

CONSTRUÇÃO, ANÁLISE E TESTES DE 4 PROTÓTIPOS DE FOGÕES SOLARES

Paulo Cesar da Costa Pinheiro – Pinheiro@demec.ufmg.br
Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Mecânica

2.4 Coletores de concentração e fogões solares

Resumo. *Os fogões solares são uma alternativa para a cocção, pasteurização de leite e purificação de água. Este artigo descreve a construção e resultados operacionais de 4 fogões solares dos tipos estufa e refletor. O fogões solares do tipo concentradores se mostraram eficientes para a cocção, mas não de uso prático. É apresentada também uma proposta de metodologia de ensaios de fogões solares.*

Palavras-chave: *Fogão Solar, Energia Solar, Concentradores, Fontes Alternativas*

1. INTRODUÇÃO

O uso do fogo está diretamente relacionado com a existência da raça humana. O consumo de alimentos cozidos é primordial para o ser humano, e a forma mais comum de cocção é a combustão. Assim, o crescimento da população humana é acompanhado do aumento de consumo de alimentos, e por consequência um aumento do consumo de combustível para cocção. O suprimento de energia para cocção é necessário para o bem estar da população, e o fogão solar pode ser uma opção de cocção para uma certa parcela da população.

Na maior parte dos países pobres do mundo, a lenha é o principal combustível da cocção. No Brasil, cerca de 94% das residências possuem fogões a GLP, o que ocasiona uma grande demanda deste combustível. Somente uma pequena parcela da população brasileira usa exclusivamente a lenha para a cocção. O aumento do preço do petróleo e dos seus derivados, está levando parte da população pobre brasileira a retornar ao uso dos fogões a lenha. O uso de energia solar para cocção, diminui a demanda de combustível no setor, economizando combustíveis fósseis e lenha.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os fogões solares estão presentes na literatura técnica desde o século XVIII. O pioneiro dos fogões solares foi o suíço Horace de Saussure que construiu em 1767 um fogão tipo estufa capaz de atingir cerca de 90°C. Em 1830 o astrônomo John Herschel usou fogões solares em sua expedição na África do Sul. Em 1870 Augustine Mouchot desenvolveu para a Legião Francesa um fogão solar portátil capaz de assar 500 g de pão em 45 min ou 1 kg de batatas em uma hora. Em 1878 William A. Adams (Bombaim, Índia) desenvolveu um fogão concentrador que usava espelhos planos montados na forma de uma pirâmide invertida de 8 lados, que concentrava a radiação sobre um forno cilíndrico. Este forno podia cozinhar de 6 kg em 4 a 5 horas. Este modelo é popular ainda hoje.

O fogão solar tem sido objeto de estudo de vários pesquisadores em todo mundo, sobretudo devido ao impacto do uso da lenha na cocção sobre o meio ambiente. Na China e no Tibet o fogão solar é um sucesso comercial, existindo hoje cerca de 300.000 fogões solares em uso. Na China são utilizados fogões concentradores com espelhos de vidro com área 2 m², capazes de ferver 1 litro de água em 20 minutos sob uma boa insolação. Estes fogões custam cerca de US\$ 20,00.

Existem três tipos básicos de fogões solares.

- 1- Concentradores
- 2- Estufa
- 3- Sistema com coletor solar separado da unidade de cozimento.

Tabela 1. Classificação dos Fogões Solares

Concentrador	Estufa	Indireto
Radiação Descendente Lente de água Lente Fresnel Domo multilente Refletor Cônico Bernard	Sem Espelho Tipo Saussurs - Tipo Chinês - Tipo Vaughen - Tipo Brace Tipo Herschles	Tipo Whiller Tipo Chines Tipo Stam Tipo Swet Tipo Fraber Tipo CPC Winston
Radiação Ascendente Esférico Fresnel Cilindro parabólico Espelho Plano Parabólico - Desmontável - Assimétrico - Foco Fundo - Foco Raso	Com Espelhos 1 Espelho 2 Espelhos 3 Espelhos 4 Espelhos >4 Espelhos	Concept XII Tipos Químicos Biogas Hidrogênio Solar Aquecedor Solar

2.1 Fogões Solares Concentradores

Os fogões solares concentradores utilizam um dispositivo ótico (refletor ou lente) entre a fonte de radiação (sol) e a superfície absorvedora. A área da superfície absorvedora é menor do que a área do dispositivo de captação da energia solar, de modo a aumentar a intensidade energética. A razão entre a área de coleta e a área do absorvedor é a chamada razão de concentração geométrica, e pode variar de 10 a até centenas nos fogões concentradores. Assim, é possível alcançar no foco temperaturas superiores a 400°C. Outra característica dos concentradores solares é a razão de concentração ótica, que leva em conta as características óticas da superfície coletora e da superfície absorvedora (respectivamente refletividade e absorvidade). A superfície refletora pode apresentar diversas formas: forma parabólica, semi-esférica, cilindro-parabólica, cônica, tronco-cônica, paraboloidal e tipo V. A panela de cocção deve ter fundo negro para absorver melhor a radiação solar.

Os fogões concentradores são os fogões solares que apresentam as maiores potências e menores tempos de cozimento. A grande desvantagem destes equipamentos é que funcionam somente com a radiação direta, devendo estar corretamente orientados para o sol para o funcionamento correto. A orientação incorreta ou a presença de nuvens podem reduzir bastante a eficiência do fogão concentrador.

O projeto da superfície refletora de um fogão solar do tipo concentrador deve produzir uma razão de concentração adequada ao uso do fogão. Além disto, quanto maior o ângulo de aceite, menor a necessidade de orientação do fogão solar.

O material utilizado na superfície refletora deve garantir um acabamento o mais liso e especular possível, acompanhar a forma da superfície refletora e ser economicamente viável. As superfícies refletoras são obtidas com revestimentos de folha de alumínio polido, plástico aluminizado, alumínio anodizado, chapa de bronze niquelada, etc. O papel alumínio é uma boa solução do ponto de vista econômico. Ele possui uma alta refletividade e um baixo coeficiente de absorção da radiação

solar. Entretanto, devido a sua fragilidade, sua vida útil é pequena. O plástico metalizado é mais resistente e possui vida útil maior que a do papel alumínio. Sua refletividade é alta e possui o baixo coeficiente de absorção à radiação solar. O aço inox, é um excelente refletor, mas possui preço elevado. O aço inox não sofre ação do tempo ou de gorduras, água ou outros líquidos derramados. É de fácil limpeza e resistente à riscos. Placas de alumínio polidas, possuem características óticas superiores ao aço inox. Entretanto o processo de polimento é caro e elas sofrem um processo de oxidação.

2.2 Fogões Solares Tipo Estufa

Os fogões solares tipo estufa consistem basicamente de uma caixa isolada termicamente, dotada de uma janela de vidro para absorver a radiação solar. O vidro permite a passagem da radiação de ondas curtas (luz solar) e impede a saída da radiação de ondas longas (radiação infravermelha emitida pelos componentes do interior da caixa). O calor retido aumenta a temperatura no interior da caixa possibilitando a cocção dos alimentos. Alguns fogões solares do tipo estufa possuem superfícies refletoras externas, que aumentam a intensidade da radiação incidente sobre o vidro, aumentando a potência do fogão.

Os fogões solares tipo estufa aproveitam não só a radiação direta (como nos fogões concentradores), mas também a radiação difusa. Assim é possível o seu funcionamento em dias parcialmente nublados. O isolamento térmico permite que a cocção continue durante um determinado tempo, mesmo na ausência de radiação solar. Entretanto, o vidro dificulta o acesso à panela, e no cozimento de alimentos que necessitam uma interferência constante, o funcionamento fica prejudicado.

2.3 Fogões Solares com Armazenamento

Os fogões solares com armazenamento possuem um coletor solar separado da unidade de cozimento. O fluido de trabalho (água ou óleo) é aquecido pelo coletor solar e é levado para a unidade de cozimento por mecanismo de termosifão. A grande vantagem deste sistema é que a unidade de cocção pode ficar dentro de casa, eliminando o desconforto de cozinhar ao ar livre, fora de casa. Além disso, um reservatório armazena o fluido aquecido e permite que se possa cozinhar à noite. Entretanto, são muito mais complexos e caros que os demais tipos de fogões solares.

3. PROTÓTIPOS DE FOGÕES SOLARES

A fim de estudar o funcionamento e operação dos fogões solares foram construídos e testados 4 protótipos de fogões solares.

3.1 Fogão 1. Tipo Estufa



Figura 1. Fogão 1 Tipo Estufa.

O fogão 1 Tipo Estufa (figura 1) foi construído em papelão, isolado internamente com placas de isopor 20mm. O interior foi forrado com espelhos de vidro nas laterais e uma chapa de aço galvanizado pintada de preto no fundo. A cobertura é de vidro plano 3mm de 53cm x 53cm. Foram instalados puxadores na tampa de vidro de modo a facilitar a sua remoção e o acesso ao interior.

3.2 Fogão 2. Tipo Estufa



Figura 2. Fogão 2 Tipo Estufa.

O fogão 2 Tipo Estufa (figura 2) foi construído em papelão, isolado internamente com placas de isopor 20mm. Em 2 das laterais foram colocados espelhos em ângulo de 30° de modo a direcionar a radiação solar para a panela. A cobertura é de vidro plano 3mm de 94cm x 95cm. Foram utilizados 2 vidros de 47cm x 95cm na cobertura de modo a facilitar a retirada do vidro e o acesso ao interior. Um orifício de diâmetro 10mm em uma das laterais permite a saída do vapor produzido.

3.3 Fogão 3. Tipo Concentrador Parabólico



Figura 3. Fogão 3 Tipo Concentrador Parabólico.

O fogão 3 Tipo Concentrador Parabólico (figura 3) foi construído a partir de uma antena parabólica em fibra de vidro de diâmetro 1,56m. A antena parabólica foi pintada com tinta alumínio e no foco foi instalado o dispositivo de sustentação da panela. O ajuste do foco é realizado movimentando o concentrador sobre um suporte apoiado no solo.

3.4 Fogão 4. Tipo Concentrador Cônico

O fogão 4 Tipo Concentrador Cônico (figura 4) foi construído em madeira e papelão. O suporte é de aço. A seção tronco-cônica (45°) foi construída com papelão e forrada com papel alumínio. O fundo do concentrador foi coberto com uma chapa de aço galvanizado pintada de preto. Um suporte mantém a panela na posição de cocção. O ajuste do foco é realizado movimentando o concentrador sobre um suporte apoiado no solo.



Figura 4. Fogão 4 Tipo Concentrador Cônico.

Tabela 2. Quadro Sinótico das Características dos Protótipos de Fogões Solares.

	Tipo de Fogão Solar	Área coletora m²
01	Estufa	0,281
02	Estufa	0,893
03	Concentrador parabólico	1,910
04	Concentrador cônico	0,622

4. MÉTODO DE ENSAIO DE FOGÕES SOLARES

Para ensaiar os protótipos construídos foi necessário desenvolver uma metodologia de testes. A metodologia de testes procurou estabelecer todas as grandezas que influem diretamente no desempenho dos fogões solares e delimitar parâmetros para cada uma delas.

4.1 Equipamentos Necessários para o Ensaio

- Medidor de Temperatura (termopar)
- Solarímetro
- Cronômetro
- Anemômetro
- Trena ou metro
- Bureta 1000 mL
- Painel de alumínio: diâmetro 250mm, espessura 0,5mm, preto fosco (absortividade $\geq 0,86$)

4.2 Procedimentos Preliminares

- Medir a área do coletor, inclusive os refletores.
- Instalar o termopar na panela, de modo que ele se mantenha no centro e a 10mm do fundo. Os fios do termopar devem passar através de um orifício na tampa.
- Conectar o termopar ao equipamento de medição.
- Colocar 7 kg de água por metro quadrado de área do coletor (ou refletor). Quando for utilizada mais de uma panela, repartir igualmente a água entre todas as painelas. Assegurar que a junta de medição do termopar na panela esteja submersa na água.

4.3 Procedimento Operacional

- Colocar a panela no fogão.

- Medir a velocidade do vento com o anemômetro. Anotar.
- Medir a insolação com o solarímetro. Anotar.
- Medir a temperatura ambiente e da água.
- Iniciar as medições quando a temperatura da água atingir 40°C, terminar o ensaio quando atingir 90°C.
- Medir a cada 10 minutos:
 - temperatura da água. Anotar.
 - temperatura ambiente. Anotar.
 - insolação. Anotar.
 - velocidade do vento. Anotar.

Restrições:

- Os experimentos deverão ser realizados entre 10h e 14h (Hora Solar).
- A temperatura ambiente deve estar entre 20 e 35°C.
- A insolação deve estar entre 450 e 1100 W/m². A variação da insolação entre cada medição (10 minutos) não pode ser maior que 100 W/m².
- A velocidade do vento deve ser inferior a 2,5m/s e sua média inferior a 1m/s.

4.4 Cálculos

- Calcular a potência efetiva do fogão **P** (a cada intervalo de 10 minutos, 600 s):

$$P = \frac{m \cdot Cp (Ta_i - Ta_f)}{600} \quad (W) \quad (1)$$

onde **m** é massa total de água no fogão (kg), **Cp** o calor específico da água (4186 J/kg.°C), (**Ta_i** - **Ta_f**) variação de temperatura da água durante o intervalo de tempo (°C).

- Calcular a potência específica (**Pe**):

$$Pe = \frac{(800 \cdot P)}{Hi} \quad (W) \quad (2)$$

onde **Hi** é a insolação média W/m² no intervalo considerado, e **800 W/m²** a insolação padrão.

- Calcular a temperatura média da água **T'a = (Ta_i + Ta_f) / 2**
- Calcular a diferença de temperatura (**ΔT_f**) entre a temperatura média da água (**T'a**) e a temperatura ambiente (**To**).

$$\Delta T_f = T'a - To \quad (°C) \quad (3)$$

- Plotar a curva de potência específica (**Pe**) em função da diferença de temperatura (**ΔT_f**) para cada intervalo de tempo.
- Calcular a regressão linear. Se o coeficiente de correlação (**r²**) for menor que 0,9, deve-se repetir o experimento.
- A potência específica do fogão é avaliada pela correlação na diferença de temperatura (**ΔT_f**) de 50°C.
- Calcular o rendimento do fogão (**η**)

$$\eta = \frac{m \cdot Cp (T_2 - T_1)}{t \cdot Hi} Ac \cdot 100\% \quad (4)$$

onde: m é massa total de água, kg; C_p Calor específico da água, 4186 J/kg.°C; T_2 temperatura final da água, °C; T_1 temperatura inicial da água, °C; t tempo de medição, s; H_i insolação média durante os testes, W/m² e A_c área da superfície de captação da radiação solar, m².

5. TESTES E RESULTADOS

Os ensaios dos fogões solares foram realizados no Campus da UFMG em Belo Horizonte, MG, no período de 08 a 19 de Novembro de 2004, entre 10h e 14h (hora solar). Neste período o céu encontrava-se aberto, com a presença de poucas nuvens.

Local do teste - Campus da UFMG, Belo Horizonte, MG

Latitude: 19°52'14" S Longitude: 43°57'41" W Altitude: 790 m

Condições do teste: Céu aberto com poucas nuvens

Temperatura ambiente: 29,9 - 34,6°C

Umidade relativa do ar: 50-65%

Velocidade do vento: < 1m/s

Radiação global - 930 a 1050 W/m²

Equipamentos Utilizados

Solarímetro Spectral Eppley Modelo PSP 33050F3 (Precisão ± 0,5%)

Temopar tipo K Icel com certificado de calibração (Precisão ± 0,5°C)

Termômetro digital Polimed PM 1020 (Precisão ± 0,5% leitura ± 1,0°C)

Anemômetro Minipa MDA-11 (Precisão ±3% fundo de escala)

Psicrometro de aspiração (bulbo-seco - bulbo-úmido)

Os fogões do tipo estufa foram colocados na horizontal, orientados no sentido leste-oeste, e ficaram estáticos durante todo o ensaio. Os fogões do tipo concentrador foram orientados perpendicularmente aos raios solares, de modo que o foco atingisse o absorvedor (panela). A cada 15 minutos verificava-se a posição do foco. Foram realizados no mínimo 3 ensaios de cada fogão. Os resultados (médias dos 3 ensaios) são apresentados na tabela 3 e nas figuras 5 e 6.

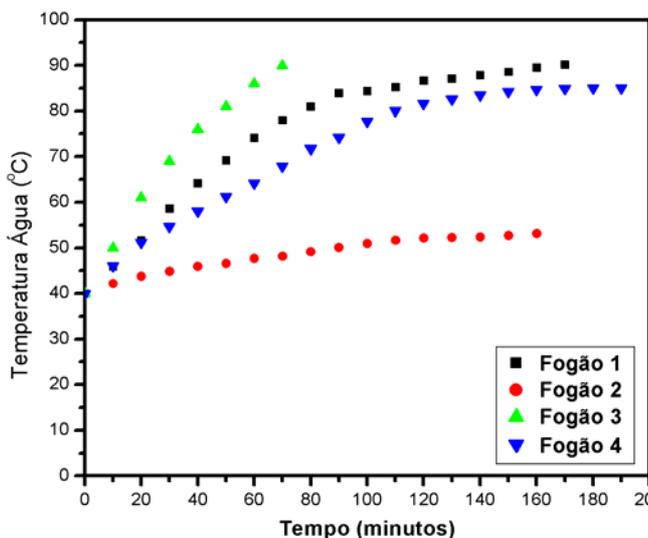


Figura 5. Temperatura da Água.

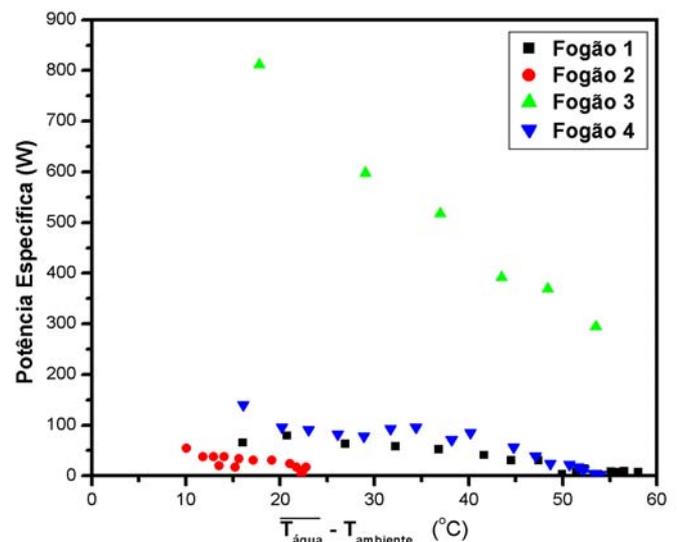


Figura 6. Potência Específica dos Fogões Solares.

Tabela 3. Quadro Sinótico das Características dos Protótipos de Fogões Solares.

	Tipo de Fogão Solar	Área coletora	água	Rend	Potência W
01	Estufa	0,281 m ²	1,9 L	14,3%	40
02	Estufa	0,893 m ²	6,3 L	4,0%	35
03	Concentrador parabólico	1,910 m ²	13,3 L	34,5%	670
04	Concentrador cônico	0,622 m ²	4,5 L	12,8%	86

Nos fogões 01 e 03 foi possível atingir a temperatura de 90°C, após um tempo de 2h 50 min e 1h 10 min respectivamente. A temperatura máxima atingida no fogão 02 foi 53°C e no fogão 04 foi 85°C.

O fogão 01 funcionou a contento, com um rendimento próximo ao encontrado na literatura. O fogão 02 teve um rendimento muito baixo. Apesar de sua grande superfície coletora, o fogão 02 possui também uma grande superfície de perda de calor. Além disso, sua construção não foi muito esmerada, existindo perdas de calor pela junção dos 2 vidros. A grande inclinação dos espelhos em vez de direcionar a radiação para a panela provocou a reflexão de parte da radiação para o exterior.

O fogão concentrador parabólico 03 funcionou a contento. O bom acabamento da superfície refletora concentrou os raios solares no fundo da panela com precisão. Como somente o fundo da panela foi aquecido, as perdas térmicas para o meio ambiente foram menores. O uso de uma panela de fundo preto e superfícies laterais polidas poderia minimizar ainda mais as perdas térmicas por radiação.

O fogão concentrador cônico por sua vez concentra a radiação na superfície lateral da panela. Quanto maior a radiação, maiores as perdas térmicas para o meio ambiente. O uso de painéis com superfícies laterais negras aumenta a absorção da radiação solar e aumenta as perdas térmicas para o meio ambiente. O uso de painéis com superfícies laterais polidas, diminuiu consideravelmente a absorção da radiação solar. Além disso, como a construção também não foi esmerada, o foco não se realizava totalmente sobre a panela.

Nos 2 fogões concentradores verifica-se que é muito importante o posicionamento correto da panela em relação ao foco. Caso a panela fique fora do foco, não se consegue um funcionamento satisfatório.

6. TESTES PRÁTICOS

A fim de analisar a viabilidade prática de uso dos fogões solares, uma cozinheira profissional, com grande experiência em culinária em fogões a lenha e a gás, experimentou os fogões solares na cocção de um almoço típico brasileiro: arroz, feijão, bife e salada.

Para fritar os bifês, utilizou-se uma frigideira de teflon e fundo preto de 30cm de diâmetro. A frigideira foi colocada no foco dos fogões concentradores, até que o óleo entrasse em ebulição. Neste momento foi colocado o bife e realizada a fritura. Conseguiu-se obter um bife com boas propriedades organolépticas com um tempo de fritura de cerca de 10 minutos.

Para cozinhar o arroz, colocou-se o arroz em uma panela de alumínio preta com tampa, juntamente com água e temperos. Foi possível cozinhar o arroz nos fogões concentradores e no fogão estufa 01. No fogão estufa 02 não foi possível cozinhar o arroz.

Não foi possível cozinhar o feijão. O feijão foi deixado nos fogões estufa por mais de 2 horas e não cozinhou. Talvez fosse possível cozinhar o feijão nos fogões concentradores, mas para que isto fosse possível seria necessário um tempo maior, de cocção e de ajustes do foco dos fogões ao longo do tempo.

Verificou-se também o desconforto de se cozinhar em pleno sol. O ato de cozinhar exige a presença do operador (cozinheiro) próximo ao fogão e sujeito à radiação solar. Normalmente os cozinheiros não estão acostumados a trabalhar nestas condições.

Como conclusões, verificou-se que a culinária brasileira típica é composta de vários pratos que necessitam cocção simultânea, o que requer um fogão solar de várias "bocas". Uma utilização prática visualizada foi a de utilizar o fogão solar para esquentar a comida pré-cozida. Neste caso não existe a necessidade da supervisão constante do cozinheiro próximo ao fogão. Este uso pode ser particularmente interessante para esquentar as marmitas dos "boias-frias".

7. CONCLUSÕES

Os testes mostram a aplicação prática do uso dos fogões solares na preparação de alimentos cozidos. Entretanto, este uso só pode ser realizado em dias de sol claro ou parcialmente nublados. Em dias nublados não é possível o seu uso, sendo necessário o uso de um outro método de cocção. Assim o fogão solar não pode ser o único método de cocção. Em climas desérticos, onde as chuvas são raras, podem ser utilizados durante todo o ano.

Uma outra dificuldade operacional é a preparação do jantar. Com os fogões solares é necessário preparar o jantar durante o dia, e existir uma outra fonte de calor para aquecer o jantar à noite.

A eficiência dos fogões solares depende do tipo de fogão e do esmero da fabricação. Os fogões tipo estufa podem ser utilizados para a cocção de alimentos e os tipo concentradores para a cocção e fritura.

Os fogões solares, apesar de funcionais, não são práticos, sobretudo para a cozinha brasileira. A culinária brasileira típica é composta de vários pratos que necessitam cocção simultânea, o que requer um fogão solar de várias "bocas". Ele poderia ser bem utilizado em outros tipos de culinária onde o alimento típico são as massas, sobretudo macarrão (italiana e chinesa) ou arroz (japonesa).

Uma utilização prática particularmente interessante para o fogão solar tipo estufa é esquentar as marmitas dos "boias-frias". Neste uso o "boia-fria" colocaria a marmitta na fogão solar no meio da manhã, e o fogão solar aqueceria e manteria a comida quente até o horário do almoço. Neste uso não é necessário acompanhamento e vigilância da cocção, nem a necessidade de se obter altas temperaturas.

Verifica-se também a possibilidade de aplicação do fogão solar em atividades de lazer: camping, picnics e atividades correlatas.

REFERÊNCIAS

- BARROS, Ricardo Paes de; BOLUDA, Luis Carlos P. J. *Consumo de Energia para Cocção: Análise das Informações Disponíveis*. Rio de Janeiro: Grupo de Energia IPEA, INPES, 1983, 113 p.
- DUFFIE, John A.; BECKMAN, William A. *Solar Engineering of Thermal Processes*, New York, John Wiley & Sons, 1991, 920p.

INCROPERA, Frank P.; DEWITT, David P. Fundamentos de Transmissão de Calor e Massa, 5a ed., Rio de Janeiro, LTC, 2003, 698p, ISBN 85-216-1378-4.
KREITH F., KREIDER J.F. Principles of Solar Engineering, McGraw-Hill, 1978, 778p.
KUNDAPUR, Ashok. Review of Solar Cooker Designs. TIDE, v.8, n.1, pp.1-37, March 1998.
http://ashokk_3.tripod.com/

TESTS AND ANALYSIS OF 4 SOLAR COOKERS

Abstract. *Solar cookers are an alternative to cooking, milk pasteurization and water purification. This paper describes the assemblage and operational data of 4 solar cookers, two greenhouse type and two concentrator type. It is also propose a methodology for solar cookers tests..*

Key words: solar cooker, solar stove, solar energy