



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**CONSTRUÇÃO E TESTES DE FOGÕES SOLARES PARA AS COMUNIDADES
CARENTES DO RIO GRANDE DO NORTE – BRASIL**

JOHNSON PONTES DE MOURA

Orientador: Prof. Dr. Sebastião Ribeiro Ferreira

Co-orientador: Prof. Dr. Luiz Guilherme Meira de Souza

Natal-RN

Abril de 2007

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

Dissertação de Mestrado, UFRN, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. Áreas de Concentração: Engenharia Ambiental, Engenharia de Processos, Modelagem e Simulação, Natal/RN, Brasil.

Orientador: Prof. Dr. Sebastião Ribeiro Ferreira

Co-orientador: Prof. Dr. Luís Guilherme Meira de Souza

RESUMO

Uma das principais características de nossa sociedade, ao menos sob um ponto de vista prático e material, é o aumento cada vez maior da demanda por abastecimento energético. Esta é a condição para a existência de nossa indústria, nossos meios de transporte e até mesmo a agricultura e a vida urbana. Enfim, é a condição para a existência de nossa sociedade como a conhecemos.

Hoje em dia mais de 98% de nossa energia procede de combustíveis fósseis: carvão, petróleo e gás natural. Por mais importantes que sejam as reservas de combustíveis fósseis são limitadas e, como a interrupção do consumo é praticamente impossível, o ritmo atual de exploração de tais combustíveis é insustentável. O petróleo e o carbono, além disso, são importantíssimas matérias-primas para a indústria química e seu desperdício como combustível é, no mínimo, uma falta de visão.

Até muito pouco tempo se dava por descartado o esgotamento da energia. Um homem comum simplesmente desconhecia a intrincada rede formada pela produção de combustível e a indústria que serve à sua comodidade. A divisão do trabalho, levada ao limite, foi a responsável por essa posição de puro descaso do pensamento: “não importa de onde venha, se eu o obtenho” que prevalecia em nossa sociedade de consumo. Não fazíamos conta do valor inerente ao que possuímos. Esta é uma das causas da alienação, da divisão entre a vida particular e a sociedade como um todo e os processos naturais dos quais dependemos.

Nos últimos anos, no entanto, este quadro tem se alterado significativamente. Pessoas comuns são melhores informadas, devido à crescente eficiência dos meios de comunicação, o que gera um fortalecimento da consciência comum, quanto à necessidade da manutenção de nossas reservas esgotáveis de energia e do desenvolvimento tecnológico no setor de aproveitamento de fontes de energia alternativa.

O Sol, além de fonte de vida, é a origem de toda as formas de energia que o homem vem utilizando durante sua história e pode ser a resposta para a questão do abastecimento energético no futuro, uma vez que aprendamos a aproveitar de maneira racional a luz que esta estrela constantemente derrama sobre nosso planeta. Brilhando a mais de 5 bilhões de anos, calcula-se que o Sol ainda nos privilegiará por outros 6 bilhões de anos, ou seja, ele está apenas na metade de sua existência e lançará sobre a Terra, só neste ano, 4000 vezes mais energia que consumiremos.

Frente a esta realidade, seria irracional não buscar, por todos os meios tecnicamente possíveis, aproveitar esta fonte de energia limpa, ecológica e gratuita. Discutiremos, a partir deste ponto, a disponibilidade da energia provenientes do Sol e possíveis aplicações de fogões solares para as comunidades carentes.

Pretende-se construir um modelo de fogão solar e testar sua viabilidade técnica-econômica, que tenha como características principais à facilidade de fabricação e montagem, o baixo custo (utilizando material compósito acessível às comunidades de baixa renda) e a simplicidade no mecanismo de movimentação do protótipo para incidência da luz solar direta.

Palavras-chaves: Energia; Meio Ambiente; Fogões Solares.

MOURA, Johnson Pontes. – Construction and tests of solar stoves for the devoid communities of the Great River of North-Brazil: Program of Master Degree of Chemical Engineering – UFRN – Natal/RN – Brazil.

ABSTRACT

One of the main characteristics of our society, to little under a practical and material point of view, is the increase each bigger time of the demand for energy supplying. This is the condition for the existence of our industry, our ways of transport and even though agriculture and the urban life. At last, it is the condition for the existence of our society as we know it.

Nowadays more than 98% of our energy proceeds from fossil fuels: coal, oil and natural gas. By more important that they are, the fossil fuel reserves are limited e, as the interruption of the consumption is practically impossible, the current rhythm of exploration of such fuels are unsustainable. The oil and the carbon, moreover, are much important raw materials for the chemical industry and its wastefulness as combustible it is, at the very least, a vision lack.

Until very little time if it gave for discarded the exhaustion of the energy. A common man simply was unaware of the intricate net formed for the fuel production and the industry that serves to its comfort. The division of the work, taken to the limit, was the responsible one for this position of pure indifference of the thought: "he does not matter of where he comes, if I get it" that he prevailed in our society of consumption. We did not make account of the inherent value to that we possess. This is one of the causes of the alienation, the division between the particular life and the society as a whole and the natural processes of which we depend.

In the last years, however, this picture if has modified significantly. Common people better are informed, due to increasing efficiency of the media, what she generates a increasing of the common conscience, how much to the necessity of the maintenance of our exhaustible reserves of energy and of the technological development in the sector of exploitation of alternative power plants.

The Sun, beyond life source, is the origin of all the energy forms that the man comes using during its history and can be the reply for the question of the energy supplying in the future, a time that learns to use to advantage in rational way the light that this

star constantly special tax on our planet. Shining more than the 5 billion years, it is calculated that the Sun still in them will privilege for others 6 billion years, or either, it is only in the half of its existence and will launch on the Earth, only in this year, 4000 times more energy that we will consume.

Front to this reality, would be irrational not to search, by all means technical possible, to use to advantage this clean, ecological and gratuitous power plant. We will argue, from this point, the availability of the energy proceeding from the Sun and possible applications of solar stoves for the poor communities.

It is intended to construct a model of solar stove and to test its viability technique-economic, that has as characteristic main the easiness of manufacture and assembly, the low cost(using material accessible composite to the low income communities) and simplicity in the mechanism of movement of the archetype for incidence of the direct solar light.

Keywords:	Energy;	Environment;	Solar	Cookies.
------------------	---------	--------------	-------	----------

DEDICATÓRIA

A Deus, por sua graça sempre presente em minha vida;

Aos meus pais e minha esposa, Fabiana Alves Pinto, por todo amor, empenho e porto seguro;

Aos meus irmãos, por estarem sempre me incentivando e dando bons exemplos.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Dr. Sebastião Ribeiro Ferreira por sua dedicação, empenho e presteza e interesse demonstrado por este trabalho;

Ao professor Luís Guilherme pelo envolvimento, colaboração; pela paciência e apoio em todas as horas, bem como seu companheirismo e amizade;

Ao Bolsista Érico Costa pela ajuda nos trabalhos;

Aos amigos e companheiros do curso de Engenharia Química;

À coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química.

ÍNDICE

RESUMO	I
ABSTRACT	III
DEDICATÓRIA	V
AGRADECIMENTO	VI
LISTA DE FIGURAS	XI
LISTA DE TABELAS	XI
Capítulo 1 – Introdução Geral	01
Capítulo 2 - Objetivos	10
2.1. Objetivos Gerais	11
2.2. Objetivos Específicos	11
Capítulo 3 – Justificativa e Relevância do Trabalho	12
Capítulo 4 – Aspectos Teóricos	14
4.1. Utilização da energia solar	15
4.2. Aspectos tecnológicos	55
4.3. Aspectos institucionais	58
4.4. A energia solar no contexto energético mundial	60
4.5. Aspectos ambientais	65
4.6. O Brasil no campo da geração de energia	68
4.7. Viabilidade de execução	69
4.8. Eletricidade do Sol	71
4.9. Modelo Brasil - SR	73
4.10. Mapas do fluxo de radiação solar no território brasileiro	75
4.11. Dados da energia solar (NE e RN)	79
4.12. As Fontes de Energia Renováveis	80
4.13. Considerações sobre o planejamento da geração elétrica	86
Capítulo 5 – Estado da Arte	88
5.1. Introdução	89
5.2. Fogão solar tipo caixa de baixo custo	90
5.3. A importância das Energias Renováveis e dos Materiais	97
5.4. Tipos de Coletores Concentradores	105
5.5. Os Fogões Solares	111
5.6. Fogões solares conjugados de uso múltiplo	119

5.7. Estudo de caracterização, aplicação e viabilidade econômica de projetos solares	132
5.8. Fogão Solar Tipo Caixa	134
5.9. Projeto e Análise do Fogão Solar Tipo Caixa	136
5.10. Cozinhas Concentradoras	144
Capítulo 6 – Proposta do Trabalho	147
Capítulo 7 – Materiais e Métodos	149
7.1. Materiais	157
7.2. Descrição do Fogão	157
7.3. Métodos e testes	161
Capítulo 8 – Modelagem do Processo	162
8.1. Modelagem de cálculos do tempo mínimo de cozimento solar realizado num fogão do tipo caixa	163
8.2. Programa em matlab empregado como auxiliar no cálculo da função erro	187
Capítulo 9 – Viabilidade de Execução	200
Capítulo 10 - Cronograma	202
REFERÊNCIAS	204
ANEXOS	209

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Piranômetro	4
Figura 4.1. Associação da transferência de calor por condução com difusão de energia	17
Figura 4.2. Transferência de calor unidimensional por condução	18
Figura 4.3. Desenvolvimento da camada limite na transferência de calor por convecção.	20
Figura 4.4. Processo de transferência de calor por convecção	21
Figura 4.5. Transferência por radiação	24
Figura 4.6. Distribuições de temperaturas transientes em um sólido semi-infinito para três condições superficiais	28
Figura 4.7. Histórico das temperaturas em um sólido semi-infinito com transferência de calor por convecção na superfície	32
Figura 4.8. Contato interfacial entre dois sólidos semi-infinitos com diferentes temperaturas iniciais	33
Figura 4.9. Constante solar G_s e radiação solar extraterrestre	34
Figura 4.10. Efeitos da atenuação atmosférica sobre a distribuição espectral da radiação solar	35
Figura 4.11. Radiação solar recebida na superfície terrestre	37
Figura 4.12. Radiação solar total sobre uma superfície horizontal, medida em Greenbelt, Maryland, a 14 de maio de 1971	39
Figura 4.13 Radiação solar total sobre uma superfície horizontal medida em Greenbelt, Maryland, a 14 de maio de 1971	39
Figura 4.14. Coordenadas para a definição do fator de forma	42
Figura 4.15. (a) Espaço fechado cheio com meio inerte; (b) balanço de energia por unidade de área da zona i	44
Figura 4.16. Espaço fechado com duas zonas e o circuito equivalente	47
Figura 4.17. Coletor Plano	48
Figura 4.18. Secador Solar	49
Figura 4.19. Destilador Solar	49

Figura 4.20. Concentrador cilíndrico-parabólico (foco linear)	50
Figura 4.21. Concentrador Parabólico (foco pontual)	51
Figura 4.22. Heliostato	51
Figura 4.23. Campo de Heliostatos	51
Figura 4.24. Sistema Fotovoltáico Fixo	54
Figura 4.25. Sistema Fotovoltáico Móvel	54
Figura 4.26. Sistema de Iluminação Pública	54
Figura 4.27. Fluxograma do modelo de transferência radiativa	74
Figura 4.28. Mapas de radiação solar global média mensal para o território brasileiro	77
Figura 4.29. Mapas de radiação solar média anual para o território brasileiro	78
Figura 4.30. Origem das fontes de energia	82
Figura 5.1. Fogão solar tipo caixa de baixo custo	91
Figura 5.2. Teste para assamento do bolo	93
Figura 5.3. Comportamento das temperaturas médias do absorvedor e do forno durante o ensaio	94
Figura 5.4. Comportamento das temperaturas da água durante o ensaio	95
Figura 5.5. Tipos de Coletores Concentradores	106
Figura 5.6. CPC	106
Figura 5.7. Concentrador Cilindro-Parabólico	107
Figura 5.8. Sistema de Receptor Central com Foco Linear	108
Figura 5.9. Aplicações Práticas de Concentradores pelo Mundo	109
Figura 5.10. Prato parabólico com receptor de foco pontual	110
Figura 5.11. heliostatos (Sistema Torre)	110
Figura 5.12. As dimensões do FSP	112
Figura 5.13. Variação da temperatura da água e radiação solar com a hora do dia	116
Figura 5.14. Variação da diferença de temperatura ΔT entra a água e o ar ambiente com a hora do dia	116
Figura 5.15 variação da energia e do consumo de saída para o fogão solar com a hora do dia	117

Figura 5.16. Variação da energia η e da eficiência de consumo ψ do fogão solar com a hora do dia	117
Figura 5.17. Vista lateral da curva contornada do concentrador	122
Figura 5.18. Esquema do concentrador	123
Figura 5.19. O absorvente do tipo fervedor	126
Figura 5.20. Fervedor concentrado construído com dez barras de alumínio pintado de preto, de secção triangular, ocupando cilíndricamente o espaço	128
Figura 5.21. O gráfico mostra o aumento da temperatura em três diferentes pontos de uma das barras que compõe concentrador cilíndrico	128
Figura 5.22. Conjunto de fogão ocupado por um pote com 10 litros como absorvedor no concentrador	129
Figura 5.23. Variação na temperatura do pote enquanto ele recebe radiação	130
Figura 5.24. Vista em perspectiva da cozinha solar tipo caixa	135
Figura 5.25. Fogão solar painel de Bernard	136
Figura 5.26. Perspectiva isométrica do fogão tipo caixa	138
Figura 5.27. T_{mp} Vs τ	141
Figura 5.28. τ_{bolha} Vs $(100 - T_a)/H$	142
Figura 5.29. $T_{w,médio}$ Vs τ	143
Figura 5.30. Fogão solar construído no Laboratório de Máquinas Hidráulicas e Energia Solar	144
Figura 5.31. Cozinhas Concentradoras	145
Figura 7.1. Caixa solar com cobertura, janela e refletor	150
Figura 7.2. Efeito estufa	151
Figura 7.3. Orientação do vidro	152
Figura 7.4. Refletores para ganho solar	152
Figura 7.5. O calor conduzido através da panela para o cabo	153
Figura 7.6. O calor irradia a partir do fogão aquecido	153
Figura 7.7. O ar aquecido pode escapar através das frestas	154
Figura 7.8. Massa térmica dentro do fogão solar	154
Figura 7.9. Material estrutural, de isolamento, transparente e	

resistente à umidade	155
Figura 7.10. Caixas solares mais largas captam mais luz solar do leste e do oeste	158
Figura 7.11. Fogão solar proposto	162
Figura 8.1. Esboço bife de frango	165
Figura 8.2. Fogão utilizado no laboratório de máquinas hidráulicas da UFRN	165

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1. Principais dados relativos ao Sol	05
Tabela 4.1. Valores típicos para o coeficiente de transferência de calor por convecção	23
Tabela 4.2. Níveis de temperaturas obtidos por alguns tipos de fogões	69
Tabela 4.3. Dados: Centro de Estudos de Energia Solar	79
Tabela 4.4. Média Mensal: 250,3 – 3003,6 horas de Sol/ano	79
Tabela 4.5. Dados: Anuário Estatístico do RN/1997	80
Tabela 4.6. Quadro comparativo das características das fonte alternativas de energia elétrica	84
Tabela 5.1. Temperaturas entre 9 e 15 h do dia	94
Tabela 5.2. Aquecimento de 1,0 litro de água	95
Tabela 5.3. Modificação de posições por ano e Coeficiente de Concentração	104
Tabela 5.4. Sumário de resultados	118
Tabela 5.5. Um exemplo dos resultados para o modelo do concentrador	125
Tabela 8.1. Tempo de Cozimento	163
Tabela 8.2. Temperaturas obtidas no segundo experimento	165

Capítulo 1

Introdução Geral

1. Introdução geral

O uso de concentradores para captar a energia solar, remonta pelo menos dois séculos antes de Cristo, quando Arquimedes havia repellido um ataque romano a Siracusa. Mas somente a partir da década passada se intensificaram os estudos e o desenvolvimento de tecnologias para cozinhas solares segundo Beyer et al. (2004).

A idéia de um fogão alimentado por energia solar não é novidade. Nem mesmo a utilização de parábolas para aquecer é uma descoberta: os vikings ateavam fogo às velas das embarcações inimigas utilizando um equipamento semelhante Beyer et al. (2004).

Segundo Beyer et al. (2004) os primeiros experimentos relacionados com fornos solares tipo caixa (fogões solares tipo caixa) para a preparação de alimentos foram descritos por Nicholas de Saussure, a mais de 200 anos, por volta de 1770. Saussure desenhou um fogão que consistia numa caixa retangular isolada e com a parte de cima envidraçada. A tampa da caixa, refletora, encarrega-se de concentrar a radiação dentro da caixa. Quando essa radiação entra na caixa, é absorvida pelo seu fundo que é pintado de preto mate, quando é libertada por este, já tem um comprimento de onda infravermelho, o que não permite que volte a passar pelo vidro (este é opaco aos infravermelhos). Este aparelho atinge cerca de 160 °C, conseguindo cozer ou assar qualquer alimento.

Em 1837, o astrônomo inglês John Herschel, filho do famoso astrônomo Sir William Herschel, construiu um pequeno dispositivo para seu próprio uso durante uma expedição que realizou no Cabo da Boa Esperança. Consistia também numa caixa negra que era enterrada na areia, para isolá-la termicamente, e era coberta com dupla chapa de vidro para permitir a entrada da luz solar e evitar que o calor escape. Herschel registrou uma temperatura de 116 °C nesse fogão, que era utilizado para cozinhar alimentos à base de carne e vegetais durante a expedição (Beyer et al., 2004).

Também C. G. Abbot, outro astrônomo nascido em 1873, usou um fogão solar ao sul do Monte Wilson, onde tinha o seu observatório, e lhe serviu durante muitos anos para preparar seus alimentos.

Como vêem, o fogão solar é um aparelho bastante simples de se fazer e utilizar, e que trás muitos benefícios a quem o utiliza, constituindo-se em um equipamento eficaz. Mas importante saber e compreender os motivos pelos quais, países subdesenvolvidos como é o caso do Brasil, não utilizarem essa tecnologia em grande escala. E bem verdade que já foram

feitas algumas tentativas nesta direção, mas sem grande sucesso, já que sempre foi visto como um aparelho feio e artesanal, concebido por pessoas que não podem ter um fogão convencional, além da falta de uma participação mais efetiva por parte do governo.

Talvez uma das diretivas prioritárias na concepção de um forno solar é dar-lhe uma visão moderna, uma imagem de alternativa do futuro ao fogão. Terá, contudo, de ser altamente resistente e facilmente transportável, mantendo a simplicidade de utilização e o baixo custo. Mas, talvez seja necessário importar fogões solares, pois não é dado ao brasileiro o direito de produzir e/ou utilizar novas tecnologias sem que antes encham os bolsos dos nossos irmãos do 1º Mundo (Beyer et al., 2004).

□ **Potencial Solar**

Em qualquer ponto da superfície terrestre existe um suprimento de energia enviado pelo reator de fusão nuclear (o Sol) situado a 151 milhões de quilômetros de nós na forma de radiação térmica. A energia térmica irradiada sobre a Terra chega na parte exterior da atmosfera terrestre com uma intensidade média de 1353 W/m^2 . Ao passar pela atmosfera sofre uma atenuação chegando na superfície terrestre, em dia de céu limpo, com cerca de 1000 W/m^2 de energia radiante por unidade de área perpendicular ao feixe de raios.

Embora seja apenas uma estrela média, o Sol inunda o espaço a sua volta com uma quantidade imensa de energia. O que ele produz em um único segundo, daria para cobrir o consumo atual de toda humanidade durante 10.000 anos. O imenso peso do Sol, concentrado no seu centro, faz os núcleos se unirem uns aos outros, numa reação de fusão nuclear. A chave do processo é o tamanho: o Sol é 1 bilhão de vezes maior que a Terra e 1 milhão de vezes mais pesado.

A energia solar é a mais promissora dentre as formas energéticas conhecidas. Além de não ser poluente, a energia solar pode ser considerada inesgotável. Podemos dizer que o sol é em última análise a fonte responsável pela maior parte de energia existente na superfície do globo terrestre.

Quase a totalidade da energia incidente sobre a Terra é proveniente do Sol, em forma de radiação eletromagnética. Esta radiação está assim distribuída: ultravioleta, visível e de infravermelho.

A energia do Sol anualmente captada pela Terra, representa cinco a dez vezes todas as reservas de combustíveis conhecidas, sendo uma energia limpa com propriedade bactericida

em virtude da presença do ultravioleta. O Sol não é uma nova fonte de energia. A sua utilização na produção de calor e potência por vários métodos novos constitui uma nova maneira de proporcionar à humanidade os benefícios de uma energia que tem a idade da Terra.

A radiação solar é medida em W/m^2 e é de natureza direta e difusa, a soma destas duas radiações é a radiação global. A radiação solar direta (medida pelos pireliômetros) é aquela proveniente do disco solar para os respectivos dias de insolação e que não sofre interação com a atmosfera terrestre, enquanto que a radiação solar difusa é toda aquela oriunda da atmosfera. A radiação solar global (medida pelos piranômetros Fig. 1.1) é, portanto aquela proveniente do conjunto do hemisfério aparente diurno da esfera celeste.

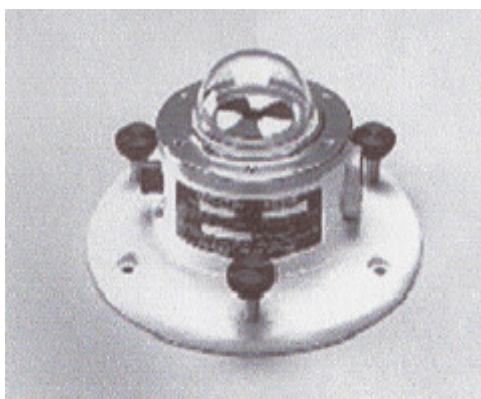


Figura 1.1. Piranômetro

A Radiação eletromagnética é decorrente das reações termonucleares que ocorrem no núcleo do Sol, chegando até nós já bastante diluída em função dos efeitos do espalhamento e absorção pela atmosfera. Alcançando níveis máximos em torno de $1,0 kW/m^2$, em regiões privilegiadas e em horário de pico.

A nível de Rio Grande do Norte, região do nordeste brasileiro, pode-se considerar uma Radiação Solar Global média na faixa entre $0,5$ a $0,7 kW/m^2$, com nível de insolação médio da ordem de 8 horas por dia. Para efeito de projeto uma consideração da radiação solar global da ordem de $0,6 kW/m^2$ é perfeitamente aceitável. No que diz respeito à insolação para todas as aplicações da energia solar, pode-se considerar uma média de 6 horas para o ano. A tabela 1 mostra os principais dados relativos ao Sol.

Tabela 1.1. Principais dados relativos ao Sol. (cometa, 1978).

Distância média da terra	$1,486 \times 10^8$ Km
Raio	$6,960 \times 10^5$ Km
Massa	$1,991 \times 10^{33}$ g
Densidade Média	$1,410 \text{ g/cm}^3$
Energia Total Média	$3,860 \times 10^{20}$ Mw
Fluxo de Energia na Temperatura Superficial	$63,4 \text{ Mw/cm}^2 - 5780\text{K}$

No mundo contemporâneo onde a demanda energética tende para um crescimento vertiginoso para atender às necessidades da humanidade hoje estimada em aproximadamente 6 bilhões de pessoas, ainda sob os resquícios de uma crise energética desencadeada na década de 70; o homem tem se voltado para a natureza buscando nos seus elementos as alternativas energéticas capazes de lhe proporcionar a energia de que tanto necessita para a manutenção de um nível de vida compatível com a sua própria dignidade.

Na verdade as alternativas energéticas oriundas dos recursos renováveis naturais estão sendo retomadas. O vento e o Sol, principalmente, já desempenharam no passado papéis de importância significativa na História da Humanidade. Com as previsões até certo ponto alarmantes referentes à exaustão dos recursos petrolíferos mundiais, configurada pela crise energética eclodida na década de 70, os países desenvolvidos, principalmente, aceleraram as suas pesquisas na obtenção de novas tecnologias alternativas elegendo a energia Solar como a mais promissora alternativa energética do futuro.

Essa retomada de posição dos países desenvolvidos não significa dizer necessariamente que a manutenção dos seus padrões energéticos esteja na dependência dessas novas tecnologias, mas e principalmente porque é exatamente nos países em desenvolvimento que se encontra um verdadeiro mercado em potencial para essas novas tecnologias, capaz de assegurar um vantajoso comércio internacional além de, com isso, estabelecer no futuro, uma outra forma de dependência configurada pela dominação tecnológica no campo das energias alternativas.

Tanto isto é verdade que surgiram na França e nos Estados Unidos, principalmente, projetos grandiosos de geração de energia elétrica via Sol, como é o caso do Projeto THEMIS

de 1 MWatt, localizado em Targassone no sul da França, o Projeto BARSTOW de 10 MWatt e 35 MWatt solar, construído nos Estados Unidos, a Central de MITSUBISHI de 1 MWatt, construído no Japão, além de outros semelhantes, hoje desativados.

O objetivo primordial a ser alcançado com tais instalações solares, além de testar a respectiva viabilidade técnica, era o de dominar a tecnologia solar pertinente prevendo uma utilização futura, onde os países em desenvolvimento, detentores da matéria-prima em abundância, serão logicamente os alvos de seus pacotes tecnológicos de energia alternativa.

Os países em desenvolvimento não podem evidentemente prescindir da tecnologia dos países ricos, mas nem por isto devem se colocar na cômoda posição de simples espectadores, pois esta é uma posição que poderá no futuro se tornar bastante incômoda para as suas respectivas economias.

Os países em desenvolvimento como o Brasil, precisam urgentemente partir para uma ação integrada no sentido de desenvolverem as suas próprias tecnologias energéticas alternativas, baseadas nas vocações energéticas de cada país, pois é exatamente nos países em desenvolvimento que se encontra o maior potencial destas fontes alternativas.

As relações internacionais no campo dos negócios, da ciência, da tecnologia, da cultura etc. são necessárias e salutaras à comunidade internacional. O que não é salutar para os outros países em desenvolvimento é que tais relações nos transformem em credores e dependentes eternos!

É preciso, portanto, desenvolver a própria tecnologia neste campo já que o desenvolvimento de um país é em última análise fundamentado na energia.

Se a energia solar ainda não encontrou o seu espaço dentro do contexto energético do país, assim como outras formas alternativas de energia, isto não será verdade na virada do século.

“É oportuno transcrever aqui a opinião do diretor da Atomic Energy Commission, Mr. Glenn T. Seaborg dos Estados Unidos constante da página 26 da publicação ENERGIA SOLAR, do Instituto de Tecnologia Internacional-novembro de 1978, quando assim se expressa: ” O caso dos países em vias de desenvolvimento merece aqui uma atenção particular. Mesmo dentro da ótica habitual de uma economia que negligencia a degradação do meio ambiente, a energia solar, geralmente abundante nos países em questão, deveria ter um lugar de destaque em seu desenvolvimento. Durante vários anos acreditou-se, que uma energia nuclear abundante e econômica poderia permitir o desenvolvimento de certos países costeiros áridos infelizmente não é possível levar a bom termo estes projetos por razões

econômicas (em compensação) a energia solar poderá em futuro próximo fornecer economicamente a eletricidade, e mesmo antes disso, ser útil de várias formas.

A posição do Brasil diante da crise energética de 1973 que carregou um fluxo de riquezas sem precedentes para os países da OPEP (Organização dos Países Exportadores de Petróleo), é um pouco mais confortante considerando o fato de que os seus recursos petrolíferos não foram de todo explorados.

Além deste fato, que é de importância fundamental para o desenvolvimento da economia brasileira, podem ainda alinhar o vasto potencial brasileiro no campo da agricultura, pecuária, energia de biomassa e tantas outras riquezas minerais adormecidas, além de outras formas de energia (como a solar), à espera de uma exploração racional, o que tem tornado este país tão cobiçado por nações desenvolvidas.

Por outro lado o Brasil dispõe de uma bacia hidrográfica que constitui um fabuloso potencial energético, a qual possibilitou a construção de grandes barragens e possibilitará ainda a execução de tantos outros projetos de real significação para a economia nacional, mas devem ser lembradas que a construção de hidroelétricas podem acarretar em problemas ambientais.

A expansão petrolífera brasileira é hoje uma realidade incontestável! As plataformas submarinas, em que pese às dificuldades de extração do petróleo face às jazidas cada vez mais profundas, não constituem problemas maiores graças à tecnologia nacional desenvolvida pela PETROBRÁS e à indiscutível e comprovada capacidade profissional de seus técnicos.

Com todo este elenco de recursos energéticos o problema brasileiro não é propriamente um problema fundamentado basicamente no petróleo. É muito mais um problema relacionado com energia; energia imprescindível ao seu desenvolvimento para que possa no futuro sair da condição de país pertencente ao bloco dos países em desenvolvimento.

O desenvolvimento do país deverá ser fundamentado no sentido de evitar os riscos ecológicos decorrentes desse mesmo desenvolvimento.

O extraordinário aumento do consumo de energia verificado nas três últimas décadas tem chamado a atenção para o seu impacto sobre os recursos ecológicos, principalmente nos países altamente industrializados. A poluição do ar e da água não conhece limites políticos! O homem pode criar nações, mas não pode criar a biosfera que é única na Terra!

A exploração de energia em um país pode seguramente gerar efeitos adversos em outros países e oceanos quando tal exploração negligencia as normas internacionais de segurança.

Não há dúvida de que o consumo de energia continuará a aumentar, principalmente nos países ávidos de desenvolvimento como é o caso brasileiro.

A causa principal da poluição do ar no mundo industrializado é devido à combustão de materiais fósseis em veículos e outros meios de transporte, nas indústrias, usinas termoeletricas, edifícios comerciais, residenciais etc.

Entre os principais poluentes estão os hidrocarbonetos, os óxidos de enxofre, nitrogênio, partículas sólidas de matéria etc.

Estes poluentes, de formas diversas, afetam a saúde da população, dos animais, das plantas e até mesmo podem causar danos materiais a edifícios.

No caso da água a poluição está caracterizada pelo rejeito residencial e industrial lançados aos rios e seus afluentes, detritos aquecidos de usinas elétricas, vazamento de petróleo nos oceanos e assim por diante.

As usinas nucleares são uma outra ameaça à ecologia! “O lixo atômico radioativo é na verdade um problema que transcende todas as diferenças nacionais e culturais e que se estenderá pelos séculos afora.”

“O freio ecológico final ao consumo de energia não será caracterizado pela exaustão dos recursos nem pelos efeitos específicos da poluição, porém pelo impacto de consumo de energia não limpa, na Terra.”

Assim como no passado o clima da Terra foi afetado por profundas mudanças, como por exemplo, o desaparecimento de terras férteis transformadas em desertos calcinados em decorrência da Era Glacial, não resta dúvidas de que no futuro, mesmo independente do controle do homem, forças naturais causarão outras modificações climáticas importantes. O consumo de energia na atividade contemporânea está se aproximando dos níveis nos quais a possibilidade de efeitos irreversíveis sobre o clima da Terra, começa a se constituir numa preocupação crescente.

De acordo com a segunda lei termodinâmica, o calor é o resultado final de todo o consumo de energia e independe do combustível e da tecnologia de emprego. O consumo de energia implica na liberação de calor que no futuro terá grande influência em relação à quantidade de energia solar recebida pela Terra. “Se o consumo mundial de energia continuar a aumentar, segundo índices históricos de 5 % ao ano, ou talvez mais, a quantidade de calor liberada pela atividade humana atingirá 0,1 % no ano 2050 e 1 % no ano 2100.”

No início da década de 70 o calor produzido pelo homem era equivalente a 0,01 % da energia solar incidente na Terra. “Alguns cientistas especulam que pode existir uma conexão

causal entre a liberação de calor na Europa e a seca na África Subsaariana.” “Por isto muito antes que o limite térmico ao consumo mundial de energia seja atingido, é bem possível que ocorram substanciais efeitos locais ou regionais” (Beyer et al., 2004).

Em síntese, o uso cada vez maior de energia poderá, pelo calor liberado, gerar fatores de desestabilização no equilíbrio das forças da natureza que regulam o clima da Terra.

As modernas sociedades industriais das grandes metrópoles necessitam de grandes quantidades de petróleo para o transporte de pessoas. Por outro lado as futuras sociedades dificilmente poderão contar com essa forma de energia e é muito provável que passarão a depender da eletricidade de origem nuclear ou mesmo termonuclear e solar.

De acordo com o IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), em 1996, a extração anual de lenha no Nordeste brasileiro é de 18.000.000 de metros cúbicos e a população nordestina da zona rural é da ordem de 17.000.000 de habitantes. Se o fogão solar fosse usado por apenas 30 % desta população, a extração de lenha para cozimento de alimentos sofreria uma redução anual de 5.370.000 metros cúbicos, cifra esta nada desprezível.

Esses dados apontam para a necessidade de massificar o uso do fogão solar para o cozimento de alimentos, como forma de preservação da natureza, e contribuição para amenizar o desequilíbrio ecológico pelo uso indiscriminado da lenha, além do fato de minimizar a emissão de gases poluentes para a atmosfera. Como se podem ver, estudos que viabilizem o uso do fogão solar, através da otimização do seu processo de construção e dos níveis de temperatura gerados, bem como a melhoria do conforto de quem o utiliza, devem ter prioridade e são imprescindíveis para uma política de combate ao desequilíbrio ecológico, que amenizem a matriz energética, contribuam para a fixação do homem no campo e possa dar-lhe uma opção de geração de renda, através do domínio da construção de fogões solares, para sua futura comercialização (Bezerra, 1986).

Capítulo 2

Objetivos

2. Objetivos

2.1. Objetivos Gerais

Construir e testar fogões solares para as comunidades carentes do nosso Estado, utilizando um compósito à base de gesso e isopor (produto derivado do petróleo), material naturalmente encontrado na região nordestina.

2.2. Objetivos Específicos

Estudar o modelo de transferência de calor proposto para calcular o tempo de cozimento em um fogão solar tipo caixa;

Implementar em linguagem de engenharia computacionalmente o modelo proposto para cozimento de um alimento no fogão solar tipo caixa;

Construir um modelo de fogão solar e testar sua viabilidade técnica-econômica, que tenha como características principais a facilidade de fabricação e montagem, o baixo custo (utilizando material compósito acessível às comunidades de baixa renda).

Utilizar matérias-primas das regiões implantadas, adquiridas até mesmo em sucatas promovendo, assim, um estímulo à reciclagem de matérias e a preservação do meio ambiente.

Capítulo 3

Justificativa e Relevância do Trabalho

3. Justificativa e Relevância do Trabalho

Desde muito tempo as comunidades rurais do Brasil e principalmente as do nordeste sofrem com a falta de infra-estrutura básica. No Rio Grande do Norte onde existem comunidades rurais isoladas serão implantadas fogões solares tipo caixa e o pessoal treinado para a construção dos fogões solares de baixo custo, para fins de geração de emprego e renda com benefício direto e indireto para o município.

Serão frutos deste projeto construções de protótipos de fogões solares que empregam fontes alternativas de energia para as comunidades carentes, utilizando materiais de baixo custo orçamentário, para a melhoria das condições de vida da população rural (econômica, social, educacional, saúde, conforto). Este trabalho trará uma efetiva solução para diversas famílias, seja pelo baixo custo de construção e montagem do fogão seja pela economia que ele proporciona ao consumo de energia, com relação ao gás de cozinha. Tudo isso aliado a uma conscientização ecológica com o uso de materiais compósitos, descartados ou encontrados em sucatas cuidando assim da região onde vivem.

O trabalho também apresentará uma boa contribuição científica e poderá servir como fonte de pesquisa para desenvolvimento de novas formas de energias limpa e renováveis.

Capítulo 4

Aspectos Teóricos

4. Aspectos Teóricos

A base deste trabalho assenta-se na questão energética, no contexto da utilização das energias alternativas. Abordar-se-á aspectos do potencial da energia solar que foi utilizada como fonte para o referencial teórico e suas inter-relações com o meio ambiente, denotando sua estreita ligação com uma política de substituição de combustíveis convencionais e mais caros, contribuindo para a matriz energética de nosso país e a aquisição de uma tecnologia mais barata.

A energia evoluciona no seu uso (fontes e técnicas), inerentemente a elementos como: os sócio-econômicos que incluem aspectos como as necessidades, o mercado, o capital disponível, os benefícios, a regulamentação; os culturais como os gostos, satisfação, curiosidades, espírito de sacrifício para alcançar um objetivo, e difusão do conhecimento; os conhecimentos teóricos e científicos, outras tecnologias e seu desenvolvimento. Isto tudo demonstra que o uso da energia evolui de uma forma não linear.

4.1. Utilização da energia solar

4.1.1. Utilizações Puramente Térmicas

São utilizações puramente térmicas as que a radiação solar é convertida em calor, sendo esse calor transmitido a uma “chapa” (placa). Nesta área da energia solar estão incluídos os coletores solares para aquecimento de líquidos, os secadores solares para grãos, frutos e sementes, os destiladores solares e os fogões solares.

4.1.2. Utilizações Através da Conversão Termodinâmica

A conversão termodinâmica da energia solar baseia-se na utilização de diversos ciclos termodinâmicos (ciclos de Rankine, ciclos de Stirling, ciclos de absorção) e tem sido objeto de estudos e projetos para tornar viável a utilização da energia solar, substituindo fontes convencionais, na produção de trabalho mecânico.

4.1.3. Meios de Transferência de Energia

Os fundamentos de transferência de calor utilizados no projeto dos fogões solares serão mostrados a seguir. E, por sua vez, estes conceitos serão detalhados e usados no capítulo 7 deste projeto de pesquisa.

4.1.3.1. Condução

Ao mencionar a palavra *condução*, devemos nos lembrar imediatamente dos conceitos de *atividade atômica e molecular*. Uma vez que são processos físicos que ocorrem a esses níveis os responsáveis por esse modo de transferência de calor. A condução pode ser vista como a transferência de energia das partículas mais energéticas para as partículas de menor energia, em um meio, devido às interações entre elas.

O mecanismo físico da condução pode ser mais facilmente explicado utilizando-se de um gás e das noções familiares da termodinâmica. Considere um gás no qual exista um gradiente de temperatura e suponha que não exista *movimento global ou agitação mecânica da mistura*. Logo, o gás pode ocupar o espaço entre as duas superfícies mantidas a diferentes temperaturas, conforme mostrado na Fig.4.1. Associamos a temperatura em qualquer ponto com a energia das moléculas do gás nas proximidades desse ponto. Essa energia, por sua vez, está relacionada ao movimento aleatório de translação, assim como aos movimentos internos de rotação e de vibração das moléculas.

Temperaturas mais elevadas estão associadas a energias moleculares maiores, e, quando as moléculas vizinhas colidem, conforme ocorre constantemente, há, necessariamente, transferência de energia das moléculas de maior energia para as de menor energia. Na presença de um gradiente de temperatura, ocorre a transferência de energia por condução, portanto, no sentido da diminuição da temperatura. Essa transferência é evidente na Fig. 4.2. Devido ao movimento *aleatório* das moléculas, o plano hipotético em x_0 é constantemente atravessado tanto por moléculas localizadas acima do plano quanto pelas localizadas abaixo dele. Contudo, moléculas localizadas acima do plano estão associadas a temperaturas maiores do que as localizadas abaixo, e, nesse caso, a transferência *líquida* de energia ocorre no sentido positivo de x . Pode-se nos referir a essa transferência líquida de energia pelo movimento aleatório das moléculas como sendo uma *difusão* de energia.

Nos líquidos a situação é muito semelhante, embora as moléculas se encontrem mais próximas umas das outras e com isso as interações moleculares se tornem mais fortes e mais freqüentes. Similarmente, em um sólido, a condução pode ser atribuída à atividade atômica na forma de vibrações dos retículos. Uma visão moderna é a de associar a transferência de energia a *ondas na estrutura dos retículos* induzidas pelo movimento atômico. Nos não-condutores, a transferência de energia se dá exclusivamente através dessas ondas; em um condutor, a transferência também é devida ao movimento de translação dos elétrons livres.

Existem vários exemplos de transferência de calor por condução. A ponta de uma colher de metal, quando imersa em uma xícara de café quente, será aquecida devido à condução de energia através da colher. Em um dia de inverno, há uma perda significativa de calor de uma sala aquecida para o ambiente externo. Essa perda é devida, principalmente, à transferência de calor por condução através das paredes que separam o ar do interior da sala do ar externo.

É possível quantificar os processos de transferência de calor em termos das equações de *taxas de transferência de calor* apropriadas. Essas equações podem ser utilizadas para calcular a quantidade de energia transferida por unidade de tempo. Para a condução de calor, a equação da taxa de transferência é conhecida como *lei de Fourier*. Para a parede plana mostrada na Fig. 4.2. que apresenta uma distribuição de temperatura $T(x)$, a equação da taxa de transferência de calor é dada por:

$$q'' = -k \frac{dT}{dx} \quad (4.1)$$

o *fluxo de calor* q_x'' (W/m^2) é a taxa de transferência de calor na direção x por unidade de área *perpendicular* à direção de transferência. sendo proporcional ao *gradiente de temperatura*, dT/dx , nessa direção. A constante de proporcionalidade k é uma propriedade de transporte conhecida como *condutividade térmica* ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$) e é característica do material da parede.

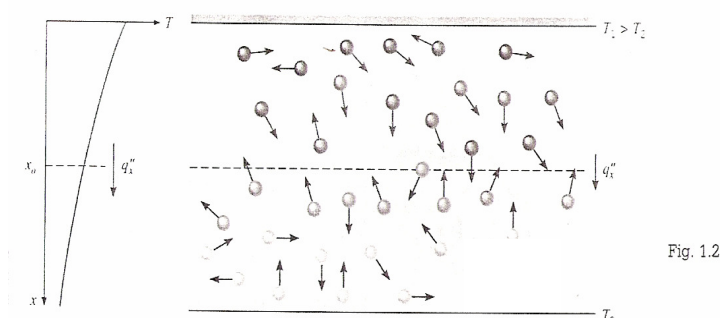


Figura 4.1. Associação da transferência de calor por condução com difusão de energia devido à movimentação molecular, (incropera e De Witt,1996).

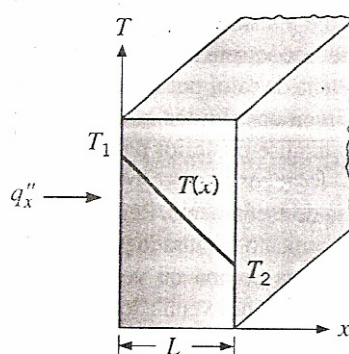


Figura 4.2. Transferência de calor unidimensional por condução (difusão de energia)

O sinal negativo é consequência do fato que o calor é transferido no sentido decrescente da temperatura. Sob as condições de regime estacionário mostradas na figura 4.2, onde a distribuição da temperatura é linear, o gradiente de temperatura pode ser expresso como:

$$\frac{dT}{dx} = \frac{T_2 - T_1}{L} \quad (4.2)$$

e o fluxo de calor é portanto

$$q_x'' = -k \frac{T_2 - T_1}{L} \quad \text{ou} \quad q_x'' = -k \frac{T_1 - T_2}{L} = k \frac{\Delta T}{L} \quad (4.3)$$

Observe que esta equação fornece o fluxo de calor, ou seja, a taxa de transferência de calor por unidade de área. A taxa de transferência de calor por condução, $q_x(W)$, através da parede plana de área A é, portanto, o produto do fluxo de calor pela área, $q_x = q''_x \cdot A$

4.1.3.2. Convecção

O modo de transferência de calor por convecção é composto de dois mecanismos. Além da transferência de calor devido ao movimento aleatório molecular (difusão), a energia também é transferida através do movimento global, ou macroscópico, do fluido. Esse movimento do fluido é associado ao fato de que, em qualquer instante, um grande número de moléculas está se movimentando coletivamente ou na forma de agregados de moléculas. Tal movimento, na presença de um gradiente de temperatura contribui para a transferência de calor. Uma vez que as moléculas nos agregados mantêm seus movimentos aleatórios, a transferência total de calor é, então, composta pela superposição do transporte de energia devido ao movimento aleatório das moléculas e pelo transporte devido ao movimento global do fluido. É comum utilizar os termos *convecção*, quando nos referimos a esse transporte cumulativo, e *advecção* quando nos referimos ao transporte devido ao movimento global do fluido.

Aqui, o interesse principal é na transferência de calor por convecção, que ocorre entre um fluido em movimento e uma superfície, quando os dois se encontram a diferentes temperaturas. Considere o escoamento do fluido sobre a superfície aquecida da Fig. 4.3. Uma consequência da interação entre fluido-superfície é o desenvolvimento de uma região no fluido através da qual a velocidade varia entre zero, na superfície, e um valor infinito u , associado ao fluxo. Essa região no fluido é conhecida como *camada limite hidrodinâmica* ou *de velocidade*. Além disso, se as temperaturas da superfície e do fluido que escoar forem diferentes, existirá uma região do fluido através da qual a temperatura irá variar de T_s em $y = 0$ a T_∞ , associada à região do escoamento afastada da superfície. Essa região, conhecida como *camada limite térmica*, pode ser menor, maior ou ter o mesmo tamanho daquela através da qual a velocidade varia. Em qualquer caso, se $T_s > T_\infty$, ocorrerá transferência de calor por convecção entre a superfície e o fluido, se $T_s < T_\infty$ também!!!

A transferência de calor por convecção ocorre tanto em função do movimento molecular aleatório quanto pelo movimento global do fluido no interior da camada limite. A

contribuição dada pelo movimento molecular (difusão) é dominante próximo à superfície, onde a velocidade do fluido é baixa. De fato, na interface entre a superfície e o fluido ($y = 0$), a velocidade do fluido é nula e o calor é transferido somente através desse mecanismo. A contribuição dada pelo movimento global do fluido origina-se no fato de que a espessura da camada limite *cresce* à medida que o escoamento progride na direção x . Nesse sentido, o calor que é conduzido para o interior dessa camada é "arrastado" na direção do escoamento, sendo eventualmente transferido para o fluido que se encontra no exterior da camada limite.

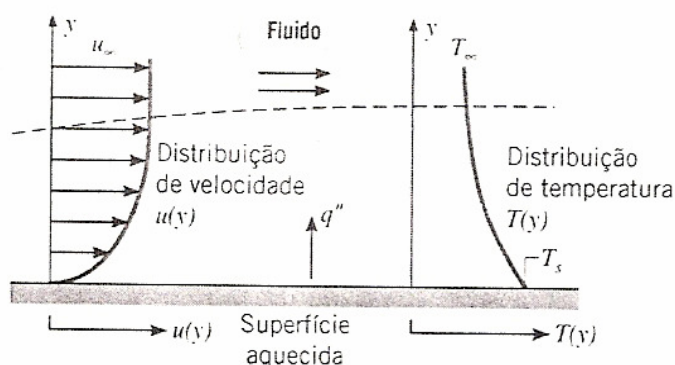


Figura 4.3. Desenvolvimento da camada limite na transferência de calor por convecção.

O estudo e a observação dos fenômenos relacionados à camada limite são essenciais para o entendimento do processo de transferência de calor por convecção. Por essa razão, a disciplina de mecânica dos fluidos assume um papel importantíssimo na análise posterior de convecção.

A transferência de calor por convecção pode ser classificada de acordo com a natureza do escoamento. A *convecção forçada* ocorre quando o escoamento é causado por meios externos, tais como um ventilador, uma bomba ou ventos atmosféricos. Por exemplo, considere o uso de um ventilador para esfriar o ar, por convecção forçada, dos componentes eletrônicos aquecidos de uma série de placas de circuito impresso (Fig. 4.4a). Em contraste, para *convecção livre* (ou *natural*) o escoamento é induzido por forças de empuxo, que são originadas por diferenças de densidade causadas por variações de temperatura no fluido. Um exemplo é a transferência de calor por convecção livre de uma série de placas de circuito dispostas verticalmente e expostas ao ar em repouso (Fig. 4.4b). O ar que entra em contato com os componentes experimenta um aumento de temperatura e, portanto, uma redução da

densidade. Uma vez que ele se encontra mais leve do que o ar circunvizinho, as forças de empuxo induzem um movimento vertical ascendente do ar aquecido, que é substituído pelo influxo de ar com menor temperatura.

Embora tenhamos mostrado, na Fig. 4.4a, condições de convecção forçada *pura* e na Fig. 4.4b convecção natural *pura*, podem existir condições correspondentes à *mistura (combinação)* das *convecções forçada e natural*. Por exemplo, se as velocidades associadas ao escoamento da Fig.4.4a, forem pequenas e/ou as forças de empuxo forem altas, um escoamento secundário, comparável ao escoamento forçado imposto, poderia ser induzido no sistema. O escoamento induzido pelo empuxo seria perpendicular ao escoamento forçado e poderia ter efeito significativo na transferência de calor por convecção dos componentes. Na Fig. 4.4b, existiria convecção mista se um ventilador fosse usado para forçar a subida do ar através das placas do circuito, auxiliando dessa forma o escoamento causado pelo empuxo ou então para forçar a descida do ar, opondo-se ao escoamento do empuxo.

Descreve-se a transferência de calor por convecção como sendo a transferência de energia que ocorre no interior de um fluido devido à combinação dos efeitos de condução e do movimento global do fluido. Tipicamente, a energia que está sendo transferida é uma energia *sensível* ou térmica interna do fluido. Contudo, existem processos de convecção que apresentam ainda a troca de calor *latente*. Essa troca de calor latente é, geralmente, associada à mudança de fase entre os estados líquido e vapor do fluido. Por exemplo, a transferência de calor por convecção resulta do movimento do fluido induzido pelas bolhas de vapor geradas no fundo de uma panela contendo água em ebulição (Fig.4.4c) ou por condensação do vapor d'água na superfície externa de uma tubulação por onde escoar água fria (Fig. 4.4d).

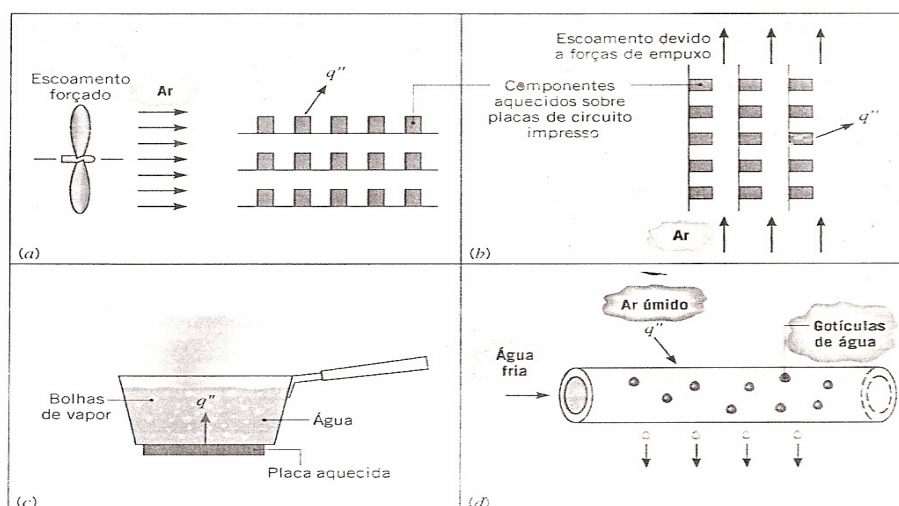


Figura 4.4. Processo de transferência de calor por convecção: (a) Convecção forçada, (b) Convecção natural, (c) Ebulição, (d) Condensação.

Independentemente das características particulares do processo de transferência de calor, a equação apropriada para a taxa de transferência tem a forma:

$$q'' = h(T_s - T_\infty) \quad (4.4)$$

onde q'' , o *fluxo de calor convectivo* (W/m^2), é proporcional à diferença de temperaturas da superfície e do fluido, T_s e T_∞ . Essa expressão é conhecida como *lei do esfriamento de Newton*, e a constante de proporcionalidade h ($Wm^{-2}K^{-1}$) é chamada de *coeficiente de convecção*. h depende das condições na camada limite, as quais, por sua vez, são influenciadas pela geometria da superfície, pela natureza do movimento do fluido e por uma série de propriedades termodinâmicas e de transporte do fluido.

Todo estudo de convecção, em última análise, se reduz ao estudo dos procedimentos pelos quais h pode ser determinado. A transferência de calor por convecção surgirá frequentemente como uma condição de contorno na solução de problemas, envolvendo a transferência de calor por condução. Na solução de tais problemas, o valor de h é considerado conhecido, podendo-se utilizar valores fornecidos na Tabela 4.1.

Quando a Equação. 4.4 é utilizada, o fluxo de calor por convecção é considerado *positivo* se o calor for transferido *a partir da* superfície ($T_s > T_\infty$) e *negativo* se o calor for transferido *para* a superfície ($T_\infty > T_s$). Contudo, se $T_\infty > T_s$, não existe nada que nos impeça de representar a lei do esfriamento de Newton por:

$$q'' = h(T_\infty - T_s) \quad (4.5)$$

Caso em que o fluxo de transferência de calor é positivo se ocorrer no sentido da superfície.

Tabela 4.1. Valores típicos para o coeficiente de transferência de calor por convecção. (Bird, et al, 1960, Incropera e De Witt, 1996).

Processo	h (Wm ⁻² K ⁻¹)
Convecção livre	
Gases	2 a 25
Líquidos	50 a 100
Convecção forçada	
Gases	25 a 250
Líquidos	100 a 20.000
Convecção com mudança de fase	
Ebulição ou Condensação	2.500 a 100.000

4.1.3.3. Radiação

Radiação térmica é a energia *emitida* por toda matéria que se encontra a uma temperatura finita. Embora o enfoque esteja aqui direcionado para a radiação emitida por superfícies sólidas, as emissões também podem ocorrer a partir de líquidos e gases. Independentemente da forma da matéria, a emissão pode ser atribuída a mudanças nas configurações dos elétrons que constituem os átomos ou moléculas. A energia do campo de radiação é transportada por ondas eletromagnéticas (ou, alternativamente, por fótons). Enquanto a transferência de calor por condução ou convecção, requer a presença de um meio material, a radiação não necessita dele. Na realidade, a transferência por radiação ocorre de forma mais eficiente no vácuo.

Considere os processos de transferência por radiação da Figura 4.5a. A radiação que é *emitida* pela superfície tem sua origem na energia térmica da matéria limitada pela superfície, e a taxa na qual a energia é liberada por unidade de área (W/m²) é denominada *poder emissivo E* da superfície. Existe um limite superior para o poder emissivo, que é previsto pela *lei de Stefan-Boltzmann*

$$E_b = \sigma T_s^4 \quad (4.6)$$

onde T_s é a *temperatura absoluta* (K) da superfície e σ é a constante *Stefan-Boltzmann* ($\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$). Tal superfície é chamada de radiador ideal ou *corpo negro*.

O fluxo de calor emitido por uma superfície real é menor do que o emitido por um corpo negro a mesma temperatura e é dado por:

$$E = \varepsilon \sigma T_s^4 \quad (4.7)$$

Onde ε é uma propriedade radiante da superfície denominada *emissividade*. Com valores na faixa $0 \leq \varepsilon \leq 1$, essa propriedade fornece uma medida da capacidade de emissão de energia de uma superfície em relação a um corpo negro. Ela depende fortemente da superfície do material e de seu acabamento, e alguns valores representativos estão apresentados no Apêndice A do Incropera .

A radiação também pode ser *incidente* sobre uma superfície a partir de sua vizinhança. A radiação pode ser oriunda de uma fonte especial como o Sol, ou de outra superfície à qual a superfície de interesse esteja exposta. Independentemente da(s) fonte(s), designamos a taxa na qual todo tipo de radiação incide sobre uma unidade de área como *irradiação* G (Figura 4.5a).

Uma parte da irradiação, ou toda ela, pode ser *absorvida* pela superfície aumentando dessa forma a energia térmica do material.

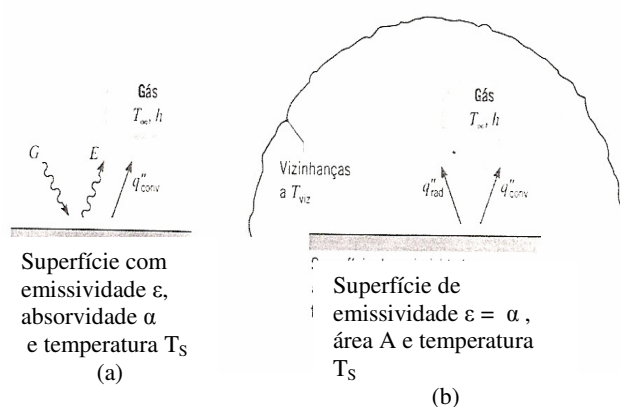


Figura 4.5. Transferência por radiação: (a) em uma superfície e (b) entre superfície e uma grande vizinhança, (Incropera e De Witt, 1996).

A taxa na qual a energia radiante é absorvida por unidade de área pode ser avaliada a partir do conhecimento de uma propriedade radiante da superfície denominada *absorvidade* α . Ou seja,

$$G_{\text{abs}} = \alpha G \quad (4.8)$$

Onde $0 \leq \alpha \leq 1$. Se $\alpha < 1$ e a superfície for *opaca*, frações da radiação são *refletidas*. Se a superfície for *semitransparente*, frações da irradiação também podem ser *transmitidas*. Contudo, enquanto as radiações absorvidas e emitidas aumentam ou diminuem, respectivamente, a energia térmica da matéria, as radiações refletidas e transmitidas não causam nenhum efeito nessa energia. Note que o valor de α depende da natureza da radiação, bem como da superfície propriamente dita. Por exemplo, a absorvidade de uma superfície para a radiação solar pode diferir da absorvidade da radiação emitida pelas paredes de um forno.

Um caso especial, que ocorre com frequência, envolve a troca de radiação entre uma superfície pequena e uma superfície isotérmica, muito maior, que envolve completamente a menor (Fig. 4.5b). A *vizinhança* poderia, por exemplo, ser as paredes de uma sala ou um forno cuja temperatura T_{viz} difere da temperatura da superfície contida no interior ($T_{\text{viz}} \neq T_s$). Para tal condição, a irradiação pode ser aproximada pela emissão de um corpo negro T_{viz} na qual $G = \alpha \cdot T_{\text{viz}}^4$. Se a superfície considerada apresenta $\alpha = \varepsilon$, ou seja, é uma superfície cinza, a taxa *líquida* de transferência de calor por radiação *a partir* da superfície, expressa por unidade de área da superfície, é dada por:

$$q_{\text{Rad}}'' = \frac{q}{A} = \varepsilon E_b(T_s) - \alpha G = \varepsilon \sigma (T_s^4 - T_{\text{viz}}^4) \quad (4.9)$$

Essa expressão fornece a diferença entre a energia térmica que é liberada devido à emissão de radiação e aquela que é ganha devido à absorção da radiação.

Existem muitas aplicações nas quais é conveniente expressar a troca de calor líquida por radiação na forma

$$q_{\text{Rad}} = h_r A (T_s - T_{\text{viz}}) \quad (4.10)$$

Onde, da Eq. (4.9) e (4.10), se obtém o *coeficiente de transferência de calor por radiação hr*, dado por:

$$h_r \equiv \varepsilon \sigma (T_S + T_{Viz}) (T_S^2 + T_{Viz}^2) \quad (4.11)$$

Aqui é modelado o modo de transferência de calor por radiação de uma forma similar à convecção. Nesse sentido, foi linearizado a equação da taxa de radiação, fazendo com que a taxa de troca térmica fosse proporcional à diferença de temperatura, em vez de as duas temperaturas ficarem elevadas à quarta potência. Observe, contudo, que h_r depende fortemente da temperatura, enquanto na convecção a dependência de h em relação à temperatura era, de forma geral, fraca.

As superfícies da Fig. 4.5 podem também, simultaneamente, transferir calor por convecção para um gás adjacente expor radiação. Para as condições da Fig. 4.5b, a taxa total de calor transferida *a partir* da superfície é então:

$$q = q_{Conv} + q_{Rad} = hA(T_S - T_\infty) + \varepsilon A \sigma (T_S^4 - T_{Viz}^4) \quad (4.12)$$

Sólido Semi-infinito

Uma outra geometria simples, na qual soluções analíticas podem ser obtidas, é o *sólido semi-infinito*. Uma vez que **tal** sólido se estende até o infinito em todas as direções exceto uma, ele é caracterizado por uma única superfície identificável (Fig. 4.7). Se uma súbita mudança for imposta nas condições dessa superfície, condução unidimensional em regime transiente ocorrerá no interior do sólido. O sólido semi-infinito fornece uma *idealização útil* para muitos problemas práticos. Ele pode ser usado na determinação da transferência de calor transiente em uma região próxima à superfície do solo, ou então para aproximar a resposta transiente de um sólido finito, como uma placa espessa. Nesse segundo caso, a aproximação é razoável na porção inicial do processo transiente, quando as temperaturas no interior da placa (em pontos distantes da sua superfície) ainda não tenham sido influenciadas pela mudança nas condições superficiais.

A equação do calor para a condução transiente em um sólido semi-infinito é dada pela Eq. 5.26. A condição inicial é descrita pela Eq. 5.27 e a condição de contorno no interior do sólido possui a forma

$$T(x \rightarrow \infty, t) = T_i \quad (4.13)$$

Soluções em forma fechada foram obtidas para três importantes condições Superficiais, impostas instantaneamente em $t = 0$ [1,2]. Essas condições são mostradas na Fig. 4.7. Elas incluem a imposição de uma temperatura superficial constante $T_{\text{sup}} \neq T_i$ a aplicação de um fluxo térmico constante na superfície. q'' , e a exposição da superfície a um fluido caracterizado por $T_{\infty} \neq T_i$ e um coeficiente de transferência de calor por convecção.

A solução para o caso I pode ser obtida através do reconhecimento da existência de uma *variável similar* η , com a qual a equação do calor pode ser transformada de uma equação diferencial parcial, que envolve duas variáveis independentes (x e t), em uma equação diferencial ordinária expressa em termos de uma única variável independente, a variável similar. Para confirmar que tal exigência é satisfeita por $\eta \equiv (x/4\alpha t)^{1/2}$, em primeiro lugar, transforma-se os operadores diferenciais pertinentes:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial x} &= \frac{dT}{d\eta} \frac{\partial \eta}{\partial x} = \frac{1}{(4\alpha t)^{1/2}} \frac{dT}{d\eta} \\ \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} &= \frac{d}{d\eta} \left[\frac{\partial T}{\partial x} \right] \frac{\partial \eta}{\partial x} = \frac{1}{4\alpha t} \frac{d^2 T}{d\eta^2} \\ \frac{\partial T}{\partial t} &= \frac{dT}{d\eta} \frac{\partial \eta}{\partial t} = -\frac{x}{2t(4\alpha t)^{1/2}} \frac{dT}{d\eta} \end{aligned}$$

Substituindo as transformações na Eq. 5.26 a equação do calor adquire a seguinte forma

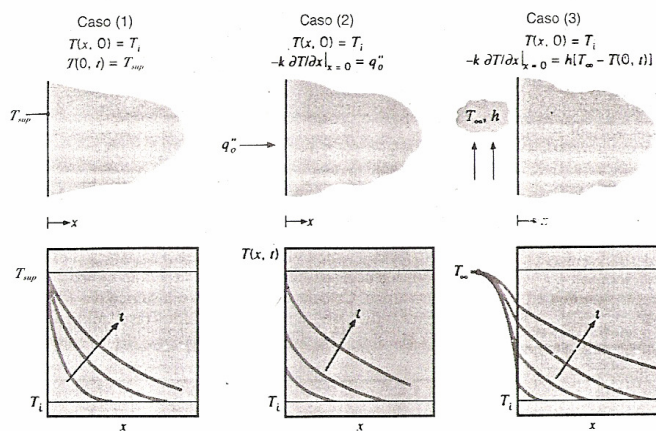


Figura 4.6. Distribuições de temperaturas transientes em um sólido semi-infinito para três condições superficiais: temperatura superficial constante, fluxo térmico na superfície constante e convecção na superfície.

$$\frac{d^2 T}{d\eta^2} = -2\eta \frac{dT}{d\eta} \quad (4.14)$$

Com $x = 0$ correspondendo a $\eta = 0$, a condição de contorno na superfície pode ser representada por:

$$T(\eta = 0) = T_{Sup} \quad (4.15.)$$

e com $(x \rightarrow \infty)$, bem como $t = 0$, correspondendo a $(\eta \rightarrow \infty)$, a condição inicial e a condição de contorno no interior do sólido correspondente a uma única exigência.

$$T(\eta \rightarrow \infty) = T_i \quad (4.16)$$

Uma vez que a equação do calor transformada e as condições de contorno/inicial são independentes de x e t , $\eta \equiv x/(4\alpha t)^{1/2}$ é, de fato, uma variável similar. Sua existência implica que a forma da distribuição de temperaturas no meio. $T(x)$ é independente do tempo e que, não importando os valores de x e t , a temperatura pode ser representada como uma função de η .

A forma específica dependência da temperatura, $T(\eta)$, pode ser obtida pela separação de variáveis na Eq. 4.14, tal que

$$\frac{d(dT/d\eta)}{(dT/d\eta)} = -2\eta d\eta$$

Integrando, tem-se que

$$\ln(dT/d\eta) = -\eta^2 + C_1'$$

Integrando novamente, obtemos

$$T = C_1 \int_0^{\eta} \exp(-u^2) du + C_2$$

Onde u é uma variável muda (variável de integração). Utilizando a condição de contorno em $\eta = 0$, Eq. 4.15, segue-se que $C_2 = T_{Sup}$ e

$$T = C_1 \int_0^{\eta} \exp(-u^2) du + T_{Sup}$$

Com a segunda condição de contorno, Eq. 4.16, obtemos

$$T = C_1 \int_0^{\infty} \exp(-u^2) du + T_{Sup}$$

Ou, avaliando a integração definida,

$$C_1 = \frac{2(T_i - T_{Sup})}{\pi^{\frac{1}{2}}}$$

Portanto, a distribuição de temperaturas pode ser representada por:

$$\frac{T - T_{Sup}}{T_i - T_{Sup}} = \left(2 / \pi^{\frac{1}{2}} \right) \int_0^{\eta} \exp(-u^2) du \equiv \text{erf } \eta \quad (4.17)$$

Onde a função erro de Gauss, erf η , é uma função matemática clássica que se encontra tabelada no Apêndice B. O fluxo térmico na superfície pode ser determinado pela utilização da lei de Fourier em $x = 0$:

$$q_{Sup}''(t) = \frac{k(T_{Sup} - T_i)}{\sqrt{(\pi \alpha t)}} \quad (4.18)$$

Soluções analíticas também podem ser obtidas para as condições superficiais descritas nos casos 2 e 3. Os resultados para os três casos são resumidos a seguir.

Caso 1 Temperatura Superficial Constante: $T(0, t) = T_{Sup}$

$$\frac{T(x, t) - T_{Sup}}{T_i - T_{Sup}} = \text{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} \right) \quad (4.19)$$

$$q_{Sup}''(t) = \frac{k(T_{Sup} - T_i)}{\sqrt{(\pi \alpha t)}} \quad (4.20)$$

**Caso 2 Fluxo Térmico Constante na Superfície: $q_{sup}'' = q_0''$
 $q_s'' = q_0''$**

$$T(x, t) - T_i = \frac{2q_0''(\alpha t / \pi)^{\frac{1}{2}}}{k} \exp\left(\frac{-x^2}{4\alpha t}\right) - \frac{q_0'' x}{k} \text{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}\right) \quad (4.21)$$

Caso 3 Convecção na Superfície: $k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = h[T_{\infty} - T(0, t)]$

$$\frac{T(x, t) - T_i}{T_{\infty} - T_i} = \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}\right) - \left[\exp\left(\frac{hx}{k} + \frac{h^2 \alpha t}{k^2}\right)\right] \left[\operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} + \frac{h\sqrt{\alpha t}}{k}\right)\right] \quad (4.22)$$

A função erro complementar, $\operatorname{erfc} w$, é definida como $\operatorname{erfc} w \equiv 1 - \operatorname{erf} w$.

Históricos das temperaturas para os três casos são mostrados na Fig. 4.7, e as características que os distinguem podem ser observada. Com uma mudança em forma de degrau na temperatura superficial, caso 1, à medida que t aumenta as temperaturas no interior do meio se aproximam monotonicamente de T_{sup} enquanto a magnitude do gradiente de temperatura na superfície, e portanto do fluxo térmico correspondente, diminui proporcionalmente a $t^{-1/2}$. Em contraste, para um fluxo térmico constante na superfície (caso 2), a Eq. 4.19 revela que $T(0, t) = T_{sup}(t)$ aumenta monotonicamente com $t^{1/2}$. Com a superfície exposta à transferência de calor por convecção (caso 3), a temperatura superficial e as temperaturas no interior do meio tendem ao valor da temperatura do fluido T_{∞} com o transcorrer do tempo. À medida que T_{sup} se aproxima de T_{∞} , existe, obviamente, uma redução do fluxo térmico na superfície, $q''_{sup}(t) = h [T_{sup}(t) - T_{\infty}]$. históricos das temperaturas calculados pela Equação 4.22 estão plotados na Figura. 4.8. O resultado correspondendo a $h = \infty$ é equivalente ao associado a uma súbita mudança na temperatura superficial, caso 1. Isto é, para $h = \infty$, a superfície atinge instantaneamente a temperatura do fluido ($T_{sup} = T_{\infty}$) e, com o segundo termo no lado direito da Equação 4.22 se anulando, o resultado é equivalente a Equação 4.19.

Uma permutação interessante do caso 1 ocorre quando dois sólidos semi-infinitos, inicialmente a temperaturas uniformes diferentes $T_{A,i}$ e $T_{B,i}$ são posicionados com suas superfícies livres em contato (Figura 4.9). Se a resistência de contato for desprezível, a exigência de equilíbrio térmico dita que, no instante do contato ($t = 0$), as duas superfícies devem assumir a mesma temperatura T_{sup} , com $T_{B,i} < T_{sup} < T_{A,i}$. Uma vez que T não varia com o transcorrer do tempo, tem-se que a resposta térmica transiente e o fluxo térmico na superfície para cada um dos sólidos são determinados pelas Equações 4.19 e 4.20. respectivamente.

A temperatura superficial de equilíbrio na Fig. 4.9 pode ser determinada por um balanço de energia na superfície, que exige:

$$q''_{\text{sup},A} = q''_{\text{sup},E} \quad (4.23)$$

Utilizando a Eq. 4.20 para representar $q''_{\text{sup},A}$ e $q''_{\text{sup},B}$ e reconhecendo que a coordenada do eixo x na Fig. 4.9 exige uma mudança de sinal em $q''_{\text{sup},A}$ tem-se que:

$$\frac{-k_A (T_{\text{Sup}} - T_{A,i})}{(\pi \alpha_A t)^{\frac{1}{2}}} = \frac{k_B (T_{\text{Sup}} - T_{B,i})}{(\pi \alpha_A t)^{\frac{1}{2}}} \quad (4.24)$$

ou, resolvendo para T_{Sup} ,

$$T_{\text{Sup}} = \frac{(k\rho C)_A^{1/2} T_{A,i} + (k\rho C)_B^{1/2} T_{B,i}}{(k\rho C)_A^{1/2} + (k\rho C)_B^{1/2}} \quad (4.25)$$

Assim, a grandeza $m \equiv (k\rho C)^{1/2}$ é um fator de ponderação que determina se T_{sup} se aproxima mais de $T_{A,i}$ ($m_A > m_B$) ou de $T_{B,i}$ ($m_B > m_A$).

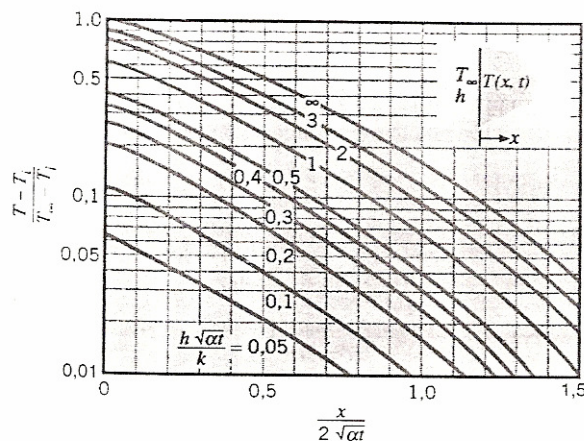


Figura 4.7. Histórico das temperaturas em um sólido semi-infinito com transferência de calor por convecção na superfície.

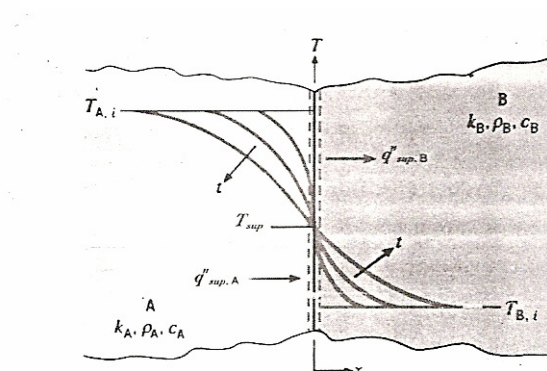


Figura 4.8. contato interfacial entre dois sólidos semi-infinitos com diferentes temperaturas iniciais.

Radiação solar

A energia do Sol provém das regiões internas do Sol, em virtude de uma reação de *fusão* contínua. Quase 90 % desta energia são gerados dentro da região 0,23 vezes o raio do Sol e em seguida transferidos radiativamente até uma distância cerca de 0,7 vezes o raio do Sol. Fora desta região há a *zona convectiva* , onde a temperatura está na faixa de 6.000 K. A frieza relativa da superfície externa do Sol é indicação de que a energia criada no interior é dissipada radiativamente pela superfície externa do sol. Portanto, o Sol, com seu raio $R \equiv 6,96 \times 10^5$ km e massa $M \equiv 1,99 \times 10^{30}$ kg, é uma fonte de energia quase inexaurível para a terra. Somente uma pequena fração de energia do Sol atinge a Terra, em virtude da grande distância entre eles. A intensidade da radiação solar que atinge a atmosfera foi determinada muito precisamente por uma série de medidas elevadas feitas com o emprego de balões, de aviões, e de naves espaciais, de 1967 a 1970. A energia resultante, conhecida como a *constante solar* G_s , vale [15]:

$$G_s = 1,353 \text{ W/m}^2 \quad (4.26)$$

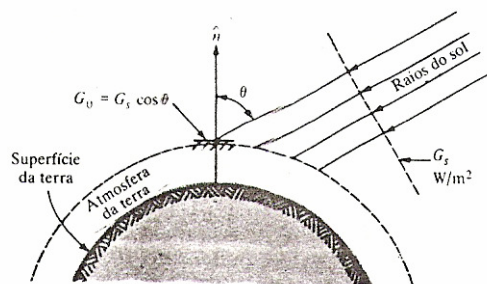


Figura 4.9. Constante solar G_s e radiação solar extraterrestre.

Essa quantidade representa o *fluxo de radiação solar incidente* sobre um plano normal aos raios de Sol, exatamente no limite da atmosfera da terra, quando esta está à distância média do Sol. À medida que a terra se desloca em torno do Sol, em uma órbita ligeiramente elíptica, a distância entre eles varia de 98,3 % da distância média, quando a terra está no ponto mais próximo do Sol, até 101,7 % da distância média, quando a terra atinge sua distância máxima ao Sol. Por isso, o valor instantâneo de G_s varia aproximadamente por $\pm 3,4$ % isto é, do máximo 1.399 W/m^2 , em 21 de dezembro, ao mínimo 1.310 W/m^2 , em 21 de junho. Entretanto, para fins práticos a variação de G_s é desprezada, e retorna a constante como 1.353 W/m^2 . Então a energia solar G_o que incide normalmente na superfície externa da atmosfera terrestre é:

$$G_o = G_s \cos \theta \quad \text{W/m}^2 \quad (4.27)$$

onde G_o é a radiação solar *extraterrestre*. A Fig. 4.10 ilustra o significado físico de G_s e de G_o em relação à direção do feixe de raios solares.

O valor de G_s pode ser utilizado na lei da radiação do corpo negro para estabelecer uma temperatura efetiva T_s da superfície do Sol:

$$G_s = \left(\frac{r}{R} \right)^2 \sigma \cdot T_s^4 \quad (4.28)$$

onde:

$$G_s = 1.353 \text{ W/m}^2$$

$$r = 6,9598 \times 10^8 \text{ m, raio do disco solar}$$

$R = 1,496 \times 10^{11}$ m, distância média da terra ao Sol

$\sigma = 5,6697 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$, constante de Stefan-Boltzmann

Então, a temperatura efetiva da superfície do Sol é $T = 5.762 \text{ K}$.

A radiação solar que atinge a superfície mais elevada da atmosfera terrestre propaga-se através da atmosfera da terra antes de chegar à superfície. Aproximadamente 99% da atmosfera estão contidos à distância de cerca de 30 km a partir da superfície da terra. À medida que a radiação solar atravessa a atmosfera, é absorvida ou é espalhada pelo meio atmosférico. A Fig. 4.11 mostra a distribuição espectral da radiação solar $G_{S\lambda}$, exatamente fora da atmosfera da terra e no nível do solo, quando a atmosfera está clara. Notamos que a energia total contida abaixo da curva $G_{S\lambda}$ representa o fluxo de radiação solar exatamente acima da atmosfera terrestre, isto é

$$\int_0^{\infty} G_{S\lambda} d\lambda = G_s = 1353 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \quad (4.29)$$

A curva da distribuição espectral da radiação solar que chega na superfície da terra fica abaixo da curva de $G_{S\lambda}$ e mostra vários mínimos. O motivo disto é a absorção da radiação solar pelo O_3 , O_2 , CO_2 e H_2O em diversos comprimentos de onda. O ozônio (O_3), que está concentrado em uma camada 10 a 30 km acima da superfície da terra, absorve fortemente a radiação ultravioleta no intervalo $\lambda = 0.2$ a $\lambda = 0,29 \mu\text{m}$ e bastante no intervalo 0,9 a 0,34 μm .

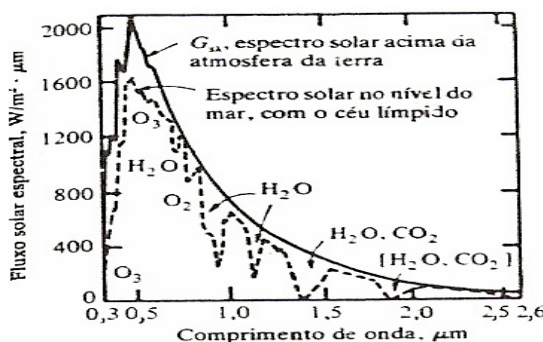


Figura 4.10 Efeitos da atenuação atmosférica sobre a distribuição espectral da radiação solar. (De Thekaekara)

Por isso, é desprezível a radiação solar com comprimentos de onda menores do que cerca de $0,3 \mu\text{m}$ que atinge a superfície da terra. Assim, os sistemas biológicos na terra estão protegidos da danosa radiação ultravioleta. A absorção do oxigênio ocorre numa raia muito estreita centrada em $\lambda = 0,76 \mu\text{m}$. As bandas de absorção devidas ao vapor de água são visíveis distintamente na faixa de $0,7$ a $2,2 \mu\text{m}$. O dióxido de carbono e o vapor de água absorvem fortemente a radiação térmica nos comprimentos de onda maiores do que cerca de $2,2 \mu\text{m}$. Disso resulta que a radiação solar que atinge a superfície da terra está essencialmente contida nos comprimentos de onda entre $0,29$ e $2,5 \mu\text{m}$. A energia total submetida pela curva do espectro solar na superfície da terra, num dia de atmosfera límpida, é cerca de 956 W/m^2 . Este valor é consideravelmente menor do que a constante solar 1.353 W/m^2 , na fronteira da atmosfera terrestre.

Além da absorção da radiação solar, há o seu espalhamento pelas moléculas do ar, pelas gotículas de água nas nuvens e pelos aerossóis ou partículas de poeira, à medida que a radiação atravessa a atmosfera. As moléculas de ar espalham a radiação solar de comprimentos de onda muito curtos em relação às dimensões das moléculas, e este espalhamento é o *espalhamento Rayleigh*. Gotículas de água, aerossóis e outras sujeiras atmosféricas espalham a radiação em comprimentos de onda comparáveis ao diâmetro das partículas.

A parte da radiação solar que não é espalhada nem absorvida pela atmosfera, e que atinge a superfície da terra como um feixe é a *radiação solar direta*. A parte espalhada da radiação que atinge a superfície da terra, vinda de todas as direções do firmamento, é a *radiação solar difusa*. Assim, a radiação solar recebida pela superfície da terra é composta das partes *direta* e *difusa*. A componente difusa varia de cerca de 10 % do total, num dia claro, a quase 100 %, num dia totalmente nublado.

Radiação solar que chega à terra

A quantidade de energia solar recebida por uma superfície no nível do mar depende da orientação da superfície em relação ao Sol, da hora do dia, do dia do ano, da latitude do ponto de observação e das condições atmosféricas. Na alvorada ou no crepúsculo, a radiação solar que atinge a superfície da terra percorre um caminho oblíquo, mais longo, através da atmosfera; por isso, a atenuação atmosférica é maior e a intensidade se reduz significativamente.

O fluxo total de energia solar q_t , recebido por unidade de área de uma superfície ao nível do mar consiste nas componentes direta e difusa. Seja q_{df} (em Watts por metro quadrado) a *radiação solar difusa* incidente sobre uma superfície horizontal e devida à radiação proveniente de todo o hemisfério espacial, e seja q_D o fluxo da *radiação solar direta*, por unidade de área normal à direção do feixe de radiação solar, no nível do mar. Seja θ o *ângulo de incidência*, isto é, o ângulo entre o raio do Sol e a normal à superfície, conforme a ilustração da Fig. 4.12. Então, o fluxo de energia solar total q_t recebido pela área unitária da superfície no nível do mar, é:

$$q_t = q_D \cos \theta + q_{df} \text{ W/m}^2 \quad (4.30)$$

Portanto, para calcular o fluxo total de energia solar recebido por uma superfície, precisa-se saber o fluxo da radiação solar difusa, o fluxo da radiação solar direta sobre um plano normal à direção do feixe, e o ângulo de incidência θ .

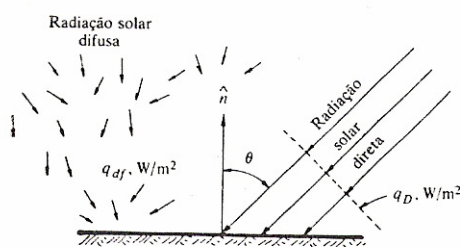


Figura 4.11. Radiação solar recebida na superfície terrestre.

O ângulo de incidência pode ser relacionado ao *ângulo de inclinação* (isto é, o ângulo entre o plano horizontal e a superfície), à *latitude* (isto é, a distância angular ao equador) e à *declinação* (isto é, o ângulo entre o raio do Sol e o plano equatorial no meio-dia solar).

A energia solar incidente sobre uma superfície opaca é parcialmente absorvida pela superfície e o restante é refletido. Na Tabela C-2 do Apêndice apresentamos o poder de absorção de várias superfícies.

Medidas da radiação solar

Os registros diários e horários da quantidade de radiação solar recebida em um dado local sobre a superfície da terra são essenciais para o projeto e otimização dos sistemas de transferência de calor que empregam a energia solar. Esta informação é também útil para finalidades arquitetônicas, agrícolas, biológicas e outras. Por isso, realizam-se continuamente medidas de radiação solar com dispositivos monitores de radiação localizados em diferentes partes do globo. Estas medidas geralmente incluem:

1. O fluxo de radiação solar direta q_D na incidência normal.
2. O fluxo de radiação solar difusa q_{df} provindo de todo o firmamento, sobre uma superfície horizontal.
3. O fluxo total (ou global) de radiação solar q_t , que é a soma da radiação solar difusa com a direta recebida por uma superfície horizontal.
4. O fluxo total de radiação solar sobre uma superfície inclinada com uma orientação especificada.

Além disso, a distribuição espectral da radiação solar sobre certas bandas de comprimento de onda e a quantidade de radiação solar refletida pelo solo têm interesse em certas situações.

Por isso, as medidas de radiação solar são executadas continuamente por um sistema de centros nacionais e internacionais de medidas solares em diferentes partes do globo.

Para ilustrar os efeitos das condições da atmosfera e da hora do dia sobre o fluxo total (isto é, global) da radiação solar q_t , recebido por uma superfície horizontal, apresentamos nas Figs. 4.13 e 4.14 as medidas feitas em um dia claro e em um dia nublado, respectivamente, em Greenbelt, Maryland, publicados na Ref. [22]. O registro de um dia límpido, na Fig. 4.13, mostra o máximo do fluxo de radiação de 1.000 W/m^2 , perto do meio-dia, e os mínimos acentuados na curva, devidos a nuvens ocasionais que bloqueiam o Sol. Um registro semelhante, de um dia nublado, está na Fig. 4.14. Os máximos agudos, no meio da tarde, provêm da aparição do Sol por breves espaços de tempo. Notamos que o máximo ocasional próximo de 1.200 W/m^2 , imediatamente após as 14 horas. São 30 % maior do que o máximo no céu claro de 900 W/m^2 naquela mesma hora do dia. Isto é devido à reflexão pelas nuvens.

Emissão atmosférica

A radiação solar que passa através da atmosfera é atenuada devido à absorção por certos constituintes do ar atmosférico. Por isso, a atmosfera emite radiação térmica em virtude da temperatura desses constituintes. O CO_2 e a H_2O são os dois principais constituintes que provocam a emissão de bandas nas regiões de 5 a 8 μm e acima de 13 μm . Embora esta

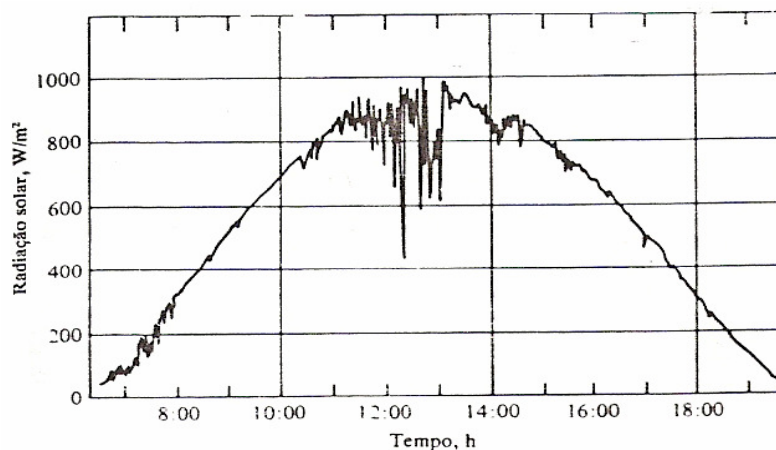


Figura 4.12. Radiação solar total sobre uma superfície horizontal, medida em Greenbelt, Maryland, a 14 de maio de 1971. (da ref.[22].)

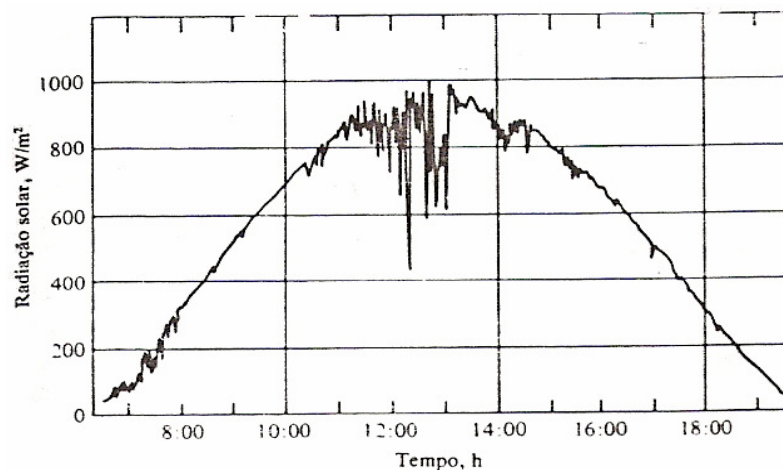


Figura 4.13 Radiação solar total sobre uma superfície horizontal medida em Greenbelt, Maryland, a 14 de maio de 1971. (Da Ref. [22])

emissão não seja emissão de corpo negro, para convivência na análise, foi introduzida uma *temperatura efetiva do céu* $T_{\text{céu}}$. A emissão da atmosfera para a superfície da Terra é representada por:

$$q_{\text{céu}} = \sigma \cdot T_{\text{céu}}^4 \quad \text{W/m}^2 \quad (4.31)$$

A grandeza desta temperatura fictícia $T_{\text{céu}}$ depende das condições atmosféricas. Os seus valores variam de 230 K, nas condições de tempo frio e céu límpido, até cerca de 285 K, num dia quente e nublado.

Conceito de fator de forma

Até agora discutimos a radiação para uma superfície única ou de uma superfície. Entretanto, nas aplicações de engenharia, os problemas de interesse prático envolvem troca de radiação entre duas ou mais superfícies. Quando as superfícies estiverem separadas por um meio inerte, que não absorve, nem emite, nem difunde a radiação, a troca de radiação entre as superfícies não é afetada pelo meio. O vácuo, por exemplo, é um perfeito meio inerte; entretanto, o ar e muitos gases se aproximam quase exatamente desta condição. Para quaisquer duas superfícies dadas, a orientação entre elas afeta a fração da energia radiante emitida por uma superfície e que incide diretamente na outra superfície. Por isso, a orientação das superfícies tem papel importante na troca radiativa de calor.

Para formalizar os efeitos da orientação na análise da troca radiativa de calor entre superfícies, adota-se o conceito de *fator de forma*. Os termos *fator de vista*, *fator de visada* e *fator de configuração* também são utilizados na literatura. Deve-se fazer uma distinção entre o *fator de forma difuso* e o *fator de forma especular*. O primeiro se refere à situação em que as superfícies são refletores difusos e emissores difusos, enquanto o último se refere à situação em que as superfícies são emissores difusos e refletores especulares. Empregando-se simplesmente o termo *fator de forma*, e este termo corresponde ao fator de forma difuso.

O significado físico do fator de forma entre duas superfícies é representar a *fração de energia radiante emitida por uma superfície que incide diretamente na outra superfície*.

Fator de forma entre duas superfícies elementares

A fim de termos uma visão mais profunda da dedução das relações que definem os fatores de forma, vamos demonstrar a expressão que define o fator de forma entre duas superfícies elementares.

Consideremos duas superfícies elementares dA_1 e dA_2 , como está ilustrado na Fig. 12.17. Seja r a distância entre essas duas superfícies; θ_1 , o ângulo polar entre a normal $\mathbf{n}_1$ ao elemento de Superfície dA_1 e a reta r que liga dA_1 a dA_2 ; e θ_2 , o ângulo polar entre a normal $\mathbf{n}_2$ a elemento de superfície dA_2 e a reta r .

Seja $d\omega_{12}$ o ângulo sólido sob o qual um observador em dA_1 vê o elemento de superfície dA_2 e I_1 a intensidade da radiação emitida difusivamente pelo elemento de superfície em todas as direções do espaço hemisférico. A taxa de energia radiante dQ_1 emitida por dA_1 e que incide na superfície dA_2 é.

$$dQ_1 = dA_1 I_1 \cdot \cos \theta_1 d\omega_{12} \quad (4.32)$$

onde o ângulo sólido $d\omega_{12}$ é dado por

$$d\omega_{12} = \frac{dA_2 \cos \theta_2}{r^2} \quad (4.33)$$

A substituição da Equação (4.33) na Equação (4.32) leva a

$$dQ_1 = dA_1 I_1 \frac{\cos \theta_1 \cdot \cos \theta_2 dA_2}{r^2} \quad (4.34)$$

A taxa da energia de radiação Q_1 emitida pelo elemento de superfície dA_1 , em todas as direções sobre o espaço hemisférico é:

$$Q_1 = dA_1 \int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta_1=0}^{\pi/2} I_1 \cos \theta_1 \sin \theta_1 d\theta_1 d\phi \quad (4.35)$$

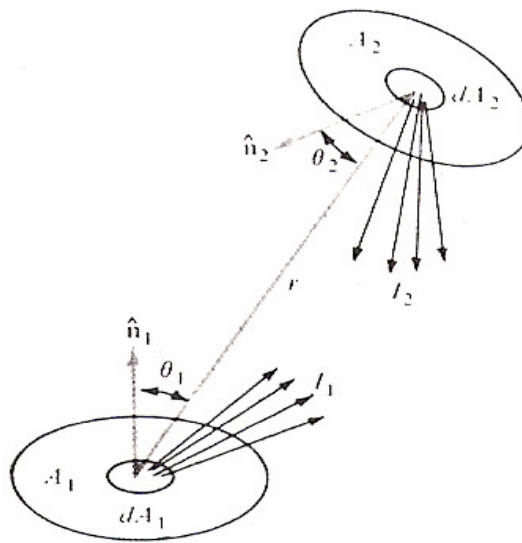


Figura 4.14. Coordenadas para a definição do fator de forma.

Método do circuito equivalente para a troca radiativa num espaço fechado

A análise da troca de radiação entre as superfícies de um espaço fechado é complicada, pois, quando as superfícies não são negras, a radiação emitida por uma superfície pode ser refletida de volta, oscilando diversas vezes entre as superfícies, com absorção parcial em cada reflexão. Por isso, uma análise própria do problema deve incluir os efeitos destas reflexões múltiplas. Para simplificar a análise, admitamos que um espaço fechado possa ser dividido em diversas zonas, como está na Fig. 4.16, de tal modo que sejam válidas as seguintes condições de cada zona $i = 1, 2, \dots, N$.

1. As propriedades radiativas (isto é, refletividade, emissividade, poder de absorção) são uniformes e independentes da direção e da frequência.
2. As superfícies são emissores difusos e refletores difusos.
3. O fluxo de calor radiante emitido pela superfície é uniforme sobre a superfície de cada zona.
4. A irradiação é uniforme sobre a superfície de cada zona.
5. As superfícies são opacas (isto é $\alpha + p = 1$).
6. Há uma temperatura uniforme, ou um fluxo de calor uniforme, na superfície de cada zona.
7. O espaço está cheio de um meio inerte.

As hipóteses 3 e 4 não são geralmente corretas, mas a análise se torna muito complicada sem elas.

O objetivo da análise da troca de calor radiante em um espaço fechado é *determinar o fluxo líquido do calor radiante* nas zonas em que a temperatura é determinada. Vários métodos de análise foram publicados para a solução da troca de calor radiante em um espaço fechado, com as hipóteses simplificadoras estabelecidas acima [27-33]. Entretanto a observação detalhada de todos esses métodos revela que não há diferença significativa entre eles, pois todos utilizam as mesmas hipóteses simplificadoras. Nesta seção, apresentamos o método do circuito equivalente introduzido originalmente por Oppenheim [31]. O método é relativamente fácil de aplicar nos problemas simples, que não envolvem um número muito grande de superfícies. Além disso, proporciona boa visualização dos conceitos físicos da troca de calor entre as superfícies. Quando estiverem envolvidas muitas superfícies de transferência de calor o método não será assim tão prático. Por isso, na seção seguinte apresentamos a formulação matricial da troca de radiação em espaços fechados.

O primeiro passo na análise da troca de radiação pelo método do circuito equivalente é o desenvolvimento do conceito de *resistência superficial à radiação*.

Resistência superficial à radiação

Considere a zona i de um espaço fechado, como está na Fig. 4.16. Definiremos as seguintes grandezas:

G_i = irradiação na zona i : representa o fluxo de radiação incidente sobre a superfície A_i , W/m^2 .

J_i = Radiosidade na zona i : representa o fluxo de radiação emitido pela superfície A_i , W/m^2 .

q_i = Fluxo líquido de radiação emitido pela superfície A_i , W/m^2 .

Há uma distinção entre J_i e q_i . A *radiosidade* J_i é a energia radiante emitida pela superfície observada imediatamente fora da superfície da zona i , na localização ilustrada simbolicamente pela linha tracejada da Fig. 4.16b. O *fluxo líquido de radiação Térmica* q_i , emitido pela superfície A_i , entretanto, está baseado

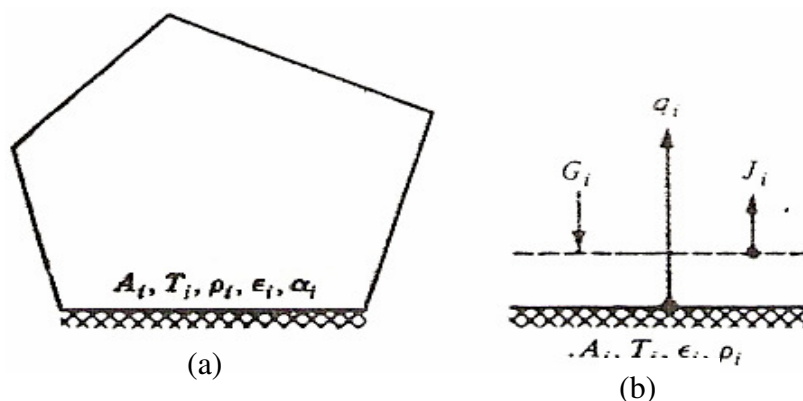


Figura 4.15. (a) Espaço fechado cheio com meio inerte; (b) balanço de energia por unidade de área da zona i .

no balanço da energia líquida no interior da superfície A_i . Por isso, por definição, q_i é igual à diferença entre J_i e G_i :

$$q_i = J_i - G_i \quad \text{W/m}^2$$

A radiosidade, entretanto, é composta das seguintes componentes:

$$J_i = \left(\begin{array}{c} \text{Radiosidade emitida} \\ \text{pela superfície} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{Radiação refletida pela} \\ \text{superfície} \end{array} \right) \quad (4.36)$$

Seja E_{bi} o poder emissivo do corpo negro; ϵ_i , a emissividade; ρ_i , a refletividade; e G_i , o fluxo de radiação incidente na zona i . então, a equação (4.36) se torna

$$J_i = \epsilon_i E_{bi} + \rho_i G_i = E_{bi} + (1 - \epsilon_i)G_i \quad (4.37)$$

Onde admitimos $\rho_i = 1 - \alpha = 1$. A equação (4.37) é substituída na equação (4.35) para eliminar J_i :

$$q_i = \varepsilon_i (E_{bi} - G_i) \quad (4.38)$$

A equação (4.37) resolvida em G_i dá:

$$G_i = \frac{J_i - \varepsilon_i E_{bi}}{1 - \varepsilon_i} \quad (4.39)$$

A equação (4.39) entra na equação (4.38).

$$q_i = \frac{\varepsilon_i}{1 - \varepsilon_i} (E_{bi} - J_i) \quad \therefore \quad W/m^2 \quad (4.40)$$

O fluxo líquido total de radiação térmica Q , emitido pela superfície A_i , torna-se

$$Q_i = A_i q_i = A_i \frac{\varepsilon_i}{1 - \varepsilon_i} (E_{bi} - J_i)$$

que é reordenado na forma

$$\boxed{Q_i = \frac{E_{bi} - J_i}{R_i}} \quad \therefore \quad W \quad (4.41)$$

onde

$$\boxed{R_i = \frac{1 - \varepsilon_i}{A_i \varepsilon_i}} \quad (4.42)$$

Evidentemente, a Eq. (4.41) é análoga à lei de Ohm, onde R_i representa a resistência da superfície à radiação. A Eq. (4.42) é também análoga ao conceito de resistência térmica (ou resistência pelicular) que discutimos quando estudamos a transferência convectiva de calor

sobre uma superfície. Isto é, a taxa de transferência de calor total é igual à diferença de potencial na superfície dividida pela resistência térmica ao fluxo de calor na superfície.

Quando a superfície for *negra*, temos $\varepsilon_i = 1$, o que implica $R_i = 0$. Então, a Eq. (4.41) se reduz a

$J_i = E_{bi} = \sigma \cdot T_i^4 \quad \text{com } \varepsilon_i = 1 \text{ ou superfície negra} \quad (4.43)$
--

Espaço fechado com duas zonas

Tendo estabelecido o formalismo para definir a resistência superficial à radiação, podemos analisar o problema do espaço fechado mais simples, envolvendo a troca de calor em uma cavidade fechada com duas zonas somente. Exemplos típicos desta situação física incluem a troca de radiação entre as superfícies de duas grandes placas paralelas, ou de dois cilindros longos coaxiais, ou de duas esferas concêntricas. Para generalidade, consideremos um espaço fechado com duas zonas, como está na Fig. 4.17. A zona 1 tem uma área superficial A_1 e emissividade ε_1 e é mantida à temperatura uniforme T_1 . A zona 2 tem uma área superficial A_2 e emissividade ε_2 e é mantida à temperatura uniforme T_2 . Ambas as superfícies são opacas. A troca térmica ocorre entre as superfícies porque estão em temperaturas diferentes. Seja

$$Q_{1-2} = \text{transferência líquida de calor radiante da zona 1 para a zona 2}$$

Então o balanço de energia da troca radiativa de calor entre as duas zonas pode ser escrito como:

$$Q_{1-2} = \left(\begin{array}{l} \text{Energia raizante emitida} \\ \text{pela superfície } A_1 \\ \text{e incidente em } A_2. \end{array} \right) - \left(\begin{array}{l} \text{Energia raizante emitida} \\ \text{pela superfície } A_2 \\ \text{e incidente em } A_1. \end{array} \right) \quad (4.44)$$

As expressões matemáticas de cada termo do segundo membro são:

$$Q_{1-2} = J_1 A_1 F_{1-2} - J_2 A_2 F_{2-1} \quad (4.45)$$

onde F_{i-j} , é o fator de forma entre as superfícies e J_1 e J_2 são as radiosidades. Aplicamos a relação de reciprocidade à segunda parcela do segundo membro:

$$Q_{1-2} = J_1 A_1 F_{1-2} - J_2 A_1 F_{1-2} = A_1 F_{1-2} (J_1 - J_2) \quad (4.46)$$

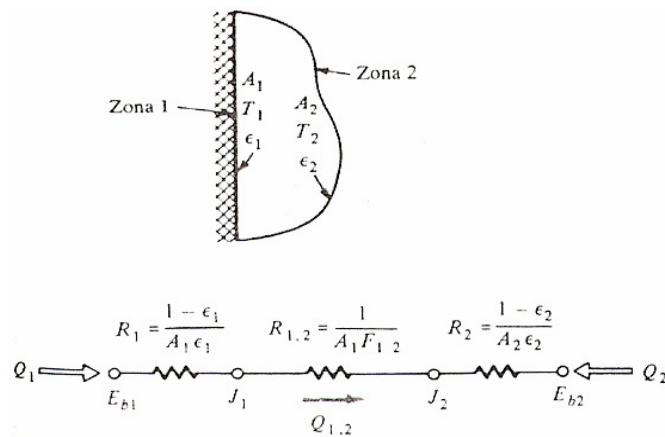


Figura 4.16. Espaço fechado com duas zonas e o circuito equivalente.

4.1.4. Os Dispositivos Solares e suas Aplicações

Os dispositivos baseados em superfícies formadas por segmentos planos devidamente dispostos de modo a formarem no conjunto, uma determinada curva, geralmente um segmento de parábola, utilizados na captação da radiação solar para aplicações terrestres são denominados coletores solares e, conforme as faixas de temperaturas obtidas são classificadas em coletores de baixa, média e alta concentração.

4.1.4.1. Coletores de Baixa Concentração

São aqueles que permitem obter temperaturas de até 100 °C, e geralmente são utilizados para o aquecimento de água em residências, hospitais, maternidades, hotéis;

secagem; destilação; climatização de ambientes; acionamento de bombas e pequenas máquinas térmicas, dentre outras.

Dentre os coletores mais conhecidos está o de placas planas, também chamados de coletores planos. Esses coletores são geralmente constituídos de uma caixa termicamente isolada na parte inferior e nas laterais, contendo sobre este isolamento, formando a caixa isoladora, uma chapa metálica pintada de preto fosco, podendo ou não ter sobre a citada chapa uma tubulação, dependendo se o coletor está projetado para aquecimento de ar ou líquidos. A parte superior do coletor está coberta com uma (ou mais) lâmina de vidro transparente, que tem a propriedade de deixar passar a radiação solar, porém é praticamente opaco à radiação emitida pela chapa, de maior comprimento de onda, o que dá origem a um fenômeno conhecido como efeito estufa.

a) Coletores Planos

São aqueles que possuem princípio de funcionamento baseado na absorção da radiação solar pela chapa preta, de acordo com a equação de Stefan-Boltzmann, a qual é transformada em calor que, por sua vez, é transferido ao fluido de trabalho.

Na Figura 4.6 é mostrado um coletor plano usado para aquecimento de água em uma residência.



Figura 4.17. Coletor Plano

b) Secador Solar

É um tipo de coletor plano que se caracteriza por apresentar o seguinte princípio de funcionamento: a absorção da radiação solar se dá pela chapa preta, a qual é transformada em calor e transferida para o ar dentro do secador, fazendo com que esse se desloque da parte

mais baixa para a mais alta, devido à mudança de densidade, e leve consigo a umidade dos produtos a serem secados. Às vezes, os materiais a serem secados são colocados sobre placas perfuradas, dentro do secador solar. Os secadores são geralmente utilizados para a secagem de frutas, peixes, grãos, sementes etc. Na Figura 4.18 é mostrado um modelo de secador solar alternativo.



Figura 4.18. Secador Solar

c) Destilador Solar

A destilação solar é uma das aplicações práticas da energia solar bastante promissora principalmente em regiões distantes dos centros urbanos onde os custos das fontes convencionais ainda são altos, onde água de boa qualidade é praticamente inexistente em quantidade satisfatória e onde a população mais pobre é obrigada a se abastecer da água em poços construídos, muitas vezes contaminados. Neste contexto a dessalinização solar representa uma contribuição para a melhoria das condições de saúde. Na Figura 4.19 é mostrado um destilador solar.



Figura 4.19. Destilador Solar

4.1.3.2. Os Coletores de Média Concentração

Os coletores de média concentração são dispositivos baseados em superfícies refletivas curvas ou superficiais formadas por segmentos planos, devidamente dispostos a formar no conjunto, geralmente, um segmento parabólico. Permite obter uma zona fortemente iluminada, denominada foco, onde estão posicionados os absorvedores.

As superfícies cilíndricas ou cilíndrico-parabólicas permitem obter focos lineares e as esféricas ou semi-esféricas, e ainda, os parabolóides dão focos pontuais. As Figuras 4.20 e 4.21 dão uma idéia de focos lineares e pontuais respectivamente.



Figura 4.20. Concentrador cilíndrico-parabólico (foco linear)

Os coletores de média concentração são assim pelo fato de permitirem a obtenção de temperaturas no foco do sistema onde se concentra a radiação Solar, compreendidas entre 200 a 400 °C.

As principais aplicações dos coletores de média concentração são: a produção de vapor para fins industriais; a movimentação de motores de pequenas potências; a cocção de alimentos através do uso de fogões solares.

O emprego do fogão solar como um meio energético na cocção de alimentos é uma opção ecologicamente correta, quando se sabe que cerca de 2 bilhões de pessoas (um terço da população mundial dependem diariamente de lenha para a satisfação de suas necessidades energéticas, direcionadas para a utilização domiciliar, principalmente para a cocção de alimentos). Isto representa um desmatamento anual das florestas da ordem de 20000 a 25000 km².

Algumas das vantagens dos coletores de média concentração são: ausência de chamas por conseqüente não existe fumaça, energia da queima gratuita.

Algumas desvantagens são: falta de orientação devido ao movimento de rotação da Terra que muda o foco de incidência solar, exigência de radiação direta, exposição ao Sol.



Figura 4.21. Concentrador Parabólico (foco pontual)

4.1.4.3. Coletores de Alta Concentração

Os coletores de alta concentração são sistemas de captação da energia solar que permitem obter altas temperaturas, através da superposição de inúmeras imagens do Sol, em uma determinada área chamada foco do sistema, o que é feito através da reflexão da radiação.

O elemento de captação é constituído por um campo de heliostatos (fig.4.22 e 4.23), formado por espelhos planos, comandados por um sistema de lunetas, de modo que o foco do concentrador se mantenha fixo em relação ao eixo principal do sistema.



Figura 4.22. Heliostato



Figura 4.23. Campo de Heliostatos

As principais aplicações dos coletores de alta concentração são: produção de óxidos refratários, metalurgia, síntese dos gases, tratamento de metais de alto ponto de fusão e centrais termoelétricas.

4.1.5. Tipos de concentradores solar de calor

4.1.5.1. Refletor / Tipo Focal

Os fogões solares tipo refletores foram desenvolvidos antes da década de 1950 e foi produzido em larga escala na Índia. Tentativas foram feitas também nas décadas de 1960 e 1970 para desenvolver fogões solares tipo refletores. Porém, o fogão solar tipo refletores não tornou-se tão popular por defeitos próprios, isto porque, requeria que o fogão fosse alinhado em direção ao Sol devido o movimento de rotação da terra de rotação, a cada 10 min, cozinhar poderia ser feito só no meio dia e só na luz direta do Sol. O desempenho era grandemente afetado pelo vento e pela poeira, existia perigo do cozinheiro ser queimado, tanto que foi necessário manter bem fechado o fogão quando for cozinhar e o projeto se tornou complicados.

4.1.5.2 Tipo Transferidor de Calor

No fogão solar tipo transferidor de calor, o coletor é armazenado fora e a câmara de cozimento é mantida dentro da cozinha de casa, mas este tipo de fogão solar também não se tornou popular por causa do alto custo e também pelo limite de cozimento que pode ser desempenhado.

4.1.5.3. Tipo Caixa Quente

O terceiro tipo de fogão é conhecido como caixas quentes, dos que a maioria dos defeitos dos dois tipos de fogões anteriores foram removidos. Diferentes tipos de fogões solares foram testados e o forno solar tem sido o melhor. Apesar do desempenho do forno ser muito bom, também requer um alinhamento ao Sol a cada 30 min., é também grande e caro.

Por isso o fogão solar tipo caixa quente com refletor único tem sido promovido e o custo subsidiado pelo ministério de pesquisa em energia não-convencional, o governo da Índia e as agências Nodal do estado na Índia desde 1981 a 82 e 462000 fogões solares foram vendidos até 31 de dezembro de 1998. Desde 1^o de abril de 1998 até dezembro de 1998 foram vendidos 5000 fogões solares. Isto mostra que a popularidade dos fogões declinou, na época citada. Ele também requer alinhamento ao Sol a cada 60 min. Por esta razão a operação tornou-se difícil e o desempenho do fogão solar tipo caixa quente é muito pequeno durante o inverno, quando a radiação solar e a temperatura estão muito baixas. Considerando isto, o fogão solar tipo caixa quente com dois refletores foi desenvolvido pelo Gupta e Purohit, então este movimento poderia ser evitado por 3 horas, mas o problema do baixo desempenho durante o inverno persistia com este fogão solar. Por conseguinte, tentativas também foram feitas por Nahar et. Al. para melhorar o desempenho do fogão solar tipo caixa quente durante o frio extremo pelo uso de material isolante e transparente (MIT), e o fogão solar tipo caixa quente com MIT foi testado dentro do simulador solar da Universidade de Wales, na faculdade de Cardiff. Nesse aspecto, ambos os defeitos do fogão solar tipo caixa quente foram removidos pelo fornecimento de mais de um refletor, e as perdas de calor por convecção têm sido supridas pelo uso do MIT como sugeriu Hollands, Goetzberger et. al., Nordgard e Beckham, Platzer e Nahar et. Al., o fogão é armazenado de tal forma que um refletor está voltado para o sul e o outro para o leste no Forenoon então o movimento do fogão é evitado por 180 min. À tarde um refletor é voltado para o sul e o outro para o oeste, então de novo o movimento é evitado por 180 min. O tempo máximo para cozinhar um prato é menor que 3 horas.

4.1.5.4. Placas Fotovoltaicas

Os sistemas que utilizam efeitos quânticos para a conversão da energia solar em energia elétrica, recebem o nome genérico de células solares. É possível construir células solares com base em diversos efeitos quânticos. Dentre estes o mais utilizado é o fotovoltaico.

Chama-se efeito fotovoltaico ao que permite a conversão direta da energia luminosa do sol em energia elétrica, utilizando captadores, denominados fotocélulas.

O princípio de funcionamento de uma célula fotovoltaica baseia-se na propriedade que alguns materiais possuem, principalmente os cristais quando devidamente manuseados, de gerar uma corrente elétrica quando sobre eles incide um feixe de luz, ou seja, a partir da

energia do fóton (da luz incidente) é produzida uma corrente elétrica, devido a uma diferença de voltagem ou de potencial, resultando no termo energia fotovoltaica.

As fotocélulas mais empregadas são as de silício, com um rendimento que já alcança cerca de 16 %, para as mais modernas.

Nas aplicações terrestres são inúmeras as suas utilizações, como por exemplo, funcionamento de rádio, farol, eletrificação de cercas, estações meteorológicas, estações de comunicação, telefones, rádio transmissor, acionamento de bombas, máquinas frigoríficas, televisão, antenas parabólicas, lâmpadas etc. Na Figura 4.24 mostra-se a aplicação de placas fotovoltaicas fixas, em uma residência, enquanto que na Figura 4.25 é mostrado um exemplo de sistema móvel (rastreador), já na Figura 4.26 é mostrada uma aplicação na iluminação pública.



Figura 4.24. Sistema Fotovoltaico Fixo



Figura 4.25. Sistema Fotovoltaico Móvel



Figura 4.26. Sistema de Iluminação Pública

4.2. Aspectos tecnológicos

4.2.1. Tecnologias Empregadas

Atualmente o emprego Sol como fonte energética na cocção de alimentos, tomou-se numa das alternativas mais importantes e ecologicamente correta, principalmente quando se sabe que de acordo com o Manual for Solar Box Cooker's, cerca de dois terços da população mundial, dependem diariamente de lenha para satisfação de suas necessidades energéticas direcionadas para a utilização domiciliar (cocção de alimentos e aquecimento). Esta ocorrência se dá exatamente entre as populações que habitam as regiões tropicais, portanto em áreas propícias ao uso da energia solar onde a incidência solar chega, em alguns casos, a um potencial de 1 kW/m^2 .

A utilização da energia solar para suprir as necessidades energéticas do futuro, não significa em absoluto que possa a mesma substituir de maneira integral as demais formas de energia ainda hoje utilizadas pelo homem.

Mas, voltando-nos para o Brasil, vemos na seca (o grande problema nordestino), uma prova inconfundível da potência energética solar dessa região. Este mesmo Sol, cuja radiação tem causado tantos efeitos prejudiciais durante as estiagens, poderá ser vantajosamente aproveitado para acionar bombas, destiladores, aquecer água para utilização doméstica e industrial, para secar frutos, carnes, peixes, grãos, climatização, conversão de energia, cocção de alimentos etc.

O fogão solar é hoje um fato comprovado, e como já foi dito, tem sido objeto de estudo por vários pesquisadores no âmbito internacional. A maioria dos fogões solares existentes funciona à concentração, muito embora existam outros tipos que aproveitam o efeito estufa como é o caso do protótipo desenvolvido por M. TELKS e ainda o sistema misto desenvolvido por S.PRA TA.

Os sistemas a concentração são normalmente constituídos de captadores de forma parabólica, semi-esférica, cilindro-parabólico, cônica e tronco-cônica. Estes sistemas, para que possam apresentar um desempenho satisfatório, necessitam de radiação direta, céu claro e sem nebulosidades.

A literatura internacional faz inúmeras referências a fogões solares construídos e testados por diversos pesquisadores. Nomes como H. STAM, SALGADO PRATA, G.LOF, ABOU-HUSSEIN e outros, contribuíram objetivamente para a solução do problema. Foram

construídos e testados inúmeros protótipos de concentradores parabólicos, esféricos, cilindro-parabólico, o sistema "four" ou caixa quente baseado no efeito estufa, o sistema misto "four" cilindro-parabólico e outros.

Os protótipos industrializados na França, Japão, Estados Unidos, etc. Utilizam superfícies refletoras parabólicas.

Entre os protótipos testados observou-se que o tempo necessário para ebulição de um litro de água com temperatura inicial de 20°C situou-se na faixa entre 15 e 30 minutos, para a otimização da curva da radiação solar.

As superfícies refletoras destes protótipos foram obtidas com revestimento de folha de alumínio polido, plástico aluminizado, alumínio anodizado, chapa de bronze niquelada etc.

A SOFEE, indústria francesa de equipamentos solares patenteou um fogão construído em plástico rígido, de forma parabólica cuja superfície refletora é formada por um revestimento de plástico aluminizado, conhecido localmente como "mylar". Existe outro tipo de fogão denominado "umbrella" que apesar de sua fragilidade estrutural é bastante prático e facilmente transportável. A sua superfície refletora é constituída por um tecido recoberto de um filme de plástico aluminizado.

4.2.2. Considerações sobre a superfície refletora

O emprego de plástico rígido metalizado funcionando como elemento estrutural e superfície refletora do concentrador, tem sido objeto de vários estudos.

Presentemente o único plástico possível de ser metalizado pela indústria brasileira é o tipo ABS. A tecnologia adotada exige, contudo o emprego de matrizes de aço ou latão o que até certo ponto invalida a utilização do ABS para fabricação dos concentradores para utilização em fogões solares devido ao alto custo do produto final. Além desse fato, as câmaras de metalização empregadas pela indústria brasileira, geralmente utilizadas para peças de pequenas dimensões, provavelmente não seriam economicamente recomendáveis em virtude do pequeno número a ser processado de cada vez, devido às dimensões dos concentradores com diâmetros da ordem de 1,14 metros.

A utilização do papel de alumínio para revestimento do parabolóide ainda é a solução mais economicamente indicada na obtenção da superfície refletora, muito embora não seja a melhor. Este material apresenta algumas desvantagens apesar da boa refletividade e baixo

coeficiente de absorção à radiação solar. Tem vida útil reduzida e sua refletividade fica dentro de pouco tempo comprometida pela oxidação natural sem considerar que, durante a operação de cocção dos alimentos, água ou gorduras não tenham sido entornadas sobre o papel. O plástico aluminizado importado tipo "mylar" e outros, apresentam problemas semelhantes. É contudo mais resistente e de vida útil maior do que a do papel. A sua refletividade e o baixo coeficiente de absorção à radiação solar, são excelentes.

O aço inox poderia ser uma solução, porém além de seu preço elevado, tem a propriedade de absorver o infravermelho do espectro solar, afetando o rendimento do concentrador. Em relação ao papel de alumínio apresenta a vantagem de não sofrer a ação do tempo ou mesmo das graxas ou gorduras, água ou outro líquido que sobre ele seja entornado. É de fácil limpeza, não pode ser riscado com facilidade, o que contribui para manter a superfície refletora sempre em boas condições.

Os filmes de plástico metalizados, via de regra importados, não seria a melhor solução em virtude do custo e dificuldade de importação. Poder-se-ia pensar em folhas de alumínio polido ou anodizado, porém não são facilmente encontradas no mercado regional, com o grau de polimento desejado. Soluções outras como superfícies cromadas ou niqueladas exigem que o absorvedor seja construído de metal, encarecendo o produto acabado.

Podem-se também obter parabolóides de madeira laminada, pó de madeira com aglomerante, alumínio, papelão, fibra de vidro etc.

Considerando as dificuldades encontradas para obtenção de um material de boa qualidade e de baixo custo para compor a superfície refletora, utilizamos pedaços de espelhos obtidos através do corte de uma lâmina de 2 mm de espessura, adaptando-se os pedaços ao perfil curvo da parábola.

É importante, contudo esclarecer que o fogão solar não tem a pretensão de substituir integralmente o uso da lenha ou mesmo do gás de cozinha e nem isto seria possível, pois sendo o fogão solar um equipamento cuja operacionalidade só tem sentido com a presença da radiação solar direta, é perfeitamente compreensível que haverá ocasião em que o Sol não ofereça condições de operacionalidade do fogão solar, quer por questões de forte nebulosidade, que em decorrência de períodos chuvosos e fatores outros que impeçam a presença da radiação direta e neste caso o uso da lenha ou do gás se torna imperativo.

4.3. Aspectos institucionais

4.3.1. A energia solar no mundo

No mundo contemporâneo onde a demanda energética tende a um crescimento vertiginoso para atender as necessidades da humanidade hoje estimada em mais de 6 bilhões de pessoas o homem tem se voltado para a Natureza buscando nos seus elementos as alternativas energéticas capazes de lhe proporcionar a energia de que tanto necessita para a manutenção de um nível de vida compatível com a sua própria dignidade.

Na verdade as alternativas energéticas oriundas dos recursos naturais renováveis estão sendo retomadas! Principalmente com relação ao vento e ao Sol, que já desempenharam no passado papéis de importâncias significativas na História da Humanidade. Em face às previsões até certo ponto alarmantes referentes à exaustão dos recursos petrolíferos mundiais, configuradas pela crise energética eclodida na década de 70, os países do I Mundo, principalmente, aceleraram as suas pesquisas na obtenção de novas tecnologias alternativas elegendo a Energia Solar como a mais promissora alternativa energética do futuro.

Esta tomada de posição do I Mundo não significava necessariamente que a manutenção dos seus padrões energéticos fosse depender dessas novas tecnologias, mas e principalmente porque é exatamente no III Mundo que se encontra um verdadeiro mercado em potencial para essas novas tecnologias, capaz de assegurar um vantajoso comércio internacional além de, estabelecer futuramente uma outra forma de dependência configurada pela dominação tecnológica no campo das alternativas energéticas.

Tanto isto é verdade que surgiram na França e nos Estados Unidos, principalmente, projetos grandiosos de geração de energia elétrica via sol, como é o caso do Projeto THEMIS de 2 MW, localizado em Targassone no sul da França, o Projeto BARSTOW de 10 MW e 35 MW solar, construído nos Estados Unidos, a Central de MITSUBISHI de 1 MW construída no Japão, além de outros.

Tudo indica que o objetivo a ser alcançado com tais instalações solares era o de dominar a tecnologia pertinente prevendo uma utilização futura onde o III Mundo seria o alvo predileto para seus pacotes tecnológicos alternativos.

Os países do III Mundo não podem evidentemente prescindir da tecnologia alienígena dos países ricos, mas nem por isto devem se colocar na cômoda posição de simples

espectadores, pois esta é uma posição que poderá no futuro se tornar bastante incômoda para as suas economias.

Países do III Mundo como o Brasil, precisam urgentemente partir para uma ação integrada no sentido de desenvolverem as suas próprias tecnologias energéticas alternativas, baseadas nas vocações energéticas de cada país, pois é exatamente nos países do III Mundo que se encontra o maior potencial destas fontes alternativas.

As relações internacionais no campo dos negócios, da ciência e da tecnologia, da cultura etc., são necessárias e salutares à comunidade internacional. O que não é salutar para os outros do III Mundo é que tais relações nos transformem em credores e dependentes eternos! Precisamos, portanto desenvolver a nossa própria tecnologia neste campo já que o desenvolvimento de um país é em última análise fundamentalmente baseado na energia.

Se no século passado a energia solar não encontrou espaço dentro do contexto energético do país, assim como outras formas alternativas de energia, isto não será verdade neste século. É oportuno transcrever aqui a opinião do Diretor da Atomic Energy Commission, Mr. Glenn T. Seabord, dos Estados Unidos, constante da página 26 da publicação ENERGIA SOLAR, do Instituto de Tecnologia Internacional - novembro de 1978, quando assim se expressou: - *"O caso dos países em vias de desenvolvimento, merece aqui uma atenção particular. Mesmo dentro de uma ótica habitual de uma economia que negligência a degradação do meio ambiente, a ENERGIA SOLAR, geralmente abundante nos países em questão, deveria ter um lugar de destaque em seu desenvolvimento. Esta é por exemplo, a opinião do diretor da Atomic Energy Commission dos E. V.A., Glenn T. Seabord. Durante vários anos acreditei, juntamente com muitos dos meus colegas, que uma energia nuclear abundante e econômica poderia permitir o desenvolvimento de certos países costeiros áridos Infelizmente não é possível levar a bom termo estes projetos por razões econômicas (em compensação) a ENERGIA SOLAR poderá em futuro próximo fornecer economicamente a eletricidade, e mesmo antes disso, ser útil de várias formas"*.

4.3.2. O Brasil e a crise energética

A posição do Brasil face à crise energética de 73 que carrou um fluxo de riquezas sem precedentes para os países da OPEP, é um pouco mais confortante considerando o fato de que os seus recursos petrolíferos não foram ainda de todo explorados. Além deste fato, que é

de importância fundamental para o desenvolvimento da economia brasileira, podem ainda alinhar o vasto potencial brasileiro no campo da agricultura, pecuária, energia de biomassa e tantas outras riquezas minerais adormecidas, além de outras formas de energia (como a Solar), a espera de uma exploração racional, o que tem tornado este país tão cobiçado por nações desenvolvidas.

Por outro lado dispomos de uma bacia hidrográfica que constitui um fabuloso potencial energético, a qual possibilitou a construção de grandes barragens e possibilitará ainda a execução de tantos outros projetos de real significação para a economia nacional.

A expansão petrolífera brasileira é hoje uma realidade incontestável! As plataformas submarinas, em que pese às dificuldades de extração do petróleo face à jazidas cada vez mais profundas, não constituem problemas maiores graças à tecnologia nacional desenvolvida pela PETROBRÁS e a capacidade indiscutível e comprovada de seus técnicos.

Com todo este elenco de recursos energéticos o problema brasileiro não é propriamente um problema fundamentado basicamente no petróleo. É muito mais um problema relacionado com energia; energia imprescindível ao seu desenvolvimento para que possa no futuro sair da condição de país pertencente ao bloco dos países do III Mundo.

4.4. A energia solar no contexto energético mundial

Quando no século XVI Galileu Galilei (1564-1642), provou com suas observações que a Terra era quem se movia em torno do sol, confirmando, portanto a teoria desenvolvida por Nicolau Copérnico (1473-1543), cuja teoria à época conflitava com a crença estabelecida desde o tempo de Ptolomeu no século II; ele foi obrigado a abjurar publicamente tal afirmação sob pena de sofrer torturas por parte da Inquisição que acreditava ser a Terra o centro do Universo e o sol era quem se movia em torno dela.

Acreditava-se que era impossível algo mais pesado que o ar, voar! No entanto Alberto Santos Dumont (1873-1932), provou com o seu 14-Bis em 1904 que era possível fazer voar uma máquina mais pesada do que o ar, fato acontecido no campo de Bagatelle em Paris, com repercussão mundial.

As viagens espaciais eram até bem pouco tempo considerada ficção científica, produto da mente fértil de romancistas e cineastas.

A luz elétrica, o rádio, a televisão, o transplante de órgãos humanos, a energia atômica, a bomba de hidrogênio, as microcirurgias, os aviões supersônicos etc., já foram no passado também considerados assuntos de ficção científica, e mesmo que assim fosse hoje estamos convivendo com estas "ficções".

Algum tempo atrás, na década de 70, um cientista americano surpreendeu a comunidade científica mundial quando revelou que a energia solar poderia ser captada por meio de uma central solar orbital, constituída de dois painéis de fotocélulas cada um com 25 km² cuja energia nele incidente seria enviada a Terra e captada por uma antena receptora de 1 km de diâmetro a qual seria convertida em ondas de alta frequência. O projeto que foi considerado obra de um visionário na época, deveria ter sido iniciado no ano de 1990 e a exploração comercial seria a partir do ano 2.000.

Mas eis que em julho de 1969, o homem pisou em solo lunar! A partir daí o avanço científico e tecnológico no campo espacial permitiram as viagens espaciais e a construção de estações orbitais, antes inimagináveis. Surgiu, portanto em 1971 a estação Salyut 1 da então URSS, depois em 1973 a estação espacial Skylab dos EUA e em 1997 foi posta em órbita a estação espacial Mir. Outras surgirão para surpresa e estupefação dos incrédulos e daqueles que se limitam apenas ao conhecimento científico e tecnológico de outrora.

Segundo o cientista Pinguelle Rosas da USP, o Brasil enfrentara problemas de geração de energia de origem hídrica a partir do ano 2020. A solução será partir para as termoelétricas que por sua vez são fontes de poluição ambiental e que contribuirão para aumentar o efeito estufa já existente em algumas áreas do mundo industrializado.

Os combustíveis fósseis não são renováveis e à medida que o tempo passa agrava-se o problema de obtenção desse tipo de combustível decorrente de jazidas cada vez mais profundas e ainda com o agravante de que a queima desses combustíveis vem cada vez mais contribuindo para aumentar a poluição ambiental em decorrência de gases tóxicos lançados à atmosfera. Os carros do futuro deverão ser movidos não com os combustíveis fósseis e sim por meio de células combustíveis não poluentes dando como resultado da combustão apenas água. A energia atômica continua sendo uma interrogação no que diz respeito à segurança e o vazamento de materiais radioativos. Apesar da autoconfiança depositada pelos franceses no programa nuclear, sete países europeus fecharam seus reatores e cancelaram os respectivos programas nucleares depois do impacto causado em 1987 pela usina de Chernobyl.

A energia nuclear é uma opção para quem não tem outra saída como é o caso o Japão, que não tem petróleo, carvão ou rios e também não tem espaço suficiente para instalar grandes painéis fotovoltaicos e captar energia solar em grande escala.

Os cientistas americanos, depois dos avanços científicos obtidos com os programas espaciais já começam a olhar com mais simpatia o então discutido programa de uma central solar orbital como imaginada na década de 80. A energia solar e eólica poderá ser uma alternativa energética para o futuro conforme a opinião do cientista Pinguelle Rosas, especialista em planejamento energético da USP.

Lamentavelmente tais opiniões ainda não são levadas em consideração pelos órgãos públicos federais relacionados com a geração e a distribuição de energia no país.

A Califórnia tem atualmente uma capacidade total de mais de 350 MW de geração de energia a partir da tecnologia solar, suprida por autoprodutores e interligados ao sistema de distribuição das grandes companhias geradoras regionais.

Na Suíça, de acordo com a exigência do Ministério Federal, no ano 2.000 uma parte da energia gerada naquele país deverá ser de origem solar e corresponderá a 230 MW. Por outro lado, as indústrias americanas estão sendo apoiadas pelo governo para envidar esforços no sentido de conseguir redução de preço, tomando a energia fotovoltaica competitiva no mercado aberto com o custo de geração de carga na base pelo ano 2.000.

Dados de 1994 revelam que em alguns estados nordestinos estão em andamento programas de implantação de projetos e estudos específicos em empresas de geração e distribuição de energia elétrica, universidades e empresas privadas. Estes programas são de pouca abrangência e destinam-se a levar energia elétrica de origem solar a pequenas comunidades, vilas, povoados, regiões remotas etc., para prover sistemas de bombeamento para água potável e irrigação. É por exemplo o caso da Companhia Energética de Pernambuco (CELPE), UFPE, Secretaria de Recursos Hídricos do Ceará, Companhia Energética do Ceará (COELCE), Companhia de Eletricidade da Bahia (COELBA), Companhia Hidrelétrica do São Francisco (CHESF), etc.

No caso específico da Paraíba não obstante ter sido o Estado nordestino pioneiro no estudo e pesquisa da energia solar desenvolvendo na década de 70 projetos de aquecedores, secadores, fogões solares, destiladores, cilindro parabólico, fomo solar etc. As pesquisas em energia solar, na atualidade, estão desativadas. A Universidade Federal da Paraíba e o governo estadual ainda não partiram para a utilização em grande escala desta energia nobre na

geração de energia elétrica em níveis compatíveis com as necessidades futuras de geração e distribuição de energia elétrica.

Desconhecem os "tecnocratas" paraibanos, é o que tudo indica que a importância do aproveitamento solar principalmente nas áreas cobertas pela CHESF está se tornando evidente conforme foi amplamente debatido no Seminário Nordeste Século XXI Energia para o Futuro, realizado na cidade do Recife em outubro de 1994.

O potencial solar do Nordeste em levantamento preliminar feito pela CHESF em 1987 mostrou que toda a Região tem um alto índice de radiação solar, e numa estimativa preliminar, utilizando apenas as áreas de maior insolação com premissas bastante restritivas, concluiu que este potencial é da ordem de 11.400 MW/ano, numa superfície com cerca de 1.000 km². Não se trata portanto de um pensamento utópico!. A energia solar não serve apenas para aquecer água ou possibilitar a fotossíntese como pensam alguns pseudoconhecedores do assunto. O leque de abrangência é muito vasto, o que não se coaduna com o conhecimento elementar sobre o assunto, de pessoas que detêm cargos de importância na esfera estadual e federal envolvidas com o problema de geração e distribuição de energia no próximo milênio.

Em 1996 teve lugar no Rio de Janeiro, o Congresso Brasileiro de Energia. Entre os trabalhos apresentados valem ressaltar o dos professores Ronaldo Gonçalves Madureira e Gilberto de Martinho Jannuzzi, ambos da UNICAMP, cujo título foi: Análise Econômica Da Introdução de Pré-Aquecedores Solares nas Habitações Brasileiras.

Em artigo publicado no Jornal Correio da Paraíba, edição de 19 de julho de 1998, o engenheiro Lúcio César Mesquita assim se expressa: - *"estranha que o Brasil se mantenha omissa quanto à aplicação de um plano de desenvolvimento de energia solar"*.

A Energia Solar é uma realidade indiscutível quer queiram ou não os antagonistas, uma realidade que à medida que nos aproximamos do Terceiro Milênio verifica-se na comunidade científica internacional do I Mundo uma tendência evidente na utilização desta energia para a geração de energia elétrica e outras aplicações, sem no entanto descartar a utilização de outras formas de energia alternativa. O Nordeste Brasileiro é uma evidência da potência solar que até então só tem servido para castigar os nordestinos nos períodos de estiagem e alimentar a "indústria da seca". A Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste Brasileiro (SUDENE), apesar dos seus 40 anos de existência não sabe fazer outra coisa diferente das inócuas e improdutivas frentes de emergência, uma "solução" bem a gosto dos políticos oportunistas da Região.

Está mais do que provado que as frentes de emergência não representam solução para o combate às secas, mesmo porque a seca é um fenômeno cíclico natural que continuará a existir. O que é preciso fazer é desenvolver ações governamentais com o apoio da sociedade civil no sentido de que possa o homem conviver com a seca sem que tenha que partir para o êxodo em direção as metrópoles aumentando assim a legião de desocupados e miseráveis favelados. A solução está em um amplo programa de eletrificação rural especificamente nas áreas que constituem o polígono das secas, na utilização dos recursos naturais de acordo com as vocações energéticas de cada região, na construção de açudes, na exploração racional dos cursos de água existentes, no preparo do solo irrigado, na captação e tratamento de água de subsolo, na construção de estradas para permitirem o escoamento da safra agrícola sem a intervenção do atravessador, na utilização dos materiais orgânicos para produção de biogás, no emprego da potência solar para a secagem de produtos agrícolas etc.

Abrir poços e fazer açudes em propriedades particulares de políticos e seus afilhados, não constitui nenhum programa de combate às secas.

A classe política nordestina notadamente a paraibana, precisa urgentemente modificar o eterno comportamento subserviente com relação ao Planalto e exigir tratamento igual ao dispensado pelo governo federal com relação aos estados das regiões sul e sudeste.

Esta é uma questão de dignidade e de respeito à sociedade local que vem sofrendo com o programa do governo de fechamento de órgãos públicos federais existentes no Estado, com as retaliações políticas, com os projetos inoportunos e sem sentido de políticos "samaritanos" que falam em "acabar a pobreza" tomando mais pobre o povo brasileiro que paga ao governo 30% do que ganha em impostos, que não agüenta mais tanta demagogia.

A pobreza não é privilégio do Brasil e ela sempre existirá aqui ou em qualquer outro país do mundo. Não é criando novos impostos que se erradica a pobreza como não foi com a criação da CPMF, com relação à saúde pública, que de provisória virou definitivo, e que não serviu para os objetivos para que fora criada; aumentado apenas à arrecadação federal para ser empregada só Deus sabe onde! Melhoram-se as condições do povo brasileiro com uma distribuição de rendas mais eqüitativa, com o aumento da produção em todos os níveis, com oportunidades de empregos, com uma política que privilegie o homem para que ele possa viver com dignidade mesmo não ostentando riqueza.

Erradicar a pobreza como querem alguns, é um pensamento utópico e oportunista!

O que se pode fazer e deve ser feito em um país de dimensões continentais e rico por natureza como o Brasil, é, paralelamente, investir pesado nos recursos naturais renováveis

criando ilhas de prosperidade na zona rural, erradicando a exploração do homem pelo homem e eliminando de uma vez por todas a linha de pobreza absoluta sob a qual vive uma significativa parcela de brasileiros, uma vergonha que afronta a dignidade humana e o direito de cidadania inerente a toda pessoa humana.

4.5. Aspectos ambientais

4.5.1. O desenvolvimento e o meio ambiente

O extraordinário aumento do consumo de energia verificado nas três últimas décadas tem chamado a atenção para o seu impacto sobre os recursos ecológicos, principalmente nos países altamente industrializados. A poluição do ar e das águas, não conhecem limites políticos! O homem pode criar nações mas não pode criar a biosfera que é única na Terra!

A exploração de energia em um país pode seguramente gerar efeitos adversos em outros países e oceanos, quando tal exploração negligencia as normas internacionais de segurança. Não há dúvida de que o consumo de energia continuará a aumentar, principalmente nos países ávidos de desenvolvimento como é o caso brasileiro.

A causa principal da poluição do ar no mundo industrializado é a combustão de materiais fósseis em veículos e outros meios de transporte, nas indústrias, usinas termoelétricas, edifícios comerciais, residenciais etc. Entre os principais poluentes estão os hidrocarbonetos, os óxidos de enxofre, nitrogênio, partículas sólidas etc.

Estes poluentes, de formas diversas, afetam a saúde das populações, dos animais, das plantas e até mesmo podem causar danos materiais a edifícios, por exemplo.

O consumo de energia na atividade contemporânea está se aproximando dos níveis nos quais a possibilidade de efeitos irreversíveis sobre o clima da Terra, começa a se constituir numa preocupação crescente.

Ao se confirmarem estas tendências, é bem provável que o fator determinante capaz de reduzir o consumo mundial de combustíveis fósseis no futuro, seja ditado pelo impacto deste consumo sobre o clima da Terra e não pela possibilidade de exaustão destas reservas.

4.5.2. Geração de energia versus impacto ambiental

Energia, fator essencial ao desenvolvimento sócio-econômico de um país. É nela que se baseia o progresso das nações desde as emergentes até as civilizações mais adiantadas do mundo. Nos primórdios, o homem se valeu da energia muscular do próprio homem e dos animais para suprir as suas necessidades energéticas nos mais diferentes afazeres do cotidiano. Mais adiante utilizou a força dos ventos e da água corrente, descobriu a combustão da madeira e posteriormente o carvão mineral.

Surgiram as máquinas a vapor e com elas a revolução industrial, que teve sua origem na Inglaterra. Mas o homem foi mais além! Aprendeu a represar os rios transformando a energia potencial da água em energia cinética e com ela movimentou os rotores das turbinas cujos eixos estavam acoplados a geradores elétricos, obtendo desta forma a hidroeletricidade. Surge o petróleo e o gás natural, e a partir daí o mundo industrializado passou a depender cada vez mais destes insumos para movimentar as suas máquinas, assim o petróleo e o gás natural, aliados a hidroeletricidade, constituíram-se no carro chefe energético do mundo atual.

Porém isto não bastou! A evidência das estatísticas no que se refere ao quadro atual de obtenção de energia através das fontes convencionais tendo em vista uma possível exaustão de suas reservas naturais já que elas não são renováveis (petróleo, gás natural e hidroeletricidade), despertou na humanidade a necessidade de encontrar novas formas de energia que possam garantir no futuro a continuidade da vida sem a necessidade de um racionamento energético que somente causaria um desequilíbrio sócio-econômico de conseqüências desastrosas para a humanidade. A contínua e incessante busca por novas formas de geração de energia aliada ao desenvolvimento científico e tecnológico, resultou finalmente no que se convencionou chamar de "a energia do futuro": A energia nuclear. A força do átomo a serviço da humanidade. Defendida por uns, rejeitada por outros, conduzindo em seu bojo um elenco de sucessos e insucessos, a energia nuclear aí está como uma nova contribuição energética mundial. Tem como prioridade a geração de energia elétrica, mas por outro lado existe a possibilidade de sua utilização para fins não pacíficos sem esquecer a constante ameaça de um vazamento radioativo, fato ocorrido na Rússia, entre outros, cujas conseqüências são fatais para a vida no planeta. A preocupação maior deverá ser com as condições de vida das gerações futuras e esta é uma tese defendida pelos especialistas, muito embora alguns achem que a energia nuclear seja a solução para este século.

Segundo Jean Paul Chaussade, diretor da Comunicação Científica da Electricité de France (EDF), *"virar as costas para o átomo é burrice". "O petróleo e o gás vão se esgotar em quarenta anos". "Os combustíveis fósseis poluem mais e o impacto ambiental das hidroelétricas é muito maior. A alternativa atômica é cada vez mais barata e segura."*, conforme consta do artigo O NÚCLEO DO FUTURO, publicado na revista Super Interessante, ano **11**, número 1 - janeiro de 1997.

Países como a França, Estados Unidos, Canadá, Grã-Bretanha, Japão e China, fazem uso da energia nuclear para geração de energia elétrica. A França detém o primeiro lugar com 75 % da energia elétrica gerada por meio de 56 reatores nucleares, exportando usinas, reprocessando o urânio, armazenando o lixo atômico e tem dois reatores de última geração.

Os reatores franceses são instalados próximos aos consumidores o que elimina custo de transmissão e a dependência de recursos naturais. Apesar de toda a segurança que envolve o processo nuclear francês e de gerar o kW nuclear 2,5 vezes menos que o kW do cata-vento e 12 vezes menos que o kW solar, o perigo de uma catástrofe não está descartado.

O lixo é tratado segundo a radioatividade. Em cada quilo, 950 gramas têm fraca intensidade (esgota-se em 30 anos), 45 gramas têm média intensidade (o metal contaminado das cúpulas dos reatores é perigoso durante centenas de anos), e 5 gramas têm alta radioatividade e dura centenas de milhares de anos.

Apesar da autoconfiança depositada pelos franceses no programa nuclear, sete países europeus fecharam seus reatores e cancelaram os programas nucleares, depois do impacto causado em 1987 pela usina de Chemobyl.

Os italianos, em plebiscito, votaram não à energia nuclear. Fecharam a usina de Latina e paralisaram as obras dos reatores de Caorso, Trino e Montalto de Caorso a qual terminou se transformando numa termoeletrica a gás natural. Depois de Chemobyl a Alemanha, Suíça, Finlândia, Bélgica, Holanda e Espanha, seguiram o exemplo da Itália.

"O programa nuclear brasileiro coleciona atrasos, multas, juros e erros como as fundações mal calculadas de ITAOMA. ANGRA II é um desses casos, além do ponto de não-retorno", diz o ex-ministro do Meio Ambiente José Goldemberg. *"ANGRA 3 é um absurdo",* concorda Pinguelle Rosas. *"Não tem justificativa energética".*

A energia nuclear é uma opção para quem não tem outra saída como é o caso do Japão, que *"não tem petróleo, carvão ou rios e também não tem espaço suficiente para instalar grandes painéis fotovoltaicos e captar energia solar em larga escala."* Por esta razão a produção do kW atômico no Japão vem crescendo. Em 1973 representava 0,6 % de toda a

eletricidade produzida no país. Em 1996 saltou para 30 %. É o terceiro maior parque nuclear do mundo com 51 reatores.

Apesar da confiança depositada pelos franceses em seu programa nuclear responsável por 75 % da energia consumida no país, sempre existirá, sem sombras de dúvidas, a possibilidade de um acidente nuclear, de conseqüências imprevisíveis, não ocorrendo o mesmo com as alternativas energéticas.

A energia solar, nas suas mais variadas formas de manifestação é a única não poluente e disponível na face da terra, razão pela qual o seu emprego como um insumo energético alternativo do futuro tem sido objeto de estudos e de investigações científicas. A energia do hidrogênio poderá vir a ser uma outra opção alternativa notadamente direcionada para os veículos automotivos.

Como se não bastassem às agressões sofridas pela natureza ao longo dos últimos 100 anos devido ao consumo exagerado dos combustíveis fósseis, o derrame de petróleo nos oceanos devido a acidentes degradando os ecossistemas marinhos deve-se levar em conta o desmatamento acirrado para obtenção de energia térmica, que parece não regredir.

4.6. O Brasil no campo da geração de energia

No Brasil a predominância energética e de origem hídrica o que hoje representa 92 % da capacidade nominal instalada. Somos um país praticamente monoenergético o que não é bom para o seu desenvolvimento industrial.

As bacias hídricas das regiões sul e sudeste, portanto onde se encontram os grandes centros populacionais e industriais, representadas pelos rios Paraná e São Francisco já utilizam praticamente 80 % do potencial hídrico em operação ou em construção. O que ainda resta a ser utilizado em longo prazo representa pouco mais de 17 %. Resta-nos apenas a região Amazônica cujo potencial a ser explorado com vistas à geração de energia de origem hídrica, representa 54 %. Porém se ainda nos resta este potencial o seu aproveitamento implica (como ocorreu em outras áreas), em promover impactos ambientais significativos que não devem ser negligenciados.

A formação da bacia de acumulação necessária à operação de uma usina hidrelétrica significa a inundação de florestas, aquíferos, o desaparecimento pela submersão de áreas ocupadas pela fauna, inundação de solos agricultáveis, vilas e povoados com suas tradições e

culturas, deslocamentos populacionais etc. Isto significa um custo social que não será contemplado pelas vantagens que a usina possa oferecer.

Agredir a Natureza com o objetivo de gerar energia necessária ao desenvolvimento do país não parecer ser a solução lógica e viável. *"A hidrelétrica de Balbina, por exemplo, devido à emissão de metano na degradação da massa florestal inundada, produz para o efeito estufa um resultado similar ao de uma usina termoeletrica de mesma capacidade". "A usina termoeletrica de Piratininga, dentro de São Paulo, por exemplo, produz sozinha mais dióxido de enxofre do que toda a frota de ônibus do município",* segundo o engenheiro Lúcio César Mesquita, diretor da Agência de Energia de Belo Horizonte.

A Tabela 4.2 mostra os tempos gastos para cozimento de alguns alimentos, fazendo-se comparações entre alguns fogões utilizados.

Tabela 4.2. Níveis de temperaturas obtidos por alguns tipos de fogões.

Alimentos utilizados	Quantidade	Fogão a gás	Fogão solar (mylar)	Fogão solar (al. Polido)	Fogão solar (UFRN)
Feijão	½ Kg	90 min	95 min	100 min	120 min
Batatinha	½ Kg	27 min	30 min	35 min	30 min
Batata doce	450g	26 min	30 min	35 min	30 min
Arroz	250g	31 min	35 min	38 min	40 min
Inhame	1Kg	30 min	34 min	37 min	32 min

4.7. Viabilidade de execução

Os estudos ora desenvolvidos no mundo todo em busca de novas fontes de energia, são uma demonstração evidente do declínio do ciclo do petróleo. O Brasil não pode se dar ao luxo de ficar esperando que a solução de seus problemas energéticos ocorra através da tecnologia alienígena, mas sim, investindo maciçamente em tecnologia nacional, o que ocasionará na libertação tecnológica, geração de emprego e renda, além da valorização do potencial do seu povo.

Não se pretende aqui afirmar que a energia solar seja a solução ideal para contornar a crise energética mundial. Porém em sã consciência, não se pode ignorar que a energia solar é a que mais tem contribuído para oferecer uma solução ao problema, pelo menos em termos parciais.

O aspeto da utilização da energia solar no preparo dos alimentos não é utópico! É um fato comprovado. Do mesmo modo também é verdade que, para que esta utilização seja significativa, é necessário adquirir o hábito de utilizá-la sempre quando possível. O emprego eventual do fogão solar não tem nenhuma significação econômica, como de resto, o de nenhum outro equipamento solar.

Os testes levados a efeito com os materiais para formar a superfície refletora, nos permitem afirmar ser o alumínio economicamente o mais indicado. Por outro lado, as dificuldades encontradas na obtenção deste material em condições satisfatórias para ser utilizado como elemento refletor, sugere uma tomada de posição, em escala industrial, no sentido de se desenvolver materiais refletivos de melhor qualidade, não só para aplicações em fogões solares como para aplicação em sistemas outros de média concentração como por exemplo, o cilindro-parabólico, usado na produção de pequenas potências e outras finalidades.

Como ficou demonstrado, o parabolóide é o único elemento que pesa no custo do fogão. É muito provável, contudo, que em escala industrial o custo unitário do equipamento venha sofrer uma redução significativa.

Mas, reduzir o custo final do produto não é tudo que se deseja. Mais importante ainda é garantir a aceitação do fogão solar pelas populações, quer seja para fins recreativos, quer seja para operar como elemento auxiliar, no preparo dos alimentos no cotidiano das populações rurais das regiões ensolaradas deste imenso Nordeste brasileiro, assim como em outras regiões existentes em todo o mundo.

Energia é hoje uma preocupação de todos os governos. Deste modo, uma campanha de âmbito nacional através dos meios normais de comunicação no sentido de educar e estimular às massas para o emprego de novas fontes energéticas, é de uma importância fundamental no equipamento de um problema que se reveste de caráter universal.

Contudo, chegamos às seguintes conclusões:

1. O fogão proposto é bastante viável para o fim de cozimento de alimentos, podendo trazer substancial economia e evitar problemas de ataque à ecologia, principalmente no que diz respeito ao desmatamento por uso de lenha;
2. Sua operacionalidade é bastante simples, em função do fácil manuseio de seu mecanismo de seguimento solar e de seu baixo peso;
3. A otimização do processo de obtenção do molde foi fundamental para a obtenção de níveis de temperatura bastante significativos, permitindo uma diminuição acentuada no tempo de cozimento;
4. O mecanismo que permite a desmontagem da parábola mostrou-se eficiente, facilitando seu transporte;
5. O fogão proposto tem capacidade de cozimento no período de 08:00 às 15:00 horas, dentro de boas condições solarimétricas, podendo cozer alimentos para todas as refeições de uma família;
6. O protótipo proposto é prioritariamente viável para a utilização em zona rural, por comunidade de baixo poder aquisitivo;
7. O mecanismo que permite a movimentação da panela para um melhor ajuste de foco, mostrou-se bastante eficiente;
8. As variações de posição do fogão para que a panela estivesse sempre no foco do sistema, com área a de sombra no centro da parabolóide, deu-se geralmente a cada 1 hora;
9. O fogão solar proposto, com algumas modificações a ser operacionalizada já pode tomar-se um produto de mercado;
10. Pretende-se construir um novo fogão de, de 3 m² de área, com parábola construída utilizando-se um compósito de gesso e isopor, para permitir a utilização de duas painéis, cozendo dois alimentos diferentes, diminuindo o tempo de cozimento de cada refeição.

4.8. Eletricidade do Sol

A eletricidade solar térmica é uma tecnologia relativamente nova que já se tem mostrado muita promissora. Com pouco impacto ambiental e sendo uma fonte massiva, oferece uma oportunidade aos países mais pobres do mundo comparável ao avanço que os parques eólicos marinhos estão oferecendo atualmente aos países europeus com mais ventos

no litoral. A eletricidade solar térmica usa diretamente o Sol, porque se situar em regiões com uma alta radiação solar direta. Entre as áreas mais promissoras do mundo estão o Sudeste dos Estados Unidos, América Central e do Sul da África, Oriente Próximo, a Europa Mediterrânea, Iran, Paquistão, e as regiões desérticas de Índia, a ex-União Soviética, China e Austrália.

Em muitas regiões do mundo, um quilômetro quadrado de terra basta para gerar de 100 a 200 GigaWatts hora (GWh) de eletricidade ao ano usando a tecnologia solar termoelétrica. Isto equivale à produção anual de uma central térmica, a exploração de menos de 1 % do potencial solar térmico total, seria suficiente para estabilizar o clima mundial mediante reduções massivas de CO₂.

- **Converter o calor do sol em eletricidade.**

Produzir eletricidade da energia dos raios solares é um processo relativamente simples. A radiação solar direta pode ser concentrada e armazenada mediante uma série de tecnologias (TCS) que proporcionariam temperaturas de médias a altas. Este calor se utiliza para operar um ciclo termodinâmico convencional, por exemplo, acionar uma turbina acoplada a um gerador de eletricidade.

O calor solar recolhido durante o dia pode também se armazenar em meios líquidos, sólidos ou que cambiam de fase, como sais fundidos, cerâmicas, cimento, ou no futuro, misturas de sais que mudam de fase. Pela noite, pode extrair-se o calor do meio de armazenamento para fazer funcionar a turbina.

A eletricidade solar térmica também está barateando os custos de produção. As centrais que operam na Califórnia alcançaram impressionantes reduções de custos, com custos de geração que oscilam hoje entre 10 a 13 centavos de \$/kWh. Sem embargo, se espera que no futuro os custos estejam próximos de 5 centavos de \$. Juntas, tecnologias avançadas, produção em massa, economias de mercado e melhoras na operação, permitiram uma redução nos custos da eletricidade solar a um nível competitivo com as centrais térmicas de combustíveis fósseis nos próximos 10 a 15 anos.

- **Tecnologia, custos e benefícios.**

Para produzir eletricidade a partir da energia solar térmica se requerem quatro elementos: concentrador, receptor, alguma forma de transporte do calor, armazenamento e conversão da energia, um equipamento que é muito similar ao de uma planta de combustível fóssil. As três tecnologias solares térmicas mais promissoras são o concentrador cilindro parabólico (CCP), o receptor central de torre e o disco parabólico.

4.9. Modelo Brasil - SR

Os mapas de radiação solar para o território brasileiro e América do Sul foram obtidos com o uso do modelo de transferência de radiação BRASIL-SR desenvolvido pelo Instituto Nacional de pesquisas espaciais (INPE) em parceria com o Laboratório de Energia Solar / Universidade Federal de Santa Catarina. Atualmente o modelo encontra-se operacional no LABSOLAR processando os dados solares para a América Latina. A obtenção de uma estimativa da radiação solar incidente na superfície utilizando o modelo BRASIL-SR está atrelada a três conjuntos principais de informações: a) valores climatológicos de temperatura, visibilidade, umidade relativa; b) dados digitais extraídos de imagens de satélite; e c) aplicação do “Método de Dois-Fluxos” (Martins, 2001) para solução da equação de transferência de radiação na atmosfera. Na Figura 4.27 é mostrado o diagrama em blocos dos processos pelo modelo. As bases de dados climatológicos de temperatura e visibilidade foram desenvolvidas a partir da compilação e análise geoestatística dos dados de todas as estações de superfície na América do Sul disponíveis na base de dados “Global Surface Summary of Day Data” mantida pelo National Climatic Data Center. O banco de dados de umidade relativa foi desenvolvido a partir da interpolação de dados obtidos junto à “International Research Institute for Climate Prediction” para toda a América do Sul. A base de dados de albedo de superfície foi gerada a partir das planilhas mensais na resolução 1° x 1° disponibilizadas pelo “Distributed Active Archive Center – Goddard Space Flight Center”. Os valores de altitude para todo o território da América do Sul foram obtidos pela manipulação da base de dados GTOPO30 produzida pelo Earth Resources Observation System Data Center (EROS) mantido pelo U.S Geological Survey. Os valores do coeficiente de cobertura efetiva de nuvens (*neff*) são obtidos após manipulação e análise estatística das imagens de satélite

(GOES-8 e GOES-12) e descrevem dois efeitos causados pela presença de nuvens: a fração do céu coberto por nuvens e a profundidade ótica das mesmas.

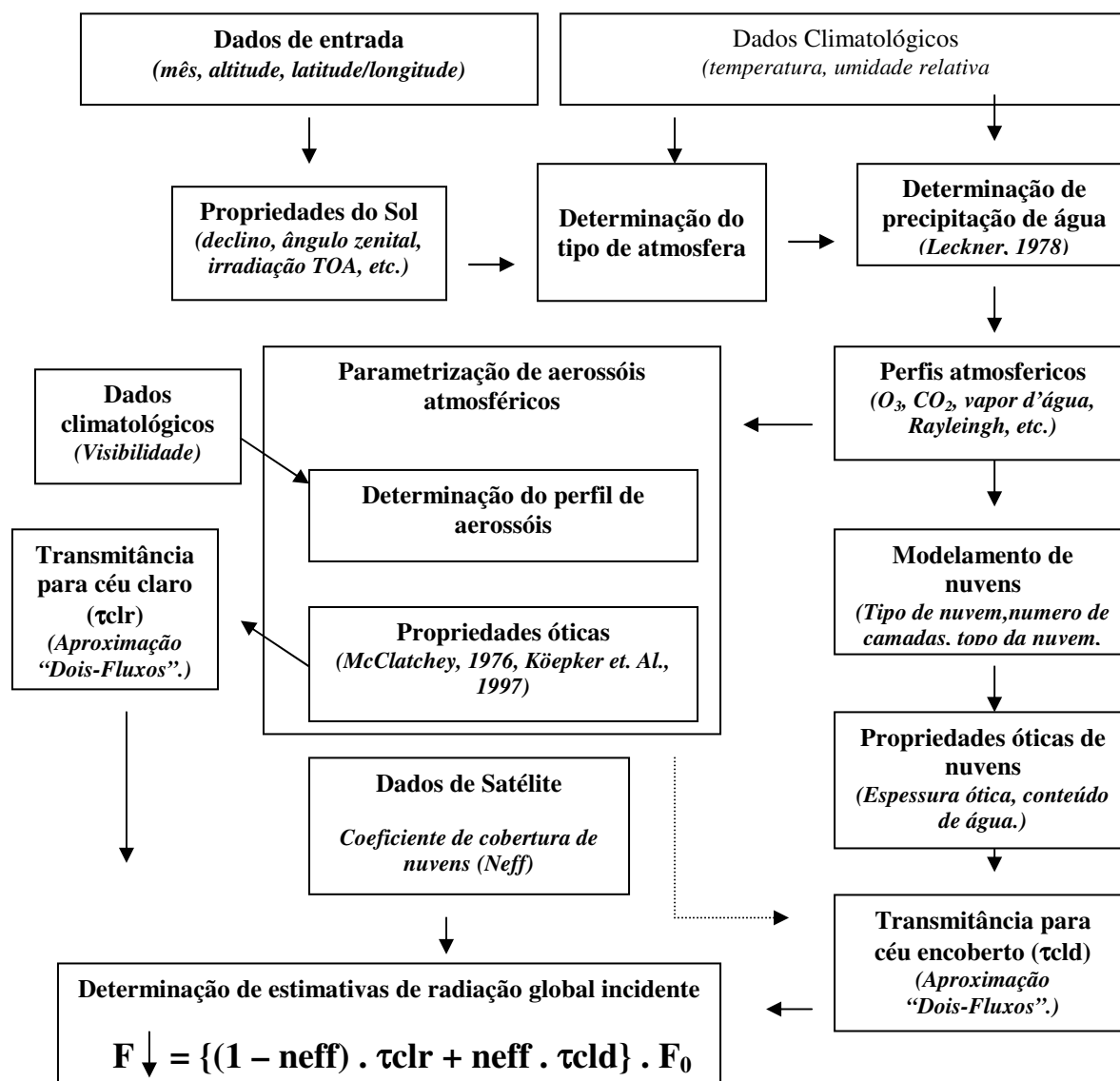


Figura 4.27. Fluxograma do modelo de transferência radiativa BRASIL-SR.

O modelo assume que fluxo de radiação solar no topo da atmosfera está linearmente distribuído entre as duas condições atmosféricas extremas, céu claro e céu encoberto (Martins, 2001; Pereira et al., 2000). O modelo assume, também, a existência de uma relação linear entre a irradiância global na superfície e o fluxo de radiação refletida no topo da atmosfera, descrita matematicamente por:

$$F_{\downarrow} = F_0 \{ \tau_{clear} \cdot (1 - n_{eff}) + n_{eff} \cdot \tau_{cloud} \} \quad (4.13)$$

Onde $F_{\downarrow}$ é fluxo de radiação solar incidente na superfície, F_0 é a radiação incidente no topo da atmosfera. A radiação solar incidente na superfície é estimada através da Equação (4.13) a partir de duas componentes independentes: a primeira componente corresponde à transmitância atmosférica em condição de céu claro, τ_{clear} , e a segunda refere-se à condição de céu encoberto, τ_{cloud} . As duas transmitâncias podem ser estimadas a partir de parametrização dos processos físicos que ocorrem na atmosfera utilizando dados climatológicos e a aproximação de “Dois-Fluxos” para solução da equação de transferência de radiação. A natureza aleatória do fluxo de radiação solar incidente na superfície em qualquer condição de nebulosidade é incluída no modelo através do coeficiente de cobertura de nuvens (n_{eff}).

4.10. Mapas do fluxo de radiação solar no território brasileiro

Na Figura 4.28 são apresentados os mapas da média mensal da radiação solar global para os doze meses de 2000. Como era esperado, pode-se observar que o Brasil, devido à sua localização predominantemente tropical, possui uma grande disponibilidade de recursos de energia solar em todo o seu território. Os maiores valores de fluxo de radiação são observados na região central do país durante o verão. É interessante notar que durante o verão, os valores de radiação solar global observados na região sul do país são superiores aos valores obtidos para a região norte.

Mesmo durante o inverno, a radiação solar na superfície é elevada apresentando os valores mínimos da ordem aproximada de 2,5 kWhm⁻²/dia no sul do Brasil. Vale observar que durante a estação seca, as estimativas de radiação solar apresentam incertezas maiores em função da ocorrência de queimadas na região central e norte do país que lançam grande quantidade de aerossóis na atmosfera capazes de absorver a radiação solar (Pereira *et al.*, 2000). Trabalhos realizados (Pereira *et al.*, 2000) indicam desvios que são da ordem de 11 % entre valores calculados e medidos nessas regiões, em comparação com os desvios bem menores, da ordem de 6 % nas regiões onde não ocorrem queimadas. Estudos estão sendo desenvolvidos para incluir uma parametrização dos aerossóis emitidos em eventos de queima de biomassa em modelos de transferência de radiação, no entanto, a reduzida quantidade de

informações disponíveis sobre a composição, a concentração e a distribuição espacial dos mesmos vem dificultando a obtenção de resultados consistentes.

Além dos mapas de radiação solar global, mapas das componentes direta e difusa, de radiação fotosinteticamente ativa (PAR) e da radiação em planos inclinados também estão sendo gerados e armazenados para disponibilização de acesso público. Na Figura 4.29 é mostrada a média anual das componentes da radiação solar (global, direta, difusa) e a radiação solar no plano inclinado para o território brasileiro. A informação contida no mapa de radiação no plano inclinado (Figura 4.29D) é de grande utilidade no aproveitamento da energia solar em projetos de geração fotovoltaica ou térmica uma vez que mostra a quantidade de energia incidente no plano de maior radiação solar direta considerando a posição geográfica do local. Pode-se observar que os maiores valores de radiação direta e no plano inclinado ocorrem aproximadamente nas mesmas regiões do país: região compreendida pelo estado do Tocantins, oeste da Bahia e sul dos estados de Maranhão e Piauí durante o período de verão e na região central e sudeste do país durante a estação seca (agosto a outubro). Na Figura 4.29(D) é apresentada de forma clara o grande potencial para o aproveitamento da energia solar no Brasil. A média do território brasileiro (aproximadamente $5 \text{ kW.h.m}^{-2}/\text{dia}$) é praticamente igual ao valor máximo de radiação observado no continente europeu (aproximadamente $5,5 \text{ kW.h.m}^{-2}/\text{dia}$) (Helioclim, 2004), onde ocorre um grande investimento tanto governamental como de iniciativa privada nesta fonte de energia renovável.

Estudos estão sendo desenvolvidos com o objetivo de avaliar a variabilidade interanual do fluxo de radiação solar na superfície. Estimativas para o período de 1999 a 2004 foram processadas e analisadas, o que permitirá também a realização de estudos para determinar quais os fatores climático-ambientais que influenciam na variabilidade dos recursos de energia solar. Esse é um aspecto importante para a avaliação dos riscos associados a investimentos para a aplicação desta fonte de energia.

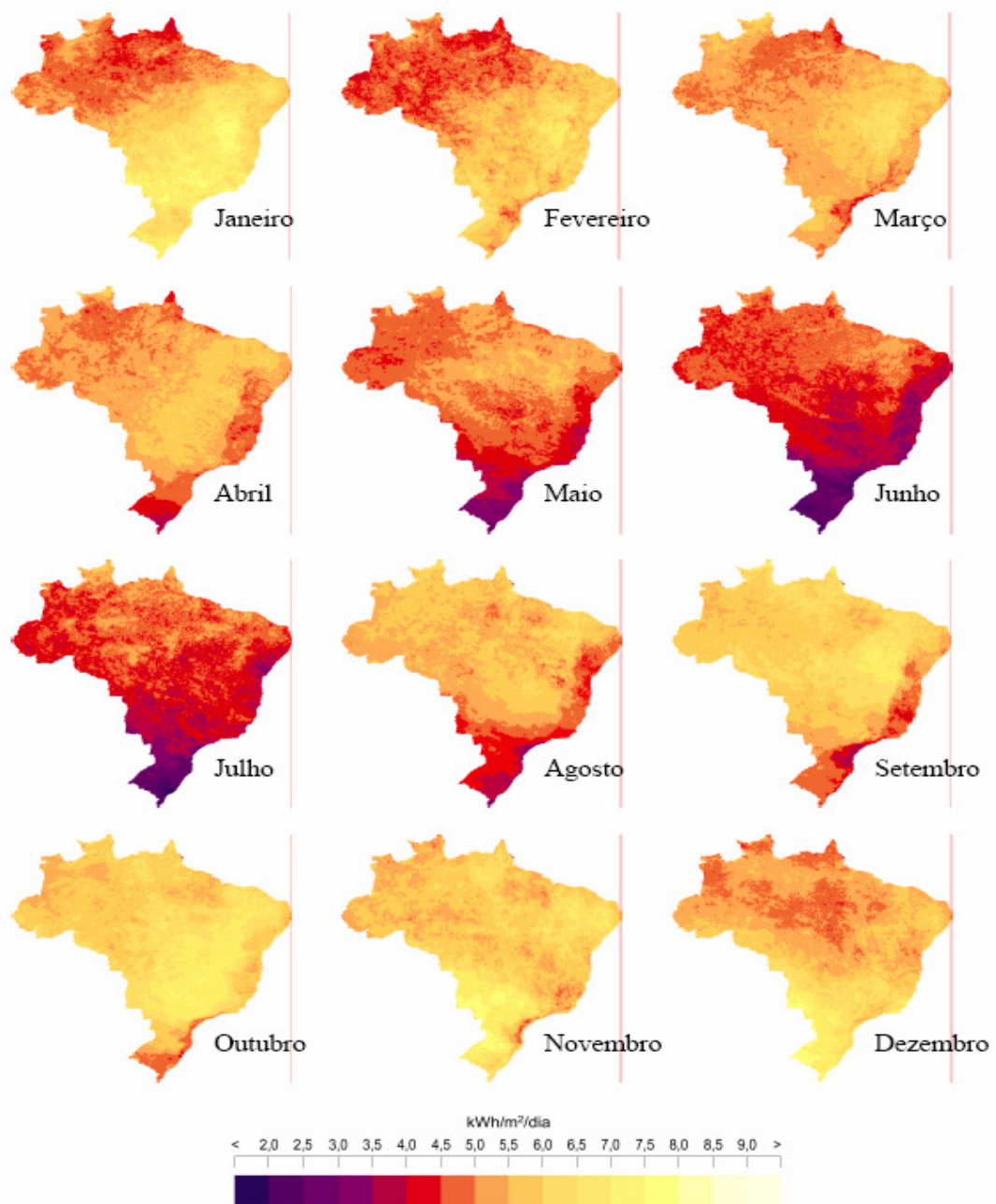


Figura 4.28. Mapas de radiação solar global média mensal para o território brasileiro obtidos com o uso do modelo BRASIL-SR a partir de dados climatológicos e imagens de satélite GOES-8 para o ano de 2000.

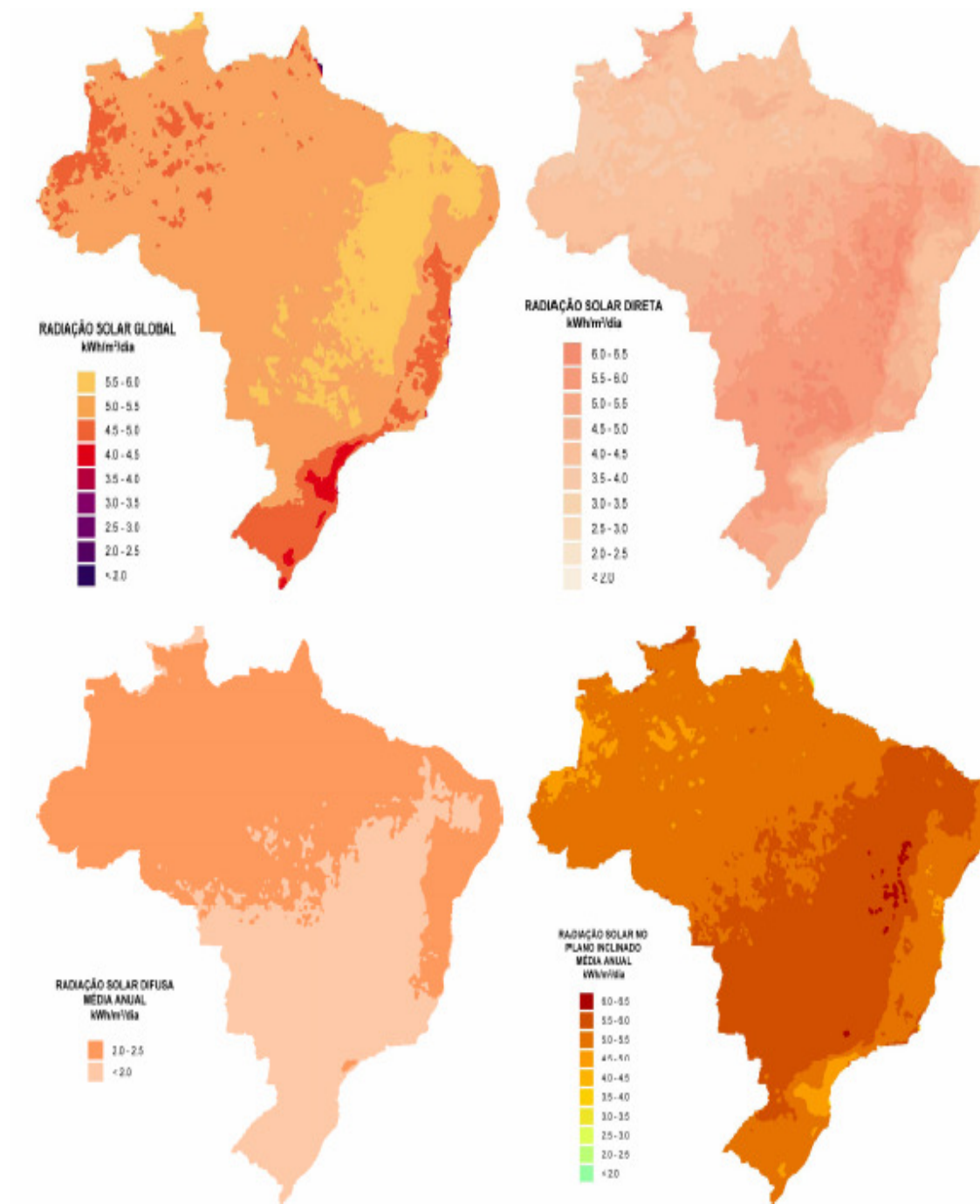


Figura 4.29. Mapas de radiação solar média anual para o território brasileiro obtidos com o uso do modelo BRASIL-SR a partir de dados climatológicos e imagens de satélite GOES-8 para o ano de 2000: (A) radiação global, (B) radiação direta, (C) radiação difusa e (D) radiação global em plano inclinado em ângulo igual à latitude local.

4.11. Dados da energia solar(NE e RN)

A radiação média global (Anual) da região Nordeste foi de 5688 W.h/m² conforme apresentado na tabela 4.3.

Tabela 4.3. Dados: Centro de Estudos de Energia Solar- CENSOLAR/ES

JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
5945	5806	5723	4945	5111	4528	5000	5611	5611	6612	6667	6389

Radiação Incidente Mensal Média em Natal/RN sobre Superfície Horizontal (W.h/m²) em horas de Sol, Média Diária (1995 a 1999), tabela 4.4, segundo a estação Climatológica da UFRN.

Tabela 4.4. Média Mensal: 250,3 – 3003,6 horas de Sol/ano

JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
8,6	7,9	7,1	7,3	8,2	7,1	7,2	7,5	9,0	9,7	9,5	9,7

Situação energética RN (Dados: IDEMA/IBGE/COSERN) mostra a radiação anuário das diversas regiões do Rio Grande do Norte, tabela 4.5.

Tabela 4.5. Dados: Anuário Estatístico do RN/1997

Zona	Pop.Res.	Consumidores de Energia Elétrica				
		Outros	%	Rural	%	Total
Litoral Oriental	1.129.951	273.372	97,7	6.513	2,3	279.888
Litoral Norte	158.750	29.638	98,1	564	1,9	30.202
Agreste	267.080	50.609	97,9	1.094	2,1	51.703
Currais Novos	92.547	20.758	90,1	2.290	9,9	23.075
Caicó	113.055	25.728	94,1	1.620	5,9	27.348
Serras Centrais	84.165	13.540	96,8	445	3,2	13.985
Alto Apodi	215.112	45.810	96,3	1.769	3,7	47.579
Mossoroense	498.000	107.507	94,1	6.729	5,9	114.236
Total	2.558.660	566.989	96,4	21.027	3,6	588.016

Resultados – Censo 2000: Domicílios: **612.639**

Com energia elétrica: **582.055**

Sem energia elétrica: **30.584**

4.12. As Fontes de Energia Renováveis

A geração ou produção de energia elétrica compreende todo o processo de transformação de uma fonte primária de energia em eletricidade, e tem um papel de grande importância no contexto de qualquer estratégia voltada a um desenvolvimento sustentável. Isto porque é no processo de produção que se localiza uma parte significativa dos impactos ambientais, socioeconômicos e culturais dos sistemas de energia elétrica. Para ilustrar a importância de um desenvolvimento adequado de projetos de geração de energia elétrica basta verificar a sua significativa participação na produção mundial dos gases-estufas.

Por outro lado, é importante lembrar que a energia elétrica faz parte de um conjunto mais amplo de energia de uso final que são obtidas a partir de diversas fontes energéticas primárias, conforme foi mostrado na figura 4.29. É neste contexto integrado que a energia elétrica deve ser enfocada quando se visualiza o uso mais adequado dos recursos naturais.

Na figura 4.29. Podem-se identificar as fontes básicas de energia na Terra de acordo com suas relações com o sistema solar e com o impacto do tempo, assim como os principais processos de transformação que podem conduzir à geração de eletricidade, que são:

- Transformação de trabalho gerado por energia mecânica, através do uso de turbinas hidráulicas (adicionada por quedas d'água , marés) e cata-ventos (acionados pelo vento);
- Transformação direta da energia solar, como através do uso de células fotovoltaicas;
- Transformação de trabalho resultante de aplicação de calor gerado pelo Sol, por combustão (energia química), fissão nuclear ou energia geotérmica, através da aplicação de máquinas térmicas;
- Transformação de trabalho resultante de reações químicas, através das células de combustível.

As fontes primárias usadas para a produção da energia elétrica podem ser classificadas em não-renováveis e renováveis. São classificadas como fontes não-renováveis aquelas passíveis de se estocarem por serem utilizadas com velocidade bem maior que os milhares de anos necessários para sua formação. Ou seja, tais fontes não são repostas pela natureza em velocidade compatível com a da sua utilização pelo ser humano. Nesta categoria estão os derivados de petróleo, os combustíveis radioativos (urânio, tório, plutônio etc.), a energia geotérmica e o gás natural. Atualmente, a utilização de tais fontes para produzir eletricidade se dá principalmente através de uma primeira transformação da fonte primária em energia térmica, por exemplo, por meio de combustão, fissão ou processos geotérmicos. A geração elétrica obtida por este meio é conhecida como geração termelétrica,

Fontes renováveis são aquelas cuja reposição pela natureza é bem mais rápida do que sua utilização energética como no caso das águas dos rios, marés, Sol e ventos, ou cujo manejo pode ser efetuado de forma compatível com as necessidades de sua utilização energética como no caso da biomassa - cana-de-açúcar, florestas energéticas

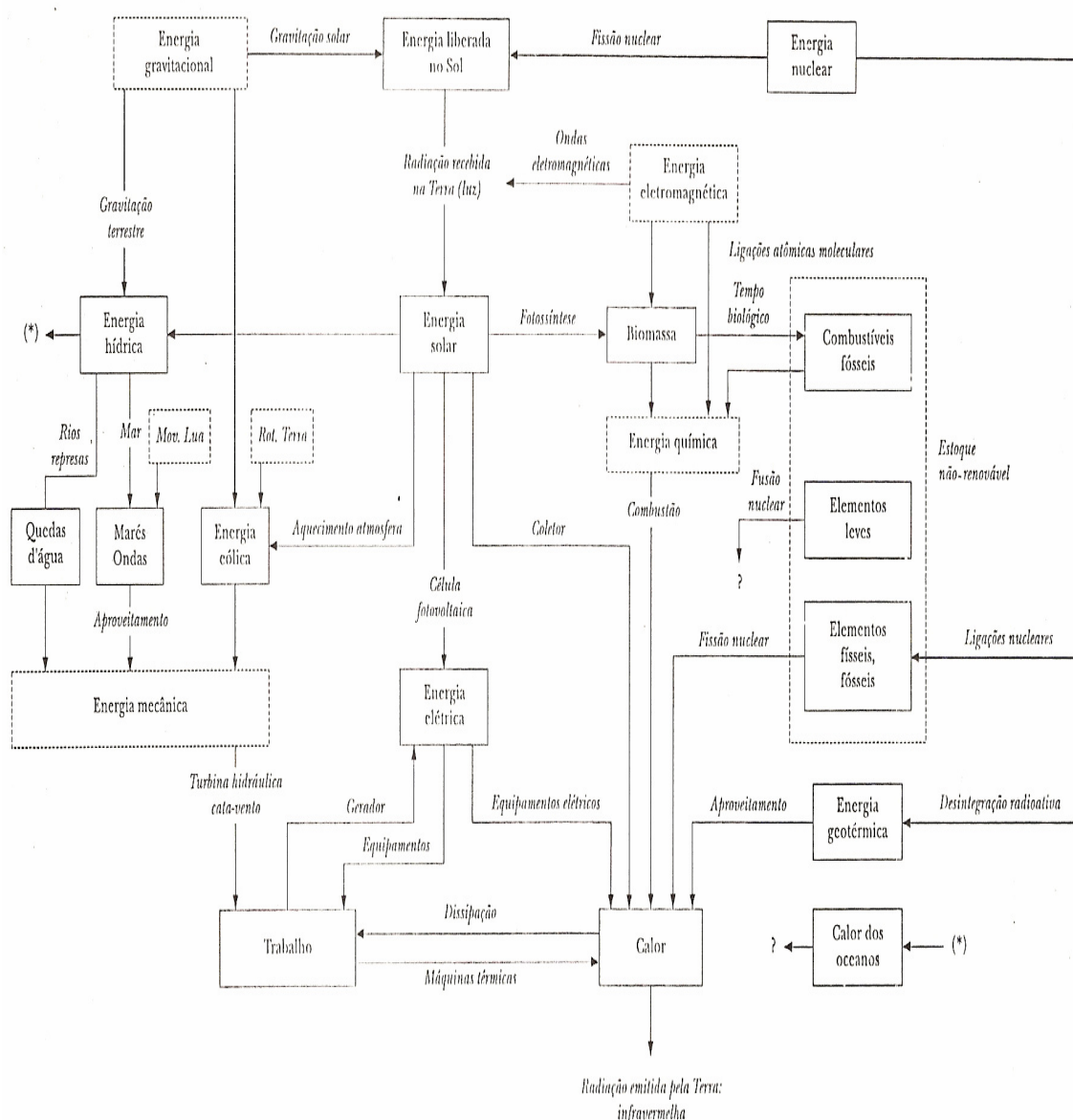


Figura 4.30. Origem das fontes de energia. Fonte La Rovere et al., 1985

e resíduos animais, humanos e industriais. A maioria dessas fontes apresenta características estatísticas e estocásticas, de certa forma cíclicas, em períodos de tempo compatíveis com a operação das usinas elétricas e inferiores à vida útil das mesmas. Tais fontes podem ser usadas para produzir eletricidade principalmente através de usinas hidrelétricas (água), eólicas (vento), solar-fotovoltaicas (Sol, diretamente) e centrais termelétricas (Sol, indiretamente, gerando vapor e biomassa renovável),

Conforme foi visto no capítulo anterior, o perfil energético atual da humanidade é fortemente baseado na utilização de fontes primárias não-renováveis, ou seja, os combustíveis fósseis. Entretanto, o contexto energético mundial é heterogêneo. Podem ser encontradas regiões onde este padrão não é reproduzido devido à grande disponibilidade de outras fontes e às estratégias específicas adotadas. Este é o caso do Brasil, onde a grande supridora de energia elétrica é uma fonte renovável a geração hidrelétrica. Isso se deve principalmente à grande disponibilidade de fontes hídricas existentes no país e às políticas de gerenciamento do setor elétrico das Últimas décadas. Termelétricas existem em pequena monta, enquanto as centrais eólicas, solar-fotovoltaicas e de biomassa não passam de projetos de pequeno porte para a alimentação de sistemas isolados, distantes das redes elétricas ou de projetos-piloto.

As atuais mudanças que vêm ocorrendo no cenário da energia elétrica no Brasil vêm associadas a um aumento da participação da geração termelétrica. Tais mudanças incluem: abertura à competição; entrada dos capitais privados; e revisão do papel do Estado quanto à regulação, regulamentação e fiscalização do setor energético. O aumento da geração termelétrica deverá se basear principalmente na utilização do gás natural devido à grande disponibilidade deste combustível. O processo efetiva-se em projetos de interligação energética com outros países da América do Sul a custos competitivos. A falta de investimentos no setor elétrico brasileiro nos Últimos tempos também fortalece a inserção da utilização do gás natural por privilegiar projetos de rápida execução, o que não é normalmente o caso das hidrelétricas.

Pode-se afirmar que a geração elétrica no Brasil ainda terá um perfil fortemente hidrelétrico a médio prazo. Entretanto, o perfil renovável que hoje se verifica na matriz energética do país pode ficar comprometido a longo prazo, caso as políticas para o setor não visualizem um futuro de desenvolvimento sustentável, fomentando assim a atratividade das soluções renováveis.

Em termos mundiais, os meios de suprimento de energia elétrica praticados em larga escala nas últimas décadas utilizam principalmente fontes primárias não-renováveis, predominando o carvão mineral, o combustível nuclear e os derivados do petróleo. A baixa eficiência da utilização desses combustíveis, aliada aos problemas de caráter ambiental, tem resultado num interesse crescente na utilização de fontes alternativas. Uma grande barreira à introdução massiva de fontes renováveis, no entanto, é a ênfase nos aspectos econômicos em detrimento dos ambientais, uma vez

que a maioria dos combustíveis não-renováveis ainda é vendida a preços muito baixos no mercado. Isso é possível porque os preços não refletem os impactos causados pelo uso de tais combustíveis.

O desenvolvimento tecnológico recente, aliado a políticas que favorecem o uso de fontes renováveis, vem diminuindo gradualmente as barreiras existentes ao uso de fontes renováveis de energia. O processo tem sido lento, mas tende a se acelerar na medida em que as tecnologias renováveis passam a um nível de comercialização mais amplo e, conseqüentemente, mais competitivo.

Tabela 4.6. Quadro comparativo das características das fontes alternativas de energia elétrica.

Avaliação	Solar-térmica	Fotovoltaica	Hidrelétrica	Eólica	Oceânica (Térmica)	Oceânica (Marés)	Geotérmica
Custo do capital	alto	alto	muito alto	moderado	muitíssimo alto	muito alto	baixo
Custo operacional	moderado	moderado	muito baixo	baixo	desconhecido	muito pequeno	pequeno
Eficiência	15%	5-10%	80%	42%	7%	25%	100%
Poluição	nenhuma	calor	nenhuma	visual	nenhuma	nenhuma	baixa
Custo nivelado	25 cents/kWh	16 cents/kWh	4 cents/kWh	4-5 cents/kWh	desconhecido	desconhecido	baixo
Impacto ambiental	moderado	alto	muito alto	baixo	desconhecido	moderado	baixo
Alta escala	muito caro	muito caro	já comprovado	possível	possível	alguns locais	alguns locais
Baixa escala	não	difícil	baixa queda	sim	não	não	não
Capacidade unitária	1 000MW	depende da área	2 000-6 000MW	variável	sem limite	250MW	1 000MW

A tabela 4.6. apresenta um quadro comparativo das diversas tecnologias à base de fontes renováveis. A utilização de fontes alternativas renováveis de energia tem se mostrado uma importante prática para reduzir a dependência de combustíveis

importados no caso de países que não são auto-suficientes. Contudo, apesar do continuado declínio nos seus custos, as novas tecnologias renováveis ainda não alcançaram um patamar capaz de competir com as tecnologias de fontes não-renováveis que já estão bem maduras. As expectativas de custo atrativo a longo prazo para utilização em larga escala da geração baseada no uso de fontes renováveis estão na faixa de 4 a 6 U\$cents/kWh (40 a 60 USS/MWh), bem distantes da faixa atual de custo destas fontes, de 9 a 50 U\$cents/kWh.

As tecnologias à base de fontes renováveis são atrativas não só devido às suas vantagens ambientais, mas também sociais. A possibilidade de criação de fontes de suprimento descentralizadas e em pequena escala é fundamental para a busca do desenvolvimento sustentável tanto em países desenvolvidos como em países em desenvolvimento. No interesse desses últimos, sobressaem as centrais que se utilizam de fontes renováveis e que não requerem alta tecnologia para instalação ou técnicos especializados para sua operação. Tais soluções utilizam-se de indústria leve e possuem baixo índice de poluição.

A diversidade de tecnologias em energia renovável a torna conveniente para prover potência bruta para redes elétricas existentes e produzir eletricidade para vilas isoladas, residências e ilhas. Em muitos países em desenvolvimento, a maioria dos investimentos públicos são feitos em redes elétricas e infra-estrutura urbana, e subsídios governamentais são dados para o carvão, gás natural e óleo cru. Ao mesmo tempo, a pequena quantidade de energia elétrica inicialmente necessária nas áreas rurais ou isoladas não justifica uma solução de extensão da rede; o baixo poder aquisitivo da população não atrai o investidor privado; e o retorno político não motiva o comprometimento político e o subsídio. Esta população acaba, então, sendo privada do atendimento a uma de suas necessidades básicas, a energia elétrica. Neste contexto, sistemas isolados baseados em tecnologias à base de fontes renováveis podem representar um papel vital.

Grandes progressos técnicos em energia renovável têm sido obtidos durante os últimos dez anos. Sistemas de energia renovável têm sido beneficiados pelo desenvolvimento da eletrônica, da biotecnologia e da tecnologia de materiais. Supõe-se que a gaseificação da biomassa possa produzir eletricidade a custo comparável com o das usinas a carvão. A geração eólica de eletricidade está crescendo rapidamente a

custo baixo, As usinas hidrelétricas de micro, mini e pequeno porte (PCHs) são uma opção economicamente viável e ambientalmente aceitável para muitos países.

O custo de módulos fotovoltaicos decresceu em um fator de 10 nos últimos quinze anos (em um fator de 50 desde o início dos anos de 1970), devido ao progresso tecnológico e à experiência de campo, o que levou à sua viabilização em certos projetos e aplicações. Finalmente, as aplicações solar-térmicas de baixa temperatura podem agora ser implementadas em muitos países em desenvolvimento usando tecnologia local.

A produção de energia renovável pode prover desenvolvimento econômico e oportunidades de emprego especialmente em áreas rurais. As fontes renováveis poderão ajudar a reduzir a miséria nessas regiões e reduzir as pressões sociais e econômicas que conduzem à migração urbana. Por exemplo, o programa do etanol (álcool) no Brasil criou cerca de 700 mil empregos em áreas rurais.

Em resumo, a expansão do uso de renováveis poderá trazer as seguintes vantagens:

- Disseminação de tecnologias novas e limpas com a produção mínima de resíduos;
- Melhoria da qualidade de vida para populações isoladas através da provisão de energia elétrica;
- Desenvolvimento das comunidades rurais pela criação de indústrias e negócios;
- Integração e complementação dos sistemas de energia convencional a custo competitivo; e
- Sustentabilidade do sistema energético.
-

4.13. Considerações sobre o planejamento da geração elétrica

4.13.1 Planejamento Centralizado versus Planejamento Descentralizado

Em sua forma mais simplista, o planejamento da geração em um sistema elétrico de potência pode ser entendido como a determinação do melhor

cronograma para implementação de centrais elétricas visando ao atendimento da carga do sistema. Como indicação da melhor solução, considera-se mais tradicionalmente os aspectos técnicos e econômicos, acrescidos hoje dos sociais, políticos e ambientais.

Além das incertezas associadas às projeções futuras, há um descompasso entre a distribuição temporal e espacial das cargas e as alternativas de geração. Estas Últimas, além de dependerem do tempo necessário para desenvolvimento do projeto, estão vinculadas a locais determinados pela disponibilidade dos recursos naturais e a requisitos econômicos para sua utilização.

Assim, o que o planejamento busca é a integração mais adequada e escalonada de novos projetos de geração ao sistema de potências, de forma a utilizar da melhor forma possível as características intrínsecas da forma de geração utilizada nos projetos. Daí pode-se entender a existência de grandes sistemas interligados, unindo diversas centrais de geração e diversas cargas em um sistema de potenciais direcionado ao atendimento das necessidades de consumo de forma econômica, segura e confiável.

Capítulo 5

Estado da Arte

5. Estado da Arte

5.1. Introdução

Como o trabalho em desenvolvimento apresenta vertentes no campo energético, térmico, de materiais e econômicos, passa-se a descrever estudos e ações implementares nestes campos, principalmente no que diz respeito à realidade mundial atual das energias alternativas, dos materiais e de suas inter-relações. Serão também abordados aspectos das pesquisas com coletores solares alternativos, na UFRN e no mundo, e os processos de degradação inerentes à utilização de tubos de PVC como elementos absorvedores e condutores de calor.

O uso de combustível não-renovável vindo de áreas mais populosas por parte das comunidades carentes é difícil e caro, devido ao fato de a maioria das comunidades estarem em áreas muito isoladas. O nível de radiação solar nestas regiões é muito alto, eis o porquê de o cozimento solar se tornar uma possível solução. O uso de fogões solares implica alcançar os dois objetivos, tanto boa comida, quanto desenvolvimento, diminuindo o impacto no meio ambiente (Souza, 2004).

Pretende-se construir um modelo de fogão solar, que tenha como características principais à facilidade de fabricação e montagem, o baixo custo e a simplicidade no mecanismo de movimentação do mesmo para o seguimento da luz solar direta.

Tal protótipo também apresenta a vantagem de ser modulável, o que facilita de sobremaneira seu transporte. Outra característica do fogão em questão é seu baixo peso.

Neste campo de abordagem teve-se como base princípios óticos, sendo um trabalho anteriormente desenvolvido ao nível local, nacional e internacional. No que diz respeito a experiências locais já foram desenvolvidas, construídas e testadas várias gerações de fogões solares ao longo dos últimos vinte anos, com várias geometrias e utilizando diferentes tipos de materiais. (Saraiva Et Al ., Energias Renovables Y Médio Ambiente, Asades ,1999, 6, 7-16),

O principal foco desse processo consistiu na obtenção de uma curva do parabolóide que mais se aproximasse do parabolóide perfeito. Utilizou-se como ferramenta básica o AUTOCAD, através do qual se desenhcou o perfil do parabolóide a partir das dimensões que

permitissem a obtenção do mesmo com uma superfície de captação e reflexão da radiação solar em torno de 1 m^2 e distância focal em torno de 0,57 m.

Outros pontos que merecem destaque para a obtenção da fabricação do parabolóide perfeito foram o desenho em tamanho real da curva parabólica, ferramenta principal para a reprodução dessa curva em uma peça metálica a ser utilizada para a confecção do molde. Para essa etapa, projetou-se e construiu-se um dispositivo semelhante a um compasso, que permitiu a usinagem do parabolóide no concreto. Isso representou uma etapa importantíssima na fabricação do parabolóide.

Outro fator que diferencia o presente projeto dos demais é a área de cada espelho utilizado para a composição da superfície refletora e a sua geometria. Utilizamos uma área de espelho bem menor que as que encontramos na literatura especializada. Isso trouxe um trabalho adicional, mas produziu um efeito significativo no aumento do desempenho do citado protótipo, permitindo a obtenção de temperaturas mais significativas em relação aos seus similares.

Para permitir a modulação dos elementos do parabolóide, em número de quatro, projetou-se e construiu-se um mecanismo de partes sobrepostas, confeccionado em estrutura metálica, propiciando simplicidade nos processos de montagem e desmontagem das mesmas.

Procurou-se dar simplicidade ao mecanismo de seguimento da radiação direta do Sol, que é feito através de simples regulagem manual. O suporte da panela foi confeccionado para permitir seu movimento longitudinal propiciando um melhor aproveitamento da região focal.

5.2. Fogão solar tipo caixa de baixo custo

Um fogão solar alternativo construído a partir de uma sucata de um fogão convencional a gás, funciona segundo os princípios do efeito estufa e da concentração. Ele é adaptado, sendo retirados os queimadores e outros acessórios que acompanham os fogareiros. Na Figura 5.1 é apresentado um fogão solar tipo caixa, de baixo custo, sendo um protótipo solar de média concentração que trabalha com dois efeitos, o estufa e a concentração; destinado ao uso doméstico em zonas rurais e urbanas, no período de 9:00 às 16:00, voltado principalmente para a fabricação de pães e bolos. O forno do fogão convencional é o recinto de cozimento onde o absorvedor (panela) do fogão solar fica localizado, sendo recoberto por uma lâmina de vidro para a geração do efeito estufa e tendo seu fundo e laterais isolados por

um compósito a base de gesso e isopor. Segmentos de espelhos facetados foram colocados nas laterais do fogão para 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. O fogão é móvel para permitir um melhor direcionamento do mesmo em relação ao movimento de rotação da Terra. Testes preliminares já realizados demonstraram a viabilidade de tal fogão pela obtenção de temperaturas internas superiores a 150 °C, porém serão estudados outros parâmetros que avaliem sua competitividade com outros fogões tipo caixa desenvolvidos em todo o mundo (Souza, 2004)

O uso do fogão solar proposto da **Fig. 5.1**, tem grande importância também na área ambiental, pois preserva a natureza e ameniza o desequilíbrio ecológico que ocorreria pelo uso indiscriminado da lenha, além de minimizar a emissão de gases poluentes para a atmosfera. Como se pode ver, estudos que viabilizem o uso do fogão solar são imprescindíveis para uma política de fixação do homem no campo, podendo dar-lhe uma opção de geração de renda, através do domínio da construção de fogões solares, para sua futura comercialização.



Figura 5.1. Fogão solar tipo caixa de baixo custo do Laboratório de Maquinas Hidráulicas e Energia Solar da UFRN/LMHES.

5.2.1. Materiais e métodos

O fogão solar proposto foi construído a partir de uma sucata de fogão convencional a gás, recebendo alguns elementos para tornar-se um fogão solar tipo caixa. Sua estrutura interna sofreu as seguintes modificações:

- Toda a tubulação de gás foi retirada;
- A chapa superior do forno e seu isolante térmico (lã de vidro) foram retirados para colocação de uma lâmina de vidro plano transparente de 3 mm de espessura;
- As paredes laterais, a parede traseira e o fundo do forno foram revestidos com compósito de gesso, isopor, cimento, areia e água, com a finalidade de se fazer o isolamento térmico dessas superfícies.
- Na parte interna, foi colocado um parabolóide de 180 mm de raio e 50 mm de profundidade adaptável ao espaço disponível neste local, com seu foco voltado para o fundo da panela no interior do forno. No topo do forno colocou-se um tampo em vidro transparente, de 480 x 465 mm, com a finalidade de se produzir o efeito estufa no seu interior.
- Em três lados do fogão acima da tampa de vidro que recobre o forno, foram colocadas placas de espelho plano, em estruturas móveis, nas dimensões de 0,80 x 0,50 m.

5.2.2. Procedimento experimental

- Foram obtidos dados da temperatura da panela absorvedora e do interior do forno para vários dias de ensaio. As temperaturas foram tomadas de 15 em 15 minutos, no período de 9:00 às 15:00 h.
- Colocou-se uma panela com 1 litro de água à temperatura de 36 °C no interior do forno e mediu-se a evolução da temperatura da água no interior da panela, a cada cinco minutos.
- Outro teste realizado foi o cozimento de macarrão e de arroz, nas quantidades de 100 g e 350 g, respectivamente, medindo-se o tempo de cozimento e os níveis de temperatura no interior do forno.

- O teste final consistiu na colocação de um bolo para assar no interior do forno proposto da **fig. 5.2**, medindo-se o tempo de assar do mesmo e os níveis de temperatura no interior do forno.
- Para avaliar as perdas térmicas do fogão (forno) solar construído mediu-se no período de maior incidência de radiação solar global, entre 11:00 e 13:00 horas, as temperaturas externas do fogão.
- Os dados de temperatura foram medidos com termopares de cromel-alumel, acoplados a um termômetro com visor digital. A radiação solar global foi medida com um radiômetro construído no LMHES da UFRN.

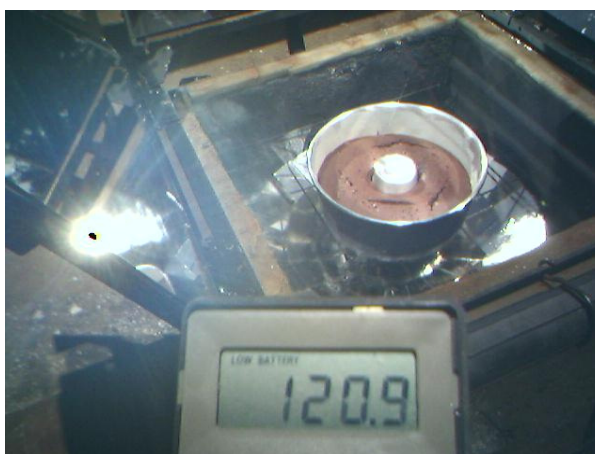


Figura 5.2. Teste para assamento do bolo (LMHES).

5.2.3. Resultados e discussões

- Os resultados do teste realizado mostram, tabela. 5.1, que é possível o cozimento de alimentos a partir da ebulição da água, embora o tempo para a obtenção de tal efeito seja bem superior ao obtido com fogões a concentração do tipo parabólico.
- O fogão foi testado para o cozimento de arroz e macarrão, nas quantidades de 250 g e 100 g, em tempos correspondentes há 2 horas e 1,25 horas, respectivamente.
- Como última experiência assado um bolo com peso líquido de 400 g, num tempo correspondente a 50 minutos. Tal resultado foi competitivo com o fogão a gás convencional. Durante esse teste a temperatura interna do forno ficou por volta de 105 °C e a da forma contendo o bolo da ordem de 120 °C.

Tabela 5.1. Temperaturas entre 9 e 15 h do dia.

Tempo (HORA)	T _{int.forno} (°C)	T _{absorvedor} (°C)	I (W/m ²)
9:00 - 10:00	75	85	700
10:00 - 11:00	100	125	750
11:00 - 12:00	115	150	780
12:00 - 13:00	120	170	780
13:00-14:00	115	150	750
14:00 - 15:00	100	125	700
MÉDIA	104	134	743

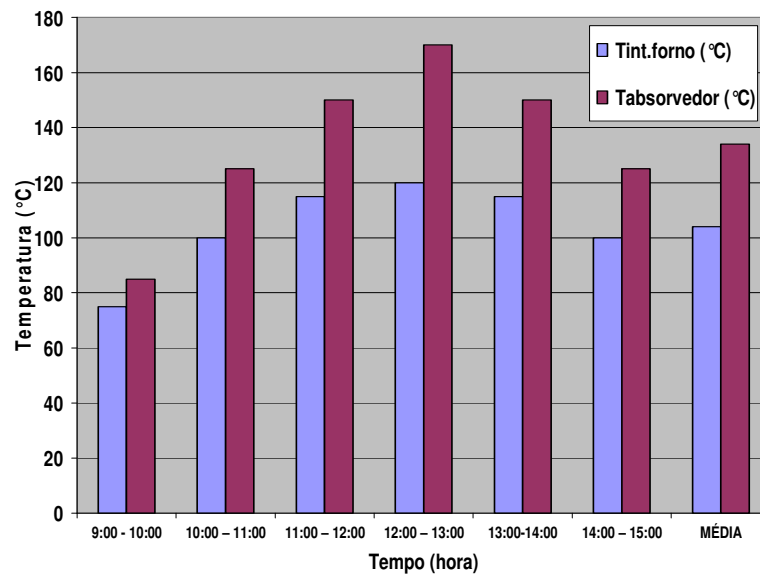
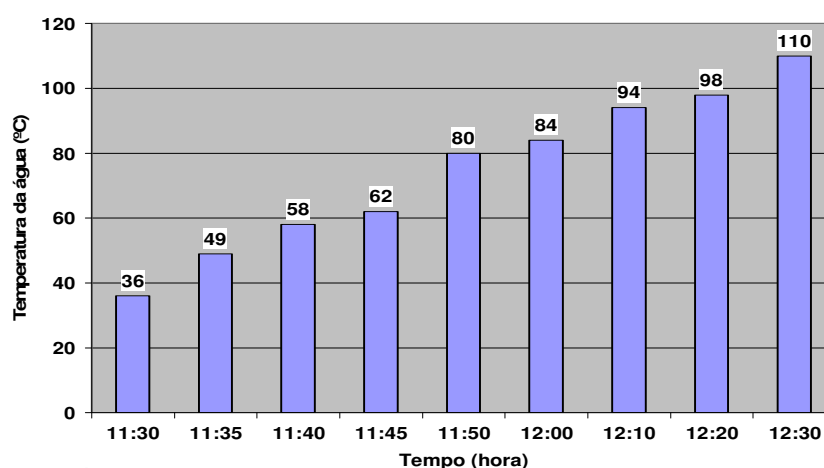
**Figura 5.3.** Comportamento das temperaturas médias do absorvedor e do forno durante o ensaio.

Tabela 5.2. Aquecimento de 1,0 litro de água ($I_m = 750 \text{ W/m}^2$, $T_{\text{amb}} = 35^\circ\text{C}$)

Tempo (HORA)	$T_{\text{int.forno}} (^\circ\text{C})$	$T_{\text{água}} (^\circ\text{C})$
11:30	95	36
11:35	95	49
11:40	95	58
11:45	97	62
11:50	110	80
12:00	120	84
12:10	120	94
12:20	120	98
12:30	120	110

**Figura 5.4.** Comportamento das temperaturas da água durante o ensaio.

□ Teste de perda térmica

- $T_{\text{laterais}} = 38^\circ\text{C}$
- $T_{\text{parte posterior}} = 38^\circ\text{C}$
- $T_{\text{ambiente}} = 35^\circ\text{C}$
- Esses dados mostram a boa eficiência térmica do compósito isolante
- Os resultados do teste realizado mostram, tabela. 5.1, que é possível o cozimento de alimentos a partir da ebulição da água, embora o tempo para a obtenção de tal efeito seja bem superior ao obtido com fogões a concentração do tipo parabólico.
- O fogão foi testado para o cozimento de arroz e macarrão, nas quantidades de 250 g e 100 g, em tempos correspondentes há 2 horas e 1,25 horas, respectivamente.

- Como última experiência assado um bolo com peso líquido de 400 g, num tempo correspondente a 50 minutos. Tal resultado foi competitivo com o fogão a gás convencional. Durante esse teste a temperatura interna do forno ficou por volta de 105 °C e a da forma contendo o bolo da ordem de 120 °C.

5.2.4. Viabilidade de execução

- O fogão solar proposto apresentou-se viável em termos econômicos, pois tem um baixo custo de aquisição ou de construção, operacionalidade, térmicos atingindo temperaturas desejáveis e de materiais, pois podem ser adquiridos para sua construção em sucatas para fins de integração social;
- O fogão em estudo mostrou-se mais eficiente para a operação de assar, ou seja, na função de forno no preparo de comidas;
- O custo do fogão proposto é de R\$ 100,00 (cem reais) o que torna seu uso extremamente viável principalmente para as pessoas de baixa renda;
- A característica mais positivas desse estudo é a sua função social, que pode ser avaliada pela boa relação custo X benefício do fogão proposto;
- Os tempos para cozimento de alimentos foram bem superiores aos obtidos com os fogões de foco pontual, porém não inviabilizam a utilização desse tipo de fogão para esse fim;
- Para uma melhor avaliação dos resultados obtidos torna-se necessário um maior período de funcionamento em dias de variadas condições solarimétricas e o cozimento de variados tipos de alimentos para a determinação dos seus tempos em comparação com os resultados mostrados pela literatura, para vários tipos de fogões construídos em todo o mundo.
- Serão estudados novas configurações para posicionamento dos espelhos com vistas a um melhor aproveitamento da energia solar incidente e sua canalização para absorção pelo interior do forno.
- Os riscos para o usuário de tal tipo de fogão são de baixa magnitude exigindo-se apenas alguns cuidados que podem ser facilmente transmitidos a seus usuários.

5.3. A importância das Energias Renováveis e dos Materiais

5.3.1. O Futuro

Olhando para o futuro, percebe-se-à que o custo da energia tenderá a ser sempre maior e a crise de combustíveis fósseis e de madeira torna-se-à mais e mais aguda. As formas de suprimento de energia estão determinando o curso dos desenvolvimentos social e econômicos futuros. O suprimento de energia será a base para um elevado e sustentável nível de segurança e conforto. A energia também determinará o balanço ecológico.

As tecnologias e fontes energéticas que se usam nos dias atuais influenciarão significativamente o amanhã. Há também uma grande evidencia de que a maioria das tecnologias energéticas em uso não é ecologicamente apropriada e tem o potencial de provocar sérias e irreversíveis mudanças climáticas, bem como a constatação de que a quase totalidade destas fontes energéticas não é renovável e estão se esgotando rapidamente. Em função dessas percepções, o direcionamento às fontes renováveis de energia é inevitável. As fontes de energia eólica, solar e de biomassa são abundantes, amplamente distribuídas e ecologicamente atrativas. Essas fontes não poluem a atmosfera e não contribuem para o aumento da temperatura do planeta.

As características especiais das energias renováveis que as tornam atrativas são: uso e produção descentralizada, envolvendo um grande numero de produtores e consumidores e custo inicial relativamente mais alto comparado a sistemas convencionais, mas de baixo custo de manutenção.

5.3.2. A Importância da Energia Solar

Citar a energia solar como solução para todos os problemas energéticos da humanidade representa desconhecer as limitações técnicas de tal alternativa. Porém o imenso potencial energético de tal fonte não pode ser desprezado por nenhum país do mundo, em tempos de economia de combustíveis convencionais. Representa uma importante alternativa para a composição da matriz energética.

Cada metro quadrado da superfície do Sol emite aproximadamente 62,8 MW de energia eletromagnética, que são lançados no espaço. A origem desta energia está em um

conjunto de reações termonucleares que ocorrem no núcleo do sol causando uma diminuição em sua massa da ordem de 4,25 milhões de toneladas em cada segundo. Embora esse dado seja avaliado como uma perda inimaginável, seriam necessários 147 bilhões de anos (a idade de nosso sistema solar é estimada em 8 bilhões de anos) de atividade solar, neste mesmo ritmo, para que a sua massa sofresse uma diminuição de um por cento (1%) (SOUZA, 1987). Para se ter uma idéia de tal potencial basta que se faça a seguinte análise (SILVA, 1993):

Considere-se que a Terra recebe do sol, em nível do solo, no máximo 1kW/m^2 , embora possa atingir maiores picos em algumas localidades. Excluídas as regiões: Ártica e Antártica, ela recebe em média aproximadamente $3,6\text{ kWh.m}^{-2}\text{dia}^{-1}$.

As massas continentais, exceto as regiões: Ártica e Antártica possuem uma área de aproximadamente $132,5 \times 10^{12}\text{ m}^2$. Portanto, a incidência solar sobre essas massas continentais é $4,77 \times 10^8\text{ GWh/dia}$. Logo, a incidência em um ano é de $1,74 \times 10^{11}\text{ GWh}$.

Considerando-se que o consumo energético anual atual corresponde a $1,5 \times 10^8\text{ GWh}$, conclui-se que a energia solar disponível nas massas continentais representa mais de 1.000 vezes o consumo de energia da humanidade. Isso equivale a dizer que menos de 1 % da energia solar disponível nas massas continentais seria suficiente para suprir de energia à humanidade. Considerando-se toda a área da Terra, a disponibilidade aumenta para $1,02 \times 10^{13}\text{ GWh}$.

Uma vez que a luz solar está disponível em todas as regiões da Terra e pode ser usada de forma descentralizada, a opção solar para a geração de eletricidade dispensa o caro transporte da energia através de redes de distribuição, inerentes ao sistema convencional.

Os equipamentos solares têm um grande potencial em países tropicais, entre os quais se encontra o Brasil, com disponibilidade equivalente a $1,13 \times 10^{10}\text{ GWh}$, por possuírem significativos potenciais solares e receberem energia solar em quase todo o ano, como acontece no nordeste brasileiro (LUIZ, 1985).

A radiação solar é atualmente usada para produzir potência através de duas tecnologias: fotovoltaica e térmica. A tecnologia fotovoltaica tem um grande potencial e parece ser um dos mais atrativos modos de obtenção de energia no futuro. Os sistemas fotovoltaicos são atualmente mais confiáveis e econômicos que muitas outras tecnologias energéticas por serem independentes, descentralizados e pelas alternativas de aplicabilidade, gerando uma gama de produtos para consumo.

Um sistema fotovoltaico pode atuar em rede ou de modo independente. São muito importantes para o desenvolvimento de países do terceiro mundo, pela escassez de

fornecimento de energia elétrica principalmente em áreas rurais, onde a energia elétrica gerada pode ser usada de forma descentralizada.

Os métodos para a geração de potência térmica solar são essencialmente os mesmos das tecnologias convencionais, porém o combustível usado é a energia térmica. Ao invés do combustível fóssil, usa-se a radiação solar. A faixa de temperatura requerida para aplicações domésticas e comerciais pode ser coberta com as tecnologias disponíveis de conversão da energia solar em energia térmica.

Os sistemas térmicos solares para uso principalmente doméstico não necessitam de alta eficiência, porém para uso em aplicações industriais e comerciais já estão sendo desenvolvidos sistemas de alta performance. Tais sistemas permitem a obtenção de temperaturas para pré-aquecer a água de alimentação de caldeiras, aquecer água e ar em processos industriais e produzir vapor para gerar potência.

5.3.3. O Uso da Energia Solar para o Desenvolvimento Ecologicamente Sustentável

Na última década do século passado a fonte motora párea à utilização da energia solar em muitos países esteve relacionada aos contextos ambiental local e global. Isto representa uma premissa parcialmente verdadeira, uma vez que os principais motivos para o desenvolvimento da energia solar foram o alto custo das fontes convencionais, a seguridade nacional de energia e o equilíbrio do comércio.

Se o mundo se move em direção a uma economia da energia verdadeiramente sustentável será essencial integrar essas relativamente novas tecnologias solares com as plantas energéticas não renováveis hoje disponíveis, de forma mais efetiva, levando em conta os fatores tecnológico e socioeconômico envolvidos em tais processos de transição.

Ênfases recentes na degradação ambiental, a poluição atmosférica e o aumento de temperatura da terra causado pelas plantas de potencia convencionais têm ressaltado a natureza benigna das tecnologias energéticas renováveis (CHARTERS, 1996).

5.3.4. Avaliação dos Recursos Solares

A radiação que chega à terra não só está disponível continuamente em grande quantidade, como também está amplamente distribuída sobre a sua superfície. Isto representa uma vantagem imediata considerando-se seu uso de uma forma descentralizada. Porém conduz à conclusão de que se torna necessária a utilização de grandes áreas de coletores para o uso da energia solar em larga escala. Embora a energia seja gratuita, seu custo inicial é elevado.

A quantidade de radiação solar incidente sobre uma superfície depende da localização geográfica, dia do ano, condições do tempo, nebulosidade, umidade e turbidez, orientação e ângulo de inclinação do coletor. Há, naturalmente, os efeitos diurnos e noturnos a serem considerados quando se projeta um sistema solar; e isto introduz, a necessidade de armazenamento elétrico e/ou térmico para as condições de tempo nublado e uso noturno da energia.

Os efeitos atmosféricos da terra espalham a radiação solar de tal forma que, na superfície há duas componentes da radiação: radiação direta vinda da posição do sol no céu e radiação difusa proveniente das nuvens e da abóbada. A proporção relativa destes dois tipos de radiação é importante quando se seleciona o tipo de coletor a ser usado em um sistema solar, assim como os locais para a sua utilização.

No deserto ou regiões áridas, áreas do mundo onde se pode esperar mais de 300 dias de céu limpo, a componente pode representar mais de 85 % da radiação global. Em regiões tropicais e temperadas, esta componente pode ser bastante baixa, possivelmente em torno de 10 a 20 % da radiação global em alguns dias (**CENSOLAR, 2001**).

5.3.5. Desenvolvimento Sustentável

Um fator crítico na política e planejamento energético para este século será o uso da energia solar para desenvolvimento ecologicamente sustentável. Implícito nisto está o fato indiscutível que o contínuo crescimento econômico não é sustentável e que se deve olhar para o extensivo uso de materiais reciclados como forma de melhorar a confiabilidade nas

fontes energéticas renováveis mesmo se estas parecem não ser econômicas em termos atuais, quando comparadas às energias convencionais. A introdução de métodos de planejamento de custo mínimo e uma apresentação mais clara dos mesmos está mostrando a real importância econômica dos benefícios ambientais inerentes ao uso das fontes energéticas renováveis. Isso se torna indispensável, uma vez que, na atualidade, a dependência da humanidade no uso de combustíveis fósseis está acima de 85 % (**TRENDS AND RENEWABLE, 2000 – 2002**).

Em qualquer cenário mundial deve-se considerar o fato de que o nível de desenvolvimento varia significativamente de país para país. Isso indica a necessidade de fornecer-se um adequado suprimento de energia para a maioria das novas populações, quando recentes previsões indicam um crescimento da população de 90 % com o desenvolvimento das nações (**BAKTHAVATSALAM, 1996**).

É razoável esperar, baseado em recentes estudos internacionais, que a taxa de crescimento da energia no desenvolvimento das nações será em torno de 5 a 6 % enquanto que para o mundo essa taxa corresponderá a 1,5 a 2,5 % (**YACOV, 2000**). A dependência excessiva de óleo importado, realidade para grande maioria das nações, pode comprometer o desenvolvimento e a economia dos mesmos.

5.3.6. Os materiais

Os materiais têm um papel muito importante na cultura do homem. Na realidade todos os segmentos do cotidiano são influenciados em maior ou menor intensidade pelos materiais. Historicamente, o progresso das sociedades está intrinsecamente ligado à habilidade de seus membros em produzir e manipular materiais para atender suas necessidades. Um fato que comprova tal ligação é o da designação das civilizações antigas pelo nível de desenvolvimento de seus materiais (isto é, idade da pedra, idade do bronze) (**CALLISTER, 1997**).

Os primeiros humanos tiveram acesso apenas aos materiais encontrados na natureza: pedra, madeira, argila, couro, etc. com o passar do tempo foram descobrindo técnicas para a produção de materiais com propriedades superiores às daquelas da natureza. Mais tarde descobriu-se que as propriedades de um material poderiam ser alteradas através de tratamentos térmicos e pela adição de outras substâncias.

Até este ponto, a utilização dos materiais consistia num processo de pura seleção, onde se escolhia o material mais apropriado a uma aplicação em virtude de suas características. Não faz muito tempo que os cientistas começaram a compreender a relação entre os elementos estruturais do material e suas propriedades. Este conhecimento, adquirido nas ultimas décadas, tem permitido mudar as características dos materiais. Assim, um ilimitado numero de diferentes materiais tem se desenvolvido com determinadas características especiais requeridas pelo mundo moderno e sua complexa sociedade; incluindo metais, plásticos, vidros e fibras (**MANO, 1999**).

5.3.6.1. Os coletores de Média Concentração

Os coletores de média concentração, assim chamados por permitirem a obtenção de temperaturas no foco entre 200e 1000 °C são dispositivos baseados em superfícies formadas por segmentos planos devidamente dispostos de modo a formarem no conjunto, uma determinada curva, geralmente um segmento de parábola.

Os coletores de média concentração permitem obter uma zona fortemente iluminada denominada de foco, na qual estão posicionados os absorvedores.

As superfícies cilíndricas ou cilíndricas parabólicas permitem obter focos lineares e as superfícies esféricas ou semi-esféricas e ainda os parabolóides dão focos pontuais. As superfícies cônicas dão também origem a focos lineares, assim como as superfícies parabólicas formadas por segmentos de espelhos planos tencionados, permitem a obtenção de focos pontuais.

Os coletores de média concentração podem ser classificados em coletores de uma dimensão e coletores de duas dimensões. Os de uma dimensão são de focalização linear e os de duas dimensões são os de focalização pontual.

Na realidade, a focalização quer linear como pontual, são conceituações estritamente teóricas, uma vez que na prática, por mais bem construídos que possam ser, dificilmente serão eliminados todos os desvios óticos e outras imperfeições decorrentes dos processos construtivos, de modo que efetivamente o coletor de focalização linear apresenta uma área focal retangular e o de focalização pontual uma área focal circular ou elipsoidal.

- *As geometrias mais empregadas nesses tipos de coletores são:*

GRUPO I

- a) Cilíndricas;
- b) Cilíndro-parabólico;
- c) Tronco-cônico;
- d) Tronco-cônico sucessivos;
- e) Envolvente de círculo;

GRUPO II

- a) Semi-esférico;
- b) Parabólico.

As geometrias do grupo I são coletores de focalização linear. O grupo II define os coletores de focalização pontual.

Os concentradores podem ser posicionados segundo montagens: as montagens Shuman e Abott. Na montagem Shuman o eixo principal do concentrador está orientado segundo a direção Leste-Oeste. O concentrador é praticamente estacionário exigindo apenas movimento ocasional em função da declinação solar. Os concentradores posicionados segundo esta montagem apresentam baixo rendimento. Na montagem Abott o eixo principal do concentrador está orientado segundo a direção Norte-Sul e o concentrador exige movimento contínuo diurno em função do movimento azimutal. Os concentradores operando segundo esta montagem apresentam um rendimento bem maior que no caso anterior, porém necessitam de um mecanismo de acompanhamento do movimento aparente do Sol.

O princípio dos coletores concentradores é o de concentrar radiação solar mediante procedimentos ópticos, antes de sua transformação em calor. Dessa forma, a radiação solar que incide no concentrador através de uma superfície é refletida, refratada ou absorvida por uma superfície menor, para em seguida ser transformada em energia térmica.

Uma vantagem importante deste tipo de coletor é a redução de perda térmica no receptor, pois por ser de menor superfície haverá uma área menor para a irradiação do calor e portanto o líquido que circula pelo receptor pode aquecer-se a maiores temperaturas com um bom rendimento e a um custo menor. É claro que as reflexões e refrações extras da radiação

solar causam o aumento das perdas óticas e as curvas representativas do rendimento partem de ordenadas na origem menores que a de um coletor plano, porém não têm a queda pronunciada, característica deste outro.

Historicamente a idéia de concentrar a radiação solar para obter mais energia foi anterior ao surgimento dos coletores planos. Assim, por exemplo, os caldeus que se distinguiram pela astronomia, criaram suas lentes fundindo quartzo mediante a concentração dos raios solares. Em 1695 em Florência foi fundido um diamante empregando-se energia solar concentrada e o famoso químico francês Lavoisier, já no século XVIII, fazia suas experiências químicas a altas temperaturas mediante o emprego de lentes concentradoras.

Define-se como coeficiente de concentração a relação:

$$C = \frac{\text{Área de entrada da radiação no coletor}}{\text{Área por onde se concentra a radiação}} \quad (5.1)$$

Os coletores concentradores, de acordo com o valor de C, se dividem em dois tipos:

- **De alta concentração** - ($C > 10$)

São os que mediante dispositivos especiais e precisos de enfoque e seguimento solar, alcancem no receptor uma alta densidade de energia;

- **De média e baixa concentração** - ($2 < C < 10$)

São os que não requerem dispositivos especiais de focalização e acompanhamento permanente da trajetória do Sol, tendo apenas a modificação de sua posição algumas vezes por ano, que será função do valor de C. assim, por exemplo, para:

Tabela 5.3. Modificação de posições por ano e Coeficiente de Concentração.

C = 2 a 3	4 vezes por ano
C = 3 a 6	8 vezes por ano
C = 10	80 vezes por ano.

5.4. Tipos de Coletores Concentradores

Os coletores concentradores podem ser de vários tipos, que são mostrados a seguir:

I. Parabólicos (por reflexão)

O coletor é formado por uma superfície refletora (espelho, alumínio anodizado, etc.) de forma parabólica, que recebe os raios solares e que graças à propriedade da parábola que determina que quando os raios são paralelos ao eixo da mesma se concentram no seu foco. Estes raios refletidos se concentram em um elemento receptor, que contém um fluido a ser aquecido.

II. Parabólicos (por refração)

O coletor é formado por uma lente que recebe os raios solares paralelos e os refrata, concentrando-os em um ponto, onde se encontra o elemento receptor que contém o fluido a aquecer.

III. Parabólico composto (C.P.C.)

O coletor é formado por duas parábolas dispostas de tal maneira que ambos os eixos formam o mesmo ângulo (f) com a vertical. Existe uma vinculação entre a concentração C do coletor e o dito ângulo, e todos os raios que incidem com um certo ângulo em relação a vertical e que se encontram dentro da faixa de variação de f têm a particularidade de chegarem por uma ou duas reflexões ao receptor colocado na parte inferior. Este receptor pode ser plano horizontal, plano vertical, cilíndrico, etc.

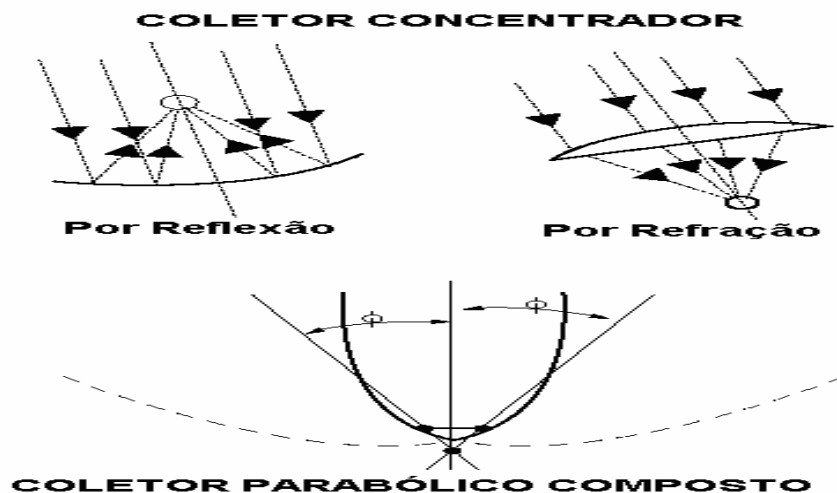


Figura 5.5. Tipos de Coletores Concentradores

A Figura 5.6 mostra um CPC fabricado em Israel, onde se pode ver a superfície refletora interior de alumínio anodizado, que na parte inferior tem a forma de trapézio (podendo também ter a forma de W).

Na parte superior há um vidro que permite a passagem da radiação solar, que na forma direta ou ao longo de uma ou duas reflexões incide em uma grade metálica com revestimento seletivo por onde circula o fluido a aquecer.

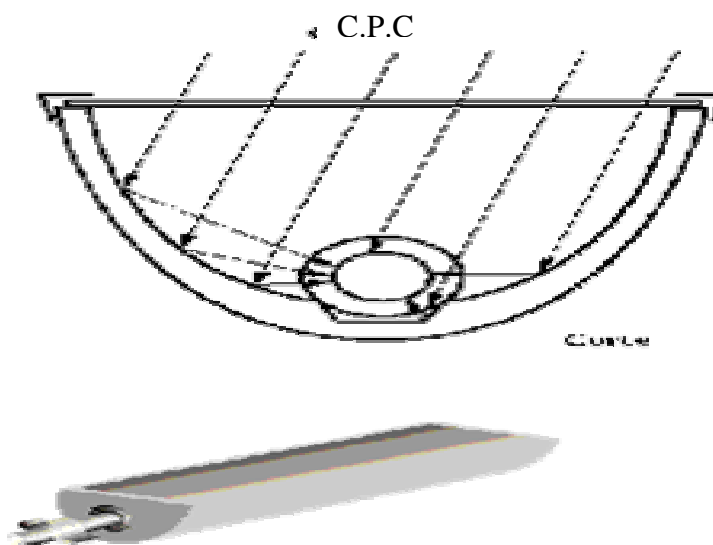


Figura 5.6. CPC

IV. Parabólico com receptor de foco linear

Trata-se de um coletor formado por um segmento de parábola cilíndrico que tem seu foco constituído por um tubo cilíndrico de metal pelo qual circula o líquido a aquecer. Rodeando esse tubo metálico é colocado um tubo de vidro, e entre eles se faz vácuo, para diminuir-se as perdas térmicas por convecção. Este coletor requer um seguimento permanente do Sol, pelo fato dos raios da radiação solar ter que estar permanentemente paralelos ao eixo da parábola.

A Figura 5.7 mostra um coletor concentrador cilindro-parabólico projetado e construído no LMHES (Laboratório de Maquinas Hidráulicas e Energia Solar) da UFRN.



Figura 5.7. Concentrador Cilindro-Parabólico construído no LMHES da UFRN.

V. Segmentos parabólicos com receptor de foco linear

Nas Figuras 5.8 e 5.9 apresentam dois sistemas que recebem a energia solar e a refletem para um receptor central do tipo linear. No primeiro caso se trata de uma série de coletores parabólicos individuais, que concentram os raios solares e os enviam a um receptor comum. No segundo caso trata-se de segmentos de espelhos parabólicos acionados simultaneamente, de modo que em todo instante os raios refletidos incidem em um receptor

formado por uma tubulação metálica com revestimento seletivo e envolvida por um tubo de vidro. Esses sistemas são utilizados para a conversão da energia solar em energia elétrica.

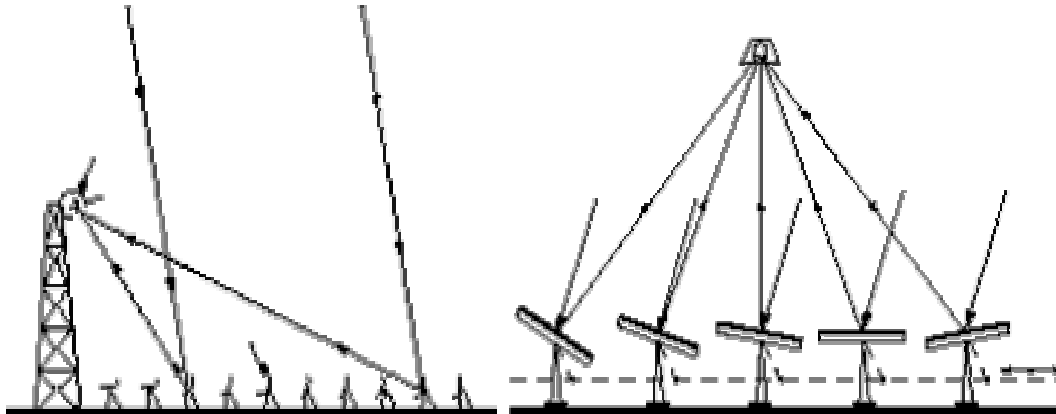


Figura 5.8. Sistema de Receptor Central com Foco Linear.

A seguir vários exemplos de aplicações práticas desses tipos de concentradores em todo o mundo:



A



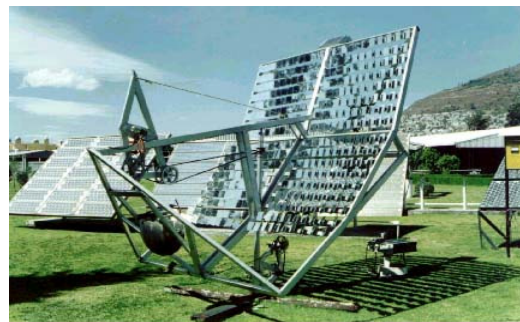
B



C



D



E

Figura 5.9. (Figuras: A, B, C, D, E). Aplicações Práticas de Concentradores pelo Mundo.

VI. Prato parabólico com receptor de foco pontual

Trata-se de um dos poucos tipos de coletores concentradores tridimensionais e, portanto deve ter seguimento solar nas duas direções. O receptor está no foco do prato parabólico e é equivalente a um ponto. A ele às vezes se conecta um motor Stirling.



Figura 5.10. Prato parabólico com receptor de foco pontual.

VII. Sistema com concentração linear em um receptor de foco central através do uso de heliostatos (Sistema Torre).

Heliostato é um ou vários segmentos segmento de espelho plano ou levemente parabólico de grande superfície, variando entre 40 e 50 m², colocados sobre uma estrutura metálica definida que lhe permite um movimento universal, para possibilitar ao mesmo o seguimento solar em ambas as direções N-S e L-O.

Os heliostatos são empregados para formar sistemas, em grandes quantidades, geralmente acima de 30, formando um campo que tem a forma de filas em um anfiteatro e a radiação solar recebida em cada um deles é refletida para uma torre central receptora, aonde a energia solar recebida se transforma em energia térmica para diversos usos. A figura mostra uma instalação de heliostatos e a Figura 5.11, um campo de heliostatos de um Sistema Torre.

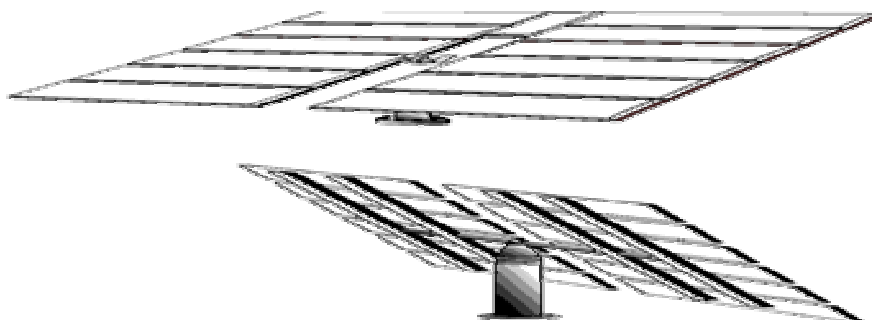


Figura 5.11. heliostatos (Sistema Torre).

Vários projetos de este tipo estão instalados em todo mundo, mostrando as viabilidades desse tipo de sistema. Na Califórnia estão instalados 1.800 heliostatos que permitem obter uma potência elétrica de 10 MW. Esse projeto denominado Solar Two, se localiza no deserto de Mojave em uma área de 30 hectares e se encontra em operação desde 1997. A temperatura do receptor é superior a 500 °C. A seguir são detalhados alguns dados do sistema e mostrada a instalação descrita (Energia Solar – Ricardo Aldabó) .

- Média mensal de produção é de 1.633 MWh;
- O recorde de produção da turbina é de 11,6 MWh;
- A máxima disponibilidade alcançada foi de 94%, em 1998;
- A eficiência do receptor é de 88 %;
- A eficiência do sistema de armazenamento é de 97 %.

5.5. Os Fogões Solares

5.5.1. O fogão parabólico solar:

O fogão parabólico solar é uma construção preliminar por propósitos experimentais. As dimensões do SPC são mostradas na Figura 5.16 as dimensões globais do SPC são 90 X 100 cm. O SPC é construído de aço de dimensões 15 X 15 cm e lamina de cromo-níquel misturados, é parafusado na carcaça. A espessura da lamina de Cr-Ni é 0,5 mm. No centro do refletor uma panela de cozimento de 10cm de largura e 5cm de profundidade é soldado. A panela de cozinhar é feita de prata galvanizada de 0,5 cm de espessura. Todas as superfícies externas da panela de cozimento são pintadas com material preto. Desta forma, Cr-Ni misturados agem como um refletor para concentrar os raios solares no recipiente de cozimento do fogão. Não existiam nuvens logo o refletor agia somente na direção dos raios solares. O refletor poderia ser ajustado, de acordo com Funk(200), pela importância dos dois parafusos nas laterais do fogão. A emissividade do fogão e sua proteção de superfícies são 0,87 e 0,45, respectivamente.

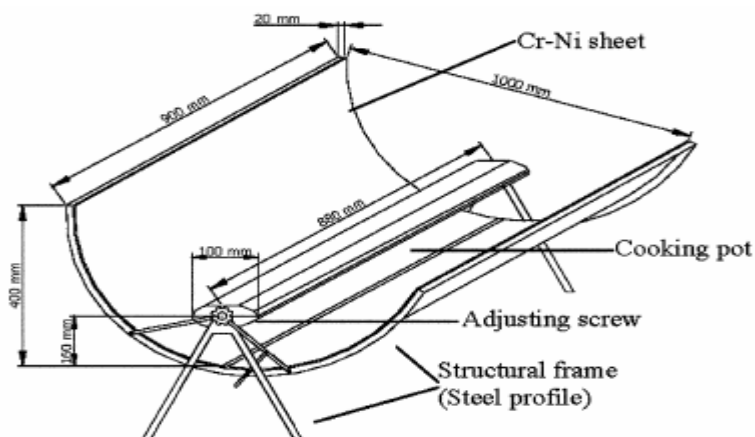


Figura 5.12. As dimensões do FSP são mostradas na figura abaixo (LMHES).

Nomenclatura			
A	área interceptada, m^2		
c	calor específico da água, J/kgK		
I^*	energia de radiação solar instantânea, W/m^2		
m	massa da água, kg		
T	tempo, s		
SC	fogão solar	<i>a</i>	<i>ar ambiente</i>
SPC	fogão solar parabólico	<i>f</i>	<i>final</i>
T	temperatura absoluta, K	<i>i</i>	<i>input, inicial</i>
Símbolos Gregos		<i>s</i>	<i>sol</i>
		<i>sc</i>	<i>fogão solar</i>
		<i>w</i>	<i>água</i>
η	eficiência energética do SPC, %		
ψ	eficiência de consumo do SPC, %		

5.5.2. As medidas (Dimensionamento)

Os testes para o (SPC) foram conduzidos durante 7 dias. Durante esse período de experimentos as seguintes quantidades foram medidas: temperatura do ar ambiente (T_A), temperatura da água no fogão (T_w), total da energia por radiação solar (T) numa superfície horizontal, e velocidade do vento. A temperatura da água foi medida com o uso de um

termômetro de cobre calibrado de baixo custo e rápidos resultados. A localização do termômetro na bacia de cozimento permite determinar a distribuição da temperatura na água.

O termômetro foi imerso na água 10 mm acima do fundo da bacia, no centro. A medida da temperatura da água na bacia foi determinada pelas medidas do termômetro. A temperatura da água na bacia de cozimento foi medida a cada segundo. A cada 10 minutos o gravador media e armazenava o valor da temperatura da água. A radiação solar na superfície horizontal e a temperatura do ar ambiente também foram gravadas durante os testes. A radiação solar foi medida pelo sensor de energia solar. O elemento sensível do sensor é uma peça de silicone azul de grande precisão, com boa estabilidade nas características. O espectro é filtrado para nivelar a resposta pela energia solar, independente da lente ondulada. O rendimento dos sensores de energia solar é 10,8 MV por kW/m^2 de radiação solar. A medição da velocidade do vento é feita através do vetor a 100R com extensão de 0,3 a 7,5 m/s. A exatidão do anemômetro é $1\% \pm 0,1$ m/s. A velocidade do vento estava sempre abaixo de 1 m/s era reconhecida como pequena desta forma o efeito do vento e suas direções, foram desprezados.

Os testes do SPC foram feitos entre 10:00 e 14:00. Os testes foram feitos com temperatura ambiente de 20°C. Os dados do experimento foram gravados com a temperatura da água entre 40° e 90 °C. A energia da radiação solar variou na série de 450 a 1100 W/m^2 . A quantidade de 7 kg de água por metro quadrado de área de interceptação do SPC foi usada dentro da bacia de cozinhar. Desde a área de interceptação; a área de projeção do SPC é 0,9 m^2 , a bacia de cozinhar estava ocupada com 6,3 kg de água. O SPC estava ajustado para resgatar a cada 30 minutos a radiação solar forçada na bacia de cozimento.

As temperaturas da bacia de cozimento e das superfícies refletoras não foram determinadas no experimento. Um detalhe foi usado para pegar e armazenar as leituras dos sensores. Os dados gravados foram armazenados na memória para imprimir ou em discos para usa no computador. A leitura deveria ser colhida em intervalos regulares, diferente para cada canal. O dado foi registrado pelo data-logger em intervalos de 1segundo e medidas variadas de 10 minutos.

5.5.3. Fórmula da energia e eficiência de consumo do fogão solar

Nesse estudo experimental, o SPC foi testado com base no teste resumo das condições por Funk (2000) que presenciou e avaliou o teste padrão dos SCs (fogões solares) proposto na 3ª conferência mundial em fogões solares.

A eficiência da energia de um SC pode ser definida pela razão da produção de energia (somente o aumento da energia da água devido ao aumento da temperatura) pela energia aplicada inicial (a energia da radiação solar). Desta forma a eficiência da energia instantânea do SPC foi calculada da seguinte forma:

$$\eta = \frac{mc (T_{wf} - T_{wi})}{I \cdot A \Delta t} \dots\dots\dots (5.2)$$

A eficiência de consumo de qualquer processo é a razão do consumo médio transferido associado com a produção do consumo médio transferido associado com o consumo inicialmente aplicado. A eficiência do consumo instantâneo do SC pode ser definida como a razão do crescimento consumo da água pelo consumo da radiação solar.

$$\Psi = \frac{mc \left[(T_{wf} - T_{wi}) - T_a \ln \frac{T_{wf}}{T_{wi}} \right]}{I \cdot \left[1 + \frac{1}{3} \left(\frac{T_a}{T_s} \right)^4 - \frac{4}{3} \left(\frac{T_a}{T_s} \right) \right] A \Delta t} \dots\dots\dots (5.3)$$

No presente trabalho, a Petela Expression (2003), foi usada para calcular o consumo da radiação solar como o consumo produzido no SPC. Os dados assumidos são os seguintes: o

intervalo de tempo $\Delta t = 600\text{s}$, o calor específico da água é constante $c = 4,2 \text{ kJ/kgK}$, a temperatura da radiação solar $T_s = 6000 \text{ K}$.

Para o exemplo que usa a formula (2) o valor da eficiência de consumo instantâneo pelo tempo solar de 12:00 foi calculado da seguinte forma:

$$\Psi = \frac{6.3 \times 4200 \left[(335.9 - 334.55) - 302 \ln \left(\frac{335.9}{334.55} \right) \right]}{773 \left[1 + \frac{1}{3} \left(\frac{302}{6000} \right)^4 - \frac{4}{3} \left(\frac{302}{6000} \right) \right] 0.9} \dots\dots\dots (5.4)$$

$$= 9.51 \times 10^{-3}$$

5.5.4. Resultado e discussão:

Os resultados do experimento são mostrados (Figura 5.13 e 5.16) e a energia calculada e eficiências de consumo são mostradas na Tabela 5.5.

A Figura 5.17 mostra a mudança da temperatura da água na bacia de cozimento em função do tempo. Durante o período do experimento a radiação solar cresceu e a temperatura da água na bacia aumentou de 313,1 para 346,5 K. Essa temperatura máxima de 346,5 K foi obtida 4 horas depois do começo do experimento. A temperatura do ar ambiente variou de 297 para 308 K, considerando a radiação solar estendida de 550 a 1020 W/m².

A Figura 5.18 mostra a mudança da diferença de temperatura ΔT entre a água na bacia e o ar ambiente após o tempo determinado. A diferença da temperatura foi somente 23,2 K as 10:10 da manhã e isso alcançou 41,7 K Às 14:00 horas no começo da tarde. Os resultados mostraram que o SPC estava apto a alcançar a temperatura máxima da água na bacia de cozimento 41,7 K mais alta que a temperatura ambiente.

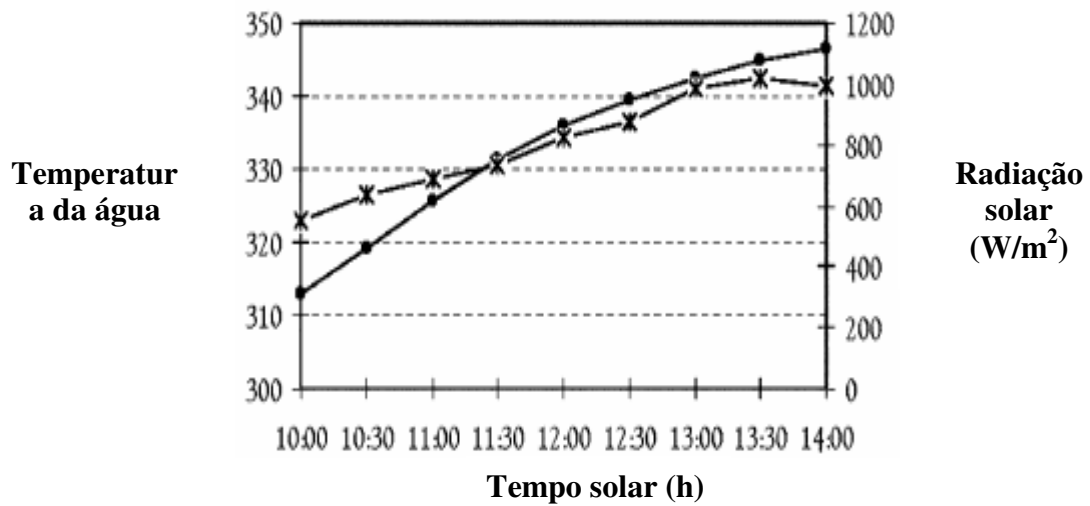


Figura 5.13. Variação da temperatura da água e radiação solar com a hora do dia.

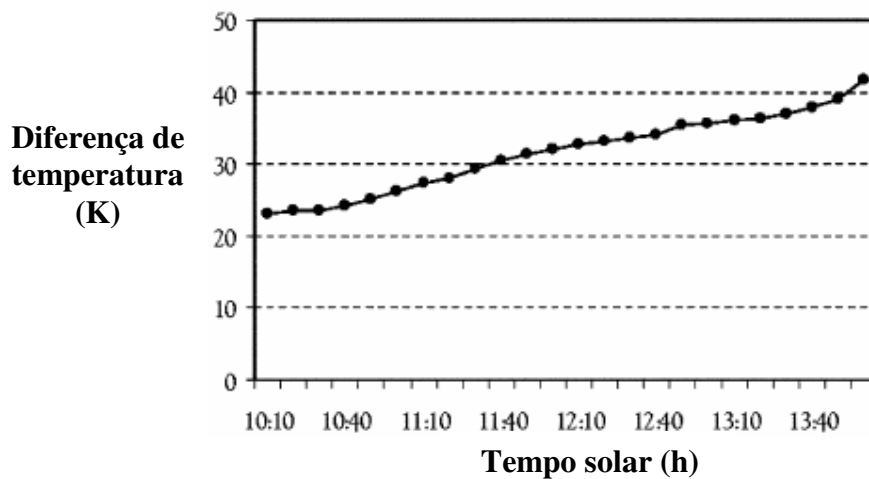


Figura 5.14. Variação da diferença de temperatura ΔT entre a água e o ar ambiente com a hora do dia.

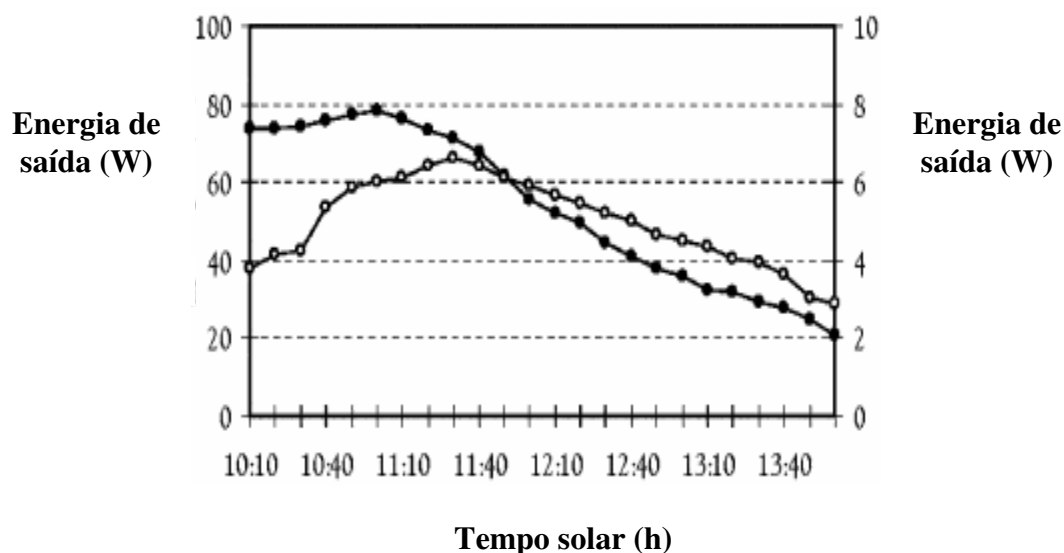


Figura 5.15 variação da energia e do consumo de saída para o fogão solar com a hora do dia.

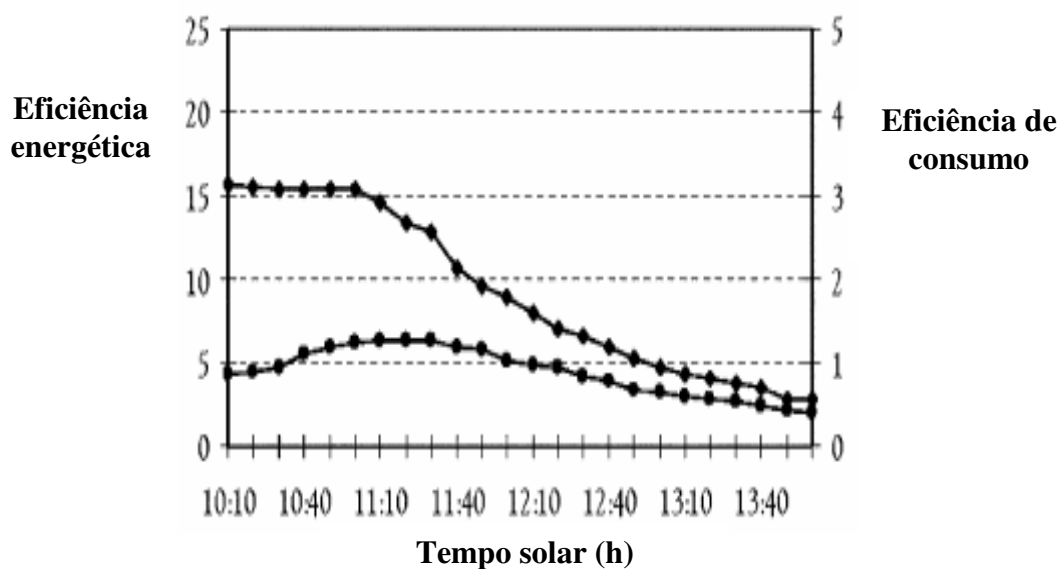


Figura 5.16. Variação da energia η e da eficiência de consumo ψ do fogão solar com a hora do dia.

Tabela 5.4. Sumário de resultados.

	Mínimo	Maximo	Médio
Temperatura da água T_w (K)	313.10	313.1	333
Diferença de Temperatura ΔT (K)	23.20	41.70	31.6
Energia de saída (W)	20.90	78.10	53.57
Consumo de saída (W)	2.90	6.60	4.97
Eficiência energética η (%)	2.80	15.70	9.20
Eficiência de consumo Ψ (%)	0.41	1.25	0.90

A Figura 5.15 mostra a variação da energia e consumo produzido em função do tempo. A energia e consumo produzidos foram calculados de acordo com os respectivos numeradores das expressões de eficiência (5.2), (5.3). A energia produzida variou de 20,9 a 78,1 W. Como indicado na Figura 5.15, a média da energia produzida cresceu rapidamente na 1ª hora, e depois baixou no período de 11:00 às 14:00 horas. A energia produzida caiu de 78,1W (no final da manhã – 11:00 horas) para 20,9 W (no começo da tarde 14:00). Durante o período do experimento a média diária de energia produzida do SPC foi de 53,57 W.

O consumo produzido, mostrado na Figura 5.15, foi significativamente diferente dessa energia produzida (78,1W) medida as 11:00 horas, enquanto o consumo máximo produzido foi 6,6 W, medida às 11:30. Na primeira hora o consumo médio produzido foi mais rápido que a da energia. A energia produzida pelo SPC foi sempre maior do que o consumo produzido.

A variação da eficiência instantânea da energia e do consumo em função do tempo pelo SPC esta representada na Figura 5.20 a eficiência da energia do SPC variou de 2,8 % a 15,7 %. A média diária da eficiência de energia foi 9,2 %. A eficiência de consumo do SPC variou de 0,41 % a 1,25 % e a média diária encontrada foi de 0,9 %. A eficiência da energia e do consumo são afetados principalmente por três fatores: o nível da temperatura da água, a energia da radiação solar e a temperatura ambiente. As combinações desses três fatores geram uma característica máxima de eficiência do consumo, enquanto a eficiência da energia uniformemente diminui durante o período das medidas.

5.6. Fogões solares conjugados de uso múltiplo

Cozimento solar em escolas de internamento e centros comuns em áreas isoladas exigem o aquecimento de grandes quantidades de alimento. É geralmente feito em grandes potes de 30 a 40 litros. Em um relatório anterior (Saraiva Et Al., Energias Renovables e Médio Ambiente, Asades ,1999,6,7-16), O fogão solar apresentado é consistido de duas partes separadas: Um Concentrador em um lado e uma caixa de isolamento contendo o pote do outro lado. Neste relatório nós iniciamos algumas mudanças que melhoram sua capacidade de funcionamento. No momento nós podemos contar com três diferentes tipos de absorvente, que tem sido otimizado para realizar funções diferentes num concentrador de uma área de 2 m². alternativas permitem a possibilidade de satisfazer as necessidades do centro de refeitório comum, cozinhando para até 30 crianças, desde que cada concentrador tenha sido instalado.

As exigências de cozimentos nas áreas secas, na Argentina, por exemplo, é um problema maior; tanto ele for conectado com o melhoramento dos padrões de vida dos seus habitantes por um lado e preservam o meio ambiente por outro.

Estas áreas têm recursos Bioenergéticos muito limitados, e sua exploração gera desertificação, como acontece na Puna com arbusto conhecido como “tola”. Esta escassez influenciou na alimentação na infestação de doenças diferentes. Além disso, enquanto o recurso se torna cada vez mais escasso, as pessoas daquelas áreas devem dedicar mais tempo para transportar a biomassa.

O uso de combustível não-renovável vindo de áreas mais populosas é difícil e caro, devido ao fato da maioria das comunidades estarem em áreas muito isoladas. Os níveis de radiação solares nestas regiões são muito altas, eis por que o cozimento solar se torna uma possível solução. O uso de fogões solares implica alcançar os dois objetivos, tanto boa comida quanto desenvolvimento, diminuindo o impacto do meio ambiente.

Uma das exigências é cozinhar para centro de refeitórios conjugados, tanto escolas quanto centros de saúde onde é necessário se preparar comida para aproximadamente de 30 a 100 pessoas. Na Puna, por exemplo, carnes cozidas são muito habituais, aproximadamente 0,200 kg/dia. Estas carnes são geralmente cozidas em potes de 20 a 40 litros. A tecnologia de fogões solares de larga escala não é bem desenvolvida, e eles significam um desafio interessante, devido a muitas razões.

Há algumas alternativas para o uso de fogões solares de larga escala que são baseadas no uso concentradores solares de grandes áreas (Chaushuri et al., 1997; Scheffier and seitter, 1997). No caso presente esta alternativa tem algumas dificuldades operacionais. Numa mão fortes asas desenvolvem nesta zona e eles fazem o uso de grades de grandes coletores muito complicados. Por outro lado, o acesso a zona é difícil para que sistemas de menor escala fosse mais adequado para o transporte. Saraiva et al. (1999) propôs uma alternativa baseada na separação da coleta solar e as funções de cozimento.

A radiação solar é coletada por concentradores de menor escala (2 m² de área) e o cozimento é executado separadamente em caixas isoladas que contem um pote de 40 litros. De acordo com as necessidades do cozimento, uma ordem de concentradores pode ser usada.

A opção inicial pelo transporte de calor foi através do calor de barras de alumínio até 300°C. este calor foi executado no concentrador. Depois as barras foram colocadas na caixa circulando o pote. Um fogão similar foi desenvolvido por “Bomin” solar foi testado por ECSCR (Grupp et al., 1994).

Depois de testa-los por três anos, mudanças foram iniciadas para melhorar a eficiência energética do sistema e suas possibilidades de atender as exigências dos centros de comunidades.

Este relatório apresenta varias mudanças iniciadas (introduzidas) ao modelo original. Estas mudanças melhoram consideravelmente o nível de eficiência do fogão em termos de qualidade de comida produzida por m² do coletor e elas permitem vários usos que representam flexibilidade para lutar com as demandas do centro de refeitório conjugados. No momento três tipos diferentes de absorventes são disponíveis. Um deles permite a colocação de um container de cozimento de 10 litros no foco concentrador; onde ate 8 kg de comida podem ser aquecido. 6litros de água chegam ao ponto de fervura em 35 min. Um segundo tipo de absorvente permite colocar um fervedor contendo 2 litros de água, que começa a fumar em 8min. E cozinha aproximadamente 8 kg como carne ou sopa- em mas ou menos três horas em um container colocado em uma caixa isolada,em quanto a fumaça esta borbulhando diretamente no liquido. O terceiro tipo de absorvente aquece barras de alumínio ate 300°C. Estas barras são então carregadas para uma caixa isolada, onde tipos diferentes de comidas podem ser assados ,por exemplo pão , bolos ou outros tipos de massas. Este procedimento a produção de 4 kg de comida em 2,5 horas. Dez barra de 0,660 kg são usadas, carregando MJ a cada 40 min, do concentrador para a caixa.

Nomenclatura

α	ângulo da secção de corte	
β	ângulo entre o anel e a horizontal	
d	largura do anel (m)	
e	espaço entre cada anel (m)	<i>Subscrito:</i>
R	raio interno do anel (m)	i <i>identidade de cada anel.</i>
R_i	raio interno do anel medido a partir do eixo (m)	
S	distancia entre a base e o ponto focal do concentrador (m)	
Z_i	altura do anel (m)	

5.6.1. O concentrador

Saraiva et al. (1999) propôs o uso de um tipo de concentrador “Fresnel”, feito de aros de alumínio refletor colocados numa superfície plana. Os aros devem estar em uma certa distancia um do outro, para evitar as sobras entre eles. Este modelo é muito simples, mas ele tem a desvantagem da distancia deixada entre os aros, que implica em uma área não usada aumentando o diâmetro do concentrador. Um cobertor de 2 litros de vidro cobre o absorvente, portanto para reduzir perdas de calor, mas nesse modelo o refletor solar alcança o absorvente formando um ângulo maior se comparado ao normal do absorvente, assim produzindo reflexões mais altas na tampa de vidro.

A opção tem sido deixar de lado a superfície achatada e construí-lo através de rodas radiais com um perfil curvo feito de seguimentos da mesma largura de cada aro refletor, que começa a inclinar no momento em que eles se distanciam do centro do espelho. O ângulo dos segmentos consecutivos podem ser planejados em tal modo que os aros não sobrem um ao outro, posicionando um após o outro com perda de espaço entre eles. Nestas condições é possível, usar o diâmetro mínimo, 1,6m, pelo concentrador, com uma área de 2 m². Só a parte central do espelho é perdida, onde o absorvente isola os raios solares que chegam. Figura 5.17 Mostra uma foto da estrutura do concentrador.

Este modelo abrange a vantagem tradicional que o espelho curvado ilumina o absorvente dos lados, e não de baixo. Desta forma os raios solares alcançam o absorvente

perto do normal, consideravelmente às reflexões na tampa transparente. Assim, a luz desviada do absorvente não é perigosa para os olhos usuário.

Esta alternativa tem um reembolso (retorno). Ela requer uma superfície refletora maior, desde que o normal para os aros externos forme um ângulo maior com um raio incidente. Isto é compensado ao passo em que os custos sejam em volvidos, desde que o espelho tenha um raio menor.

Outras melhorias são:

1. A altura do concentrador, que foi reduzido ou mínimo, tornando mas fácil alcançar o absorvente.



Figura 5.17. Vista lateral da curva contornada do concentrador, onde ele pode ser visto seis anéis consecutivos sustentam diretamente nos braços e os espaços não livres esta entre a esquerda deles.

2. Um corte no aro do lado pelo qual o usuário do sistema chega a ele. Isto permitiu uma maior proximidade do absorvente.
3. O ajuste e tamanho da balança que é colocada atrás do concentrador, para medir o peso do absorvente. Objetivando com isto, os machados de movimento do espelho foram trocados para que a balança possa ser colocada na vareja que sai do centro do espelho, sem obstruir seu movimento.

5.6.2. O modelo do concentrador

As equações seguintes são usadas para planejar o concentrador. Figura 5.18 mostra uma porção do concentrador cortada por um plano vertical contendo o principal eixo. Z define uma coordenada ao longo do eixo e R uma coordenada normal para o eixo.

Um dos cones do refletor identificou com o subíndice i é também mostrado, $i = 1$ Sendo o cone menor. O ponto A_i com coordenadas (Z_i, R_i) determina a posição do cone. Ângulo β_i no plano normal para o eixo principal e a largura d define a geometria do cone. Uma pequena distancia e separa um cone do outro (do próximo), medido na mesma direção que d .

O cone é cortado de uma folha de alumínio mostrada na Figura 5.22, colocada em uma mesa e vista de cima. Para obter o cone um aro angular com $R_{e,i}$ interno e um $(R_{e,i} + d)$ externo raio é cortado. Uma porção definida por um ângulo α é cortado do aro.

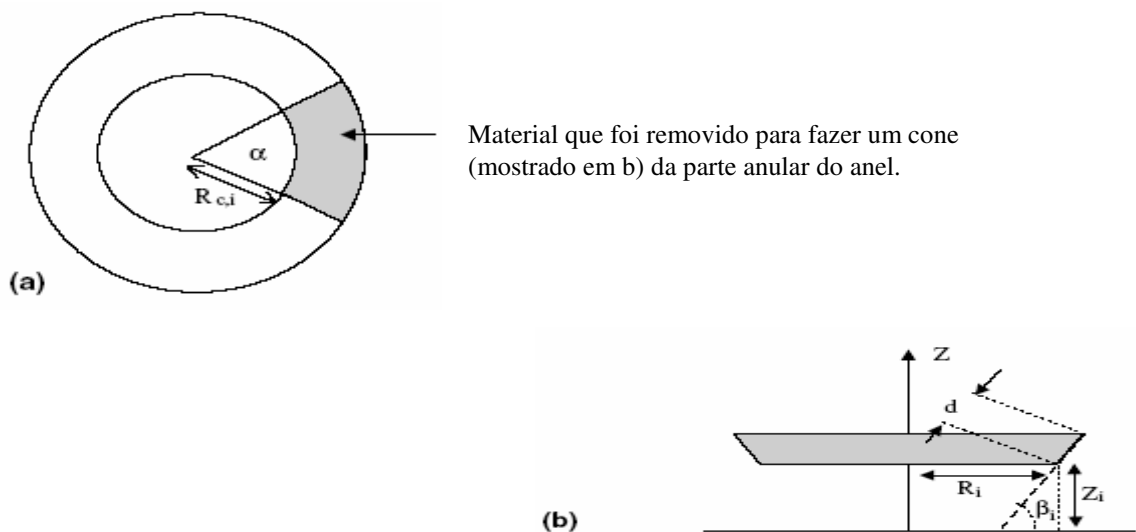


Figura 5.18.(a, b) – Mostra o esquema do concentrador.

O cone toma sua forma quando ambas as extremidades do aro mantido são unidas. Portanto, o raio satisfaz a equação seguinte:

$$R_i = R_{ef} \left(1 - \frac{\alpha}{2\pi} \right) \quad (5.5)$$

O círculo do lado de fora satisfaz

$$R_i + d \cos \beta = (R_{e,i} + d) \left(1 - \frac{\alpha}{2\pi} \right) \quad (5.6)$$

Destas equações nós obtemos a relação entre β e x

$$\cos \beta = \left(1 - \frac{\alpha}{2\pi}\right) \quad (5.7)$$

Portanto

$$R_i = R_{ci} \cos \beta \quad (5.8)$$

A luz refletida pelo cone forma um foco linear no eixo definida Z coordena Z_{Fmin} e Z_{Fmax} .

Pode ser mostrado que as relações entre estas coordenadas e os parâmetros do cone são:

$$Z_{f,max,i} - Z_{f,min,i} = \frac{d}{\sin \beta_i}, \quad (5.9)$$

$$\tan(2\beta) = \frac{R_i}{Z_{f,min,i} - Z_i}, \quad (5.10)$$

Dado os parâmetros cone i , para os próximos são obtidos através das equações:

$$Z_{i+1} = Z_i + (d + e) \sin \beta_i, \quad (5.11)$$

$$R_{i+1} = R_{i+1} + (d + e) \cos \beta_i. \quad (5.12)$$

Tabela 5.5. Um exemplo dos resultados para o modelo do concentrador

$S_{\min}$ (cm)	D (cm)	Z_i (cm)	R_i (cm)	β (°)	R (cm)	$S_{\max}$ (cm)	Área (cm)
43.00	10.00	0.00	21.00	13.02	21.55	65.20	1591.66
45.00	10.00	2.36	31.23	18.12	32.86	61.08	3755.29
45.00	10.00	5.63	41.21	23.17	44.82	57.72	6424.89
46.00	10.00	9.76	50.86	27.28	57.22	56.91	9544.99
46.00	12.50	14.57	60.20	31.23	70.39	58.06	140088.30
46.00	12.50	21.30	71.32	35.47	87.54	56.78	18970.99
46.00	12.50	8.84	81.91	39.10	105.52	55.91	24345.28

Estas equações permitem desenvolver um programa numa folha estendida para modelar um concentrador, fixando alguns parâmetros passos do cálculo são:

- Coordenadas Z_1 e R_1 do 1º cone, a distancia d e a distancia $Z_{F,\min,1}$ são os parâmetros iniciais seleccionados
- β_1 é obtido da Eq. (5.6) e então $R_{e,1}$ é calculado com (5.1). $Z_{\max}$ é obtido de (5.8).
- As coordenadas do próximo cone são obtidas da (5.10) e (5.11) e todos os cálculos são repetidos para avançar para o próximo cone.

Estes cálculos podem ser programados numa folha estendida.

Z , R , e $Z_{F,\min,1}$ são os parâmetros seleccionados e eles definem a forma do concentrador. Eles podem ser ajustados para obter o comportamento desejado do concentrador. Nós não temos o ponto de foco, mas um seguimento onde $Z_{F,\min}$ define sua posição no eixo. Essencialmente $Z_{F,\min,i}$ pode ser seleccionado diferentemente para cada cone e os segmentos e os segmentos concentrados diferentes podem ser trocados para obter o melhor foco. A largura d define o tamanho do foco segmento e ele deve ser seleccionado de acordo com o absorvente a ser usado. Tabela 5.5 mostra os resultados obtidos para o modelo (design) do concentrador.

5.6.3. Transporte do vapor quente

O calor coletado do concentrador deve ser levado para a caixa quente, onde o cozimento é feito. Os testes têm mostrado que ele é conveniente para contar em várias alternativas. Um deles é a produção do vapor em pressão atmosférica no concentrador, que transportado através de um cano flexível para o pote de cozimento, onde é feito para borbulhar diretamente no líquido sendo aquecido. Esta alternativa é praticável no caso em que a comida tem que ser fervida, numa temperatura de aproximadamente 100 °C. Em Salta, é 97 °C e em Puna, a 4000m de altura, é 85 °C.

Figura 5.19 mostra o fervedor inoxidável pintado de preto que é usado para este objetivo. Ele tem um diâmetro de 10 cm e é colocado no foco do concentrador tipo Fresnel, que é um segmento de 14 cm de neste caso.



Figura 5.19. Esta mostra o absorvente do tipo fervedor, na qual são postos 2 litros de água, que alcança o ponto de fervura produzindo vapor que sai através de um dos canos e é transportado através de uma encanação flexível.

Uma tampa de vidro de 2 litros cobre o fervedor, para reduzir as perdas de calor. O fervedor tem uma conexão de fio para a saída do vapor e a água é posta para dentro através de um fio plugue.

Os testes feitos mostram que o nível eficiente no processo de produção de vapor é aproximadamente 50 %. Com uma irradiação solar de 1000 W/m², 1,5 kg do vapor é produzido e 10 min são precisos para aquecer o fervedor até a água ferver.

Este é o, mas simples e o mais eficiente procedimento para transportar o calor, quando não mais do que 100 °C são precisos para o cozimento. Há pouca perda de calor na

transferência, quando um cano isolado é usado, e é muito simples começar. Borbulhar do vapor na água é lento, devido ao fato que a água deve superar a pressão do nível da água no cano, que é abaixo da água no pote. A eficiência global medida pela energia solar incidente alcança 46 %.

5.6.4. Transferidor de calor com barras de alumínio

Um meio alternativo de transportar o calor é aquecendo algo sólido, que é depois colocado numa caixa quente perto do pote de cozimento. Bandejos também podem ser usadas, produzindo um intercambio de energia através de convecção e radiação com o alimento a ser cozido. Isto pode ser usado para assar pão.

Num relatório anterior (saraiva et. Al.; 1999), as vantagens de usar alumínio ao invés de outro material com ferro ou pedra estão em discussão. O custo do alumínio pode ser abaixado usando-se materiais reciclados como latas descartáveis, que podem ser facilmente derretidas em um caldeirão ferro, numa fornalha em uma temperatura de 700 °C.

Um cilindro de alumínio de 6,6 kg pode ser colocado no absorvente, combinado com uma tampa de vidro para evitar perdas de calor. Para fazer seu transporte mais fácil, ele foi dividido em 10 barras triangulares colocadas em um caminho radial, para que sua borda, aproximadamente 3 cm de largura, absorva a radiação. Seu comprimento até o centro é de 4,5 cm. Quando a barra é colocada na caixa, a parte mais larga fica de frente ao produto, assim aumentando a radiação e a área de convecção. O peso de cada barra (0,660 kg) torna mais fácil de ser manuseada. 5 barras são colocadas num momento num bagageiro aberto e depois transportadas. O bagageiro é colocado diretamente na caixa quente. Figura 5.23 mostra o absorvente feito das 10 barras dentro da tampa de vidro.

Para acelerar a transferência de calor, temperaturas entre 150 e 300 °C são precisos, e neste caso o mecanismo dominante é a radiação. A barra sofre um ciclo de resfriamento entre 300 e 150 °C na caixa e um outro ciclo de aquecimento entre as mesmas temperaturas no coletor solar. Este ciclo leva aproximadamente 40 min.

Figura 5.20 mostra o aumento de temperatura de uma barra no absorvente. As temperaturas foram levadas às duas extremidades e no centro da barra. A barra tem 32 cm de comprimento, 17 cm são expostos aos raios solares e 15 cm são isolados. A área exposta

absorve a energia solar, que é transmitida para a área isolada produzindo um declive muito grande de temperatura: aproximadamente 100 °C. O processo de simulação mostra que as medidas são compatíveis com uma condutividade do alumínio de aproximadamente 140 W/mK. Isto que o alumínio é contaminado com impurezas, bem típicas do processo de manufaturamento utilizado.



Figura 5.20. Fervedor concentrado construído com dez barras de alumínio pintado de preto, de secção triangular, ocupando cilíndricamente o espaço. A cobertura superior isolada não está mostrada na figura.

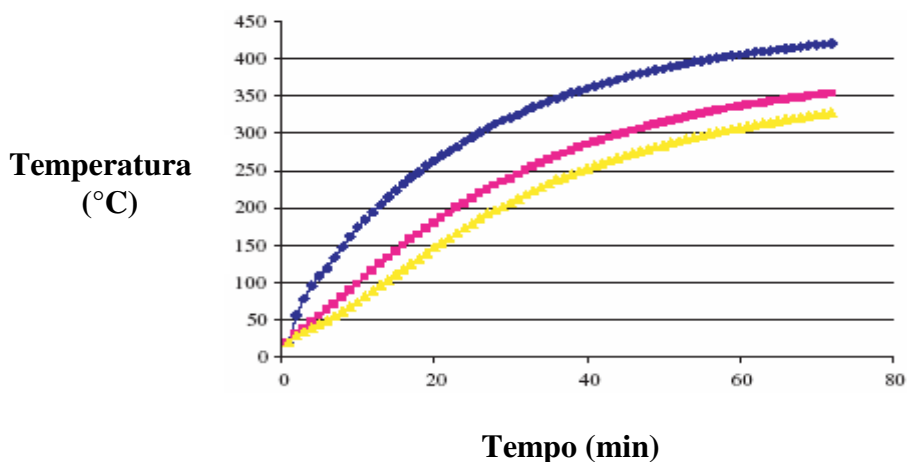


Figura 5.21. O gráfico mostra o aumento da temperatura em três diferentes pontos de uma das barras que compõe concentrador cilíndrico. A temperatura mais alta está na extremidade escura, enquanto as temperaturas mais baixas estão na extremidade oposta.

A simulação foi feita com o SIMUSOL (Saraiva et. Al, 2001) programa, usando uma rede térmica de seis pontos e o numero de atividades do transferidor de calor, através da condução, convecção, e radiação.

A simulação mostra que a produção da coleção global é neste caso, aproximadamente 21 %, que é muito mais baixo do que quando o vapor é usado, desde que a temperaturas coletadas são, mais altas, e há mais perda de calor através do vidro. Eis a razão por que este método de aquecimento é apenas apropriado quando o método de cozimento requerer, por exemplo, para assar.

5.6.5. Cozimento direto em potes

A terceira alternativa consistida em colocar diretamente o pote no foco concentrador. Dado o fato que o concentrador revolve (gira) ao redor de um eixo inclinado, um sistema do tipo “CARDAN” foi usado para agarra o pote como mostra a Figura 5.22 mantendo o pote em uma posição correta, ele é colocado de tal forma que a linha focal cai no pote, até quando ele gira, permitindo o concentrador que o ilumine o tempo todo. O foco é menor do que o pote (14 cm X 25 cm), portanto a correção da posição do concentrador é menos critica do que nos outros casos, aproximadamente uma vez a cada 30 min.

Figura 5.26. Mostra a variação na temperatura obtida dentro de uma altura de 25 cm e 25 cm no pote do diâmetro, contendo 6 kg de água, e eles são comparados com os resultados de um modelo teórico.



Figura 5.22. Esta figura mostra um conjunto de fogão ocupado por um pote com 10 litros como absorvedor no concentrador.

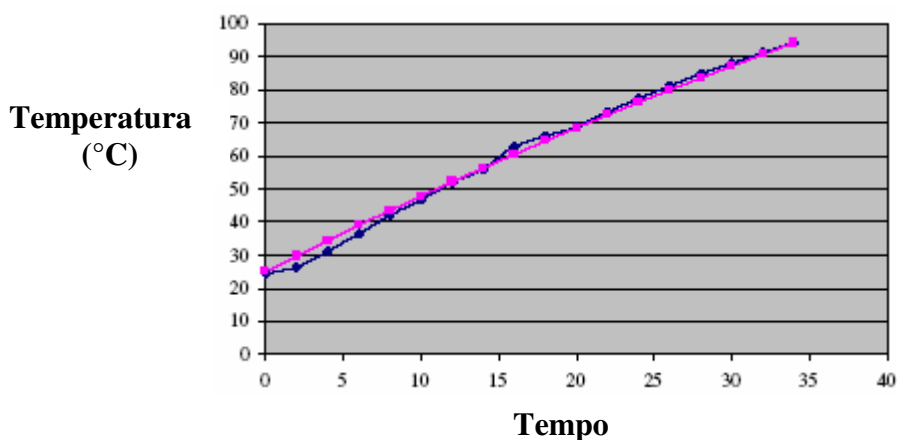


Figura 5.23. Este gráfico mostra a variação na temperatura do pote enquanto ele recebe radiação. A curva com pontos rômnicos representa os valores experimentais e a curva com as linhas tracejadas mostra os valores do modelo teórico.

O concentrador recebeu uma irradiação de 1015 W/m^2 numa superfície normal para seu eixo. Um método de trabalho muito simples foi escolhido para o sistema: o pote recebe uma radiação total $I = \text{constante}$, dada em watts, e as perdas do pote através de sua inteira superfície, com um coeficiente de perda de calor u , medido em $\text{W/m}^2\text{k}$. Isto implica que o concentrador envia do absorvente 50 % da radiação incidente. A eficiência global do sistema, definido com calor que aqueceu a água, dividido pela radiação total recebida pelo espelho, é 36 %.

O pote escolhido tem uma capacidade de 10 litros, mas só entre 6 e 8 litros são usados geralmente. Isto permite colocar e remover o pote facilmente. Embora este não seja o tamanho pretendido a ser usado (deveria ser mais ou menos 20 litros), há muitas oportunidades nas quais quantidades menores de comida devem ser preparadas e depois esta alternativa é mais apropriada. Em outros casos, o cozimento pode começar neste pote e depois ele é passado para o pote maior para ser concluído.

Esta alternativa também é utilizada para grandes famílias (mais ou menos 12 pessoas). O que é destacado sobre este fogão é o fato dele ser muito rápido. Desde que ele conte com 1 kW de força no foco, que significa que ele pode ser usado até quando uma resposta é precisa.

Quando o pote vazio é colocado no concentrador, suas paredes alcançam altas temperaturas, mais do que 200 °C, que torna possível a fritura. Esta combinação é também usada para dourar pedaços de carne a ser usados mais também usados para um grande numero de pessoas.

5.6.6. Considerações de cozimento prático

As alternativas acima mencionadas permitem grande flexibilidade para o ótimo caso do fogão de acordo com o tipo de comida a ser preparada. Isto será ilustrado com um típico exemplo da área de Puna.

Um deles é a preparação de carnes cozidas, prato muito popular nesta região. Ela é geralmente feita com batatas, arroz, carne, vegetais com pimentas. E cenoura e condimentos. O cozimento é feito na água, adicionando os ingredientes de acordo com o tempo necessário para o cozimento de cada um. Aproximadamente 18 kg de comida podem ser cozidos usando apenas um concentrador. Esta refeição geralmente é servida ao meio dia, por volta das 12:30, e a preparação é começada por voltas das 8:30 ou 9:00 am, portanto ela leva aproximadamente 3 horas e meia para ficar pronta.

Durante a ultima hora e meia, o calor exigido é muito mais baixo do que no começo, quando a caixa é isolada e o processo de cozimento não requer calor extra. A única energia necessária é a perda de calor ao redor das paredes do pote. Que é isolada. Isto implica que o concentrador está produzindo um excesso de calor como vapor. Parte do vapor pode ser desviada e usada em outro pote; por exemplo, para aquecer uma sopa previamente preparada em um fogão domestico ou que tenha sido mantida do dia anterior.

Como mostrado acima, a combinação de elementos diferente permite um processo eficiente de cozimento. Aproximadamente 18 kg de carne ensopada pode ser cozida em cada concentrador em aproximadamente 3 ou 4 horas.

Este sistema pode também ser usado à noite para preparar uma outra refeição, que pode ser mantida quente para a ceia ou para o almoço pelo meio dia seguinte. Além disso, aproximadamente 10 kg de pão pode ser produzido com dois concentradores é um forno adequado; este processo de produção pode ser repetido quatro vezes ao dia.

5.7. Estudo de caracterização, aplicação e viabilidade econômica de projetos solares.

- **Os sistemas cilíndricos parabólicos (CCP):**

Usam espelhos refletores em forma de canal para concentrar a luz solar em um tubo no qual um fluido de transferência térmica se aquece a uns 400 °C e é utilizado depois para produzir vapor superaquecido. Representam a tecnologia de energia solar térmica mais madura com 354 MW e de centrais já conectadas a rede no sul da Califórnia desde os anos 80 e mais de dois quilômetros quadrados de coletores cilíndrico parabólicos. Estas centrais fornecem 800 milhões de kWh anuais – suficiente para mais de 200.000 lugares – a um custo de geração de uns 10 a 13 centavos de \$ /kWh.

Agora se está conseguindo mais avanços na tecnologia, com os projetos de grande escala previstos na Grécia, Espanha, Egito, México, Índia, Marrocos, Iran, Israel, Itália, Estados Unidos e Argélia. A eletricidade gerada por este tipo de centrais que se combina com uma central a gás de ciclo combinado (ISCC Integrated Solar Combined Cycle) – se espera que custe hoje 6 centavos de €/kWh e 5 centavos de € a médio prazo.

- **Os sistemas de receptor central (central de torre):**

Usam uma disposição circular de grandes espelhos de trajetória individual (heliostatos) para concentrar a luz solar em um receptor central montado no alto da torre, com o calor para a geração de eletricidade transferido através de uma variedade de meios. Trás uma escala intermediária de até 30 MW de capacidade, os promotores confiam que se podem construir centrais de torre conectadas a rede de até 200 MW e de unidades somente solares. O uso de armazenamento térmico aumentará sua flexibilidade.

A quem considera que as centrais de torre estão mais longe de comercialização que os CCP, as torres solares têm boas perspectivas em longo prazo por sua alta eficiência de conversão. Existem projetos em varias fases de desenvolvimentos (da evolução a posta em

funcionamento) na Espanha, Sul da África e os EEUU. No futuro, os projetos de centrais de torre se beneficiaram de reduções de custos similares aos que se esperam nas centrais de coletores cilíndrico parabólicos. A previsão é baixar os custos totais da eletricidade a 5 centavos/kWh no médio prazo.

- **Os sistemas de discos parabólicos:**

São unidades menores em comparação com as que usam um refletor em forma de disco para concentrar a radiação solar e gás, o ar é aquecido para gerar eletricidade no ponto focal do refletor. Seu potencial reside sobre tudo no **suministro** elétrico descentralizado e remoto, nos sistemas elétricos independentes. O custo da eletricidade tem como objetivo alcançar a médio prazo uma cifra inferior a 15 centavos/kWh. O desenvolvimento atual tem aberto grandes oportunidades para se gerar eletricidade em larga escala a partir de centrais termo solares. Uma é o tipo ISCC, operação Híbrida de coleção solar, conjugada com uma planta de ciclo combinado alimentada por gás devendo introduzir critérios para avaliar a qualidade do hibridismo.

A outra é a operação solar única, com uma turbina a vapor convencional e cada vez mais com o uso de um meio como sal fundido para o armazenamento. Isto permite armazenar a energia durante o dia para usá-la quando a demanda requeira. Um benefício principal da energia solar térmica é o pouco impacto ambiental.

- **Grandes Projetos termo solares atuais**

- Egito: Planta ISCC de 127 MW com 29 MW de capacidade solar.
- Grécia: 50 MW de capacidade solar com ciclo de vapor.
- Israel: 100 MW em operação solar híbrida.
- Itália 40 MW de capacidade solar com ciclo de vapor.
- Marrocos: Planta ISCC de 230 MW com 35 MW de capacidade solar
- EEUU: 50 MW de sistemas de geração elétrica.
- EEUU: 1 MW de coletores parabólicos usando um motor ORC.
- Índia: Planta ISCC de 140 MW com 35 MW capacidade solar.

- México: Planta ISCC de 300 MW com 29 MW de central no plantea problemas.
- España: 2 x 50 MW de capacidad solar con ciclo de vapor y almacenamiento.
- Australia: 35 MW en un grupo CLFR** para precalentar vapor en una central de carbón de 2000 MW.
- Argelia: Planta ISCC* de 140 MW con 35 MW de capacidad solar.

- **Custo atual da geração de energia**

O custo atual de implantação da energia termo-solar varia de 20 a 25 centavos **USD/kWh**, competindo em desvantagem com a geração de média potência com custos atuais de 4 a 5 centavos **USD/kWh**. Só é possível que se alcance desenvolvimento sustentável se nos próximos 10 a 15 anos se consiga um custo semelhante ao da geração de média potência.

- **Fatores de Competitividades**

A competitividade está condicionada pelo custo da tecnologia em si mesma, que por sua vez, depende de:

- a) O risco potencial de extinção e de aumento de preços dos combustíveis fósseis.
- b) A internacionalização dos custos associados, como é o caso do mercado de emissores de CO₂.

Assim, se prever que a competitividade se alcançará a médio e longo prazo e que seus custos deverão atingir a cifra de 7 a 9 centavos **USD/kWh** para potências de média geração. A Espanha tem como objetivo se chegar a uma potência instalada de 200 MW em 2010, com um custo de 26,25 centavos **USD/kWh**. Isto está beneficiando os projetos solares na Espanha e o desenvolvimento de tecnologia própria.

5.8. Fogão Solar Tipo Caixa

Esse tipo de cozinha pode ter distintos número de refletores externos (0 a 4), planos ou levemente côncavos. Caracterizam-se por permitirem a obtenção de temperaturas de no

máximo 150 °C demoram a aquecer e sua operacionalização, geralmente, não é fácil. Por outro lado tem a vantagem de poder funcionar praticamente sem a intervenção do usuário, mantendo o alimento aquecido durante um tempo prolongado, não produzem efeitos danosos ao usuário nem por contemplação nem por reflexão, são estáveis e não apresentam riscos pela produção de chamas, não gerando, portanto, susceptibilidade a queimaduras. São construídos com materiais de baixo custo, ainda que seja improvável seu uso para todos os dias do ano. Pode-se construir modelos de fácil transporte, leves e dobráveis. É possível estar acoplado a um sistema auxiliara que utiliza gás como combustível.

Pode-se retirar a comida e completar o seu cozimento por via tradicional no caso do céu estar nublado. Algumas experiências têm demonstrado que muitos processos de cocção podem realizar-se a 75 °C, durante mais de duas horas.

Esse tipo de fogão encontra ampla aplicação em todo o mundo, principalmente na Ásia e África, destacando-se a Índia e a China, como países que têm investido maciçamente em programas sociais que viabilizam a construção de fogões solares a baixo custo, para uma utilização significativa por parte de seu povo. A seguir mostraremos alguns tipos de fogões do tipo caixa em utilização em todo mundo.

No Instituto de Energias Não Convencionais, em 1998, na Espanha, construiu-se uma cozinha de dupla caixa, usando-se como material para cobertura transparente duas lâminas de policarbonato, que se encontra mostrada na figura abaixo, além de dois outros fogões. Esses fogões foram construídos baseados em um modelo desenvolvido pelo Brace Research Institute (BRI, 1996) do Canadá.



Figura 5.24. Vista em perspectiva da cozinha solar tipo caixa.

Um outro tipo de fogão tipo caixa bastante utilizada é o fogão solar painel de Bernard, mostrado na figura abaixo, desenvolvido na Associação Lyonnaise para Estudo do Desenvolvimento da Energia Solar. A.L.E.D.E.S na Universidade de Lyon, na França.



Figura 5.25. Fogão solar painel de Bernard.

5.9. Projeto e Analise do Fogão Solar Tipo Caixa

O projeto do fogão solar tipo caixa se assemelha bastante nos seus parâmetros F_1 e F_2 com o projeto do fogão solar Sudanês, este estudo, objetiva desenvolver uma comparação com o fogão solar tipo caixa que está sendo usado no Sudão.

O fogão foi projetado e fabricado na oficina do centro de estudos energéticos, instituto indiano de tecnologia (IIT) Delhi. Uma série de testes foram realizados durante nove dias para determinar dois fatores de medidas F_1 e F_2 em ordem para fazer comparação desse fogão com outros modelos indianos. Os resultados obtidos verifica-se a aceitação do fogão e encontra-se sucesso.

5.9.1. Introdução

A duração do Sol é de 10 a 12 horas por dia com um alto nível de radiação solar média de 20 a 25 MJ/m².dia. Anualmente a media foi calculada em 79 GJ. m⁻², na superfície horizontal. A disponibilidade de energia solar faz do Sudão um país promissor para a aplicação de energia solar. Na área rural do Sudão cozinhar é uma das principais atividades diárias que consome considerável combustível bioenergético. Os combustíveis bioenergéticos

podem ser vantajosos se a energia solar for usada para estas atividades (Suharta, Abdullah & Sayigh, 1998).

Poucas tentativas foram feitas no passado para introduzir e popularizar os fogões solares. A mais extensa tentativa foi feita com a ajuda de cientistas solares e antropólogos para introduzir cerca de 200 fogões solares no México nos estados de Sonora, Cochula e Oaxaca. O fogão selecionado para o estudo foi desenvolvido na universidade de Nixonsin. Estes fogões têm refletores de plástico rígido com filmes refletivos colocados na frente das superfícies. Eles não tiveram sucesso devido às falhas mecânicas. Depois o fogão foi projetado, modificado e mostrou ser mais bem sucedido.

Na Índia o projeto foi aprovado pelo Ministério das Pesquisas Energéticas não-convencionais consiste de caixas internas e externas feitas de alumínio e fibra de vidro respectivamente. As dimensões da caixa interna são 45 x 48 x 8 cm. Todos os tipos de comidas como cereais, vegetais, raízes (como batata), ovos, sopas são cozinhadas neste fogão 3,66 x 10⁵ fogões solares foram vendidos nos supermercados locais desde março de 1995.

Geralmente os fornos são termicamente avaliados de acordo com a estabilidade da temperatura local, tempo requerido para cozinhar diferentes tipos de comidas e o tempo requerido para aumentar a temperatura de determinada quantidade de água até o ponto de ebulição.

Existiu uma tentativa ao presente modelo de prever se a força do cozimento do fogão solar em termos de parâmetros controlados (interceptação solar, área, coeficiente de calor total perdido, condutividade térmica da lamina absorvedora) três variáveis não-controladas (insolação, diferença de temperatura e distribuição da carga).

Outra avaliação foi feita pela avaliação do fogão solar tipo caixa quente, testes térmicos convenientes tem sido propostos e parâmetros apropriados identificados que pertence ao fogão solar e que são relativamente independentes dos parâmetros climáticos, assim como os itens cozidos. Esses parâmetros têm sido combinados dentro de duas medidas F₁ e F₂ (Mullick, Kandpal & Kumar, 1996).

5.9.2. Descrição do Fogão Solar Tipo Caixa Sudanês

Para melhorar o desempenho do fogão, a combinação de refletores externos (impulsionador) e internos foram usados. Os refletores internos foram 2 peças de espelhos posicionados dos dois lados do fogão a 45°. O fogão foi produzido com impulsionadores

feitos de espelhos de forma regular (90 x 40 cm), “dobrado” na vertical para o lado de trás do fogão, que pode ser ajustado pela haste e o pino combinados. O impulsor é assim projetado deste modo à posição ótima é alcançada quando os raios refletidos cobrem a metade da frente da lâmina enquanto pode ser coberto pelos raios dos refletores internos. Os refletores internos foram fixados a 70° da horizontal pela condução do teste de localização dos raios do Sol e dedução da imagem que cobre o pote do fogão localizado no centro da lâmina algumas variações que se deve a mudanças na hora do dia e nas estações.

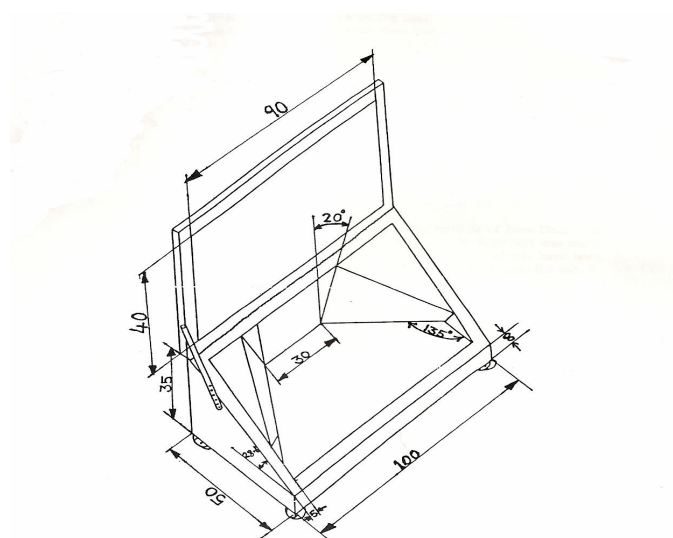


Figura 5.26. Perspectiva isométrica do fogão tipo caixa

O modelo do fogão é mostrado na **Fig. 5.26**. Ele consiste de uma caixa externa (100 x 50 cm) feito de longas peças de madeira 4 x 2,4 cm secção- cruzada e coberta externamente pelo compensado de madeira. O isolamento da caixa é produzida pela fenda de 5 cm preenchida compactamente com lanugem de vidro. A lâmina de alumínio pintada de preto está localizada no topo da superfície do lado do botão do fogão com uma camada de lanugem de vidro de mais de 5 cm. A forma completa da lâmina é trapezóide com a parte frontal retangular tendo uma área total de 0,267 m².

A porta do fogão é uma abertura de 30 x 25 cm localizado no centro da porta de trás pode ser manuseado separadamente pelo uso da manivela de alumínio fixada externamente no centro da porta.

O fogão é coberto no topo com uma placa dupla de vidro de janela comum com 1 cm de espaço construído com peças de madeira retangular de secção cruzada 8 x 2,4 cm e permanentemente aparafusado no fogão.

O topo da cobertura está inclinado $28,6^\circ$ correspondendo a latitude de nova Delhi (o local do teste). Para produzir a inclinação, a altura do lado de trás foi feito com 25 cm enquanto a frente foi feita com 8 cm. Quatro rodas em rodízio tem sido fornecido embaixo do fogão para mudar a orientação do fogão em direção ao Sol.

5.9.3. Testando o fogão

O fogão solar tipo caixa sudanês fabricado na oficina do Centro de Estudos Energéticos do Instituto Indiano de Tecnologia (IIT) Delhi, Índia. Três séries de experimentos foram feitos durante abril e maio de 1998.

Experimento 1: O fogão sem impulsor e os refletores internos cobertos por papéis preto (proteção interna). Os leitores foram usados durante três dias o fogão foi descarregado para o primeiro dia, no segundo dia foi carregado com 2 kg de água e no terceiro dia ampliado para 3 kg. A água foi colocada em potes para cada 1 kg de água empregada. O ajuste foi feito a cada 15 min. Do começo ao fim do teste pela remoção da proteção dos dois lados verticais. As leituras foram feitas a cada 5 min. Para medir:

- Temperatura na lâmina usando três termocouples localizados nos dois lados em frente aos dois refletores internos e no centro da lâmina.
- Temperatura ambiente
- Temperatura da água se ele estiver carregado.

Experimento 2: Papeis pretos foram removidos, o experimento anterior foi repetido para os outros três dias.

Experimento 3: O impulsor foi instalado e a mesma série de leituras foram feitas.

5.9.4. Métodos de cálculos

Os cálculos foram feitos para determinar duas medidas F_1 e F_2 do fogão solar tipo caixa discutindo em no balanço de energia no estado quase uniforme quando a temperatura constante é alcançada:

$$N_0 \cdot H = U_L - (T_{DS} - T_{as}) \quad (5.13)$$

Onde N_0 é a eficiência óptica, h é o total de radiação solar na superfície horizontal (Wm^{-2}), U_L é o fator de perda de calor total ($\text{W.m}^{-2}\text{°C}$), a temperatura da lâmina no ponto de estagnação (°C) e T_{as} a temperatura ambiente no ponto de estagnação (°C).

A razão de (N_0/U_L) é expressa na primeira figura de medida F_1 .

$$F_1 = (T_{ps} - T_{as}) / H \quad (5.14)$$

A segunda figura de medida F_2 é dada pela **Eq. (5.15)**. A parti experimental inclui o aquecimento sensível da água em um container fechado até o ponto de ebulição.

$$F_2 = F_1 \cdot (M.C)W / (A.t).\ln[(1-1/F_1 \cdot (T_W - T_a) / H) / (1-1/F_1 \cdot (T_{W2} - T_a) / H)] \quad (5.15)$$

Onde m é a massa de água (kg), C o calor especifica da água ($\text{J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$), A , área de fenda (m^2), t é o tempo (s), T_{w1} é a média inicial de temperatura da água (°C), T_{w2} é a média final da temperatura da água (°C), T_a é a média da temperatura ambiente (°C) e H é a média da radiação solar (W.m^{-2}).

Quanto mais alto é o valor dos fatores F_1 e F_2 , melhor o fogão é. O limite mais alto da temperatura da água, T_{w2} deve ser fixado entre 90 a 95 °C . A temperatura inicial, T_{w1} pode ser selecionado no mesmo valor médio das temperaturas entre a ambiente e o ponto de ebulição! (τ_e) é o tempo sensivelmente da temperatura ambiente até 100 °C .

$$\tau_{bolha} = F_1/F_2 \cdot (MC)_w / A \ln \cdot (1-1/F_1 \cdot (100 - TA)/H) \quad (5.16)$$

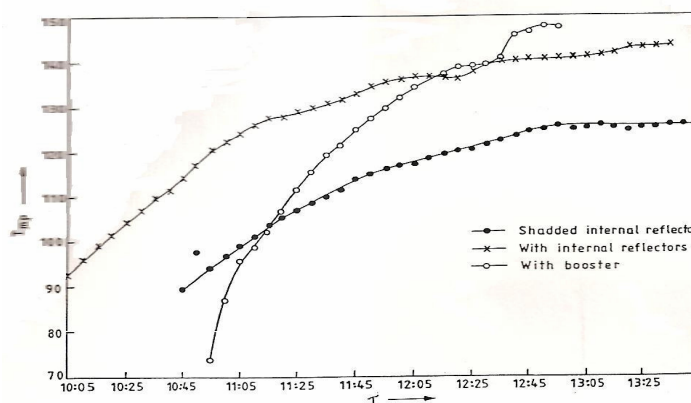


Figura 5.27. T_{mp} Vs τ

5.9.5. Resultados dos testes

Os resultados são comparados com aqueles disponíveis nos modelos indianos que tem fendas menores com área de $0,0804 \text{ m}^2$.

5.9.5.1. Influencia do impulsor

Para as condições de teste do experimento 2 e para estudar a influencia da adição do impulsor no desempenho térmico, baseando principalmente na temperatura da lâmina no valor de F_1 , abaixo da mesma condição climática foi encontrado ser $137,5^\circ\text{C}$ e com a adição do impulsor houve aumento de $10,2^\circ\text{C}$.

Baseados nos valores de F_1 e F_2 por um período de 55 min. Abaixo das mesmas condições da temperatura ambiente e radiação solar o ganho em termos da temperatura da água pela adição do impulsor foi $3,81^\circ\text{C}$ para 2 kg de água e conseqüente:

$$\text{Ganho de força} = 2/3300 \cdot 4186 \cdot 3,81 = 9,7 \text{ W} \quad (5.17)$$

Para o último dia do experimento 3 e pelo mesmo procedimento de leituras comparativas, o ganho principalmente na temperatura da água foi $5,71^\circ\text{C}$ e o ganho de força para 3 kg foi 20,0 W.

Abaixo das condições padrão de 1000 W/m^2 de radiação solar é 25°C para a temperatura ambiente, o máximo esperado principalmente para a temperatura da lâmina para os três experimentos são os seguintes:

- Para o experimento 1: $T_{\text{mp}}(\text{máximo}) = 0,107 \times 1000 + 25 = 132^\circ\text{C}$
- Para o experimento 2 : $T_{\text{mp}}(\text{máximo}) = 0,1153 \times 1000 + 24 = 140,3^\circ\text{C}$
- Para o experimento 3 : $T_{\text{mp}}(\text{máximo}) = 0,1153 \times 1000 + 25 + 10,2 = 150,5^\circ\text{C}$

Fig. 5.28 mostra que a adição do impulsor aumentou a temperatura da lâmina. A rampa da curva indica que a razão do aquecimento é mais alta que aquelas outras curvas.

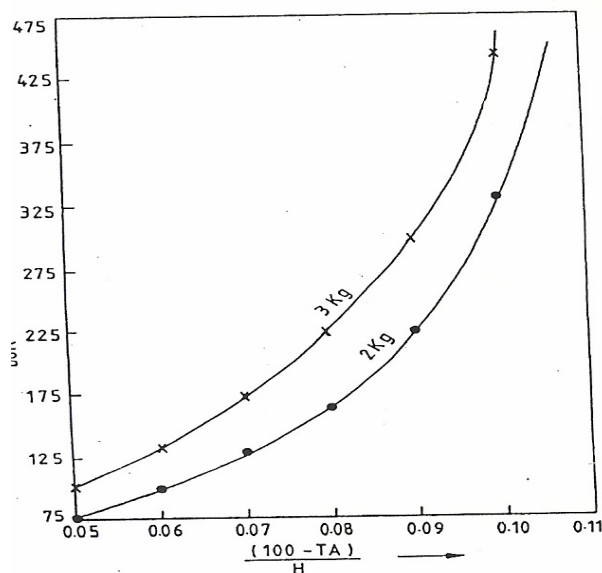


Figura 5.28 τ_{bolha} Vs $(100 - T_a)/H$

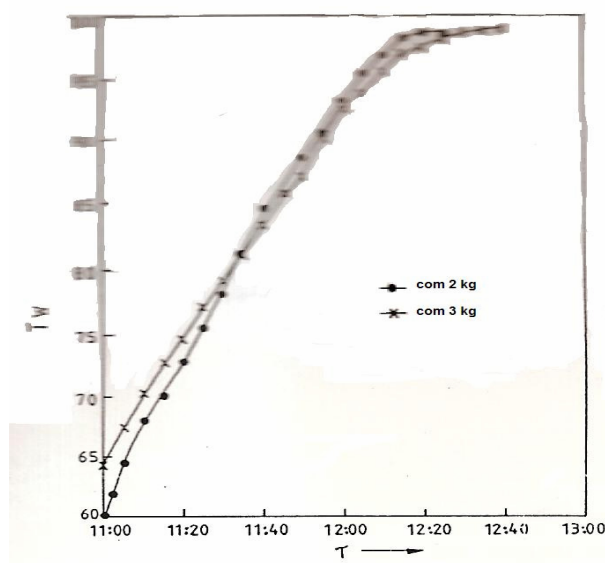


Figura 5.29 $T_{w,médio}$ Vs τ

Observando a Figura indica que F_2 para 2 kg é sempre mantida menor que a curva para a carga de 3 kg na mesma temperatura de água. O fogão carregado com 2 ou 3 kg não faz diferença significativa na temperatura da água. Pode-se nisto na Figura 5.29, a figura inova que existia, excesso de aquecimento adicionado pelo “impulsionador” externo que não era utilizado com a carga de 2 kg.

5.9.6. Outras considerações

- O estudo não recorreu a aspectos econômicos do uso de fogão solar tipo caixa como um modelo competitivo para cozinhar versus aqueles fogões tradicionais disponíveis (o modelo custa 70 Dólares e 1 Dólar = 200 Dina Sudanês no tempo do estudo).
- Os espelhos refletores podem ser substituídos por lâminas de alumínio em ordem decrescente de preço e peso do fogão, apesar do desempenho térmico ser afetado pelo baixo valor reflexivo do alumínio. As laminas de alumínio também são mais sensíveis às condições do meio ambiente tanto chuva como exposição ao Sol.
- Para aumentar o desempenho do fogão através da concentração da radiação solar os refletores planos internos podem ser substituídos por duas calhas parabólicas que é formado por tiras de espelhos fixados numa armação de aço.

5.9.7. Conclusão

1. Fogão solar tipo caixa tem melhor desempenho térmico.
2. O uso de refletores internos e externos que inclinam-se no topo da cobertura adicionado significativamente para desempenho térmico indicados pelo consumo de calor e conseqüentemente a temperatura da lâmina alcançada.
3. A carga ótima do fogão Sudanês não foi finalmente determinada, porém o uso de 3 kg de água em três diferentes potes de cozimento tem mostrado desempenho melhor.

5.10. Cozinhas Concentradoras

Os concentradores são refletores circulares que concentram a luz solar no recipiente de cocção ou panela. Suas desvantagens são a necessidade de luz solar direta, mecanismo de acompanhamento para seguir a incidência solar a cada 30 minutos, esfriamento rápido do alimento se há desvio de foco ou nebulosidade acentuada; falta de estabilidade ante ventos, risco de fogo ou queimaduras, danos aos usuários por raios refletidos. Em contrapartida têm a possibilidade de alcançar altas temperaturas, o que permite realizar frituras ou assados.

A seguir mostraremos alguns tipos de Cozinhas concentradoras Fig. 5.30 e 5.31 em uso em todo o mundo, destacando o fogão solar objeto desse estudo, construído no Laboratório de Máquinas Hidráulicas e Energia Solar (LMHES) da UFRN.



Figura 5.30 - Fogão solar construído no Laboratório de Máquinas Hidráulicas e Energia Solar (LMHES).

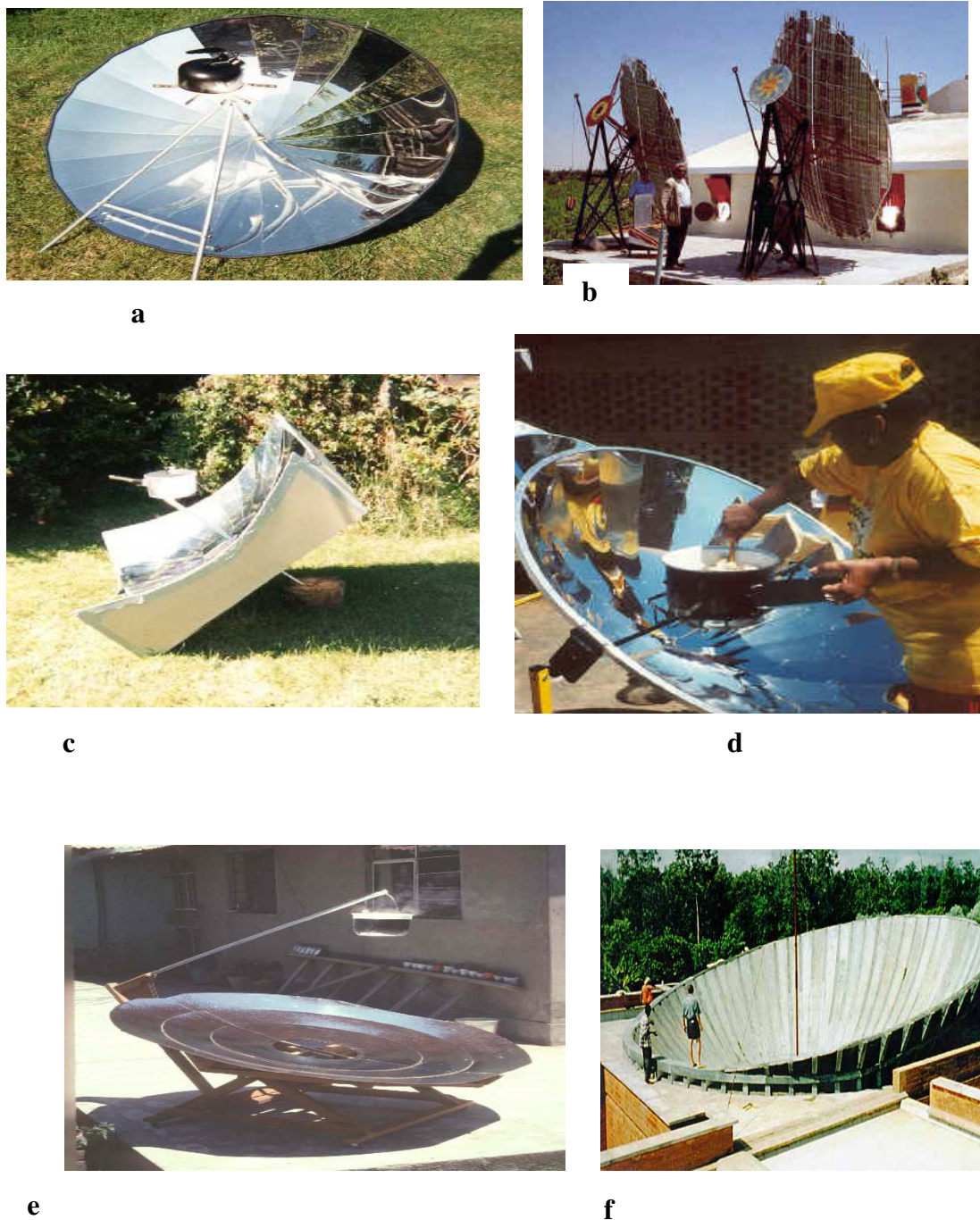


Figura 5.31. (Figuras: a, b, c, d, e, f). Cozinhas Concentradoras

5.10.1. Cozinhas Aquecidas por Coletores de Placa Plana.

Os fornos com coletores de placa plana são cozinhas aquecidas por meio de coletores desse tipo. Existem modelos que têm dois ou três refletores planos, podem operar com azeite

ou ar como fluido de trabalho e podem ter até duas panelas cada uma. Podem contar com acumulação. Suas desvantagens são: sua grande estrutura, seu peso, dificuldade de transporte e mais caras que os outros tipos. Suas vantagens residem na facilidade de uso, se pode cozinhar na sombra, não é necessária sua reorientação, funcionam sem a intervenção do usuário mantendo quente o alimento durante longo tempo, não produzem faíscas, são estáveis e não têm riscos de fogo ou queimaduras. Podem ser feitas de grandes tamanhos, para atender a te a instituições, hotéis, hospitais. Existem variedades de concentradores lineares que têm refletores curvos que concentram no foco, onde está localizado o aquecedor.

Capítulo 6

Proposta do Trabalho

6. Proposta do Trabalho

O presente trabalho visa fornecer uma forma simples e barata de fogões solares, para as populações mais carentes do Rio Grande do Norte amenizar o problema de falta de energia em determinadas áreas, com isso pretende-se construir e testá-los, mostrando assim a viabilidade do projeto.

Com base em estudos a respeito da utilização de métodos e modelos que visem uma solução apreciável à falta de infra-estrutura básica, realização de um levantamento ambiental das áreas do interior do Rio Grande do Norte, que de alguma forma diminuam os problemas enfrentados por comunidades muito afastadas das áreas urbanas, que não têm acesso a tecnologias, que os façam ter uma infra-estrutura básica necessária para sua vida.

1. Definir as comunidades a serem trabalhadas, tendo em vista a condição social;
2. Elaborar o questionário de diagnóstico sócio-econômico-energético, com conseqüente levantamento de dados nas comunidades carentes envolvidas;
3. Construir e testar fogões solares para as comunidades carentes do nosso Estado, utilizando um compósito à base de gesso e isopor (produto derivado do petróleo), material naturalmente encontrado na região nordestina;
4. Estudar o modelo de transferência de calor proposto para calcular o tempo de cozimento em um fogão solar tipo caixa;
5. Implementar em linguagem de engenharia computacionalmente o modelo proposto para cozimento de um alimento no fogão solar tipo caixa, ou seja, utilizar os fundamentos de transferência de calor para propor uma modelagem do processo;
6. Construir um modelo de fogão solar e testar sua viabilidade técnica-econômica, que tenha como características principais à facilidade de fabricação e montagem, o baixo custo (utilizando material compósito acessível às comunidades de baixa renda);
7. Utilizar matérias-primas das regiões implantadas, adquiridas até mesmo em sucatas promovendo, assim, um estímulo à reciclagem de matérias e a preservação do meio ambiente.

Capítulo 7

Materiais e Métodos

7. Materiais e Métodos

A proposta desse método é resumir os princípios básicos que são usados nos projetos de fogões solares de caixa.

As pessoas usam os fogões solares principalmente para cozinhar e ferver água, embora outros usos estejam sendo continuamente desenvolvidos. Numerosos fatores, incluindo acesso a materiais, disponibilidade de combustíveis tradicionais para cozinhar, clima, preferências culinárias, fatores culturais, capacidade técnicas, afetam a aproximação das pessoas ao cozimento solar (Últanir, 1994).

Com o entendimento dos princípios básicos da energia solar e o acesso de materiais simples como papelão, folhas de alumínio e vidro, qualquer um pode construir um esquema de fogão solar eficiente, fig.7.1. Neste projeto são listados os princípios básicos para a construção de um fogão solar de caixa e identifica materiais potencialmente úteis para a sua construção.

Estes princípios são apresentados em termos gerais de tal forma que eles possam ser aplicados em uma grande variedade de problemas de projetos. Seja a necessidade de ferver água, cozinhar comida, secar peixe ou grãos;

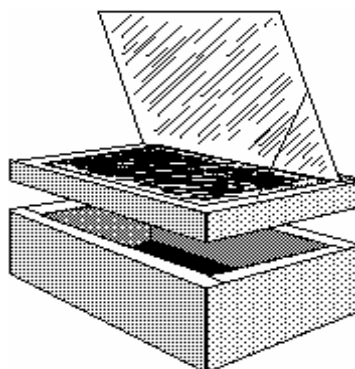


Figura 7.1. Caixa solar com cobertura, janela e refletor.

- **Princípios de aquecimento**

O propósito básico de um fogão solar de caixa é aquecer as coisas: cozinhar comida, purificar água e esterilizar instrumentos, para citar poucos.

A caixa solar cozinha porque o interior dela é aquecido devido à energia do Sol. A luz do Sol, tanto direta quanto refletida, entra na caixa através do topo de vidro ou plástico. Ela se torna energia calorífica e é absorvida por um prato preto absorvente ou vasilha de cozimento. Esse calor interno faz com que a temperatura dentro do fogão solar de caixa aumente até que a perda de calor dentro do fogão seja igual ao ganho. Temperaturas suficientes para cozimento de comida ou pasteurização da água são facilmente alcançadas.

Dadas duas caixas que têm a mesma capacidade de retenção de calor, aquela que tem maior ganho, devido à luz solar com maior energia incidente (W/m^2) ou a luz solar adicional devido a um refletor, ficará mais quente lá dentro.

Dadas duas caixas que tenham igual ganho de calor, aquela que tiver melhor capacidade de retenção de calor, melhor isolamento na paredes, fundo e topo, irá alcançar uma temperatura interior mais alta.

A. Ganho de calor

Efeito estufa: Esse efeito resulta do aquecimento em espaços fechados nos quais a luz solar passa através de um material transparente tal como vidro ou plástico a fig.7.2 ilustra bem este efeito. A luz visível facilmente passa através do vidro e são absorvidas e refletidas por materiais dentro do espaço fechado.

A energia luminosa, que é absorvida pela vasilha escurecida e pelo prato absorvente escurecido abaixo das vasilhas, é convertida em energia calorífica, que tem que um maior comprimento de onda e que irradia do interior dos materiais. A maior parte dessa energia radiante não consegue passar de volta através do vidro e então fica presa no espaço fechado.

A luz refletida também é absorvida por outros materiais dentro da caixa ou, porque ela não mudou seu comprimento de onda, passa de volta através do vidro.

Decisivo para a performance do fogão solar, o calor que é coletado pelo prato absorvente de metal preto e as vasilhas é conduzido através desses materiais para aquecer e cozinhar a comida.

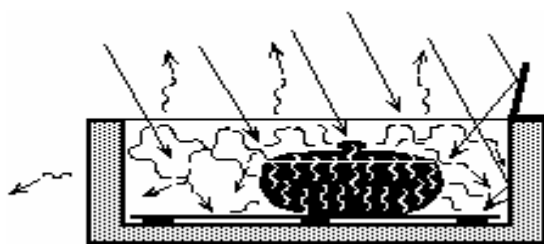


Figura 7.2. Efeito estufa.

Orientação do vidro: Quanto mais diretamente o vidro estiver voltado para o Sol, maior será o ganho de calor solar. Embora o vidro seja o mesmo na caixa 1 e na caixa 2, mais luz solar passa pelo vidro na caixa 2, porque ele está voltado mais diretamente para o Sol. Note que na figura 7.3, a caixa 2 também tem uma maior área de parede através da qual o calor é perdido, mas este efeito pode ser minimizado se as paredes forem adequadamente isoladas termicamente.

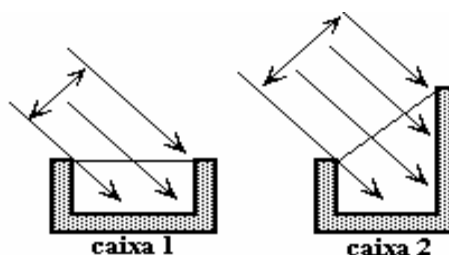


Figura 7.3. Orientação do vidro

Refletores, ganho adicional: Um refletor simples ou múltiplos refletores refletem luz solar adicional através do vidro e dentro da caixa solar, fig.7.4. Essa energia solar adicional resulta em temperaturas mais altas.

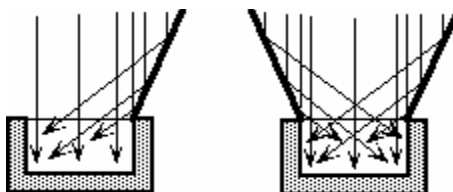


Figura 7.4. Refletores para ganho solar

B. Perda de Calor

A segunda lei da termodinâmica diz que o calor sempre “viaja” espontaneamente do corpo mais quente para o corpo mais frio. O calor dentro de um fogão solar de caixa é dissipado de três maneiras básicas: **Condução, Radiação e Convecção**.

Condução:

O cabo de metal de uma panela em uma trempe acesa ou no fogo se torna quente devido à transferência de calor através do material da panela em direção ao material do cabo. Da mesma forma, o calor em uma caixa solar é perdido através das moléculas da folha de estanho, do vidro, do papelão, do ar, do isolante, até o ar fora da caixa.

O prato absorvente de calor solar conduz o calor para o fundo das vasilhas. Para prevenir a perda de calor por condução através do fundo do fogão, o prato absorvente é elevado usando um pequeno espaço isolante, como na figura 7.5.

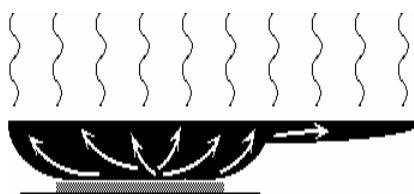


Figura 7.5. O calor conduzido através da panela para o cabo.

Radiação:

Os materiais que são mornas ou quentes ou fogo, fogão ou vasilhas com comida em um fogão solar, liberam ondas de calor ou irradiam calor nas suas redondezas. Essas ondas de calor são irradiadas a partir objetos mornos através do ar ou do espaço. A maior parte do calor irradiado liberado pela vasilha morna dentro da caixa solar são refletidos da folha e do fundo de vidro para as vasilhas e a bandeja do fundo. Embora os vidros transparentes funcionem como se fossem “armadilhas” no interior de um fogão solar, para a maior parte do calor radiante, algum calor realmente escapa diretamente através do vidro. O vidro retém o calor radiante melhor do que o plástico, fig. 7.6.

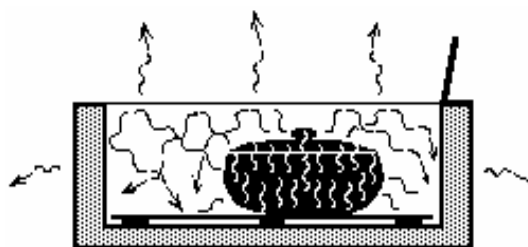


Figura 7.6. O calor irradia a partir do fogão aquecido.

Convecção:

As moléculas de ar movem para dentro e para fora da caixa através das frestas, mostrado na fig.7.7. através da convecção. O ar aquecido dentro da caixa solar escapa, primeiramente através das frestas ao redor do tampa do topo, um lado da abertura da "porta do forno" ou por imperfeições na construção. O ar frio de fora também entra por estas aberturas.

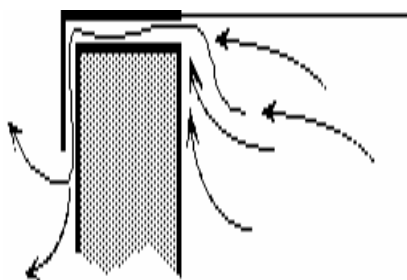


Figura 7.7. O ar aquecido pode escapar através das frestas

C. Estocagem de Calor:

Como aumenta a densidade e o peso dos materiais dentro da armação isolante do fogão solar de caixa, a capacidade de o fogão reter calor aumenta, fig.7.8. No interior da caixa, a inclusão de materiais pesados tais como rochas, tijolos, panelas pesadas, água ou comida pesada tornam mais longo o tempo de aquecimento por causa da capacidade adicional de estocar calor, a qual é dada por ρC_p , ou seja, a sua densidade multiplicada pelo seu calor específico. A energia que entra é armazenada como calor nesses materiais pesados, aquecendo lentamente o ar na caixa.

Esses materiais densos, carregados com calor, irradiarão o calor dentro da caixa, mantendo-o aquecido por um período mais longo no final do dia.



Figura 7.8. Massa térmica dentro do fogão solar.

Exigências de materiais

Existem três tipos de materiais que são tipicamente usados na construção das caixas solares, materiais transparentes, estruturais e isolantes, os quais são descritos a seguir. Uma propriedade tem que ser considerada na seleção dos materiais: é a resistência à umidade.

A - Material estrutural

O material estrutural é necessário para que a caixa tenha e mantenha a forma dada e dure ao longo do tempo como mostra a fig.7.9.

Os materiais estruturais incluem papelão, madeira, compensado, alcatex, masonite, bambu, metal, cimento, tijolos, pedra, vidro, fibra de vidro, palha trançada, palha, plástico, papel machê, clay, terra batida, metais, casca de árvores, tecido engomado com cola.

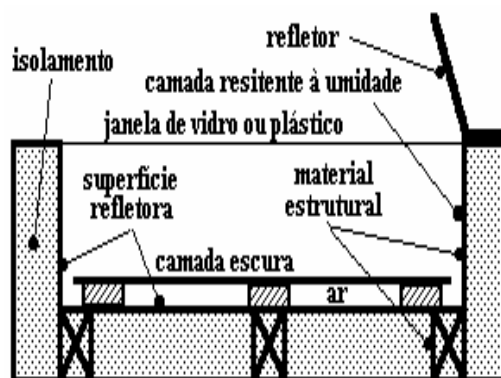


Figura 7.9. Material estrutural, de isolamento, transparente e resistente à umidade.

Muitos materiais que funcionam bem como estruturais são muito densos para serem bons isolantes. Para conseguir integridade estrutural e boas qualidades de isolamento, é necessário separar os materiais estruturais dos materiais de isolamento.

B - Isolamento

Para que a caixa mantenha as temperaturas interiores altas o bastante para o cozimento, as paredes e o fundo da caixa devem ter bom valor de isolamento (boa retenção de calor). Bons materiais isolantes incluem: folha de alumínio (refletor de radiação), penas, fibra de vidro entrelaçada, lã de pedra, celulose, casca de arroz, lã, palha e jornal amassado.

Quando construir um fogão solar, é importante que o material cerque por todos os lados a cavidade de cozimento da caixa solar, com exceção do lado transparente – geralmente o topo. Materiais isolantes devem ser instalados de tal forma que permitam o mínimo de condução de calor do material estrutural da caixa interna para o material estrutural da caixa externa. Quanto menor a perda de calor, mais alta é a temperatura de cozimento.

Um dos requisitos básicos para ser um bom isolante é que o material tenha uma pequena condutividade térmica $k(\text{Wm}^{-1}\text{°C}^{-1})$, para que não ocorra a perda de calor para o meio externo.

C – Material transparente

Pelo menos uma superfície da caixa deve ser transparente e estar voltada para o Sol para permitir o aquecimento pelo "efeito estufa". Os materiais transparentes mais comuns são vidros e plásticos para alta temperatura. Duplo envidraçamento usando ou vidro ou plástico afetam tanto o ganho quanto a perda de calor. Dependendo do material usado, a transmitância solar, ganho de calor, pode ser reduzida de 5 a 15 %. De qualquer forma, a perda de calor através do vidro ou plástico é diminuída pela metade e com isso o desempenho da caixa solar aumentará.

D - Resistência à umidade

A maior parte da comida que é preparada no fogão de caixa solar contém umidade. Quando a água ou comida é aquecida na caixa solar, direcionando o vapor de dentro para fora da caixa. Existem várias maneiras que a umidade pode ser transferida. Ele pode escapar diretamente através das frestas e brechas da caixa ou forçar as paredes e fundo se não houver barreira para o vapor. Se a caixa é projetada com alta qualidade de vedação e barreira para

umidade, o vapor da água pode ser retido dentro da câmara de cozimento. No projeto, da maioria dos fogões solares de caixa, é importante que a maior parte da superfície interna seja uma boa barreira para o vapor. Esta barreira irá prevenir que a água cause danos ao isolamento e à estrutura do fogão devido à lenta migração do vapor de água através das paredes e do fundo do fogão.

7.1. Materiais

Basicamente a construção do fogão solar foi feita de materiais compósitos, reaproveitados, encontrados até mesmo em ferros-velhos evidenciando assim o seu baixo custo orçamentário.

7.2. Descrição do Fogão

7.2.1. Projeto, Dimensão e Operação

A. Tamanho da caixa

O fogão de caixa solar deve ser dimensionado considerando os seguintes fatores:

- O tamanho deve ser suficiente para caber a maior quantidade de comida comumente cozida;
- Se a caixa precisar ser movimentada freqüentemente, o fogão não deve ser muito grande para não dificultar essa tarefa;
- A caixa deve acomodar os utensílios de cozinha que estão disponíveis e que são normalmente utilizados.

B. Razão entre a área de coleta e o volume da caixa

Com todas as outras características permanecendo iguais, quanto maior a área de coleta da luz solar da caixa em comparação com a área de perda de calor na caixa, temperaturas mais altas de cozimento serão alcançadas.

Dadas duas caixas que tenham as áreas de coleta da luz solar de igual tamanho e dimensão, aquela que for de menor profundidade ficará mais quente porque ela tem menor área de perda de calor.

C. Dimensões da caixa solar

Um fogão de caixa solar virado para o sol do meio dia deve ser mais comprido em sua dimensão leste-oeste para fazer um melhor uso do refletor durante um período de várias horas. Devido ao movimento de rotação da Terra, o Sol “atravessa o céu”, essa configuração resulta em uma temperatura de cozimento mais constante.

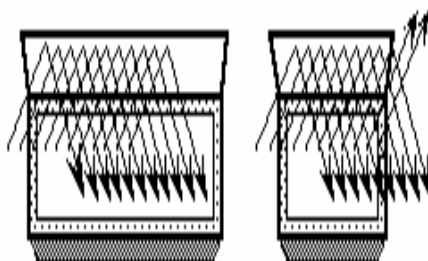


Figura 7.10. Caixas solares mais largas captam mais luz solar do leste e do oeste.

Com fogões quadrados ou aqueles que tem maior dimensão norte-sul, uma maior porcentagem da luz solar do começo da manhã e do final da tarde é refletida do refletor para o chão, não atingindo a área de coleta de luz da caixa.

D. Refletores

Um ou mais refletores são empregados para refletir luz adicional na caixa solar de maneira a aumentar a temperatura de cozimento. Embora seja possível que o fogão solar funcione sem refletores em regiões equatoriais, onde o Sol está mais elevado, “a pino”, os refletores solares aumentam significativamente a temperatura nas regiões temperadas do mundo.

7.2.1.1. Operação do fogão de caixa solar

Uma das “belezas” dos fogões de caixa solar é sua facilidade de funcionamento. Para cozinhar ao meio-dia na latitude de 20° N - 20° S, o fogão de caixa solar sem refletor precisa de um pequeno reposicionamento para ficar voltado para o Sol enquanto ele se move através do céu de meio-dia. A caixa com a face voltada para cima e o Sol está alto no céu por boa parte do dia. As caixas com refletores podem ser posicionadas em direção ao Sol da manhã e da tarde para fazer o cozimento nestas partes do dia.

Fogões de caixa solar com refletores nas zonas temperadas realmente trabalham em temperatura mais alta se forem reposicionados em direção do Sol a cada uma ou duas horas. O ajuste de posição torna-se menos necessário quando a dimensão leste-oeste da caixa é relativamente maior do que a dimensão Norte-Sul (Chaudhuri & Mistry, 1997).

7.2.1.2. Fatores culturais

Além dos aspectos técnicos básicos do projeto do fogão de caixa solar, fatores incluindo cultura, tecnologia apropriada e estética tem um papel maior no sucesso da transferência da tecnologia da caixa solar de cozimento.

Através dos séculos, o poder do Sol tem sido explorado de numerosas maneiras. Com o cozimento solar, assim como com outros esforços, algumas abordagens funcionam melhor do que outras. A “tecnologia apropriada” que é projetada para eficientemente executar uma determinada tarefa quando atende certos padrões ambientais, sociais, culturais, estéticos e de uso.

Infelizmente, o campo de cozimento solar tem sua parte de estratégias que falham em testes técnicos e sociais básicos. Por exemplo, os fogões parabólicos podem cozinhar comida, mas quando comparados com o método da caixa solar, eles são mais difíceis de construir,

necessitam de material especial e precisam ser constantemente reposicionados; podem queimar a comida e não são plausíveis de serem aceitos na maioria dos contextos sociais e culturais. De fato, por causa da boa divulgação de falhas nos inventos feitos na maioria dos projetos desenvolvidos nos anos 60, muitos ainda acreditam que a cozinha solar não é viável.

Quanto mais determinado projeto de fogão solar se aproxima de um critério tecnológico apropriado, mais provavelmente ele será aceito por aqueles que vão usá-lo. Uma aproximação de baixa tecnologia é simplesmente cavar um buraco raso no chão, isolar o fundo com grama ou folhas secas, colocar comida ou água em um recipiente escuro e colocar um vidro tampando o buraco. Já em uma aproximação de alta tecnologia, os mesmos princípios podem ser usados com material de construção e isolamento e envidraçamento de baixa emissividade. A porta do forno solar pode ser na parede a uma altura conveniente, similar ao que é usado em um forno de microondas.

Fogões solares de caixa feitos de papelão são apropriados para muitas culturas porque os materiais são abundantes e baratos. Mas as desvantagens do papelão incluem susceptibilidade a danos causados pela umidade e uma falta de durabilidade comparada com muitos outros materiais.

Estética é frequentemente importante. Culturas que tem formas arredondadas como norma podem rejeitar todo o conceito de cozimento solar porque a caixa é quadrada. E certas camadas sociais podem rejeitar o papelão porque ele é um material muito barato para eles usarem.

Certamente, uma das vantagens das pessoas projetarem seus próprios fogões solares de caixa é que elas aplicarão os princípios solares usando seus próprios materiais e senso estético. As pessoas que constroem suas casas em mobília de madeira ou bambu são possível que incluam esses materiais nos seus projetos solares. A decoração da superfície das caixas solares usando várias pinturas e texturas também ajuda a integrar os fogões a dadas culturas (Scheffler & Sutter, 1997).

Existem muitas **formas** que podem servir à **função** solar.

Afetam os projetos de fogões solares a sua localização do fogão solar e da atividade de cozimento, permanência ou portabilidade do fogão solar, período do dia quando ele é usado e importância do cozimento como atividade social.

"Materiais são derivados da economia de mercado (vidro, tinta preta, pregos etc.), da economia local (trabalho, madeira) e da economia de subsistência não-monetária (tijolos de

barro, bambu, tecido). Usando materiais e habilidades locais fica fácil de treinar construtores e ajuda as pessoas a manterem seus fogões." (Cadena & Saravia, 2001).

Embora esteja de certa forma além do objetivo dessa discussão, outros fatores podem ser críticos para uma implantação da cozinha solar bem-sucedida e merecem ser observados.

De modo a transferir a tecnologia da cozinha solar com sucesso de uma cultura para outra, uma ponte durável e de longa duração é um ponto crítico. Indivíduos de ambas as culturas devem formar uma ponte. Pessoas da cultura transferidora devem ter um elevado grau de sensibilidade e ter um tempo significativo de comprometimento. Sucesso é mais provável as pessoas da cultura implementadora são líderes nas suas próprias comunidades. Comunidade é, por definição, uma rede de atividades interconectadas. Para que o cozimento solar se torne parte de uma cultura local, ele deve ser considerado no contexto das atividades comunitárias, tais como economia local, trabalho, saúde, atividades sociais, fontes de energia, desmatamento, educação, infra-estrutura e outros (Amoroso et al, 1998).

O cozimento solar de caixa já tem sido praticado em variadas culturas. Mas no Brasil foi apenas “arranhada a superfície”. O dramático benefício potencial destes recursos em termos da fome mundial, saúde, desmatamento, ainda, está para ser realizado.

7.3. Métodos e testes

Os testes do fogão solar tipo caixa foi realizados em vários dias. Nesse período experimental os seguintes parâmetros serão medidos:

- Temperatura ambiente do ar - T_a ;
- Temperatura interna do forno - T_i ;
- Temperatura da parede interna - T_{pi} ;
- Temperatura da parede externa - T_{pe} ;
- Energia de radiação solar total na superfície - I .

A temperatura interna do forno será lida a cada 15 minutos.

A radiação solar na superfície horizontal e a temperatura ambiente do ar e das paredes interna e externa, também serão gravados durante os testes.

A radiação solar será medida pelo sensor de energia solar; cujo elemento sensível é um fotodiodo de precisão, com boa característica de estabilidade.

A velocidade do vento pode ser desprezada por apresentar valores muito baixos.

A posição do fogão solar tipo caixa será fixada em área descoberta de forma que sua exposição ao Sol seja máxima e para uma melhor focalização da radiação solar no interior do forno (Clark, 1996).



Figura 7.11. Fogão solar proposto (LMHES) UFRN.

Capítulo 8

Modelagem do Processo

8. Modelagem do Processo

8.1. Modelagem de cálculos do tempo mínimo de cozimento solar realizado num fogão do tipo caixa

8.1.1. Experimento I – Fogão Tipo Caixa

Otimização do equipamento de energia alternativa, considerando o tempo mínimo para cozinhar um bife de frango de 2 cm de espessura, igual a $t = 5$ minutos com temperatura de superfície $T_s = 155$ °C (ao meio dia), se o bife estava à temperatura inicial $T_1 = 4$ °C e o seu centro deveria atingir $T_c = 90$ °C para que ficasse bem cozido. O bife tem condutividade $K = 0,55 \text{ W.m}^{-1}.\text{°C}^{-1}$, densidade $\rho = 1,006 \text{ g.cm}^{-3}$ e calor específico $c_p = 3,64 \text{ J.g}^{-1}.\text{°C}^{-1}$. a situação descrita nos experimentos corresponde a um número de Biot tendendo a infinito, definido como $Bi = hL/K$; sendo:

$h (\text{W.m}^{-2}.\text{°C}^{-1})$: Coeficiente convectivo de transferência de calor;

$k (\text{W.m}^{-1}.\text{°C}^{-1})$: Condutividade térmica do bife ;

$L(\text{m})$: Metade da espessura do bife.

Com o fogão solar proposto, conseguiu-se em um dos lados do bife a temperatura $T_p = 155$ °C, porem do outro lado havia um coeficiente convectivo $h = 20 \text{ W.m}^{-2}.\text{°C}^{-1}$ e uma temperatura ambiente $T_a = 30$ °C.

Tabela 8.1. Tempo de Cozimento

Tempo (h)	Temperatura (°C)
10:15	30,7
10:20	36,3
10:25	44,7
10:30	47,0
10:33	50,6
10:35	52,8
10:40	54,0

Observações:

Entre 10:25 à 10:30h → Período de nebulosidade.

O alimento obteve seu cozimento na temperatura de 54 °C.

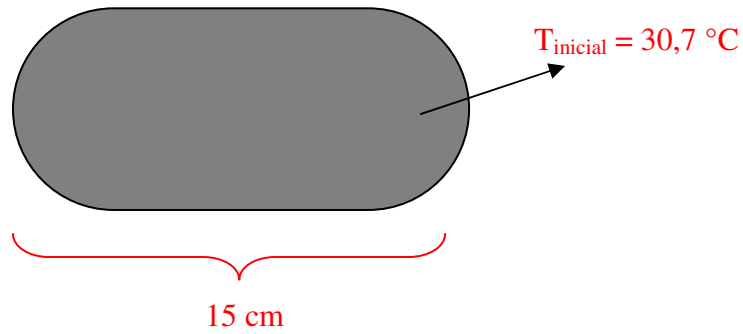


Figura 8.1. Esboço bife de frango



Figura 8.2. Fogão utilizado no laboratório de máquinas hidráulicas da UFRN.

8.1.2. Experimento II – Fogão Tipo Caixa com Bife de Frango

□ Considerações para a modelagem

t (hora)	T (°C)
13: 25	30,1
13: 30	38,4
13: 40	46,0
13: 45	50,6
14: 00	56,4
14: 05	59,6
14: 06	60,0
14: 13	63,2
14: 17	65,0
14: 20	66,0
14: 27	67,3
14: 35	70,6
14: 40	73,5

└───────────> Fim do cozimento

➤ **Demonstração :** $\frac{T - T_a}{T_1 - T_a} = \operatorname{erf}\left(\frac{x}{\sqrt{4\alpha t}}\right)$, Placa semi-infinita

Para a otimização do sistema, pôde-se realizar um dos cálculos a seguir, calculando dessa forma, o tempo e comparando-o com o tempo ótimo T = 5 minutos.

- a) Avaliou o tempo para que um objeto semi-infinito (bife), com temperatura inicial $T_1 = 4\text{ }^{\circ}\text{C}$ atingisse a temperatura $T = 90\text{ }^{\circ}\text{C}$ em uma posição qualquer;
- b) Considerou o bife como uma placa usando como referencia o ponto médio da placa (centro), resolvido o problema com duas condições de contorno diferentes em cada superfície do bife: em $X = -L$, a temperatura $T_a = 155\text{ }^{\circ}\text{C}$; para $X = +L$, usou a condição de contorno convectiva, com $h = 20\text{ W.m}^{-2}.\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ (adotada para a base de cálculo) e uma temperatura ambiente $T_a = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$. A partir da solução geral da temperatura em função do tempo e da posição, calculou o tempo para que a temperatura $T_c = 90\text{ }^{\circ}\text{C}$ em $X = 0$ e depois virou o bife e calculou o outro, tempo t , que somado ao anterior dá $t = ?$ minutos.
- c) Usou a solução geral para condições de contorno convectivas iguais em ambas faces da placa, e através de alguns artifícios conseguir avaliar um tempo mínimo $t = ?$ minutos.

Usando a condição de simetria em $x = 0$ para a condução de calor e condições de contorno convectivas igual em ambas faces citada antes, resultam as equações básicas de cálculo da temperatura em uma placa, $\underline{T}$, em função do tempo, $\underline{t}$, e da posição $\underline{X}$, que são:

$$\frac{T-T_a}{T_1-T_a} = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos\left(\frac{\mu_n x}{L}\right) \exp\left(-\frac{\mu_n^2 \alpha t}{L^2}\right) \quad (\text{temperatura})$$

$$A_n = \frac{2 \sin(\mu_n)}{\mu_n + \sin(\mu_n) \cdot \cos(\mu_n)} \quad (\text{parâmetro})$$

$$\mu_n \cdot \tan(\mu_n) = \text{Bi} \quad (\text{equação de autovalores})$$

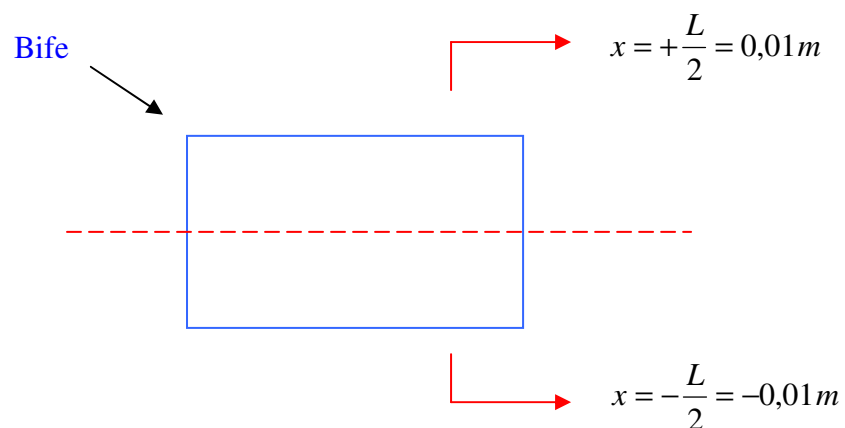
Dados para modelagem do sistema (Fogão solar tipo caixa):

Bife = **L** = 2 cm = 0,02 m
T_s = 155 °C
T₁ = 4 °C
T_c = 90 °C
T_a = 4 a 30 °C
K = 0,55 W/m.°C
ρ = 1,006g/cm³
C_p = 3,64 J/g. °C
Bi = h .L/K
h = 20W/m².°C

Anexos :

- Função erro de Gauss; Incropera e De Witt (1996) pág.475
- As quatro primeiras raízes; Incropera e De Witt (1996) pág. 476

Objeto Semi-Infinito:



$$Bi = \frac{h \cdot L}{K} = \frac{20W / m^2 \cdot ^\circ C \cdot 0,01m}{0,55W / m \cdot ^\circ C} = 0,36$$

Utilizando o apêndice B.3 do livro do Incropera para calcular μ :

$Bi = \frac{h \cdot L}{K}$	μ_n
0,30	0,5218
0,36	X
0,40	0,5932

→ Aplicando aos dados da tabela do Incropera o método numérico de interpolação linear:

$$\frac{0,36 - 0,30}{0,40 - 0,30} = \frac{x - 0,5218}{0,5932 - 0,5218}$$

$$\frac{x - 0,5218}{0,0714} = 0,60$$

$$x - 0,5218 = 0,60 \cdot 0,0714$$

$$x \cong 0,5646$$

Aplicando o modelo para o fogão solar estudado, obtém-se:

$$\frac{T(x, t) - T_{Superfície}}{T_1 - T_{Superfície}} = erf\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}\right)$$

Designando:

$$\alpha = \frac{K}{\rho \cdot C_p} \Rightarrow \alpha = \frac{0,55 \text{ W} / \text{m} \cdot ^\circ\text{C}}{\left(1,006 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}\right) \cdot \left(3,64 \frac{\text{J}}{\text{g} \cdot ^\circ\text{C}}\right) \cdot x \frac{10^6 \text{ cm}^3}{1 \text{ m}^3}}$$

↓
fator de conversão

$$[W] \equiv \frac{\text{Joule}}{s}$$

$$[W] = \text{watt}$$

Usando a definição:

Análise dimensional:

$$? m^3 \rightarrow 1 \cancel{cm}^3 \cdot \frac{1 m^3}{10^6 \cancel{cm}^3} = 10^{-6} m^3$$

$$1m = 100 \text{ cm} = 10^2 \text{ cm}$$

$$(1m^3) = (10^2 \text{ cm})^3$$

$$1m^3 = 10^6 \text{ cm}^3$$

Portanto:

$$\alpha = \frac{0,55 \frac{\cancel{J}}{\cancel{s} \cdot \cancel{m} \cdot \cancel{^{\circ}C}}}{(1,006 \cancel{g}) \times \left(3,64 \frac{\cancel{J}}{\cancel{g} \cdot \cancel{^{\circ}C}} \right) \cdot \frac{10^6}{m^{3-2}}}$$

$$\alpha = \frac{0,55}{\frac{s}{3,66184 \cdot 10^6 m^2}}$$

$$\alpha = \left(\frac{0,55}{s} \right) \times \left(\frac{m^2}{3,66184 \cdot 10^6} \right)$$

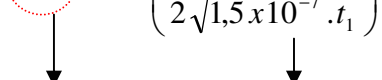
$$\alpha = 0,15 \times 10^{-6} \frac{m^2}{s} \rightarrow \boxed{\alpha \cong 1,5 \times 10^{-7} \frac{m^2}{s}}$$

Usando o modelo de Transferência de calor para o sistema:

$$\boxed{\frac{T(x,t) - T_{Superfície}}{T_1 - T_{Superfície}} = \text{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} \right)}$$

$$\frac{90-155}{4-155} = \text{erf} \left(\frac{0,01}{2\sqrt{1,5 \times 10^{-7} \cdot t_1}} \right)$$

$$0,43 = \operatorname{erf} \left(\frac{0,01}{2\sqrt{1,5 \times 10^{-7} \cdot t_1}} \right)$$



Utilizando os dados da tabela da função erro de Gauss

(em anexo), obtém-se :

Por interpolação:

0,40	0,42839
X ₁	0,43
0,44	0,46622

$X_1 \cong 0,4017$

$$(0,4017)^2 = \left(\frac{0,01}{2\sqrt{1,5 \times 10^{-7} \cdot t_1}} \right)^2 \quad \therefore \quad \frac{0,01}{2} = 5 \times 10^{-3}$$

$$\left(\frac{5 \times 10^{-3}}{\sqrt{1,5 \times 10^{-7} \cdot t_1}} \right)^2 = (0,4017)^2$$

$$\frac{25 \times 10^{-6}}{1,5 \times 10^{-7} \cdot t_1} = 0,1614$$

$$t_1 = \frac{166,67}{0,1614}$$

$$t_1 \cong 1032,65 \, s \cdot \left(\frac{1 \, \text{min}}{60 \, s} \right)$$

$t_1 \cong 17,21 \, \text{min}$

Para $x = 0,02 \, \text{m}$:

$$\frac{T-155}{4-155} = \operatorname{erf} \left(\frac{0,02}{2\sqrt{1,5 \times 10^{-7} \cdot 1032,65}} \right)$$

$$\frac{T-155}{-151} = \operatorname{erf} \left(\frac{\cancel{0,02}}{\cancel{2}\sqrt{1548,975 \times 10^{-7}}} \right)$$

$$\frac{T-155}{-151} = \operatorname{erf} \left(\frac{0,01}{\sqrt{1,549 \times 10^{-4}}} \right)$$

$$\frac{T-155}{-151} = \operatorname{erf}\left(\frac{1}{1,245 \times 10^{-2}}\right)$$

$$\frac{T-155}{-151} = \operatorname{erf}(0,80) = 0,7421 \quad \text{Função erro de Gauss conforme tabela}$$

$$T - 155 = (0,7421) \cdot (-151)$$

$$T = 155 - 112,0571$$

$$\boxed{T \cong 42,94^{\circ}\text{C}}$$

Utilizando novamente o modelo, obtém-se:

$$\frac{90-155}{42,94-155} = \operatorname{erf}\left(\frac{0,01}{2\sqrt{1,5 \times 10^{-7} \cdot t_2}}\right) \quad \therefore \boxed{t_2 \cong 8,55 \text{ min}}$$

Logo, estimando-se o tempo total de cozimento para o fogão solar proposto:

$$T_{\text{total}} = (17,21 + 8,55) \text{ min}$$

$$\boxed{T_{\text{total}} \cong 25,76 \text{ min}}$$

T_{total} : Tempo total de cozimento

Pelo cálculo de μ_n , tem-se:

$$\boxed{\mu_n = 0,5646}$$

Cálculo de An :

$$An = \frac{2 \operatorname{sen}(\mu n)}{\mu n + \operatorname{sen}(\mu n) \cdot \cos(\mu n)}$$

$$An = \frac{2 \operatorname{sen}(0,5646)}{0,5646 + \operatorname{sen}(0,5646) \cdot \cos(0,5646)}$$

$$An = \frac{(2)(0,53077937)}{(0,5646) + (0,53077937 \cdot 0,844802699)}$$

$$An \cong 1,016635285$$

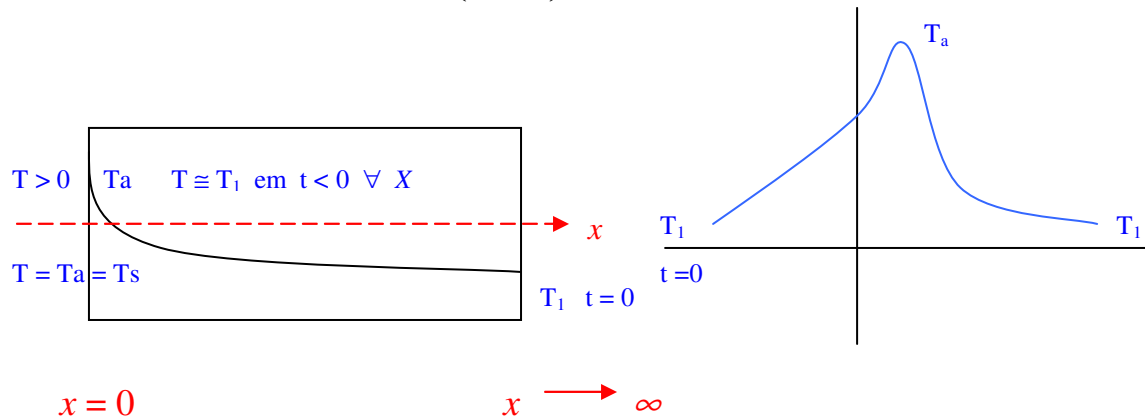
Para $x = 0\text{m}$:

$$\begin{aligned} \frac{T - T_a}{T_1 - T_a} &= \sum_{n=1}^{\infty} An \underbrace{\cos\left(\mu_n \frac{x}{L}\right)}_{1 \text{ (para } x = 0\text{m})} \exp\left(-\mu_n^2 \frac{\alpha t}{L^2}\right) \\ \frac{90 - 155}{4 - 155} &= 0,43 = 1,016635285 \cdot \exp\left(-(0,5646)^2 \cdot \frac{1,5 \times 10^{-7} t}{0,01^2}\right) \\ \ln\left[\exp\left(-(0,5646)^2 \cdot \frac{1,5 \times 10^{-7} t}{0,01^2}\right)\right] &= \ln\left(\frac{0,43}{1,016635285}\right) \\ (-0,31877316) \cdot 1,5 \times 10^{-3} t &= -0,860468504 \\ t &= \frac{0,860468504}{0,47815974 \times 10^{-3}} \\ t &= 1799,541936 \cdot \left(\frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}}\right) \end{aligned}$$

$$t \cong 29,9923 \text{ min}$$

Comparando este tempo de cozimento com o modelo anterior ($T_{\text{total}} \cong 26,76 \text{ min}$), conclui-se que os modelos apresentam estimativas de cozimento de alimento bastante precisas.

Solução: $\frac{T-T_a}{T_1-T_a} = \text{erf}\left(\frac{x}{\sqrt{4\alpha t}}\right)$, placa semi-infinita.



$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (1)$$

□ Condições de contorno (C.C.):

C.C.1 : em $t=0 \longrightarrow T = T_1 \forall x$

C.C.2 : em $x=0 \longrightarrow T = T_a$ para $t > 0$

C.C.3 : $\left\{ \begin{array}{l} T \longrightarrow T_1 \text{ em } x \longrightarrow \infty \\ k \frac{\partial T}{\partial x} \longrightarrow 0 \text{ em } x \longrightarrow \infty \end{array} \right.$

Combinação de variáveis:

$$\eta = \frac{x}{\sqrt{4\alpha t}} \rightarrow f(x,t); \quad \text{solução} \quad T \approx e^{-\eta^2}$$

$$\frac{d\eta}{dx} = \frac{1}{\sqrt{4\alpha t}} = \frac{\eta}{x}; \quad \eta = \frac{x \cdot t^{\frac{1}{2}}}{\sqrt{4\alpha}}$$

$$\frac{d\eta}{dt} = \frac{x \cdot \left(-\frac{1}{2}\right) t^{-\frac{3}{2}}}{\sqrt{4\alpha}} = \frac{-x \cdot t^{-\frac{3}{2}}}{2\sqrt{4\alpha}} = \frac{-x \cdot t^{-1} \cdot t^{-\frac{1}{2}}}{2\sqrt{4\alpha}} = \frac{-x}{2t\sqrt{4\alpha}} = \frac{-\eta}{2t}$$

para a equação (1), temos:

$$\begin{aligned}\frac{\partial T}{\partial t} &= \frac{dT}{d\eta} \cdot \frac{d\eta}{dt} = \frac{dT}{d\eta} \cdot \frac{-\eta}{2t} \Rightarrow \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{-\eta}{2t} \cdot \frac{dT}{d\eta} \quad (2) \\ \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right) \\ \frac{\partial T}{\partial x} &= \frac{dT}{d\eta} \cdot \frac{d\eta}{dx} = \frac{dT}{d\eta} \cdot \frac{1}{\sqrt{4\alpha t}} \Rightarrow \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{1}{\sqrt{4\alpha t}} \cdot \frac{dT}{d\eta} \\ \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} &= \frac{\partial}{\partial \eta} \left[\frac{\partial T}{\partial x} \right] \cdot \frac{d\eta}{dx} = \frac{1}{\sqrt{4\alpha t}} \cdot \frac{d}{d\eta} \left(\frac{1}{\sqrt{4\alpha t}} \cdot \frac{dT}{d\eta} \right) = \frac{1}{\sqrt{4\alpha t}} \cdot \frac{1}{\sqrt{4\alpha t}} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial \eta^2} = \frac{1}{4\alpha t} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial \eta^2} \\ \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} &= \frac{1}{4\alpha t} \cdot \frac{d^2 T}{d\eta^2} \quad (3)\end{aligned}$$

substituindo 2 e 3 em 1:

$$\begin{aligned}-\frac{\eta}{2t} \cdot \frac{dT}{d\eta} &= \alpha \cdot \frac{1}{4\alpha t} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial \eta^2} \Rightarrow \frac{\eta}{2t} \cdot \frac{dT}{d\eta} = -\alpha \cdot \frac{1}{4\alpha t} \cdot \frac{d^2 T}{d\eta^2} \\ -\frac{4t\eta}{2t} \cdot \frac{dT}{d\eta} &= \frac{d^2 T}{d\eta^2} + 2\eta \cdot \frac{dT}{d\eta} = 0 \Rightarrow \frac{d}{d\eta} \left(\frac{dT}{d\eta} \right) = -2\eta \frac{dT}{d\eta} \\ \frac{\frac{d}{d\eta} \left(\frac{dT}{d\eta} \right)}{\frac{dT}{d\eta}} &= -2\eta \Rightarrow \int \frac{d \left(\frac{dT}{d\eta} \right)}{\left(\frac{dT}{d\eta} \right)} = \int -2\eta \cdot d\eta ;\end{aligned}$$

fazendo:

$$\frac{dT}{d\eta} = y$$

$$\int \frac{dy}{y} = \int -2\eta \cdot d\eta \Rightarrow \ln y = -\eta^2 + c_1 ,$$

substituindo:

$$\frac{dT}{d\eta} = y$$

$$\ln\left(\frac{dT}{d\eta}\right) = -\eta^2 + c_1 \quad \Rightarrow \quad \frac{dT}{d\eta} = c_1' \cdot e^{-\eta^2} \quad \Rightarrow \quad dt = c_1' \cdot e^{-\eta^2} \cdot d\eta;$$

integrando:

$$T = c_1' \cdot \int_0^{\eta} e^{-\eta^2} \cdot d\eta + c_2 \quad (4)$$

para $x = 0$; $T = T_a$:

$$\eta = \frac{x}{\sqrt{4\alpha t}} = \frac{0}{\sqrt{4\alpha t}} = 0$$

substituindo na equação (4):

$$T_a = c_1' \cdot \int_0^{\eta=0} e^{-\eta^2} \cdot d\eta + c_2 \quad \Rightarrow \quad T_a = c_2$$

para $t = 0$; $T = T_1 \quad \forall x$

$$\eta = \frac{x}{\sqrt{4\alpha t}} \quad \Rightarrow \quad \eta \rightarrow \infty$$

com $c_2 = T_a$, substituindo $\eta \rightarrow \infty$ para $T = T_1$, na equação 4.

$$T_1 = c_1' \cdot \underbrace{\int_0^{\infty} e^{-\eta^2} \cdot d\eta}_{\frac{\sqrt{\pi}}{2}} + T_a \quad \Rightarrow \quad T_1 = c_1' \cdot \frac{\sqrt{\pi}}{2} + T_a$$

$$c_1' = \frac{(T_1 - T_a)2}{\sqrt{\pi}}$$

portanto, obtém-se:

$$T = \frac{2}{\sqrt{\pi}}(T_1 - T_a) \int e^{-\eta^2} \cdot d\eta + T_a$$

$$T = (T_1 - T_a) \cdot \operatorname{erf}\left(\frac{x}{\sqrt{4\alpha t}}\right) + T_a$$

$$\frac{(T - T_a)}{(T_1 - T_a)} = \operatorname{erf}\left(\frac{x}{\sqrt{4\alpha t}}\right)$$

Pelo método de interpolação linear, estima-se os valores de $\mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4$:

$Bi = \frac{h \cdot L}{K}$	μ_1	μ_2	μ_3	μ_4
0,30	0,5218	3,2341	6,3305	9,4565
0,36	X_1	X_2	X_3	X_4
0,40	0,5932	3,2636	6,3461	9,4670

Calculado: $\mu_1 \cong 0,5646$

Bi	μ_2
0,30	3,2341
0,36	X_2
0,40	3,2636

$$\frac{(0,36 - 0,30)}{(0,40 - 0,3)} = \frac{(x_2 - 3,2341)}{(3,2636 - 3,2341)}$$

$$\frac{(x_2 - 3,2341)}{0,1} = 0,6$$

$$x_2 - 3,2341 = 0,0177$$

$$x_2 = 3,2518$$

Bi	μ_3
0,30	6,3305
0,36	X_3
0,40	6,3461

$$\frac{(0,36 - 0,30)}{(0,40 - 0,30)} = \frac{(x_3 - 6,3305)}{(6,3461 - 6,3305)}$$

$$\frac{(x_3 - 6,3305)}{0,0156} = 0,60$$

$$x_3 - 6,3305 = 0,00936$$

$$x_3 = 6,33986$$

Bi	μ_4
0,30	9,4565
0,36	X_4
0,40	9,4670

$$\frac{(0,36 - 0,30)}{(0,40 - 0,30)} = \frac{(x_4 - 9,4565)}{(9,4670 - 9,4565)}$$

$$\frac{(x_4 - 9,4565)}{0,0156} = 0,60$$

$$x_4 - 9,4565 = 0,0063$$

$$x_4 = 9,4628$$

Cálculo de An:

$$An = \frac{2 \operatorname{sen}(\mu n)}{\mu n + \operatorname{sen}(\mu n) \cdot \cos(\mu n)}$$

n	μ_n	Sen (μ_n)	Cos (μ_n)	An
1	0,5646	05355077937	0,844802699	1,052644827
2	3,2518	-0,109984391	-0,993933314	-0,065445139
3	6,33986	0,056644357	0,998394419	0,17711287
4	9,4628	-0,038012878	-0,999277249	-0,008002049

Portanto:

$$A_1 = \frac{2 \operatorname{sen}(\mu_1)}{\mu_1 + \operatorname{sen}(\mu_1) \cdot \cos(\mu_1)}$$

$$A_1 = \frac{2 \times 0,535077937}{0,5646 + [(0,535077937) \times (0,844802699)]}$$

$$A_1 = \frac{1,070155874}{1,016635285}$$

$$A_1 \cong 1,052644827$$

Para $x = 0m$ (utilizando o 1º termo, $n = 1$):

$$\frac{T - T_a}{T_1 - T_a} = \sum_{n=1}^{\infty} \underbrace{A_n \cos\left(\mu_n \frac{x}{L}\right)}_{1 \text{ (para } x = 0m)} \exp\left(-\mu_n^2 \frac{\alpha t}{L^2}\right)$$

$$\frac{90 - 155}{4 - 155} = 0,43 = 1,0052644827 \cdot \exp\left(- (0,5646)^2 \cdot \frac{1,5 \times 10^{-7} t}{0,01^2}\right)$$

$$\ln\left[\exp\left(- (0,5646)^2 \cdot \frac{1,5 \times 10^{-7} t}{1 \times 10^{-4}}\right)\right] = \ln\left(\frac{0,43}{1,052644827}\right)$$

$$(-0,31877316) \cdot 1,5 \times 10^{-3} t = -0,895275952$$

$$t = \frac{0,895275952}{0,47815974 \times 10^{-3}}$$

$$t = 1872,336538 \cancel{s} \cdot \left(\frac{1 \text{ min}}{60 \cancel{s}}\right)$$

$$t \cong 31,2056 \text{ min}$$

Cálculo de A_2 , A_3 , A_4 :

$$A_2 = \frac{2\text{sen}(\mu_2)}{\mu_2 + \text{sen}(\mu_2) \cdot \cos(\mu_2)}$$

$$A_2 = \frac{2 \times (-0,109984391)}{3,2518 + [(-0,109984391) \times (-0,993933314)]}$$

$$A_2 = \frac{-0,219968782}{3,36111715}$$

$$A_2 \cong -0,065445139$$

$$A_3 = \frac{2\text{sen}(\mu_3)}{\mu_3 + \text{sen}(\mu_3) \cdot \cos(\mu_3)}$$

$$A_3 = \frac{2 \times 0,056644357}{6,33986 + [(0,056644357) \times (0,998394419)]}$$

$$A_3 = \frac{0,113288714}{6,39641341}$$

$$A_3 \cong 0,017711287$$

$$A_4 = \frac{2\text{sen}(\mu_4)}{\mu_4 + \text{sen}(\mu_4) \cdot \cos(\mu_4)}$$

$$A_4 = \frac{2 \times (-0,038012878)}{9,4628 + [(-0,038012878) \times (-0,999277249)]}$$

$$A_4 = -\frac{0,076025756}{9,500785404}$$

$$A_4 \cong -0,008002049$$

Para $x = 0m$ (usando até 4 termos, $n = 4$):

$$\frac{T - T_a}{T_1 - T_a} = \sum_{n=1}^4 \underbrace{A_n \cos\left(\mu_n \frac{x}{L}\right)}_{1 \text{ (para } x = 0m)} \exp\left(-\mu_n^2 \frac{\alpha t'}{L^2}\right)$$

$$\frac{90 - 155}{4 - 155} = 0,43 = \left[(A_1) \cdot \exp\left(-\mu_1^2 \cdot \frac{\alpha t'}{L^2}\right) + (A_2) \cdot \exp\left(-\mu_2^2 \cdot \frac{\alpha t'}{L^2}\right) + (A_3) \cdot \exp\left(-\mu_3^2 \cdot \frac{\alpha t'}{L^2}\right) + (A_4) \cdot \exp\left(-\mu_4^2 \cdot \frac{\alpha t'}{L^2}\right) \right]$$

Substituindo os valores calculados de A_1, A_2, A_3, A_4 e $\mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4$, obtém-se:

$$0,43 = \left[(1,052644827) \cdot \exp\left(- (0,5646^2) \cdot \frac{1,5 \times 10^{-7} \cdot t'}{0,01^2}\right) + (-0,065445139) \cdot \exp\left(- (3,2518^2) \cdot \frac{1,5 \times 10^{-7} t'}{0,01^2}\right) + 0,017711287 \cdot \exp\left(- (6,33986^2) \cdot \frac{1,5 \times 10^{-7} t'}{0,01^2}\right) + (-0,008002049) \cdot \exp\left(- (9,4628^2) \cdot \frac{1,5 \times 10^{-7} t'}{0,01^2}\right) \right]$$

Para resolver a equação, utilizar-se-á o método numérico de Newton-Raphson:

$$t_{i+1} = t_i - \frac{f(t_i)}{f'(t_i)} \quad (A)$$

$$f'(t_i) = \frac{f(t_i + \delta) - f(t_i - \delta)}{[\delta - (-\delta)]}$$

$$f'(t_i) = \frac{f(t_i + \delta) - f(t_i - \delta)}{2\delta} \quad (B)$$

Designando:

(i) $\delta = 0,05$ (é o incremento)

(ii) Critério de convergência adotado:

$$|t_{i+1} - t_i| \leq \varepsilon;$$

onde:

$$\varepsilon = 0,01 \text{ (erro)}$$

Estimativa inicial:

$$i = 0 \quad \rightarrow \quad t_0 = 30 \text{ min} \cdot 60 \text{ seg/1 min}$$

$$t_0 = 1800 \text{ seg}$$

Cálculo de $f(t_0 + \delta)$, $f(t_0 - \delta)$, $f(t_0)$ e $f'(t_0)$:

$$f(t_0 + \delta) = f(1800 + 0,05)$$

$$f(1800 + 0,05) = ?$$

$$t' = 1800,05$$

Substituindo o valor de $t' = 1800,05$ na equação (I), obtém-se:

$$0,43 = \left[(1,052644827) \cdot \exp(-0,86071144) + (-0,065445139) \cdot \exp(-28,55114181) + \right. \\ \left. + 0,017711287 \cdot \exp(-108,5263416) + (-0,008002049) \cdot \exp(-241,7770923) \right] \\ = 0$$

$$\left[(1,052644827) \cdot \exp(-0,86071144) + (-0,065445139) \cdot \exp(-28,55114181) + \right. \\ \left. + 0,017711287 \cdot \exp(-108,5263416) + (-0,008002049) \cdot \exp(-241,7770923) \right] - 0,43 = 0$$

$$0,015122586 = f(1800,05)$$

$$f(t_0 - \delta) = ?$$

$$f(1800 - 0,05) = f(1799,95) = ?$$

Substituindo $t' = 1799,95$ na equação (I):

$$[(1,052644827) \cdot \exp(-0,860663624) + 0 + 0 + 0] - 0,43 = f(1799,95)$$

$$f(1799,95) = 0,44514387 - 0,43$$

$$f(1799,95) = 0,01514387$$

Utilizando a expressão (B) para o cálculo de $f'(t_0) = f'(1800) = ?$

$$f'(1800) = \frac{f(1800,05) - f(1799,95)}{2 \times 0,05}$$

$$f'(1800) = \frac{0,015122586 - 0,01514387}{0,10}$$

$$f'(1800) = -0,00021284$$

$$t_{i+1} = t_i - \frac{f(t_i)}{f'(t_i)} \quad (\text{A})$$

$$t_1 = t_0 - \frac{f(t_0)}{f'(t_0)}$$

$f(1800) = ?$ (substituindo $t' = 1800\text{seg}$ na expressão (I)):

$$[(1,052644827) \cdot \exp(-0,860687532)] - 0,43 = f(1800)$$

$$f(1800) = 0,445133228 - 0,43$$

$$f(1800 = t_0) = 0,015133228$$

Cálculo de t_1 :

$$t_1 = t_0 - \frac{f(t_0)}{f'(t_0)}$$

$$t_1 = 1800 - \frac{0,015133228}{(-0,00021284)}$$

$$t_1 \cong 1871,101428$$

Segue, portanto, o método numérico até atender ao critério de convergência:

$$|t_{i+1} - t_i| < 0,01$$

$$t_2 = t_1 - \frac{f(t_1)}{f'(t_1)}; \quad t_1 \cong 1871,101428 \text{ seg}$$

Substituindo $t_1 = 1871,101428 \text{ seg}$ em (I):

$$f(1871,101428) = [(1,052644827) \cdot \exp(-0,47815974 \times 10^{-3} \times 1871,101428) + \\ + 0 + 0 + 0] - 0,43$$

$$f(1871,101428) = [(1,052644827) \cdot \exp(-0,894685372) - 0,43$$

$$f(1871,101428) = 0,000254023$$

$$f(t_1 + \delta) = f(1871,101428 + 0,05)$$

$$f(1871,151428) = ?$$

Substituindo $t' = 1871,051428$ seg na expressão (I):

$$[(1,052644827) \cdot \exp(-0,47815974 \times 10^{-3} \times 1871,151428) + 0 + 0 + 0] - 0,43 = f(1871,151428)$$

$$f(1871,151428) = 0,000243737$$

$$f(t_1 - \delta) = f(1871,101428 - 0,05)$$

$$f(1871,051428) = ?$$

Substituindo $t' = 1871,051428$ seg na expressão (I):

$$[(1,052644827) \cdot \exp(-0,47815974 \times 10^{-3} \times 1871,051428) + 0 + 0 + 0] - 0,43 = f(1871,051428)$$

$$f(1871,051428) \equiv 0,00026431$$

Portando:

$$t_2 = t_1 - \frac{f(t_1)}{f'(t_1)}$$

$$f'(t_1) = \frac{f(t_1 + \delta) - f(t_1 - \delta)}{2\delta}$$

$$f'(t_1) = \frac{0,000243737 - 0,00026431}{0,1}$$

$$f'(1871,101428) = -0,00020573$$

logo:

$$t_2 = (1871,101428) = 1871,101428 - 0,000254023 / (-0,00020573)$$

$$t_2 = 1871,101428 + 1,234739707$$

$$t_2 = 1872,336168 \text{ seg}$$

$$f(1872,336168 \text{ seg}) = ?$$

$$f(t_2 + \delta) = f(1872,336168 + 0,05)$$

$$f(1872,386168) = ?$$

$$f(t_2 - \delta) = f(1872,336168 - 0,05)$$

$$f(1872,286168) = ?$$

Substituindo na expressão (I):

$$[(1,052644827) \cdot \exp(-0,47815974 \times 10^{-3} \times 1872,336168) + 0 + 0 + 0] - 0,43 =$$

$$f(1872,336168)$$

$$f(1872,336168) \equiv 0,000000075$$

$$f(1872,386168) = [(1,052644827) \cdot \exp(-0,47815974 \times 10^{-3} \times 1872,386168) + 0 + 0 + 0] - 0,43$$

$$f(1872,386168) = -0,000010204$$

$$f(1872,286168) = [(1,052644827) \cdot \exp(-0,47815974 \times 10^{-3} \times 1872,286168) + 0 + 0 + 0] - 0,43$$

$$f(1872,286168) = 0,000010355$$

$$f'(t_2) = \frac{f(1872,386168) - f(1872,286168)}{2 \times 0,05}$$

$$f'(1872,336168) = \frac{-0,000010204 - 0,000010355}{0,1}$$

$$f'(1872,336168) = -0,000020559$$

Portanto:

$$t_3 = t_2 - \frac{f(t_2)}{f'(t_2)}$$

$$t_3 = 1872,336168 - \frac{0,000000075}{(-0,000020559)}$$

$$t_3 \cong 1872,339816 \text{ seg}$$

Atendendo ao critério de convergência:

$$|t_{i+1} - t_i| \leq 0,01$$



$$|t_3 - t_2| = 1872,339816 - 1872,336168$$

$$|t_3 - t_2| \cong 0,003648 < 0,01$$

portanto, o tempo é,

$$t_3 = t' \cong 1872,339816 \text{ seg}$$

8.2. Programa em matlab empregado como auxiliar no cálculo da função erro, com um argumento conhecido, segundo a expansão da série de potências a seguir:

$$\frac{T - T_a}{T_1 - T_a} = \operatorname{erf}\left[\frac{x}{\sqrt{4\alpha t}}\right], \quad \text{com } \alpha = \frac{k}{\rho C_p}$$

Por definição:

$$\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int e^{-u^2} du \quad (*)$$

A solução dada de (*) é uma série. Pode-se mostrar que a função $\operatorname{erf}(z)$ definida acima através de uma integral pode ser expandida em uma série infinita, sendo a função $f(u) = \exp(-u^2)$ uma função continua no intervalo $(-\infty, +\infty)$. Consideremos a série:

$$\operatorname{erf}(Z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left(z - \frac{z^3}{3 \cdot 1!} + \frac{z^5}{5 \cdot 2!} - \frac{z^7}{7 \cdot 3!} + \frac{z^9}{9 \cdot 4!} - \frac{z^{11}}{11 \cdot 5!} + K \right)$$

$$\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1} \cdot z^{(2n-1)}}{(2n-1) \cdot (n-1)!}$$

(Esta equação será deduzida mais tarde)

PROGRAMA EM MATLAB:

→ Function k = erro

% Este programa calcula o valor da função erro através de uma expansão em série de potências segundo Taylor. Deve-se fornecer o valor do número de termos em que se pretende truncar a série, de acordo com o fator de precisão pré-especificado.

format long

A = input (' entre com a quantidade de termos da série truncada:');

B = 2/sqrt (pi);

X = input ('entre com o argumento da função erro:');

→ L (1) = X;

M = Ø;

F (1) = 1;

For i = 1: A - 1

M = M + 1;

F(i + 1) = F(i) * M;

L(i + 1) = L(i) + ((-1) ^ i) * (X ^ (2*i + 1)) / ((2*i + 1) * F(i + 1));

end

k = B * L(A);

Na execução deste programa em ambiente MATLAB, devemos procede da seguinte maneira:

- I. Digitar k = erro;
- II. O programa pede a quantidade de termos em que se pretende truncar a série. Digitar o valor pretendido;
- III. O programa pede, em seguida, o valor do argumento da função erro. Digitar o valor pretendido;

- IV. Como resposta, o programa gera a variável k , que armazena o valor da função erro para o argumento especificado, cuja precisão dependerá do número de termos da série trunca.

Dedução Da Função Erro De Gauss:

$$\frac{T - T_a}{T_1 - T_a} = \operatorname{erf} \left[\frac{x}{(\sqrt{4\alpha t})^{1/2}} \right], \quad \text{onde:} \quad \alpha = \frac{k}{\rho C_p}$$

A função $\operatorname{erf}(z)$ é definida através de uma integral que pode ser expandida em uma série infinita, sendo a função $f(u) = \exp(-u^2)$ uma função contínua no intervalo $(-\infty, +\infty)$.

Considerando:

$$\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \left(z - \frac{z^3}{3 \cdot 1!} + \frac{z^5}{5 \cdot 2!} - \frac{z^7}{7 \cdot 3!} + \frac{z^9}{9 \cdot 4!} + \Lambda \right) =$$

$$\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1} \cdot z^{(2n-1)}}{(2n-1) \cdot (n-1)!}$$

Por definição:

$$\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \int_0^z e^{-u} du$$

Fazendo o desenvolvimento da função erro em série de potências:

Expandindo a função $f(x) = \exp(-x^2)$ em uma série de potências e utilizando a definição de série de Taylor, temos:

$$f(x) = f(x_0) + f'(x_0) \cdot (x - x_0) + \frac{f''(x_0) \cdot (x - x_0)^2}{2!} + \Lambda = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{f^{(n)}(x_0) \cdot (x - x_0)^n}{n!}$$

Logo:

$$f(x) = e^{-x^2} \cdot (-2x)$$

$$f''(x) = e^{-x^2} \cdot (-2x)^2 - 2 \cdot e^{-x^2}$$

$$f'''(x) = e^{-x^2} \cdot (-2x)^3 + 2 \cdot (-2x) \cdot (-2) \cdot e^{-x^2} - 2e^{-x^2} \cdot (-2x) = e^{-x^2} \cdot (-2x)^3 + 12xe^{-x^2}$$

$$\begin{aligned} f^{iv}(x) &= e^{-x^2} \cdot (-2x)^4 + 3 \cdot (-2x) \cdot (-2) \cdot e^{-x^2} + 12e^{-x^2} + 12xe^{-x^2} \cdot (-2x) = \\ &= e^{-x^2} \cdot (-2x)^4 + 12xe^{-x^2} - 48x^2e^{-x^2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f^v(x) &= e^{-x^2} \cdot (-2x)^5 + 4 \cdot (-2x)^3 \cdot (-2) \cdot e^{-x^2} + 12e^{-x^2} \cdot (-2x) - 96xe^{-x^2} - 48x^2e^{-x^2} \cdot (-2x) = \\ &= e^{-x^2} \cdot (-2x)^5 - 120xe^{-x^2} + 180x^3e^{-x^2} \end{aligned}$$

A expansão de uma função por série de Taylor é feita em torno de um certo ponto da abscissa x_0 . Supondo que $x_0 = 0$, temos que:

$$f(x_0) = f(0) = 1$$

$$f'(x_0) = f'(0) = 0$$

$$f''(x_0) = f''(0) = -2$$

$$f'''(x_0) = f'''(0) = 0$$

$$f^{iv}(x_0) = f^{iv}(0) = 12$$

$$f^{(v)}(x_0) = f^{(v)}(0) = 0; \dots$$

Logo:

$$f(x) = e^{-x^2} = 1 + 0 - \frac{2x^2}{2!} + 0 - \frac{12x^4}{4!} + 0 - \Lambda$$

$$f(x) = 1 - \frac{2x^2}{2!} + \frac{12x^4}{4!} + \Lambda$$

$$\int f(x)dx = \int \left(1 - \frac{2x^2}{2!} + \frac{12x^4}{4!} + \Lambda \right) dx$$

$$\int f(x)dx = x - \frac{2x^3}{3 \cdot 2!} + \frac{12x^5}{5 \cdot 4!} + \Lambda$$

$$\int f(x)dx = x - \frac{x^3}{3 \cdot 1!} + \frac{x^5}{5 \cdot 2!} + \Lambda$$

Então, pode-se mostrar que:

$$\int e^{-x^2} dx = x - \frac{x^3}{3 \cdot 1!} + \frac{x^5}{5 \cdot 2!} - \frac{x^7}{7 \cdot 3!} + \frac{x^9}{9 \cdot 4!} - \frac{x^{11}}{11 \cdot 5!} + K = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1} \cdot x^{(2n-1)}}{(2n-1) \cdot (n-1)!}$$

Pela definição da função:

$$\operatorname{erf}(Z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-u^2} du, \quad \text{temos:}$$

$$\operatorname{erf}(Z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left(u - \frac{u^3}{3 \cdot 1!} + \frac{u^5}{5 \cdot 2!} - \frac{u^7}{7 \cdot 3!} + \frac{u^9}{9 \cdot 4!} - \frac{u^{11}}{11 \cdot 5!} + K \right) \Bigg|_0^z$$

$$\operatorname{erf}(Z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left(z - \frac{z^3}{3 \cdot 1!} + \frac{z^5}{5 \cdot 2!} - \frac{z^7}{7 \cdot 3!} + \frac{z^9}{9 \cdot 4!} - \frac{z^{11}}{11 \cdot 5!} + K \right)$$

Observação: Esta equação pode ser encontrada em vários livros de cálculo.

Por exemplo, SPIEGEL, M.R., Manual de fórmulas, métodos e tabela de matemática.

Apêndice I

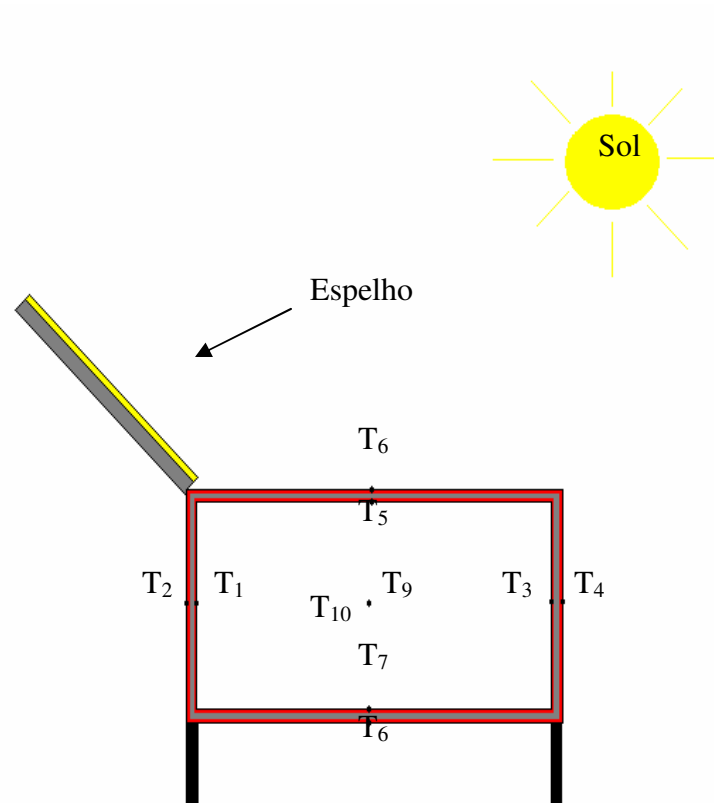


Figura – Esquema da vista lateral do fogão solar proposto com as suas diferentes temperaturas.

- T_9 : centro interno
- T_{10} : centro externo
- Material compósito constituído de gesso + isopor para diminuir as perdas térmicas.
- $K_{\text{material compósito}} = 0,3 \text{ W.m}^{-1}\text{°C}^{-1}$ ∴ Fornecido pelo LES/UFRN (Laboratório de Energia Solar).
- Lei de Fourier de condução de calor:

$$q = -K \cdot \frac{dT}{dx} \quad ; \quad q \equiv \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

Onde:

q = Fluxo de calor

Data do Experimento: 31/10/2006

Experimento com Pizza (460 g)

T (horas)	T (°C)
10:50	17,6
10:53	22,4
10:57	24,3
11:00	25,5
11:15	28,3
11:20	31,5
11:33	40,0
11:00	63,0

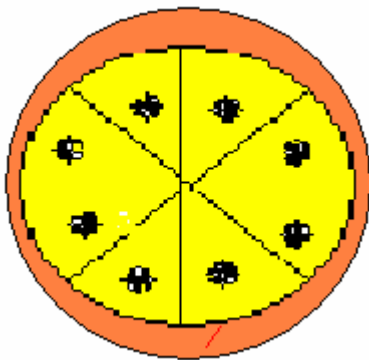


Figura esboço da pizza de 460 g utilizada.

- Utilizou-se um prato de vidro como suporte da pizza, assim, não contribuindo com a condução de calor.
- De 10:53 as 11:00 horas houve nebulosidade no clima.

Experimento para o cozimento da pizza de frango utilizando o fogão solar tipo caixa:

Data: 12/04/2007

Massa da pizza = 400 g

Temperatura ambiente (9:32 h) = 34 °C

t (horas)	9:33	9:38	9:55	10:10	10:16
T (°C)	35	36	53	58	61

→ Fim do cozimento



Figura 7.11. Pizza utilizada no teste.

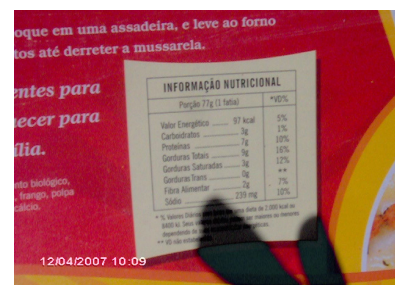


Figura 7.12. Propriedades organolépticas da pizza.



Figura 7.13. Pizza no interior do fogão tipo caixa, início do experimento

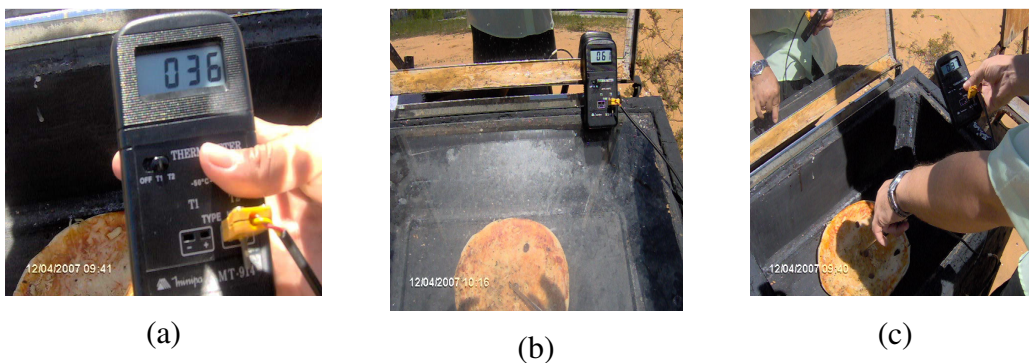


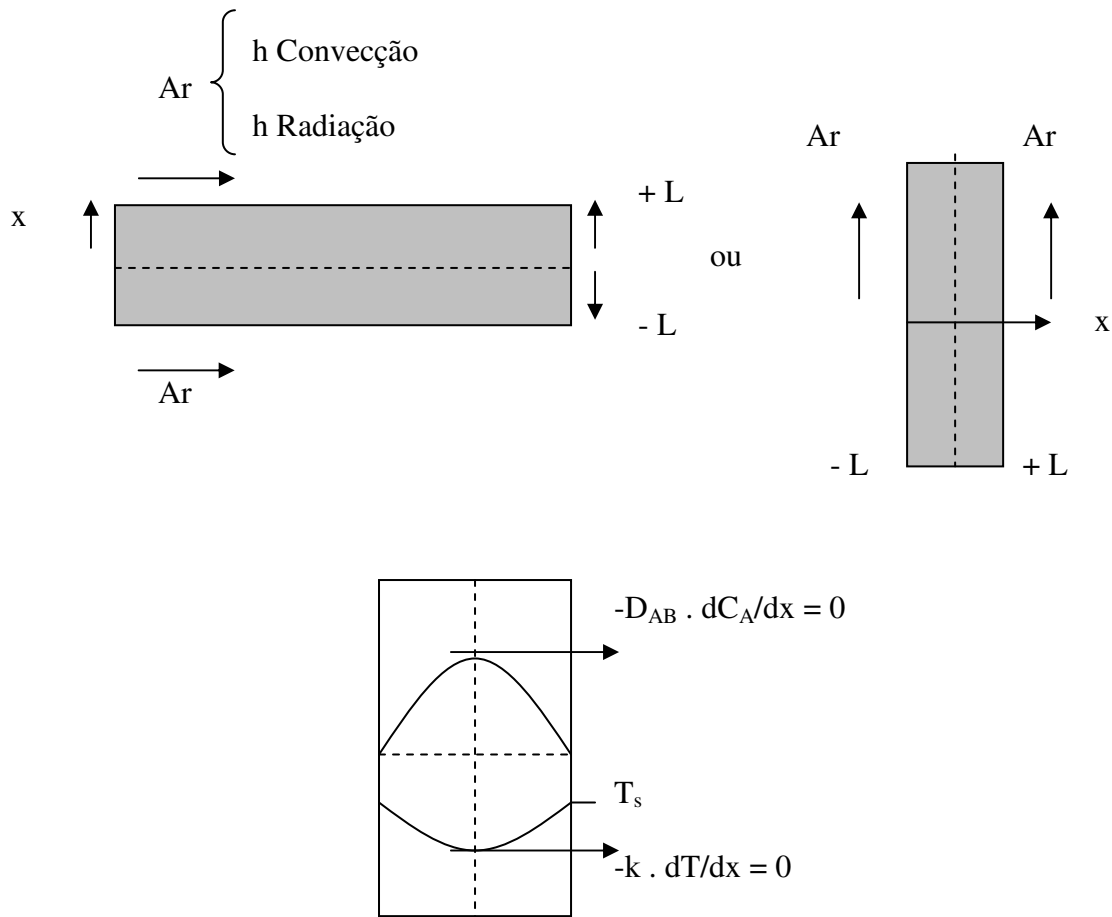
Figura 7.14. As imagens (a), (b) e (c) mostra as temperaturas colhidas durante a realização do experimento.



Figura 7.15. Fogão solar proposto (LMHES) UFRN.

Colocação e análise da difusão de matéria (água) e energia na secagem solar da pizza.

Seja uma fatia de pizza que é secada por convecção e radiação solar.



Considerando somente a difusão da água no alimento e a condução de energia no mesmo, as equações básicas são:

Difusão da Matéria

$$\boxed{\frac{\partial C_A}{\partial t} = D_{AB} \frac{\partial^2 C_A}{\partial x^2}} \quad C_A = f(x; t) \quad (I)$$

Difusão de energia (calor no sólido)

$$\boxed{\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}} \quad T = f(x; t) \quad (II)$$

Para a equação I são necessárias três condições de contorno

Para a equação II são necessárias três condições de contorno

As condições de contorno para a equação I são:

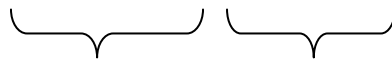
$$\text{Para } t < 0^+ \quad C_A = C_{A0} \quad (III)$$

$$\text{Em } x = 0 \quad \therefore \quad -D_{AB} \cdot dC_A/dx = 0 \quad (IV)$$



Sem fluxo de matéria (ponto de máximo ou mínimo)

$$\text{Em } x = L \quad \therefore \quad -D_{AB} \cdot dC_A/dx = kM (y_s - y) \quad (V)$$



Água que sai do alimento. Água evaporada que “entra” no ar.

As condições de contorno para a equação II são:

$$\text{Para } t < 0^+ \quad T = T_0 \quad (IV)$$

$$\text{Em } x = 0 \quad -k \cdot dT/dx = 0$$

$$\text{Em } x = L$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=L} = h_{conv}(T_s - T_\infty) + h_{Rad} \cdot (T_s - T_\infty) + \Delta H \cdot kM(y_s - y) \quad (VIII)$$

Data do Experimento: 05/12/2006

Tempo (h)	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆	T ₇	T ₈	T ₉	T ₁₀
12:50	41,1°	35,6°	41,5°	35,1°	40,0°	34,7°	42,2°	37,4°	38,9°	37,6°
13:05	38,8°	33,0°	39,0°	35,1°	36,4°	35,0°	40,0°	34,0°	36,0°	33,0°
13:20	41,2°	31,0°	36,0°	32,7°	33,9°	31,4°	37,5°	33,3°	36,0°	32,6°
13:35	39,1°	37,5°	38,7°	40,1°	37,5°	37,7°	43,3°	36,5°	40,0°	34,9°
13:50	41,0°	36,9°	38,7°	38,6°	36,7°	38,8°	40,6°	37,1°	37,3°	37,0°
14:05	39,0°	37,2°	39,1°	40,0°	36,5°	41,2°	39,0°	36,9°	35,2°	35,0°

$$\Delta X_{1 \rightarrow 2} = 6,5 \text{ cm} = 6,5 \times 10^{-2} \text{ m}$$

$$\Delta X_{3 \rightarrow 4} = 3,8 \text{ cm} = 3,8 \times 10^{-2} \text{ m}$$

$$\Delta X_{5 \rightarrow 6} = 2,5 \text{ cm} = 2,5 \times 10^{-2} \text{ m}$$

$$\Delta X_{7 \rightarrow 8} = 2,5 \text{ cm} = 2,5 \times 10^{-2} \text{ m}$$

Cálculo das Temperaturas Médias ($\bar{T}_i$):

$$\bar{T}_i = \frac{\sum T_i}{n}$$

Onde, n corresponde ao numero de termos.

$\bar{T}_1 = 40,03^\circ C$	$\bar{T}_6 \cong 36,47^\circ C$
$\bar{T}_2 = 35,2^\circ C$	$\bar{T}_7 = 40,43^\circ C$
$\bar{T}_3 = 38,83^\circ C$	$\bar{T}_8 = 35,87^\circ C$
$\bar{T}_4 = 36,93^\circ C$	$\bar{T}_9 = 37,23^\circ C$
$\bar{T}_5 = 36,83^\circ C$	$\bar{T}_{10} = 35,02^\circ C$

Data do Experimento: 12/12/2006

Tempo (h)	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆	T ₇	T ₈	T ₉	T ₁₀
10:55	43,9°	43,0°	57,1°	41,7°	50,7°	41,3°	50,7°	40,6°	45,9°	40,3°
11:10	47,2°	40,6°	49,0°	39,7°	43,5°	37,7°	44,3°	35,2°	43,3°	39,7°
11:25	44,1°	38,9°	56,6°	37,7°	48,7°	36,6°	57,8°	36,0°	52,3°	36,6°
11:40	45,0°	39,6°	51,6°	39,4°	48,2°	37,3°	50,6°	37,1°	50,9°	36,6°
11:55	48,4°	41,0°	61,3°	42,4°	50,0°	37,5°	54,0°	36,6°	52,0°	36,0°
12:10	49,0°	39,2°	58,3°	39,8°	54,2°	39,9°	53,0°	39,5°	54,2°	38,5°
12:25	49,0°	38,2°	51,0°	40,5°	46,4°	39,5°	52,6°	38,8°	53,7°	37,7°

Cálculo das Temperaturas Médias ($\bar{T}_i$):

$$\bar{T}_i = \frac{\sum T_i}{n}$$

$\bar{T}_1 = 46,7^\circ C$	$\bar{T}_6 = 38,54^\circ C$
$\bar{T}_2 = 40,07^\circ C$	$\bar{T}_7 = 51,77^\circ C$
$\bar{T}_3 = 54,98^\circ C$	$\bar{T}_8 = 37,8^\circ C$
$\bar{T}_4 = 40,17^\circ C$	$\bar{T}_9 = 50,33^\circ C$
$\bar{T}_5 = 48,81^\circ C$	$\bar{T}_{10} = 37,91^\circ C$

Capítulo 9

Viabilidade de Execução

9. Viabilidade de execução

O desempenho do fogão solar tipo caixa quente com espelhos planos é muito bom, pois a cada inverno extremo duas refeições podem ser preparadas em dias frios, quando comparado com fogões solares parabólicos em que é difícil cozinhar uma refeição em dias de frio extremo.

O fogão solar tipo caixa com três espelhos planos não requer nenhuma mudança de posição por 3 horas quando comparado ao fogão solar parabólico que requer a mudança de posição em direção ao Sol a cada hora; o tempo requerido para cozimento de algum prato não excede 3 horas. O período de amortização do custo do equipamento varia entre 1,45 e 3,86 anos dependendo do combustível substituído e está em ordem crescente com relação aos seguintes combustíveis: lenha, hulha, eletricidade, querosene. A vida estimada é em torno de 15 anos. Por essa razão, o uso do fogão solar é econômico. O uso deste novo fogão solar ajudaria na conservação de combustíveis convencionais, tanto a lenha (árvores), adubo e lixo orgânico nas áreas rurais do Brasil e mais especificamente do Rio Grande do Norte onde a incidência solar é bastante relevante GLP, querosene, eletricidade e hulhas nos distritos urbanos. A conservação da lenha das árvores ajuda na preservação dos ecossistemas, o adubo poderia ser usado como fertilizante que poderia auxiliar no aumento da produção de produtos agrícolas. Além disso, o uso do fogão solar resulta na redução da liberação de CO₂ no meio ambiente; tudo isso gera uma subsistência melhor para as comunidades carentes do RN.

Capítulo 10

Cronograma

10. Cronograma

Na Tabela 9.1 é apresentado o cronograma para realização desse projeto.

Tabela 9.1. Calendário de atividades.

Período	Atividades
De Outubro de 2005 a Fevereiro de 2006	Estudos e Pesquisas Bibliográficas para a Realização da Proposta de Mestrado
De Fevereiro de 2006 a Abril de 2007	Traduções de Artigos, Livros e Revistas científicas. Desenvolvimento da Proposta de Mestrado
Abril de 2007	Conclusão dos Estudos Teóricos Defesa da Proposta de Mestrado Início dos Procedimentos Experimentais
De Abril à Julho de 2007	Conclusão dos Testes Experimentais
Julho de 2007	Qualificação e Defesa da Dissertação

REFERÊNCIAS

- A. Kay, M. GRÄTZEL, J. Phys. Chem. 97, 6272 (1993).
- ALGIFRI, A.H., Al-Towaie, H.A., 2001. Efficient orientation impacts of box-type solar cooker on the cooker performance. Solar Energy 70 (2), 165–170.
- AMOROSO, N., BALLADIN, D.A., HEADLEY, O.St.C., MCDOOM, I.A., Parasram, A., Rampersad, K., Shakeer, S., 1998. Introduction of solar energy devices to secondary schools as teaching aids. Solar Energy 64 (1–3), 79–86.
- B. O'Regan, M. Grätzel, Nature 353, 737-739 (1991).
- BALZAR, A., STUMPF, P., ECKHOFF, S., ACKERMANN, H., GRUPP, M., 1996. A solar cooker using vacuum-tube collectors with integrated heat pipes. Solar Energy 58 (1–3), 63–68.
- BEYER, H. G., PEREIRA, E. B., MARTINS, F. R., ABREU, S. L., COLLE, S., PEREZ, R., SCHILLINGS, C., MANNSTEIN, H., MEYER, R.. Assessing satellite derived irradiance information for South America within the UNEP resource assessment project SWERA. Proceedings of 5th ISES European Solar Conference in Freiburg, Germany, September, 2004.
- BEZERRA, A.M., Energia Solar: Aquecedores de Água, Editora Universitária-UFPb, João Pessoa, 1986.
- BEZERRA, J.M. Análise de um Sistema Alternativo para Aquecimento de água por Energia Solar, Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal/RN, 1999.
- BIERMANN, E., GRUPP, M., PALMER, R., 1999. Solar cooker acceptance in south Africa: results of a comparative fieldtest. Solar Energy 66 (6), 401–407.
- BIRD, R. B., STEWART, W. E. And LIGHTFOOT, E. N. Transport phenomena, Wiley, New York. (1960).
- CADENA, C., SARAVIA, L., 2001. Análisis del comportamiento térmico de absorbedores de aluminio empleados en cocinas solares con concentración. Avances em Energias Renovables y Medio Ambiente, ASADES, 5, 2, 08.121 – 126.
- CHAUDHURI, T.K., PHILIP, S.K., MISTRY, H.M., 1997. Performance testing of a concentrating type community solar cooker. In: Proceedings of the Third

- International Conference on Sola Cookers, Solar Cooker International (USA). Saradayala Press, India, p. 158.
- CLARK, J., 1996. Solar powered/multiple fuel cooking device. *Solar Energy* 57 (3), X.
- ESCOLA Cooperativa Vale (S.Cosme) e Departamento de Física, Universidade de Aveiro. fazer uma célula fotovoltaica - Manuel Azevedo e António Cunha.
- FUNK, P.A., LARSON, D.L., 1998. Parametric model of solar cooker performance. *Solar Energy* 62 (1), 63–68.
- FUNK, P.A., 2000. Evaluating the international standard procedure for testing solar cookers and reporting performance. *Solar Energy* 68, 1–7.
- G.P. SMESTAD, M. GRÄTZEL, J. CHEM. Educ. 75, 752 (1998).
- GOLDEMBERG, J., 1998. Energia, meio ambiente e desenvolvimento. São Paulo: EDUSP, Brazil.
- GRUPP, M.T., MERKLE, M., OWEN-JONES, 1994. Deuxième essai international de cuiseurs solaires. In: *Systèmes solaires*, vol. 104, pp. 33-52.
- HABEEBULLAH, M.B., KHALIFA, A.M., OLWI, I., 1995. The oven receiver: an approach toward the revival of concentrating solar cookers. *Solar Energy* 54 (4), 227–237.
- HELIOCLIM – “Providing Information on Solar Radiation”. European Solar Radiation Atlas. Available from www.helioclim.net/esra/index.html, 2004.
- INCROPERA, F. P. E DE WITT, D. P. Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa, Livros Técnicos e Científicos, Rio de Janeiro. (1996).
- IPCC, 2001. Climate Change 2001 (3 vols). United Nations Intergovernmental Panel in Climate Change. Cambridge University Press, UK. (available from www.ipcc.ch).
- KOTAS, T.J., 1990. Exergy based criteria of performance. In: Gëo_gëus_, Y.A., € Oztëurk, A. (Eds.), *Proceedings of the Workshop on Second Law of Thermodynamics*, Erciyes University, Kayseri, Turkey, pp. (I) 21–27.
- MARTINS, F. R., PEREIRA, E. B., ABREU, S. L., BEYER, H. G., COLLE, S., PEREZ, R., HEINEMANN, D.. Cross validation of satellite radiation transfer models during SWERA project in Brazil. *Proceedings of ISES Solar World Congress 2003-Solar Energy for Sustainable Future in Goteborg, Sweden, June 2003*.
- MARTINS, F. R. Influência do processo de determinação da cobertura de nuvens e dos aerossóis de queimada no modelo físico de radiação BRASIL-SR, Tese de

- doutoramento, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 330pp (2001).
- MULLICK, S.C., Kandpal, T.C., Kumar, S., 1996. Testing of boxtype solar cooker: second figure of merit F2 and its variation with load and number of pots. *Solar Energy* 57 (5), 409–413.
- NYAHORO, P.K., Johnson, R.R., Edwards, J., 1997. Simulated performance of thermal storage in a solar cooker. *Solar Energy* 59 (1–3), 11–17.
- PEREIRA, E. B., Martins, F. R., Abreu, S. L., Couto, P., Stuhlmann, R., Colle, S. Effects of burning of biomass on satellite estimations of solar irradiation in Brazil. *Solar Energy*, 68, 1, 91-107. January, 2000.
- PETELA, R., 2003. Exergy of undiluted thermal radiation. *Solar Energy* 74, 469–488.
- SARAVIA, L.R., CADENA, C., Caso, R., FERNÁNDEZ, C., 1999. Cocinas solares comunales com concentrador y acumulador sólido. *Energías Renovables y Medio Ambiente*, ASADES, 6, 7-16.
- SISSOM, L. E. e PITTS, D. R. Fenômenos de transporte, Guanabara, Rio de Janeiro. (1979).
- SOUZA, L. G. M. “Tese de Doutorado”, Viabilidades Térmicas, econômicas e de materiais na utilização de tubos de PVC, como elementos absorvedores em coletores de um sistema de aquecimento de água por energia solar, PDCM-2002 Natal-RN.
- SOUZA, L.G.M., Fogão Solar Modulado para Aplicação em Camping e Comunidades Rurais, CONEM-2004, Belém-Pa.
- SOUZA, L.G.M., Coletor Solar não Convencional, de Baixo Custo, Composto por Múltiplos Tubos Absorvedores de PVC, CONEM-2004, Belém-Pa.
- SOUZA, L.G.M., Análise Comparativa entre Coletor Solar Plano Convencional e Coletor Solar Alternativo Composto por Múltiplos Tubos de PVC, CONEM-2004, Belém-Pa.
- SOUZA, L.G.M. A Importância da Energia Solar como Fonte Alternativa e o Desenvolvimento de um Instrumento para medir Radiação Solar Global, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 70 p., Natal, 1987.
- SPIEGEL, M.R. , Manual de fórmulas, métodos e tabela de matemática.

- SWISHER, J., SWISHER, M.B., SWISHER, W., 1996. Rotary cooker/smoker. Solar Energy 57 (3), IV.**
- SUHARTA, H., ABDULLAH, K., SAYIGH, A., 1998. The solar oven: development and field-testing of user-made designs in Indonesia. Solar Energy 64 (4–6), 121–132.**
- ÜLTANIR, M., 1994. Potential of new and renewable energy sources in long-term utilisation for Turkish rural areas. Proceedings of AGENG 94, 29th August–1st September, Milano, Italy, pp. 822–828.**

Anexos:**B.2 - Função Erro de Gauss²**

w	erf w	w	erf w	w	erf w
0,00	0,00000	0,36	0,38933	1,04	0,85865
0,02	0,02256	0,38	0,40901	1,08	0,87333
0,04	0,04511	0,40	0,42839	1,12	0,88679
0,06	0,06762	0,44	0,46622	1,16	0,89910
0,08	0,09008	0,48	0,50275	1,20	0,91031
0,10	0,11246	0,52	0,53790	1,30	0,93401
0,12	0,13476	0,56	0,57162	1,40	0,95228
0,14	0,15695	0,60	0,60386	1,50	0,966611
0,16	0,17901	0,64	0,63459	1,60	0,97635
0,18	0,20094	0,68	0,66378	1,70	0,98379
0,20	0,22270	0,72	0,69143	1,80	0,98909
0,22	0,24430	0,76	0,71754	1,90	0,99279
0,24	0,26570	0,80	0,74210	2,00	0,99532
0,26	0,28690	0,84	0,76514	2,20	0,99814
0,28	0,30788	0,88	0,78669	2,40	0,99931
0,30	0,32863	0,92	0,80677	2,60	0,99976
0,32	0,34913	0,96	0,82542	2,80	0,99992
0,34	0,36936	1,00	0,84270	3,00	0,99998

² A função erro de Gauss é definida da seguinte forma

$$\operatorname{erf} w = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^w e^{-v^2} dv$$

A função erro complementar é definida pela relação

$$\operatorname{erfc} w \equiv 1 - \operatorname{erf} w$$

B.3 – As quatro primeiras raízes da equação transcendental, $\xi_n \operatorname{tg} \xi_n = Bi$, para a Condução Térmica em Regime Transiente em uma Parede Plana

$Bi = \frac{hL}{k}$	ξ_1	ξ_2	ξ_3	ξ_4
0	0	3,1416	6,2832	9,4248
0,001	0,0316	3,1419	6,2833	9,4249
0,002	0,0447	3,1422	6,2835	9,4250
0,004	0,0632	3,1429	6,2838	9,4252
0,006	0,0774	3,1435	6,2841	9,4254
0,008	0,0893	3,1441	6,2845	9,4256
0,01	0,0998	3,1448	6,2848	9,4258
0,02	0,1410	3,1479	6,2864	9,4269
0,04	0,1987	3,1543	6,2895	9,4290
0,06	0,2425	3,1606	6,2927	9,4311
0,08	0,2791	3,1668	6,2959	9,4333
0,1	0,3111	3,1731	6,2991	9,4354
0,2	0,4328	3,2039	6,3148	9,4459
0,3	0,5218	3,2341	6,3305	9,4565
0,4	0,5932	3,2636	6,3461	9,4670
0,5	0,6533	3,2923	6,3616	9,4775
0,6	0,7051	3,3204	6,3770	9,4879
0,7	0,7506	3,3477	6,3923	9,4983
0,8	0,7910	3,3744	6,4074	9,5087
0,9	0,8274	3,4003	6,4224	9,5190
1,0	0,8603	3,4256	6,4373	9,5293
1,5	0,9882	3,5422	6,5097	9,5801
2,0	1,0769	3,6436	6,5783	9,6296
3,0	1,1925	3,8088	6,7040	9,7240
4,0	1,2646	3,9352	6,8140	9,8119

5,0	1,3138	3,0336	6,9096	9,8928
6,0	1,3496	4,1116	6,9924	10,9667
7,0	1,3766	4,1746	7,0640	10,0339
8,0	1,3978	4,2264	7,1263	10,0949
9,0	1,4149	4,2694	7,1806	10,1502
10,0	1,4289	4,3058	7,2281	10,2003
15,0	1,4729	4,4255	7,3959	10,3898
20,0	1,4961	4,4915	7,4954	10,5117
30,0	1,5202	4,5615	7,6057	10,6543
40,0	1,5325	4,5979	7,6647	10,7334
50,0	1,5400	4,6202	7,7012	10,7832
60,0	1,5451	4,6353	7,7259	10,8172
80,0	1,5514	4,6543	7,7573	10,8606
100,0	1,5552	4,6658	7,7764	10,8871
<i>x</i>	1,5708	4,7124	7,8540	10,9956
