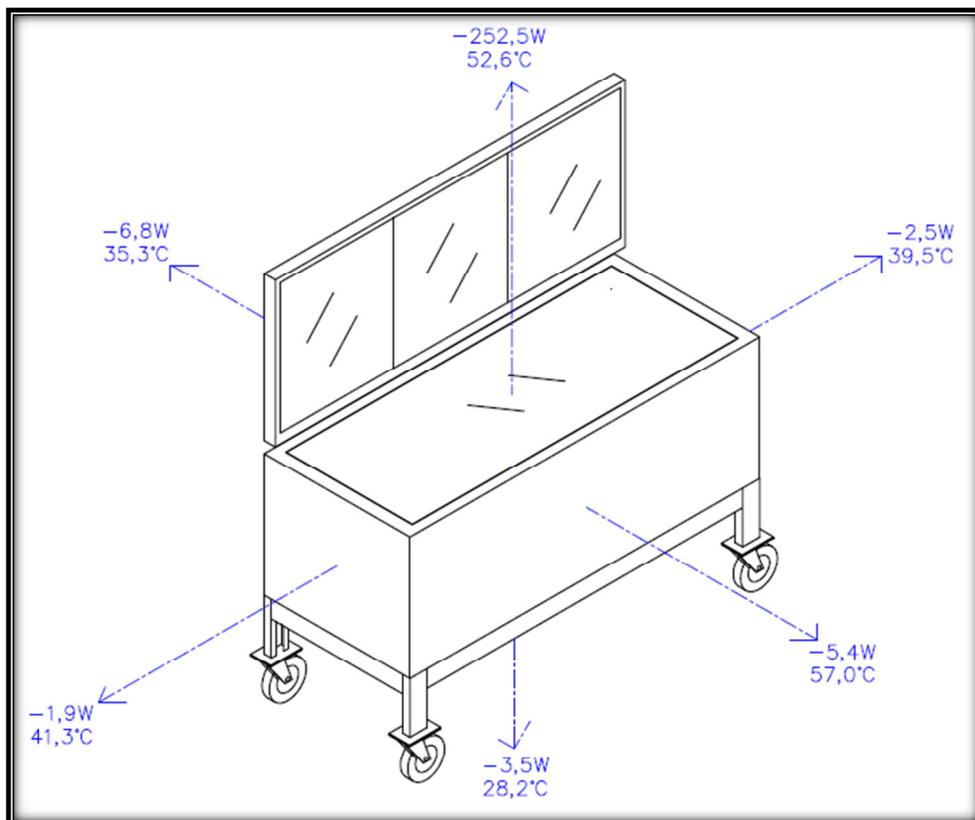
4.3.4. Taxa de energia total perdida

A taxa de energia total perdida é definida pela equação 4, abaixo, e a fig. 72 mostra a taxa de energia perdida distribuídas pelas superfícies do forno, com respectivas temperaturas médias alcançadas durante o ensaio.

$$E_{pt} = E_{lat} + E_{fun} + E_v$$

$$E_{pt} = 16,7 + 3,5 + 252,5 = 272,7 W$$

Figura 72 – Taxa de energia perdida e temperaturas médias externas do forno.



4.3.5. Taxa de energia absorvida pelo forno

Dada pela equação abaixo, equação 1, a taxa de energia total depende da radiação solar global incidente na cobertura do forno solar, equação 2, e da radiação solar direta refletida nos espelhos externos situados no topo do forno solar, equação 3.

$$E_g = I_g \cdot \tau_v \cdot A_{vidro} \quad (2)$$

$$E_g = 780,4 \cdot 0,85 \cdot 0,697 = 462,2 W$$

$$E_{re} = I_d \cdot \rho_e \cdot \tau_v \cdot A_{espelho} \quad (3)$$

$$E_{re} = 624,3 \cdot 0,95 \cdot 0,85 \cdot 0,697 = 351,3 \text{ W}$$

Assim, a taxa de energia que entra no forno é :

$$E_{ef} = E_g + E_{re} \quad (1)$$

$$E_{ef} = 462,2 + 351,3 = 813,5 \text{ W}$$

4.3.6. Rendimento térmico do forno

O Total de energia absorvida pelo forno é dada pela equação 14:

$$E_{abs} = E_{ef} - E_{pf} \quad (14)$$

$$E_{abs} = 813,5 - 272,7 = 540,7 \text{ W}$$

A equação 15 define a eficiência do forno solar proposto:

$$\eta_{forno} = \frac{E_{abs}}{E_{ef}} = \frac{540,7}{813,5} \quad (15)$$

$$\eta_{forno} = 66,5\%$$

Resumindo o aporte energético do forno solar proposto, a tabela 12 apresenta as taxas de energias envolvidas no balanço térmico, destacando os valores absolutos e percentuais relativos à taxa de energia de entrada do forno.

Tabela 12 – Balanço térmico e eficiência do forno solar estudado.

Aporte Energético	Taxa de energia (W)	Contribuição %
E_{ef} (taxa de energia total incidente)	813,5	100,0%
E_{lat} (taxa de energia perdida pelas laterais)	16,7	2,0%
E_{fun} (taxa de energia perdida pelo fundo)	3,5	0,4%
E_{pv} (taxa de energia perdida pelo vidro)	252,5	31,0%
E_{abs} (taxa de energia absorvida)	540,7	66,5%

As perdas térmicas do forno proposto, resumidos na Tab. 12, apresenta elevada contribuição pela cobertura do forno (tampas de vidro), visto que foi utilizada apenas uma camada de vidro por questões de custo de projeto. Esta configuração pode ser revista em futuros trabalhos, comparando o aspecto de custo e benefícios desta melhoria no isolamento do forno sola. Este fator de perdas de energia pela cobertura é proporcionado pela pequena distancia que separa a chapa absorvedora e o vidro, contribuindo para que maiores trocas convectivas e radiativas ocorram entre os mesmos.

Como o isolamento térmico próprio da geladeira foi mantido, as taxas de energia perdida pelo fundo e pelas laterais do forno contribuíram com apenas 2,4%, demonstrando boas condições de uso da geladeira como estrutura para fogões solares.

Apesar de todas as perdas térmicas, o forno estudado apresentou eficiência final de 66,5%, mostrando-se competitivo quando comparado aos outros fornos solares para a cocção de alimentos apresentados em estudos realizados no LMHES (Tab.13).

Tabela 13 – Comparativos de eficiências de alguns fornos estudados no LMHES.

Autor do Forno	Eficiência
Spinelli (2016)	82,6%
Varela (2013)	69,4%
Forno solar proposto	66,5%
Melo (2008)	66,3%
De Araújo (2015)	48,5%
Batista (2013)	57,0%
Gomes (2009)	51,0%

CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Com a análise dos dados obtidos com a realização de ensaio do forno estudado, neste capítulo vamos apresentar as conclusões e sugestões.

5.1. Conclusões

1. O forno solar demonstrou-se viável para produzir o assamento dos alimentos escolhidos, com tempos superiores aos obtidos com o forno convencional a gás;
2. O forno solar apresentou-se viável para o assamento dos alimentos no período das 10:00 às 14:00 horas, sob boas condições solarimétricas;
3. O forno solar estudado, por apresentar simples processos de fabricação, montagem e operacionalidade, pode ser repassado para comunidades carentes urbanas e rurais para uso em fins domésticos ou para comercialização de alimentos;
4. A principal qualidade do forno solar proposto foi sua capacidade de assar vários alimentos simultaneamente, o que não acontece para a maioria dos fornos estudados na literatura solar para cocção de alimentos;
5. A utilização de uma carga de alimentos elevada reduziu a taxa de energia perdida pelo forno, concedendo-lhe maior eficiência térmica;
6. A utilização do forno solar estudado pode contribuir para redução dos problemas que geram desequilíbrio ecológico devido ao uso intensivo de lenha na cocção;
7. Os tempos de assamento dos alimentos no forno estudado foram competitivos com os de outros fornos solares já analisados no LMHES/UFRN e em relação a outros fornos apontados pela literatura solar para cocção de alimentos;
8. O transporte e deslocamento do forno não apresentaram dificuldades, mesmo com seu significativo tamanho, quando comparados a outros fornos estudados no LMHES;
9. A operacionalidade do forno traz riscos de baixa intensidade para o usuário, sendo necessários alguns poucos cuidados que podem ser facilmente compreendidos.

5.2. Sugestões

1. Assar os alimentos em sacos plásticos transparentes, minimizando-se o efeito da condensação no vidro de cobertura;
2. Elaborar um manual com informações sobre a fabricação, montagem, operação, receitas e os cuidados durante a operação deste tipo de forno solar;
3. Assar os alimentos sob variadas condições solarimétricas.

REFERÊNCIAS

AALFS, M. **How solar cookers work.** Disponível em: <http://solarcooking.wikia.com/wiki/Principles_of_Solar_Box_Cooker_Design#>. Acesso em: 03 fev. 2016.

ACERVO TÉCNICO do LMHES/UFRN – Laboratório de Máquinas Hidráulica e Energia Solar da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2016.

ACTION4ENERGY – **United Nations Development Programme.** Disponível em: <<http://www.action4energy.org/pt/>>. Acesso em: 10 set. 2017.

ARAÚJO, L.R.R. **Estudo comparativo da capacidade de assamento de dois fornos/fogões solares com diferentes configurações.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2015.

ANEEL - Atlas de energia elétrica do Brasil. Agencia Nacional de Energia Elétrica, 2.ed. - Brasília, DF, ANEEL, 2005. Disponível em: <[http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/03-Energia_Solar\(3\).pdf](http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/03-Energia_Solar(3).pdf)>. Acesso em: 03 dez. 2017.

BATISTA, S. S. **Análise do desempenho térmico de um forno solar para assamento de alimentos fabricado a partir de tambor de polietileno.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013.

BAUER, G., **Evaluation of usage and fuel savings of solar ovens in Nicaragua.** Energy Policy 97, p. 250–257, 2016.

BEN - Balanço Energético Nacional. Disponível em: <<https://ben.epe.gov.br/benrelatoriosintese.aspx>> Acesso em: 01 ago. 2017.

BRITO, J. O., **O uso energético da madeira.** Estudos Avançados, v.21, n.59, São Paulo, abr. 2007, p. 185-193. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-40142007000100015&lng=pt&nrm=iso>. Acesso em: 03 dez. 2017.

CUCE, E. e CUCE, P.M.. **A comprehensive review on solar cookers.** Applied Energy 102, p. 1399–1421, 2013.

DE ARAÚJO, C. C., **Fabricação e estudo de um forno solar tipo caixa com dispositivo de transporte**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2015.

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

ELETROLUX Disponível em: <<http://www.electrolux-ui.com//DocumentDownload.aspx?DocURL=2008\356\984803PT.pdf>>. Acesso em: 06 set. 2017.

FIGUEREDO, Marksuel. **Após aumentos no preço do gás de cozinha, donas de casa recorrem ao fogão à lenha em Natal**. G1 RN, Natal, 06 nov. 2017. Disponível em: <<https://g1.globo.com/rn/rio-grande-do-norte/noticia/apos-aumentos-no-preco-do-gas-de-cozinha-donas-de-casa-recorrem-ao-fogao-a-lenha-em-natal.ghtml>>. Acesso em: 08 nov. 2017.

GEDDAM, S., *et al.*, **Determination of thermal performance of a box type solar cooker**. Solar Energy 113, p. 324–331, 2015.

GOMES, J.W., **Obtenção e caracterização de um compósito de matriz polimérica com carga de resíduos gerados pela manufatura do MDF (medium density fiberboard) para a fabricação de um forno solar**. Tese de Doutorado do PPGEM, UFRN, 2015.

GOMES, J. W., **Construção e Análise de Desempenho de um Forno Solar Tipo Caixa Alternativo Construído a Partir de uma Sucata de Pneu**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, 2009.

HARMIM, A., *et al.*, **Solar cooking development in Algerian Sahara: Towards a socially suitable solar cooker**. Renewable and Sustainable Energy Reviews 37, p. 207–214, 2014.

HEREZ, A., *et al.*, **Review on solar cooker systems: Economic and environmental study for different Lebanese scenarios**. Renewable and Sustainable Energy Reviews 81, p. 421–432, 2018.

IBGE - **Estimativa de População**. Disponível em: <ftp://ftp.ibge.gov.br/Estimativas_de_Populacao/Estimativas_2016/estimativa_dou_2016_20160913.pdf>. Acessado em: 28 mai. 2017.

IEO - **International Energy Outlook 2016**. Disponível em: <[https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484\(2016\).pdf](https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484(2016).pdf)>. Acessado em: 09 setembro de 2017.

JEBASINGH, V.K., e HERBERT, G.M.J., **A review of solar parabolic trough collector**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 54, p. 1085–1091, 2016.

JUNIOR, A.P.M., **Fabricação e estudo de um fogão solar multifocal para cocção de alimentos**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2016.

KHATOD, D.K., *et al.* **Development of cooking sector in rural areas in India—A review**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 17, p. 44–53, 2013.

KUMAR, A., *et al.*, **A comprehensive review of Scheffler solar collector**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 77, p. 890–898, 2017.

KUMARESAN, G., *et al.*, **Performance assessment of a solar domestic cooking unit integrated with thermal energy storage system**. *Journal of Energy Storage* 6, p. 70–79, 2016.

LESSA, L., *et al.*, **What's cooking? Unverified assumptions, overlooking of local needs and pro-solution biases in the solar cooking literature**. *Energy Research & Social Science* 28, 2017, p. 98–108, 2017.

MELO, A.V.Q. **Projeto, construção e análise de desempenho de um forno solar alternativo tipo caixa a baixo custo**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2008.

NKHONJERA, L., *et al.*, **A review of thermal energy storage designs, heat storage materials and cooking performance of solar cookers with heat storage**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 75, p. 157–167, 2017.

OTTE, P. P., *et al.* **Solar cookers in developing countries—What is their key to success?**. *Energy Policy* 63, p. 375–381, 2013.

OTTE, P.P., **A (new) cultural turn toward solar cooking—Evidence from six case studies across India and Burkina Faso**. *Energy Research & Social Science* 2, p. 49–58, 2014.

OTTE, P.P.. **Solar cooking in Mozambique—an investigation of end-user's needs for the design of solar cookers**. *Energy Policy* 74, p. 366–375, 2014.

PORTAL BRASIL. **Brasil estará entre os 20 países com maior geração solar em 2018.** Disponível em: <<http://www.brasil.gov.br/infraestrutura/2016/01/brasil-estara-entre-os-20-paises-com-maior-geracao-solar-em-2018>>. Acesso em: 03 set. 2017.

Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento no Brasil. Disponível em: <www.action4energy.org/pt/>. Acesso em: 18 set. 2017.

REGATTIERI, A., *et al.*, **Innovative portable solar cooker using the packaging waste of humanitarian supplies.** *Newable and Sustainable Energy Reviews* 57, p. 319 - 326, 2016.

SCI - SOLAR COOKERS INTERNATIONAL. Disponível em: <<http://solarcooking.wikia.com>>. Acesso em: 12 set. 2017.

SCHELLER, Fernando. Um Brasil Sufocado Pelo Atraso. O Estado de S. Paulo, São Paulo, 30 mai. 2015. Disponível Em: <<http://economia.estadao.com.br/noticias/geral,nova-noticia,1697446>>. Acesso em: 10 ago. 2017.

SCHWARZER, K.; SILVA, M.E.V.. **Solar cooking system with or without heat storage for families and institutions.** *Solar Energy* 75, p. 35–41, 2003.

SCHWARZER, K.; SILVA, M.E.V.. **Characterisation and design methods of solar cookers.** *Solar Energy* 82, p. 157–163, 2008.

SILVA, E.J. **Fabricação e estudo de um sistema de aquecimento de água utilizando coletor solar de grade absorvedora formada com tubos de PVC na configuração série-paralelo.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2016.

SOUZA, L.G.M.; *et al.*, **Solar cooking built in composite material.** 20° COBEM – International Congress of Mechanical Engineering. Anais... Gramado, RS, 2009.

SOUZA, L.G.M.; *et al.*, **Solar Oven/Cooker manufactured from a waste drum.** 21th COBEM – 2011a, Natal-RN.

SOUZA, L.G.M.; *et al.*, **Solar oven/cooker manufactured from na EPS box.** 21th COBEM - 2011b, Natal-RN.

SOUZA, L.G.M., *et al.* **Solar oven manufactured in composite low thermal conductivity.** 22° COBEM – International Congress of Mechanical Engineering, Anais... Ribeirão Preto, 2013.

SOUZA *et al.*, **Solar oven manufactured from a eps thermal box**, COBEM– 2013. Ribeirão Preto – São Paulo -SP

SOUZA, L.G.M.; ARAÚJO, L.R.R.; DIAS, A.C.; *et al.*, **Forno solar fabricado com gesso acartonado**. VII CONEM - Congresso Nacional de Engenharia Mecânica. Anais... Uberlândia, 2014b.

SOUZA, L.G.M., *et al.*, **Forno solar fabricado em chapas de pvc utilizadas em forro de ambientes**. VII CONEM - Congresso Nacional de Engenharia Mecânica. Anais... Uberlândia, 2014a.

SPECHT, M.J.S. **Uso de lenha como combustível doméstico: padrões, impactos e perspectivas futuras para conservação da floresta atlântica ao norte do rio são francisco**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco, 2012.

SPINELLI, M.C.O. **Fabricação e estudo de um forno solar tipo caixa com capacidade simultanea de assamento de vários alimentos**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016.

VARELA, P.H.A. **Viabilidade térmica de um forno solar fabricado com sucatas de pneus**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013.

WEO – Word Energy Outlook 2015 – International Energy Agency. Disponível em: <<https://www.iea.org/Textbase/npsum/WEO2015SUM.pdf>>. Acesso em: 13 set. 2017.

YETTOU, F., *et al.*, **Solar cooker realizations in actual use: An overview**. Renewable and Sustainable Energy Reviews 37, p. 288–306, 2014.

ZUBI, G., *et al.*, **Development and assessment of a solar home system to cover cooking and lighting needs in developing regions as a better alternative for existing practices**. Solar Energy 155, p. 7–17, 2017.