

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JULIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CÂMPUS DE BOTUCATU

**DETERMINAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE UM COLETOR SOLAR
PLANO COM ALETAS DE VIDRO**

LUIZ CARLOS BENTIVENHA

Orientador: Prof. Dr. Jose Roberto Corrêa Saglietti

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da Unesp - Câmpus de Botucatu, para obtenção do título de Mestre em Agronomia-Energia na Agricultura.

BOTUCATU - SP
Novembro – 2005

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO -
SERVIÇO TÉCNICO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO
UNESP - FCA - LAGEADO - BOTUCATU (SP)

Bentivenha, Luiz Carlos, 1953-
B476d Determinação da eficiência de um coletor solar plano com aletas de vidro.
/ Luiz Carlos Bentivenha. -- Botucatu, [s.n.], 2005.
x, 74 f. : il. color., gráfs., tabs.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Estadual
Paulista, Faculdade de Ciências Agrônomicas.
Orientador: José Roberto Corrêa Saglietti.
Inclui bibliografia.

1. Aquecedores solares de água. 2. Energia solar. 3. Aquecimento solar. 4.
Coletores solares. I. Saglietti, José Roberto Corrêa. II. Universidade
Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Campus de Botucatu). Faculdade
de Ciências Agrônomicas. III. Título.

CDD 621.472

AGRADECIMENTOS

À Faculdade de Ciências Agronômicas da Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”, Campus de Botucatu, em especial, ao programa de Pós-Graduação em Energia na Agricultura pela oportunidade concedida;

Ao professor Dr. José Roberto Corrêa Saglietti, pela orientação, dedicação e compreensão;

Aos funcionários do departamento de engenharia rural e da pós-graduação pelo auxílio e orientação no desenvolvimento do trabalho;

À todos os professores que contribuíram para a minha formação científica;

Aos meus amigos da pós-graduação pelo companheirismo e boa vontade em auxiliar uns aos outros;

À minha família que soube compreender todos os momentos dedicados aos estudos e pesquisa;

À Deus pelo conforto e pela graça de mais esta etapa alcançada;

Meus sinceros agradecimentos.

“A resposta que o homem dá a um desafio não muda só com a realidade com a qual se confronta. Muda o próprio homem cada vez mais, e sempre de modo diferente”.Pelo jogo constante destas respostas o homem se transforma no ato mesmo de responder". No ato mesmo de responder aos desafios que lhe apresenta seu contexto de vida, o homem se cria, se realiza como sujeito, porque esta resposta exige dele reflexão, crítica, invenção, eleição, decisão, organização, ação...Todas essas coisas pelas quais se cria a pessoa e que fazem dela um ser não somente "adaptado" à realidade e aos outros, mas "integrado" pela ação, é que o homem se constrói como homem”.

Paulo Freire

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE FIGURAS	VIII
LISTA DE TABELAS	X
RESUMO	1
SUMMARY	2
1. INTRODUÇÃO	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
2.1. Radiação solar	7
2.2. Leis fundamentais	12
2.2.1. Princípio de Prevost	12
2.2.2. Lei de Khirchorff	13
2.2.3. Lei de Stefan-Boltzman	13
2.2.4. Lei de Wien	13
2.3. Radiação do corpo negro	14
2.4. Reflexão interna	15
2.5. Refração da luz	16

2.6. Energia solar	22
2.6.1. Aquecedor solar tradicional	22
2.6.2. Importância da cobertura de vidro	24
2.6.3. Placa coletora solar	28
2.6.4. Boilers(reservatórios térmicos)	32
2.6.5. Sistema básico de aquecimento de água	33
2.6.5.1. Especificações técnicas	34
2.6.5.2. Manutenção da placa coletora	35
2.6.5.3. Certificações	35
2.6.5.4. Dimensionamento de um sistema de aquecimento solar	41
2.6.5.5. Escolha do local de instalação	42
2.6.5.6. Inclinação dos coletores	43
2.7. Fontes de energia renovável	43
2.8. Constante solar	44
2.9. Radiação normal extraterrestre	45
2.10. Tipos de radiação	46
2.11. Determinação da potência	46

2.12. Irradiância (G)	47
2.13. Irradiação (I)	49
2.14. Determinação da eficiência de um coletor solar	49
2.14.1. Coeficiente total de perdas de calor (U_L)	51
2.14.2. Calor útil (Q_u)	53
2.14.3. Cálculo do fator de eficiência da aleta (F_1)	54
2.14.4. Cálculo do fator de eficiência da sessão (F_2)	54
2.14.5. Cálculo do fator de eficiência global do coletor (F_3)	55
3. MATERIAL E METÓDOS	56
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	64
5. CONCLUSÃO	71
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	72

LISTA DE FIGURAS

Figuras	Página
1 Transformações da radiação solar _____	8
2 Curva de irradiância _____	9
3 Reflexão interna no vidro _____	15
4 Trajetória de um raio atravessando uma lâmina de faces paralelas _____	16
5 Transmissão da luz _____	18
6 Comprimento de onda – baixa frequência _____	19
7 Comprimento de onda – alta frequência _____	19
8 Refração da luz _____	20
9 Desvio da luz ao penetrar no vidro _____	20
10 Incidência da luz no vidro _____	21
11 Princípio de funcionamento _____	22
12 Incidência da radiação solar no coletor _____	26
13 Perdas da radiação infravermelha _____	28
14 Componentes da placa coletora solar _____	29

15 Sistema de aquecedor solar com sistema fechado	31
16 Reservatório soletrol	32
17 Funcionamento de um sistema básico de aquecimento de água	33
18 Etiqueta de eficiência	36
19 Padrão de classificação conforme eficiência	37
20 Aquecedor solar soletrol com boiler horizontal de nível	40
21 Esquema de um piranômetro	48
22 Esquema de instalação de sensores	58
23 Vista frontal dos equipamentos convencional e com aletas de vidro	59
24 Vista lateral dos equipamentos convencional e com aletas de vidro	60
25 Vista frontal da placa solar com aletas de vidro	60
26 Incidência e reflexão da radiação na placa convencional	61
27 Componentes de uma placa solar plana	61
28 Incidência e reflexão da radiação na placa co aletas de vidro	62
29 Irradiância solar global incidente – 04/09/2004	64
30 Rendimento em função do tempo – 04/09/2004	70

LISTA DE TABELAS

Tabelas	Página
1 Produção média mensal de energia x eficiência energética média	38
2 Reservatórios com suas características	39
3 Volume de água quente de acordo com o consumo	41
4 Consumo de água em litros	42
5 Latitudes de algumas cidades brasileiras e a inclinação dos coletores	43
6 Determinação do valor de n (dias do ano)	45
7 Radiação incidente frontal, velocidade do vento e temperatura ambiente – 04/09/2004	65
8 Temperatura registrada pelos sensores	66
9 Cálculo do rendimento instantâneo do sistema com aletas	67
10 Cálculo do rendimento instantâneo do sistema convencional	68

RESUMO

Os coletores solares comumente utilizados no aquecimento de água, para o consumo doméstico, possuem a placa de aquecimento solar plana do tipo chapa – tubo. Devido à crescente utilização desses equipamentos, buscou-se, através deste trabalho, modificar um equipamento convencional, o qual recebeu, na placa solar, aletas de vidro, instaladas no plano vertical em relação à tampa de vidro, dividindo a mesma em diversas áreas, propiciando um aumento, tanto da reflexão dos raios infravermelhos em seu interior, quanto do efeito estufa. O objetivo do ensaio foi estudar o comportamento térmico desse equipamento, trabalhando a determinada vazão e obtendo as temperaturas com o emprego de termopares instalados em vários pontos do sistema, buscando a determinação da eficiência térmica da placa solar modificada. Para a determinação da eficiência, foram considerados o calor útil, o calor absorvido e as perdas de calor. As equações empregadas na determinação da eficiência térmica foram trabalhadas no programa Excel. Verificou-se que o equipamento apresentou um bom rendimento, atendendo as especificações definidas pelo INMETRO. A temperatura média de saída da água do equipamento apresentou valor superior a de equipamento similar, o mesmo não ocorreu com seu rendimento, embora as diferenças registradas tenham sido pequenas. A eficiência do equipamento não depende apenas dos parâmetros do projeto, mas também de outros fatores que levam a perda de energia.

Palavras Chaves: Aquecedor solar de água, energia solar, aquecimento solar, coletor solar.

EFFICIENCY OF THE FLAT PLATE SOLAR COLLECTOR WITH GLASS FINS.

Botucatu, 2005. Dissertação(Mestrado em Agronomia / Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista.

Author: Luiz Carlos Bentivenha

Adviser: Prof. Dr. Jose Roberto Corrêa Saglietti

SUMMARY

The solar collectors commonly used in the water heating for domestic consumption possess the flat plate solar heating of plate type - tube. Due to increasing applications of those equipments the purpose was to modify the conventional, which received glass fins in the solar plate, installed in the vertical plan in relation to the glass cover, dividing the same in several areas, enabling reflection increase of the infrared rays in its interior as well as greenhouse effect. The thermal performance of the equipment has been studied analyzing the certain flow and obtaining the temperatures with the thermopairs installed in several points of the system and determining the thermal efficiency of the modified solar plate. The useful heat, the absorbed heat and the losses of heat were considered. The equations of the thermal efficiency were obtained in the Excel program. The equipment presented a good performance according to INMETRO specifications. The medium temperature of the water exit presented superior value when compared to a similar equipment. The same didn't occur with its performance, although the registered differences have been small. The efficiency of the equipment doesn't depend only on the parameters of the project, but also on other factors which lead to energy loss.

Keywords: Solar panel of water; solar energy; solar heating; solar collectors.

1. INTRODUÇÃO

A energia solar é uma fonte de energia alternativa, limpa, inesgotável e gratuita, contribuindo para resolver problemas existentes no mundo, tal como a escassez de energia assim como a preservação do meio ambiente.

O sol tem potencial para fornecer cerca de 7000 vezes o total de energia de que se necessita no planeta.

Em alguns países como: EUA, Israel, Itália, França, Grécia, Alemanha, Austrália e Japão, a utilização da energia solar no aquecimento de água é muito significativa, pois o equipamento de aquecimento solar é incentivado pelo governo. Em Israel seu uso é obrigatório.

O Brasil é um dos países situados em zona sub-tropical, que recebem muita radiação solar, isto torna viável a utilização da energia solar, transformando-a em energia térmica, elétrica, mecânica, etc.

Nos últimos anos, a preocupação com o meio ambiente tem aumentado consideravelmente, mais um motivo para que haja conscientização por parte dos

habitantes do planeta terra, que devem optar cada vez mais por uma fonte de energia limpa, evitando a construção de novas hidrelétricas que resulta na perda da fauna e da flora tropical, inundação de terras, que eram ou poderiam ser utilizadas para agricultura e pecuária, perda de patrimônio histórico/cultural e também na realocação de famílias.

O chuveiro elétrico consome cerca de 7,0% de todo o consumo nacional de energia elétrica, o que significa quase o dobro do que se gasta em todo o país com iluminação pública.

Ainda o Brasil é o único país do mundo a utilizar o sistema de chuveiro elétrico como padrão nacional para aquecimento de água para banhos.

A utilização da energia solar remonta aos primórdios da humanidade quando se utilizava o sol para secar peles e alimentos, sendo mais tarde utilizado para queimar pequenos pedaços de madeira, obtendo assim o fogo, concentrando a luz solar com simples lentes de vidro.

No século XVII, foi testado o primeiro coletor solar pelo suíço Horácio de Saussure, atingindo temperaturas superiores à da ebulição da água (101 °C).

Em meados do século passado, vários motores solares foram desenvolvidos pelo Francês Augusto Mouchot, na Europa, e nos Estados Unidos foram realizadas experiências no campo solar em aquecimento de água e motorização.

Um importante desenvolvimento foi obtido com o invento de uma caldeira solar, em 1936, nos Estados Unidos.

Em 1941 foi fabricada a primeira fotocélula de silício monocristalino por Bequerel, aperfeiçoada ao longo do tempo, pois não havia demanda para tal tecnologia, que gerava pouca quantidade de energia e apresentava um custo muito elevado.

Com a crise do petróleo, em meados dos anos 70, houve grande interesse em se utilizar a energia solar para aquecimento interno de água, e para gerar eletricidade para as mais diversas finalidades.

Muitas empresas começaram a produzir equipamentos destinados ao aquecimento da água, com o objetivo de substituir a energia elétrica, por energia solar, que corresponde a grande parte do consumo de energia elétrica de uma moradia e conseqüentemente também de uma Nação, por energia solar.

No Brasil, após muitas discussões no campo da energia alternativa, houve a devida conscientização do governo, instituindo incentivos ao aproveitamento dos equipamentos solares.

Apesar dos equipamentos serem constantemente melhorados, nota-se que novos estudos ocorrem, surgindo, desta forma, novos protótipos, visando aumentar seu rendimento.

Ao se propor a avaliação de coletores solares planos em sistema convencional com aletas de vidro instaladas na placa do coletor solar, objetivou-se obter uma melhor eficiência com as adaptações realizadas no equipamento, podendo oferecer ao mercado um equipamento de qualidade e de melhor desempenho.

Para o estudo proposto, serão utilizados equipamentos de um mesmo fabricante e de igual modelo, necessitando apenas ocorrer, em um deles, a alteração desejada, para que esses equipamentos possam ser empregados para a devida análise de sua eficiência.

Tais equipamentos possuem selo de qualidade emitido pelo Instituto Nacional de Metrologia (INMETRO), que o certifica como um equipamento de alto desempenho.

No estudo que será efetuado, neste trabalho, algumas informações obtidas poderão dar fundamentos para a utilização de tais equipamentos nas diversas áreas, buscando um maior rendimento para os equipamentos solares de aquecimento de água, e para que para isto possa ser viável, pode-se sugerir modificações na construção da placa coletora solar.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Radiação solar

O Sol é uma esfera de gases incandescentes, composta principalmente por átomos de hidrogênio e hélio. A temperatura deles corresponde a milhões de graus no centro da estrela, e vai diminuindo até uma superfície mais ou menos definida (fotosfera) onde a temperatura dos átomos equivale (em média) a cerca de 5770 Kelvin.

A fotosfera emite uma enorme quantidade de radiação: em torno de 72 milhões de watts por metro quadrado, numa esfera com 650.000 km de raio.

Ao deslocar-se no espaço, com a velocidade da luz, essa energia deve repartir-se em esferas concêntricas e, então chegar à órbita terrestre (a 149,5 milhões de quilômetros do centro do Sol), quando passa a 1367 Wm^{-2} , segundo Duffie; Beckman (1991), valor conhecido como constante solar.

A radiação solar chega á superfície terrestre em todos os comprimentos de onda ou frequências, mas principalmente entre 200 e 3.000 nanômetros (ou 0,2 e 3 microns).

O máximo de emissão se verifica no comprimento de onda de 0,48 microns. A distribuição corresponde aproximadamente àquela de um corpo negro a 5770 K.

O espectro representa uma irradiância espectral. Irradiância é a

potência por unidade de área (medida em Wm^{-2}).

A radiação solar sofre certas transformações ao incidir na atmosfera terrestre, como ilustrado na figura 1, de modo que é necessário o conhecimento de conceitos específicos nos diversos tipos de radiação.



Figura 1- transformações da radiação solar.

Alguns componentes da atmosfera terrestre influem no desempenho dos coletores solares. Dentre eles tem-se o vapor d'água, dióxido de carbono e o ozônio.

O vapor d'água que corresponde a aproximadamente 3% da massa da atmosfera, resulta da evaporação e transpiração, concentra-se junto à superfície e diminui rapidamente até 12 km. Condensado e depositado na superfície, representaria apenas de 2 a 3cm de altura.

O dióxido de carbono, que varia em função da proximidade das fontes, tende a aumentar devido à queima de combustíveis e florestas.

O ozônio resulta de um processo contínuo de formação e destruição.

Eles funcionam como núcleos de condensação, interceptando a radiação solar e aumentando a reflexão (Albedo).

Quando em dias nublados toda radiação disponível é a difusa, enquanto que em dias claros, 10% da radiação que atinge a superfície absorvedora é difusa (Hudson; Markell ,1985).

Ao quociente da quantidade de energia pela unidade de área durante um período de tempo, chamamos de irradiação. A figura 2 mostra a curva de irradiância, isto é, a radiação solar incidente a cada 30 minutos, num período de 24 horas.

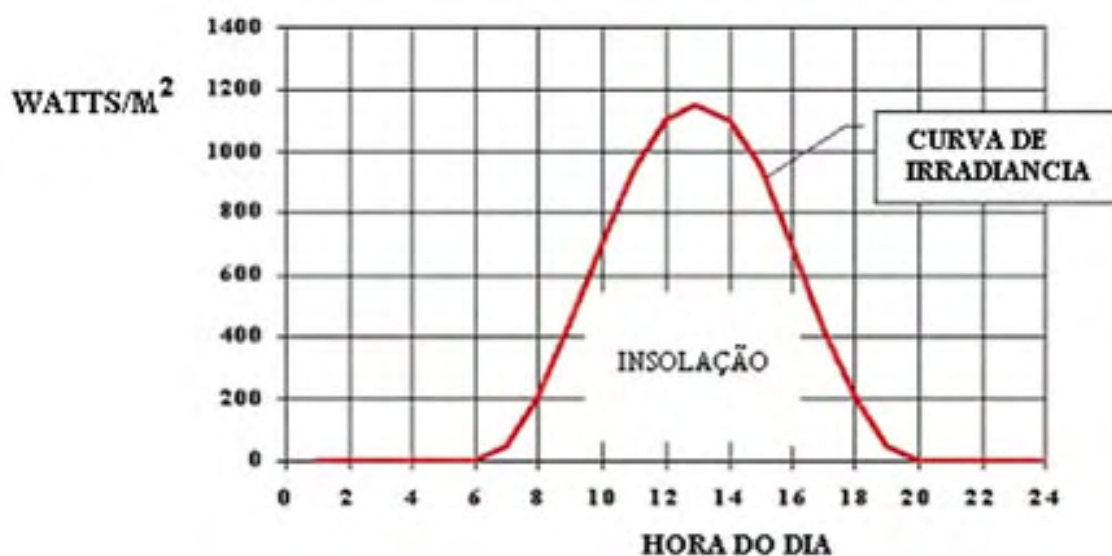


Figura 2 - Curva de irradiância de um dia típico sem nebulosidade

Os instrumentos meteorológicos utilizados na determinação da temperatura são: termômetros ordinários; termômetros de máxima; termômetros de mínima; termopares e termômetros de resistência elétrica.

Os utilizados para medir a radiação solar de baixo comprimento de onda λ (0,3 a 3,0 μm) são: o Piranômetro (radiação solar global; radiação solar refletida; radiação solar difusa; radiação solar líquida) e o Pireliômetro (radiação solar direta);

O Pireliômetro mede a radiação solar direta e é sempre voltado para cima.

O Piranômetro se estiver voltado para cima, mede a radiação solar global (S_r), se estiver voltado para baixo, mede a radiação solar refletida ($S_r\uparrow$).

Para medir a radiação de grande comprimento de onda λ , radiação terrestre e atmosférica (3,0 - 100 μm) utiliza-se o Pirgeômetro, o qual mede a radiação emitida pela atmosfera – “ radiação que vai para baixo” ($L\downarrow$).

Os Instrumentos que medem todo o espectro de radiação são: o pirradiômetro e o pirradiômetro de balanço.

$$\begin{array}{ccc} \text{pirradiômetro de balanço} \rightarrow & (\text{rad. global} + \text{rad. atm}) & - & (\text{rad.ref} + \text{rad.terr}) \\ & (\text{Rn}) & & \\ & \text{fluxo descendente} & & \text{fluxo ascendente} \\ & (\text{ganhos}) & & (\text{perdas}) \end{array}$$

O pirradiômetro se estiver voltado para cima, mede a radiação solar global (S_g) mais a radiação (L) que vem para baixo ($S_g + L\downarrow$); se estiver voltado para baixo, mede a radiação solar refletida (S_r) mais a radiação (L) que vem de baixo para cima, radiação terrestre ($S_r + L\uparrow$).

A transferência de energia pode ser realizada pela radiação, convecção ou condução.

A radiação é um processo de transferência de energia através de ondas eletromagnéticas. Característica de todos os corpos, cuja temperatura seja superior ao zero termodinâmico. Contrariamente às outras formas de transferência de energia, não necessita de um meio material para a sua propagação.

A convecção é o mecanismo de transferência de energia que ocorre num fluido, por mistura de uma porção ou porções diferentes deste, devido a movimentos de mesoscala da sua massa, relativamente organizado.

A convecção pode ser realizada de duas maneiras: livre ou forçada.

A convecção livre ocorre quando o movimento for causado apenas por diferenças de densidade dentro do fluido.

A convecção forçada ocorre quando o movimento for causado ou induzido por forças mecânicas, fluxo causado por fricção do fluido ou movimento causado por

forças externas aplicadas.

A Condução é o mecanismo de troca de energia interna de um corpo para o outro, ou de uma parte de um corpo para outro, por variação de energia cinética do movimento das moléculas, por contato direto, ou pelo movimento de elétrons no caso dos metais.

O Balanço médio da radiação no sistema globo-atmosfera é de 31% (albedo).

Radiação solar global = rad. solar direta + rad. solar difusa

Radiação média absorvida (globo - atmosfera).....235 W/m²

Radiação absorvida pelo globo.....165 W/m²

Radiação absorvida pela atmosfera..... 70 W/m²

A radiação solar global corresponde à energia total, de origem solar, recebida pela superfície por uma unidade de área e de tempo.

O globo emite energia como um corpo negro.

Radiação terrestre: é transmitida 24 horas, é mínima ao nascer do sol e máxima ao início da tarde.

O globo recebe radiação solar de pequeno λ e a atmosfera intercepta a radiação de grande λ proveniente da emissão da superfície do globo, reemitindo-a para o espaço como uma estufa.

A atmosfera é parcialmente transparente à radiação solar, ela absorve a radiação terrestre e emite radiação (atmosférica) de novo para o globo.

O comportamento das nuvens e dos gases atmosféricos designadamente do vapor de água, absorvendo a radiação infravermelha que os atinge e emitindo igualmente o mesmo tipo de radiação, constitui o que se designa por efeito estufa da atmosfera.

Quanto maior a quantidade de vapor de água na camada da atmosfera

junto à superfície do globo e maior for a nebulosidade e mais baixa estiverem as nuvens, mais se acentua o efeito estufa. Nas noites de céu limpo, de ar com diminuto vapor e condições que favorecem o arrefecimento noturno o efeito estufa é menor.

A quantidade de energia é determinada pelo fluxo radiante (Φ) : energia radiante recebida ou transmitida por unidade de tempo; Irradiância (G): densidade do fluxo radiante incidente numa superfície e Emitância radiante (E_r): densidade de fluxo radiante emitido por uma superfície.

A “qualidade” da energia a ser obtida depende da frequência f (Hertz) e do comprimento de onda λ (μm ou nm).

2.2. Leis Fundamentais

2.2.1. Princípio de Prevost

Todo corpo a uma temperatura diferente do zero absoluto emite energia do tipo radiante, sendo essa emissão dependente da temperatura absoluta do corpo.

$$I_{\lambda} = I_{\lambda} (R) + I_{\lambda} (a) + I_{\lambda} (t)$$

onde: **I** = incidente; **R** = refletida ; **a** = absorvida; **t** = transmitida

O coeficiente de refletância (R_{λ}) = $I_{\lambda}(R) / I_{\lambda}$ é a porção de energia incidente inicial refletida pelo corpo.

O coeficiente de absorção (a_{λ}) = $I_{\lambda} (a) / I_{\lambda}$ é a porção de energia incidente inicial que é absorvida pela superfície e transformada em energia calorífica, variando com o comprimento de onda (λ) da radiação incidente e o comprimento de onda (λ_c) do corpo.

O coeficiente de transmissão ou transmissividade (t_{λ}) = (R_{λ}) - (a_{λ}) é a porção de energia incidente, isto é, a diferença entre a porção da energia incidente inicial refletida (P_{λ}) e a porção de energia inicial absorvida pela superfície (a_{λ}).

2.2.2. Lei de Khirchoff

O coeficiente entre o poder emissivo de um corpo e a absorvidade é uma função universal da temperatura e de comprimento de onda.

$$E_{\lambda} = e_{\lambda} / a_{\lambda} \quad (2.1)$$

Para um dado λ , o quociente do poder emissivo e_{λ} pela absorvidade a_{λ} de um corpo é o mesmo para todos os corpos, dependendo apenas da temperatura do corpo.

$$E = e/a \quad (2.2)$$

2.2.3. Lei de Stefan-Boltzman

Define que o poder emissivo total (emitância) de um corpo negro é diretamente proporcional à 4ª potência da sua temperatura absoluta.

$$E = \sigma \cdot T^4 \quad (2.3)$$

onde:

T é dado em Kelvin (K)

$$\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$$

E é dado por Wm^{-2}

2.2.4. Lei de Wien

O comprimento de onda no qual é emitida a maior quantidade de radiação diminui à medida que a temperatura absoluta (T) do corpo aumenta.

$$\lambda_{\text{máx}} = 2898 / T \quad (2.4)$$

onde:

T é dado em Kelvin (K)

λ é dado em microns (μm)

O comprimento de onda correspondente ao poder emissivo máximo varia inversamente com a temperatura absoluta do corpo emissor.

Quanto maior for a temperatura, maior o poder emissivo, pois de acordo com a lei de Wien o λ para o poder emissivo máximo varia na razão inversa da temperatura.

O Balanço da radiação (ou radiação líquida) é a quantidade de energia radiante que fica na superfície do globo; é a energia utilizável em processos muito importantes.

$$R_n = LE + C + G + P + M$$

R_n - energia líquida disponível à superfície do globo; LE - fluxo de calor latente para e da superfície através da evaporação da água ou condensação; C - fluxo de calor sensível entre a superfície e o ar; G - fluxo do calor para e do solo; P - energia fixada pelas plantas através da fotossíntese; M - energia da respiração, armazenamento de calor na copa das árvores ou culturas.

2.3. Radiação de Corpo Negro

É a radiação produzida por um objeto que é um absorvedor perfeito de calor. Absorvedores perfeitos também devem ser radiadores perfeitos. Para um corpo negro a uma temperatura T , a intensidade da radiação emitida I em uma energia particular E é dada pela lei de Planck:

$$I(E, T) = 2E^3 [h^2 c^2 (e^{E/kT} - 1)]^{-1} \quad (2.5)$$

Onde h é a constante de Planck, k a constante de Boltzmann, e c é a velocidade da luz

2.4. Reflexão Interna

A figura 3 mostra raios provenientes de uma fonte puntiforme s , no vidro, incidindo sobre a interface vidro-ar. Para o raio a , perpendicular à interface, parte da luz se reflete, e parte passa através da superfície, sem mudar a direção.

Os raios de “ b ” até “ e ”, que têm, progressivamente, maiores ângulos de incidência na interface, também sofrem reflexão e refração na interface.

À medida que o ângulo de incidência aumenta, o ângulo de refração também aumenta, sendo de 90° para o raio “ e ”, o que significa que o raio refratado é tangente à interface. Nessa situação, o ângulo de incidência é chamado de ângulo crítico θ_c .

Para ângulos de incidência maiores do que θ_c , como os dos raios “ f ” e “ g ”, não há raio refratado, e toda a luz é refletida, efeito conhecido como reflexão interna total.

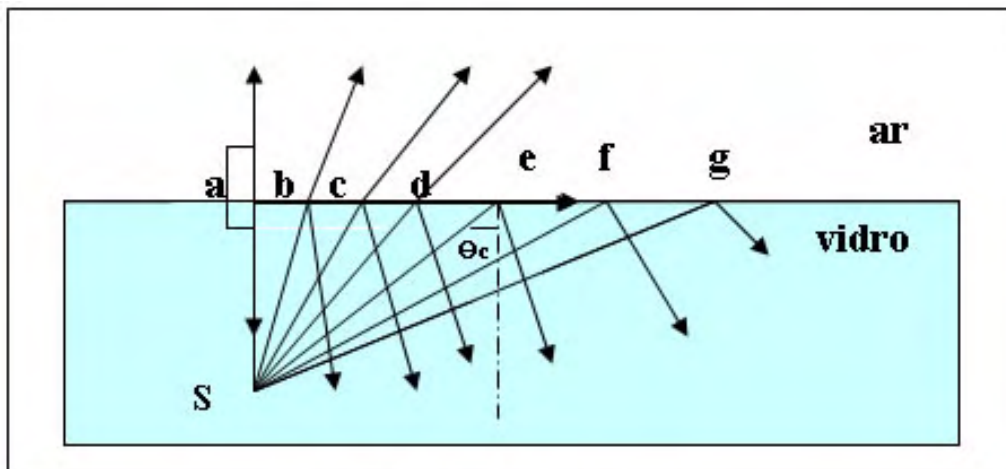


Figura 3 - Reflexão interna no vidro

A reflexão interna total da luz de uma fonte puntiforme S ocorre para todos os ângulos de incidência maiores do que o ângulo crítico θ_c . No ângulo crítico, o raio emerge tangente à interface ar-vidro.

Para calcular θ_c , utiliza-se uma equação, associando arbitrariamente o subscrito 1 ao vidro e o subscrito 2 ao ar, substituindo θ_1 , por θ_c e θ_2 por 90° , obtendo:

$$n_1 \text{ sen } \theta_c = n_2 \text{ sen } 90^\circ$$

encontrando, então:

$$\theta_c = \text{sen}^{-1} n_2 / n_1 \quad (\text{ângulo crítico})$$

Como o seno de um ângulo não pode ser maior do que 1, n_2 não pode ser maior do que n_1 , na equação. Isso implica que a reflexão interna total não pode ocorrer quando a luz incidente está num meio que tem o menor índice de refração.

Se a fonte S, na figura 3, estivesse no ar, todos os raios incidentes na superfície ar-vidro (incluindo “f” e “g”) seriam refletidos e refratados.

2.5. Refração da luz - Lei de Snell

A lâmina de faces paralelas apresentada na figura 4 é constituída de dois diopros (D_1 e D_2) planos paralelos e é usada para deslocar o raio de luz de uma posição para uma nova posição sofrendo um desvio lateral d , sem mudar a direção do raio de luz.

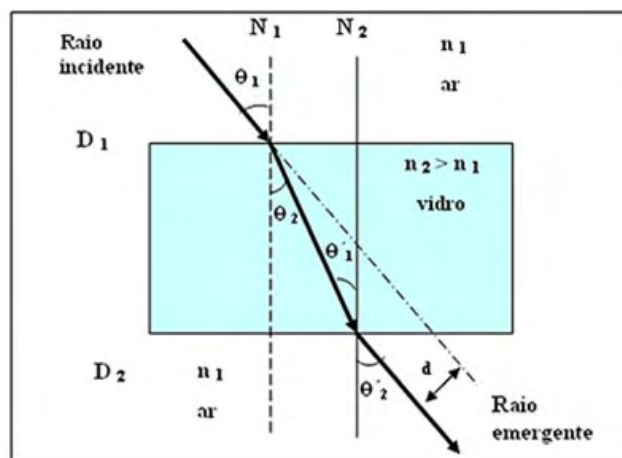


Figura 4 - Trajetória de um raio atravessando uma lâmina de faces paralelas.

A lâmina da figura 4 é uma placa de vidro imersa no ar, constituindo os dioptros ar / vidro e vidro / ar. Observa-se que o raio de luz emerge no segundo dioptró, sofrendo um desvio lateral (d) com relação ao raio incidente no primeiro dioptró. Demonstra-se que o raio emergente é paralelo ao raio incidente em uma lâmina de faces paralelas, ou seja, $\theta_1 = \theta_2$.

Aplicando a Lei de Snell Descartes para o dioptró ar / vidro, tem-se:

$$\sin \theta_1 / \sin \theta_2 = n_2 / n_1 \quad (2.6)$$

Aplicando a Lei de Snell Descartes para o dioptró vidro / ar, tem-se:

$$\sin \theta'_1 / \sin \theta'_2 = n_1 / n_2$$

ou

$$\sin \theta'_2 / \sin \theta'_1 = n_2 / n_1 \quad (2.7)$$

Igualando (2.6) e (2.7),

$$\sin \theta_1 / \sin \theta_2 = \sin \theta'_2 / \sin \theta'_1 \quad (2.8)$$

Como $\theta_2 = \theta'_1$ (ângulos alternos e internos não adjacentes), para o primeiro quadrante, tem-se:

$$\sin \theta_2 = \sin \theta'_1$$

Substituindo em (2.8),

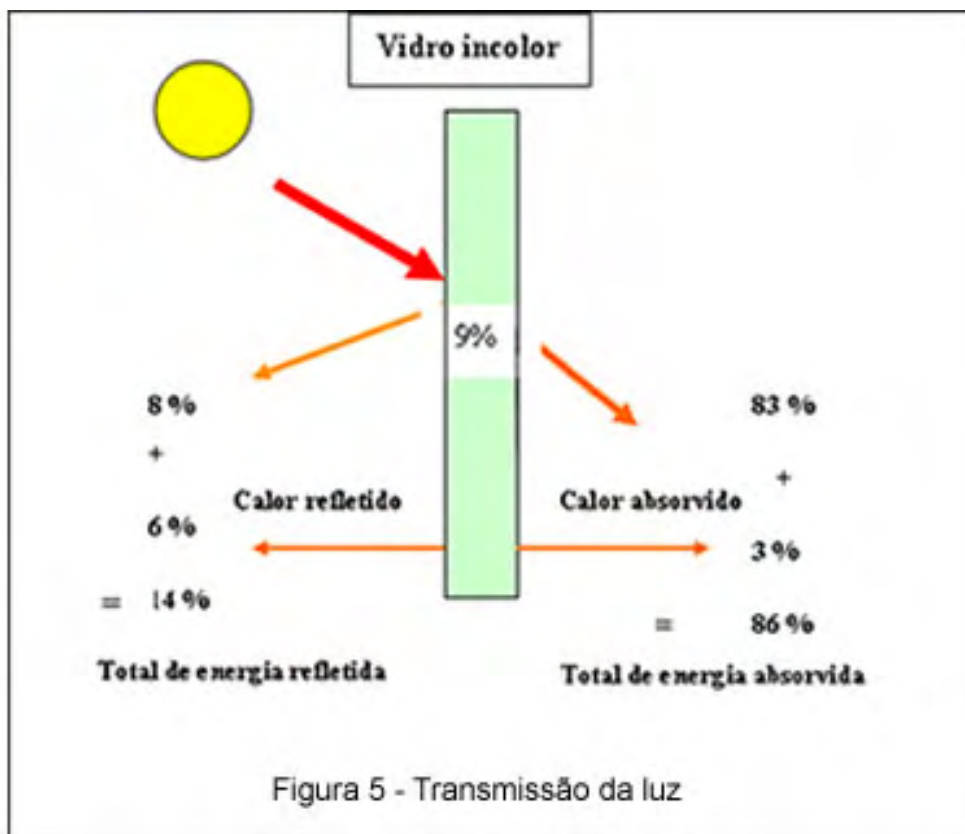
$$\sin \theta_1 = \sin \theta'_2$$

e para o primeiro quadrante

$$\theta_1 = \theta'_2$$

Conclui-se então que o ângulo (θ_1) que o raio incide no primeiro diopetro é igual ao ângulo (θ'_2) que o raio emerge no segundo diopetro, ou seja, o raio emergente é paralelo ao raio incidente quando os meios de incidência e de emergência são iguais.

A energia total absorvida e refletida em uma área envidraçada é mostrada na figura 5.



A frequência de onda é o número de ondas que passam por um ponto em um determinado espaço de tempo.

Ondas longas: Ondas de baixa frequência, caracterizada pela cor vermelha (figura 6),constituem os raios infravermelhos.

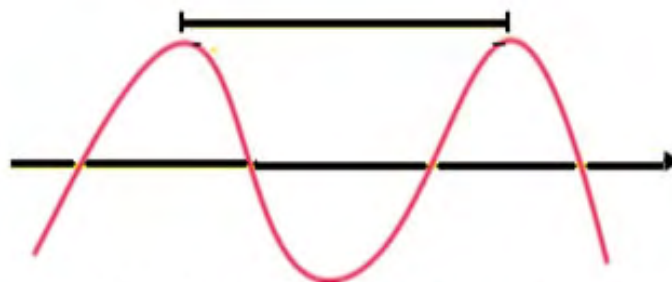


Figura 6 - Comprimento de onda de baixa frequência

Ondas Curtas: Ondas de alta frequência, caracterizada pela cor azul (figura 7), constituem os raios ultravioletas.

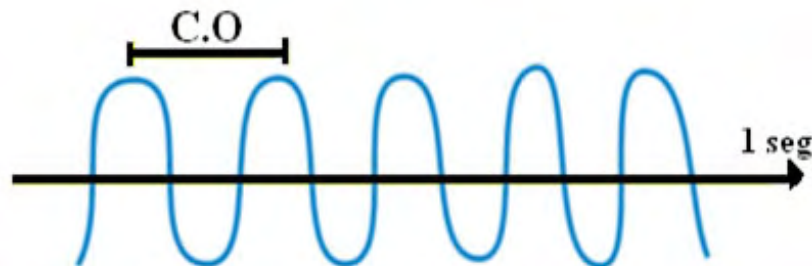


Figura 7- Comprimento de onda de alta frequência

No interior de um vidro transparente (figura 8) a luz se reduz a 200.000 km/s. É essa mudança de velocidade que faz o feixe de luz se desviar ao passar do ar para o vidro.

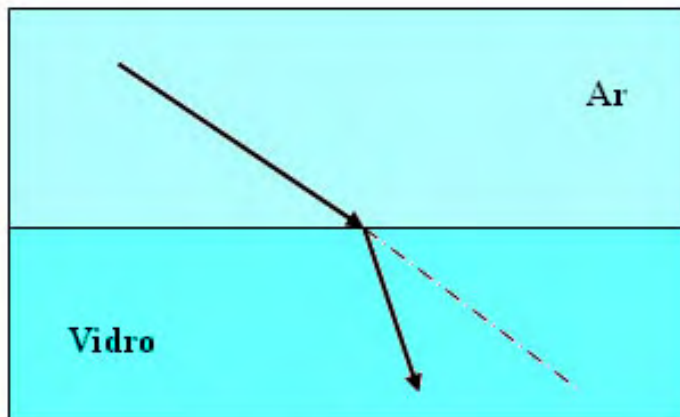


Figura 8 - Refração da luz

O astrônomo John Herschell explicou esse desvio, conforme ilustra a figura 9, comparando a onda de luz a uma formação de soldados que passa de um chão rijo (asfalto) para outro mais frouxo (areia). Na areia a velocidade das fileiras de soldados diminuiria.



Figura 9 - Desvio da luz ao penetrar no vidro

Como resultado, fica menor a distância entre as fileiras e a direção da marcha é desviada. Analogamente, ao passar do ar para o vidro, por exemplo, onde sua velocidade se reduz, a onda de luz se desvia e a distância entre as cristas ("comprimento de onda") fica menor.

A superfície de separação entre os dois meios chama-se "normal".

Há uma relação simples entre o ângulo A que o feixe faz com a normal no ar, e o ângulo B, que faz com a normal no vidro.

Nessa relação, os senos desses dois ângulos são:

$$\text{Índice de refração} = \frac{\text{sen A}}{\text{sen B}} = \frac{\text{velocidade da luz no ar}}{\text{velocidade da luz no vidro}}$$

Com os valores vistos na figura 10, temos que:

$$\text{índice de refração} = \frac{\text{sen A}}{\text{sen B}} = 1,5$$

O índice de refração é a chamada de LEI de SNELL.

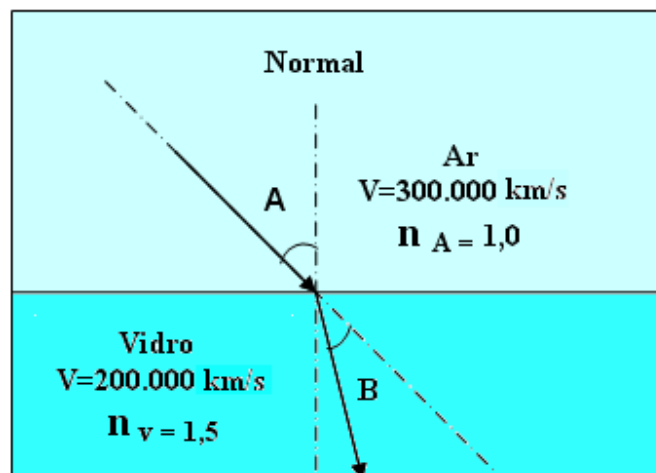


Figura 10 - Incidência da luz no vidro

2.6. Energia Solar Térmica

2.6.1. Aquecedor Solar Tradicional

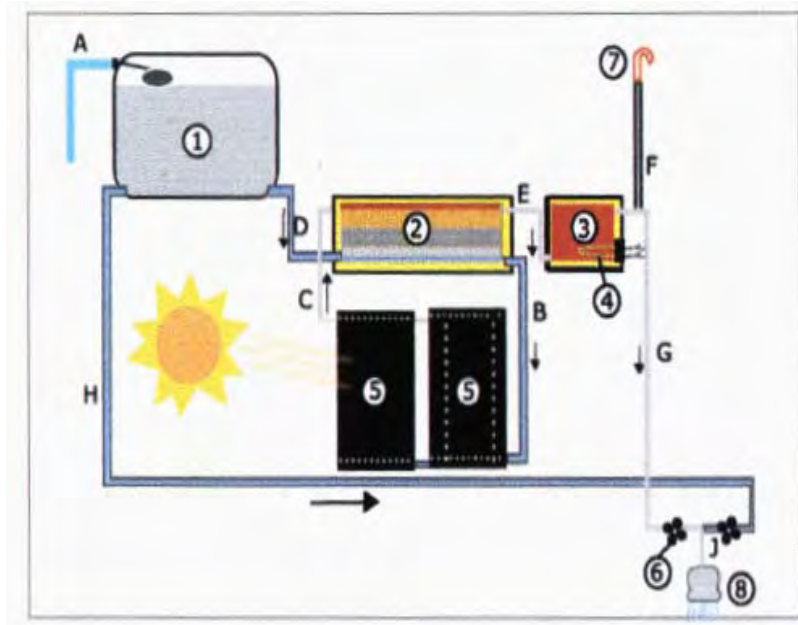


Figura 11-Princípio de funcionamento de um aquecedor solar tradicional de baixo custo.

Como se observa na figura 11, é da caixa de água tradicional (1) que vem a água que preenche os reservatórios térmicos isolados 2 e 3.

Essa caixa sempre deve estar um pouco acima dos reservatórios 2 e 3, facilitando a vazão da água em direção à ducha 8.

Do reservatório termicamente isolado para aquecimento solar é que parte a água mais fria B, para os coletores solares (5), para ser aquecida.

Dos coletores, pelo duto de água aquecida C, a água retorna ao reservatório 2.

Esse circuito fechado de água, B mais C, funciona naturalmente, sem necessidade de moto-bomba, já que a coluna B, por ter água mais fria, logo mais pesada do que a coluna C, que é mais quente, simplesmente “empurra” a água de C de volta ao reservatório.

É como se houvesse uma moto-bomba solar que opera enquanto houver muita luz ou sol. Esse efeito é denominado termosifão.

O reservatório termicamente isolado para aquecimento auxiliar possui uma resistência elétrica (4), acionada por um termostato, gera calor à água contida no

reservatório, em dias de chuva ou nublados.

O formato do recipiente para armazenamento da água aquecida é cilíndrico, podendo ser de cobre, inox ou polipropileno, isolado termicamente com poliuretano expandido sem CFC, em dias de chuva ou nublados.

Esse reservatório recebe, pelo duto E, água pré-aquecida do reservatório solar 2.

Se a água já vier quente, a resistência elétrica 4 não aciona, economizando energia. Se vier menos quente, a resistência 4 é acionada e fornece o calor que falta à água para estar na temperatura esperada.

No coletor solar, a luz do sol, ao entrar em contato com a placa negra metálica do coletor, se transforma em calor.

A água, por circular junto à placa negra, absorve esse calor, aumentando sua temperatura.

O misturador de água quente e fria visa obter a água para o consumo numa temperatura ideal.

Uma casa projetada para ter reservatórios de água quente e fria tem dois sistemas independentes de circulação de água:

- Para a água fria, o conhecido sistema hidráulico em PVC.

- Para a água quente, dutos de cobre com isolamento térmico especial, para evitar perda de calor, E G. Junto à ducha, o misturador recebe as duas águas, provenientes de G e H e as entrega devidamente temperadas ao usuário através da ducha.

O respiro serve para evitar presença de bolhas de ar no sistema, que são sentidas de forma desagradável pelo usuário. Ele é uma boa solução para eliminá-las.

Outra função do respiro é a de segurança. Se por algum motivo a resistência não parar de aquecer, haverá a geração de vapor e uma sobre pressão.

A ausência do respiro poderá levar o sistema a explodir, colocando vidas em perigo.

A principal vantagem do aquecedor tradicional é sua capacidade de gerar água muito quente, oferecer uma vida longa e capacidade de operar em pressões altas.

São características exigidas em grandes instalações e por usuários com exigências especiais.

2.6.2. Importância da cobertura de vidro

Examinando a conversão da radiação do Sol em calor, a baixo custo, de forma conveniente, o processo geral, para conversão de calor, é o efeito de estufa.

Na figura 12, uma chapa pintada de negro absorve a radiação solar incidente. Acima, está afixada uma chapa de vidro comum. Quando a temperatura da chapa negra aumenta, emite um incremento de calor na forma de luz infravermelha.

O receptor preto tem as propriedades de um corpo negro, os corpos negros ideais não têm só a maior taxa de absorção, mas também o mais alto coeficiente de emissão para todos os comprimentos de onda.

A emissão aumenta com a temperatura seguindo a lei da quarta potência da temperatura absoluta. A luz reemitida é de comprimento de onda progressivamente mais curto e maior energia, com a elevação da temperatura do corpo negro. Isto é expresso pela lei de Wien, que pode ser escrita como:

$$\lambda_{\text{máx}} \cdot T = \text{constante} = 2989 \quad (2.9)$$

sendo T a temperatura superficial do “corpo negro” e $\lambda_{\text{máx}}$ o comprimento em que a emissão de luz atinge um valor máximo.

O Sol emite radiação como um “corpo negro”, cuja temperatura superficial está por volta de 5700°C. Isto corresponde a uma emissão máxima de 0,5 μm .

Um corpo negro, à temperatura ambiente, emite radiação com um valor máximo perto de 10 μm , e que está dentro do espectro da luz infravermelha, invisível.

A chapa de vidro comum afixada acima da chapa negra numa estufa, tem uma absorvância. Assim, o vidro relativamente transparente à luz visível é absorvente para a luz infravermelha emitida pela chapa negra quando evacua sua energia térmica.

A luz infravermelha absorvida pelo vidro é reemitida em todas as direções: metade é emitida para o exterior e perdida; a outra metade é reemitida para a chapa negra que a absorve de novo. Mais e mais calor é acumulado na chapa negra, cuja temperatura vai aumentando.

Atinge-se o equilíbrio quando a energia ganha pela absorção de luz visível é exatamente equilibrada pela perda de energia pela emissão infravermelha da chapa de vidro.

Se a concentração da radiação solar estiver combinada com o efeito estufa, as temperaturas de equilíbrio atingidas são muito inferiores porque, na prática, a temperatura de equilíbrio é ainda mais reduzida por perdas de calor da chapa negra, devido à condutividade térmica e convecção no ar.

O funcionamento dos coletores planos pode ser melhorado, eliminando a maioria das perdas devidas à convecção do ar.

Não é conhecida qual eficiência poderia ser atingida com coletores de chapa plana, pois há toda uma faixa de rendimentos, não dependendo somente dos parâmetros do projeto, mas também da intensidade da luz e das condições climáticas, temperatura mínima da demanda, taxa de extração do calor, e outros.

Uma outra complicação é que o rendimento de um dado coletor não é constante ao longo do dia: assim, como uma sala aquecida que inicialmente requer um calor extra antes de atingir uma temperatura constante, o coletor inteiro, isto é, o vidro, o absorvedor e o isolamento à sua volta, bem como o ar que contem, têm de ser aquecidos pelo sol da manhã, depois de uma noite fria. Portanto, todos os coletores solares operam com saída máxima à tarde, quando a inércia térmica do sistema foi vencida.

É importante mencionar a importância do vidro, mais especificamente a contribuição do efeito estufa originada por esse tipo de cobertura transparente. O efeito estufa é conseguido quando uma cobertura transparente (preferivelmente o vidro) é colocada sobre o absorvedor solar.

Essa cobertura permite passar toda radiação solar e recupera o máximo possível a radiação infravermelha emitida pelo absorvedor (figura 12).

A superfície absorvedora pintada com cor escura pode absorver 95% da energia disponível (Hudson; Markell, 1985). Ela deve ser capaz de coletar a maior parte de radiação de onda curta, e emitir uma mínima quantidade de radiação de onda longa. Para essa finalidade, a superfície deve ter um elevado coeficiente de absorção no espectro solar e baixa emissividade para comprimentos de onda longa. Essa condição é necessária para diminuir as perdas por radiação. Comumente é utilizada superfície metálica com alta condutividade

térmica, recoberta com tinta preta fosca, sabendo que esta possui alta absorção de radiação e alta emissividade de ondas longas, prejudicando a eficiência do coletor solar. Para se evitar tudo isto, tem-se procurado a alternativa de utilizar superfícies seletivas, isto é, realizando nas mesmas um tratamento químico que, além da alta absorvidade da radiação, apresenta baixa emissividade de ondas longas.

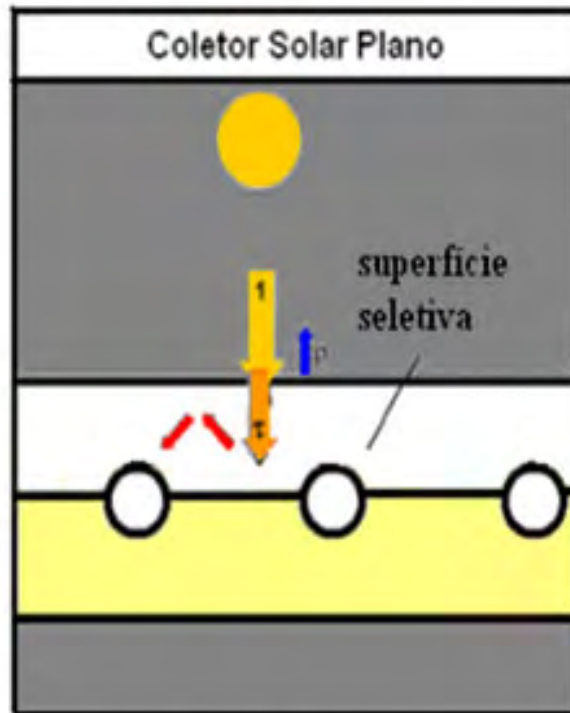


Figura 12 - Incidência da radiação solar no coletor

A radiação solar atinge a superfície do vidro do coletor (I).

Parte desta radiação é refletida pelo vidro para o exterior (ρ).

Parte que é absorvida pelo vidro (α).

Maior parcela que é transmitida para dentro do coletor (τ).

A principal importância da cobertura de vidro transparente, instalado no coletor solar plano, está na obtenção do efeito estufa, melhorando consideravelmente a eficiência desse equipamento, pois permite passar toda radiação solar e recupera o máximo possível a radiação infravermelha emitida pelo absorvedor.

O absorvedor pintado de negro tem as propriedades de um corpo negro e não tem só a maior taxa de absorção, mas também o mais alto coeficiente de emissão

para todos os comprimentos de onda.

A radiação emitida pelo absorvedor é bloqueada pelo vidro que é transparente para a radiação solar, mas não o é para a radiação infravermelha, gerada pelo absorvedor, e impede a passagem de parte dessa emissão, provocando gradiente de temperatura muito maior (Figura 13).

Uma segunda chapa de vidro pode ser colocada acima da primeira, conseguindo duas vantagens:

- Reduzem-se as perdas provocadas pela convecção do ar.
- As perdas da radiação infravermelha são reduzidas em mais de 25%, porque a metade dos 50% emitidos para fora, a partir do primeiro vidro, é irradiada de volta, conforme mostra a figura 13.

Entretanto, pode não compensar o uso de mais do que uma chapa de vidro, pelo fato de que cada uma reflete cerca de 15% da radiação solar incidente e porque, aumentando-se o número de chapas de vidros, diminuí-se a transparência global.

A maioria dos vidros tem um fator de transparência aproximadamente igual a 0,87, ou seja, somente 87% da radiação o atravessa, valor que cai para cerca de 75% com a colocação de um segundo vidro.

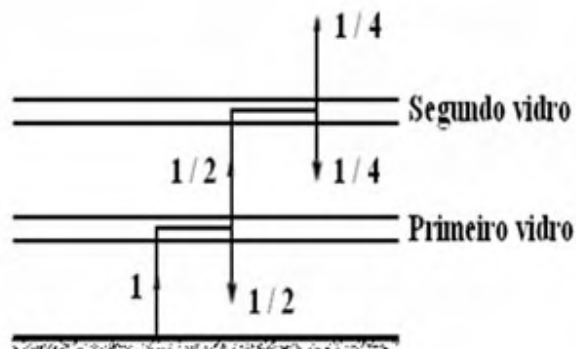


Figura 13 - Perdas da radiação infravermelha

Portanto, é necessário saber se o que se perde em transparência se compensa pelo que se recupera pelo efeito estufa suplementar.

CABIROL et al. (1980) explica todas as trocas por radiação que ocorrem entre o vidro e o absorvedor para um funcionamento corrente de 40°C.

2.6.3. Placa coletora solar

O princípio de funcionamento do aquecimento solar de água é bastante simples, é baseado na transmissão de calor através dos materiais que compõem o sistema. É composto por dois itens básicos: o reservatório térmico (boiler) e o coletor solar (placa).

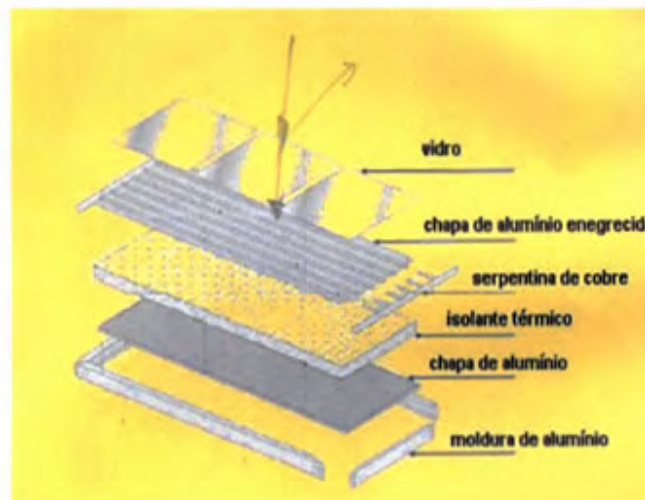


Figura 14 - Componentes da placa coletora solar

O vidro impede que entrem, no coletor, água de chuva, materiais sólidos, poeira etc. Tem como finalidade principal provocar o efeito estufa. Ou seja, a luz do sol, incidindo diretamente no vidro, faz com que parte dela penetre no interior do coletor, refletindo outra parcela de luz.

Na reflexão, a luz é composta basicamente de raios infravermelhos que não conseguem ultrapassar a camada de vidro, provocando assim um aquecimento interno que ajudará no aquecimento da água que está circulando na tubulação de cobre.

O tubo de cobre serve para conduzir a água aquecida pelo sol. O cobre, sendo um ótimo condutor de calor, absorverá todo esse calor do coletor e o transmitirá para a água que está circulando.

O cobre possui condutividade térmica (**K**) igual a **398 Wm⁻¹ °C**, sendo assim é recomendada sua utilização, pois é um dos materiais de maior condutividade térmica. A sua espessura (**δ**) deve variar entre **0,1 e 0,6 mm**.

A chapa de alumínio enegrecida tem por finalidade auxiliar no aquecimento do coletor. Pela sua cor negra, absorve melhor o calor da luz solar, transmitindo-o para os tubos de cobre e conseqüentemente para a água.

Para o isolamento térmico é utilizado o poliuretano expandido (**K isol = Ka = 0,030 Wm⁻¹ °C**), lã de vidro (**K isol = Ka = 0,038 Wm⁻¹ °C**) e lã de rocha (**K isol = Ka = 0,040 Wm⁻¹ °C**), pois impede que o calor captado pela luz solar escape para o ambiente.

À medida que a água é aquecida, as moléculas, tornando-se mais leves e, por conseqüência, tendem a subir na massa líquida ao tempo em que as moléculas de água das camadas superiores (de maior densidade), vão tomando o lugar das moléculas mais aquecidas, dando origem ao que se chama de movimento convectivo, movimento este que só é interrompido quando toda a massa líquida atinge a mesma temperatura, isto é, 100°C (na pressão atmosférica).

O calor transferido à água até que ela chegue aos 100°C é o que se chama de calor sensível. A velocidade da circulação aumenta com a intensidade da insolação.

O calor coletado pela chapa preta, devido à ação da radiação solar, e transferido à grade de tubos, a qual, por sua vez, o transfere para a água existente no interior da citada grade tornando-a menos densa, dando início à convecção natural, exatamente (como ocorre com uma chaleira), ajudada ainda pela pressão da coluna de água existente no reservatório térmico, já que este está em posição superior em relação ao coletor solar.

Esse movimento convectivo (ou convecção natural) é também conhecido como termosifão e só será interrompido quando toda a massa de água entrar em

equilíbrio térmico.

No caso da convecção natural, o deslocamento das moléculas de água se faz com menor intensidade, portanto com baixa velocidade de deslocamento das respectivas moléculas.

No coletor solar, o calor sensível é de no máximo 80°C em um dia ensolarado e sem nuvens, condição essa normalmente observada nas regiões Norte e Nordeste do Brasil.

Quando um certo volume de água quente é retirado para consumo, imediatamente igual volume de água, à temperatura ambiente, entra no reservatório termicamente isolado.

O equilíbrio térmico é desfeito, restabelecendo o movimento convectivo, ou seja, a convecção natural, e assim por diante.

Logo, um sistema solar de aquecimento de água é composto basicamente de um coletor solar, onde se verifica a conversão dessa energia em energia térmica, um reservatório termicamente isolado e respectiva tubulação de alimentação do sistema e distribuição de água quente.

A circulação da água pode ser feita através do efeito termosifão ou de motobombas.

No primeiro processo, a circulação da água, através do coletor, é realizada por convecção, ou seja, havendo Sol, o fluido aquecido no coletor se desloca para cima, pois sua densidade é inferior à do fluido não aquecido.

No circuito fechado (figura 15), o fluido quente, por sua vez, é substituído pelo frio que, então, é aquecido no coletor e se desloca para cima.

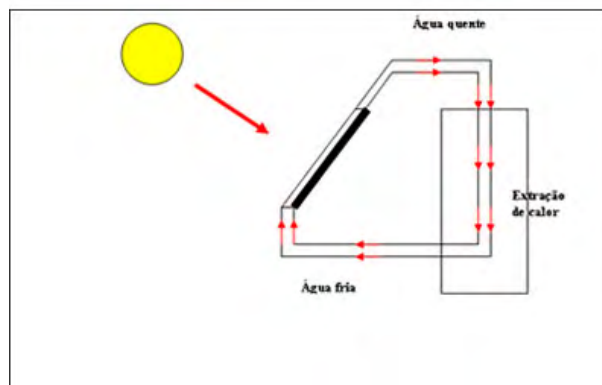


Figura 15 - Sistema de aquecedor solar com sistema fechado.

2.6.4. Boilers (Reservatórios Térmicos)



Figura 16 - Reservatório isolado termicamente

São reservatórios fabricados com matérias-primas como o cobre, o alumínio e o aço inoxidável, isolados termicamente e que armazenam e conservam a água aquecida pelo sol através dos coletores solares.

Um sistema auxiliar elétrico que complementa o aquecimento da água nos dias em que o sol não aqueça plenamente, como nos dias de chuva, pode ser instalado no interior do boiler.

Opcionalmente, o boiler pode ser fabricado com saídas para interligação com sistema de aquecimento auxiliar a gás. São desenvolvidos em vários modelos e capacidades que variam de 100 a 20000 litros.

2.6.5. Sistema Básico de aquecimento de água.

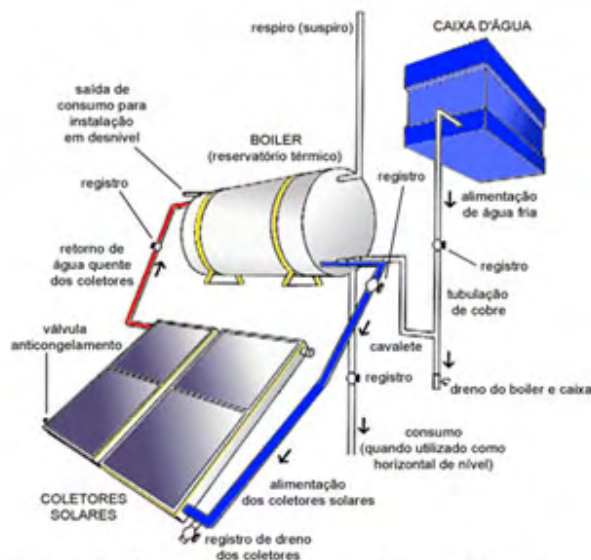


Figura 17 - Funcionamento de um sistema básico de aquecimento de água

O reservatório térmico, também conhecido por Boiler, é um recipiente para armazenamento da água aquecida. São cilindros de cobre, inox ou polipropileno, isolados termicamente com lã de vidro. Desta forma, a água é conservada aquecida para consumo posterior.

A industrialização por processos automatizados em seus materiais metálicos, como o cobre e o alumínio e a agregação de componentes de material termoplástico, deram a essa linha de coletores solares, um design inovador e permitiram que sua montagem seja feita sem a necessidade de rebites ou parafusos, dando-lhe excelente vedação e prolongando sua vida útil.

2.6.5.1. Especificações Técnicas

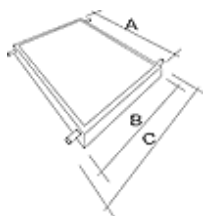
Caixa externa em perfis de alumínio, cantoneiras em material termoplástico, aletas em cobre, tubulação interna em cobre, vidros lisos, isolamento térmico em poliuretano (sem CFC) e vedação em borracha de silicone.

Esse modelo de coletor solar tem vedação total, pois não possui rebites ou parafusos para seu fechamento.

Disposição de instalação: Vertical, geralmente sobre o telhado.

Pressão de trabalho: até 40 m.c.a (metros de coluna d'água).

Dimensões Gerais: Placa Coletora Solar Max Mini Soletrol



A - Comprimento: 1000 mm

B - Largura: 1030 mm

C - Largura (incluindo tubos): 1130 mm

Altura: 100 mm

Dimensões:

Área coletora nominal: 1,03 m²

Área coletora real: 0,95 m²

Peso aproximado: 11 kg

Diâmetro dos tubos de entrada e saída de água: 22 mm.

Diâmetro do tubo de entrada de água fria da rede e o diâmetro do tubo de saída (consumo) de água quente: 28 mm.

2.6.5.2. Manutenção da placa coletora

Lavar os vidros uma vez no mês de abril e uma vez no mês de julho, sempre pela manhã, quando as placas estão frias, para evitar o risco de quebra dos vidros devido ao choque térmico.

Os últimos aperfeiçoamentos no campo são sumariados, num estilo fácil, e que o não-especialista poderá acompanhar sem dificuldade.

Nesta época, onde se fala tanto de “crise energética”, “poluição” e “tecnologia alternativa”, deve-se buscar a energia não onde ela é cara e “suja” (isto é, poluente), mas onde ela é mais abundante e “limpa”.

É o Sol quem fornece essa energia, sob várias formas: o vento, a água, as plantas, o calor e a luz.

Trata-se de imensas quantidades de energia, para as quais se propõe a encontrar aplicações e resolver o problema que daí decorre: como captar essa energia, tão difusa, especialmente para sua conversão em energia elétrica, a de maior importância dentre as aplicações da Energia Solar.

2.6.5.3. Certificações

Os eletrodomésticos são identificados - dentro da categoria quanto aos níveis de eficiência energética.

Este produto é testado, aprovado e etiquetado pelo **INMETRO** com a classificação:

- Faixa: **B**
- Eficiência Energética Média: **49,9 %**
- Produção Média Mensal de Energia: **69,9 kWh/mês**

Conforme condições gerais especificadas no certificado de garantia e condições gerais de fornecimento.

O INMETRO, com o apoio do PROCEL, possui o PBE - Programa brasileiro de etiquetagem que tem a finalidade de testar equipamentos que consomem ou economizam energia.

Para melhor informar o consumidor da qualidade e eficiência de coletores solares e reservatórios térmicos, a etiqueta INMETRO/PROCEL de eficiência energética (figura 18), informa dados do teste de pressão, exposição a seco, estanqueidade, choque térmico, eficiência térmica e análise de produção média mensal de energia

No caso de coletores solares, a letra "A" indica um produto mais eficiente e a letra "G" um produto pouco eficiente.



Figura 18 - Etiqueta de eficiência - INMETRO/PROCEL

A eficiência de um equipamento é mostrada pelo selo de certificação, fornecido pelo INMETRO, como mostra a figura 19.

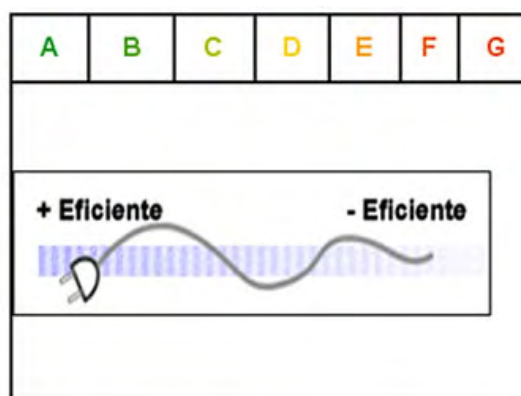


Figura 19 - Padrão de classificação conforme eficiência

O Custo/Benefício dos coletores pode ser avaliado pelo resultado da divisão do Custo do Coletor Individual pela Produção Média Mensal de Energia desse mesmo coletor.

Quanto menor o valor encontrado, melhor será a relação custo/benefício para o usuário.

As tabelas 1 e 2 que representam respectivamente a produção média de energia em função da eficiência média dos reservatórios com suas características.

Os reservatórios térmicos também passam por testes do INMETRO, obtendo ou não sua certificação, mas não recebem classificações como os coletores solares.

Tabela 1 - Produção média mensal de energia x eficiência energética média -Soletrol

MODELO	PRESSÃO DE FUNCIONAMENTO		ÁREA EXTERNA DO COLETOR (m ²)	PRODUÇÃO MÉDIA MENSAL DE ENERGIA (kWh/mês)	EFICIÊNCIA ENERGÉTICA MÉDIA (%)	FAIXA DE CLASSIFICAÇÃO
	(kPa)	(mca)				
MASTER COBRE	392	40	1,60	108,6	50,6	B
INDUSTRIAL PLUS	392	40	1,92	153,5	57,5	A
INDUSTRIAL PLUS HORIZONTAL	392	40	1,92	153,5	57,5	A
MASTER ALUMÍNIO	392	40	1,60	117,5	55,4	B
POPSOL 1,6	392	40	1,60	114,6	52,8	B
SUPER MINI	392	40	0,97	77,9	57,9	A
MAX ALUMÍNIO 1,45	392	40	1,42	107,4	54,2	B
MAX ALUMÍNIO 1,6	392	40	1,58	127,4	58,4	A
MAX ALUMINIO HORIZONTAL 1,6	392	40	1,58	127,4	58,4	A
MAX ALUMÍNIO 2,0	392	40	2,00	161,3	58,4	A
MAX ALUMÍNIO 1X2 HORIZONTAL	392	40	2,06	139,3	52,6	B

MAX COBRE 1X2 HORIZONTAL	392	40	2,06	143,4	50,6	B
MAX COBRE 2XT VERTICAL	392	40	2,06	143,4	50,6	B
MINI MAX ALUMÍNIO	392	40	1,02	68,8	52,6	B
MINI MAX COBRE	392	40	1,02	71,1	50,6	B
SOLKENT	392	40	1,60	107,1	50,9	B
MAX COBRE	392	40	1,42	100,8	51,9	B
MINI COBRE	392	40	1,03	69,9	49,9	B

Fonte: INMETRO/PROCEL, 2005

Tabela 2- Reservatórios com suas características – Soletrol

CAPACIDADE (litros)	MODÉLO	POTÊNCIA DA RESISTÊNCIA (kW)	PERDA(*) ESPECÍFICA DE ENERGIA MENSAL (kWh/mês/l)	PRESSÃO DE FUNCIONAMENTO		DIMENSÕES EXTERNAS (mm)		MATERIAL DO CORPO INTERNO	MATERIAL DO ISOLAMENTO TÉRMICO
				kPa	(mca)	COMPRI-MENTO	DIÂMETRO		
200	SUPER BOILER COBRE HORIZONTAL DE NÍVEL	3,5	0,22	20	2	1050	660	COBRE	POLIURETANO
	SUPER BOILER COBRE HORIZONTAL DE NÍVEL	3,5	0,23	20	2	1440	660	COBRE	POLIURETANO
300	BOILER COBRE HORIZONTAL DE NÍVEL	3,5	0,30	20	2	1400	600	COBRE	POLIURETANO
400	SUPER BOILER COBRE HORIZONTAL DE NÍVEL	3,5	0,22	20	2	1780	660	COBRE	POLIURETANO
	BOILER COBRE HORIZONTAL DE NÍVEL	3,5	0,29	20	2	1760	600	COBRE	POLIURETANO

500	SUPER BOILER COBRE HORIZONTAL DE NÍVEL	3,5	0,19	20	2	2140	660	COBRE	POLIURE- TANO
	BOILER COBRE HORIZON- TAL DE NÍVEL	3,5	0,27	20	2	2120	600	COBRE	POLIURE- TANO
600	SUPER BOILER COBRE HORIZONTAL DE NÍVEL	3,5	0,14	20	2	2530	660	COBRE	POLIURE- TANO
	BOILER COBRE HORIZONTAL DE NÍVEL	3,5	0,20	20	2	2500	600	COBRE	POLIURE- TANO

Fonte: INMETRO/PROCEL , 2005

No mercado existe um sistema de aquecimento solar especialmente desenvolvido para ser instalado nos telhados de baixa altura na cumeeira (até 1 metro da laje), como ilustra a figura 20.

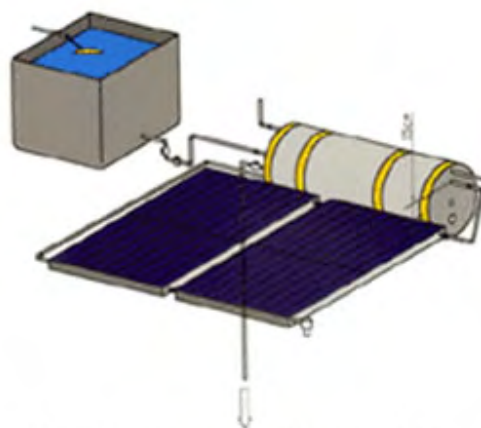


Figura 20 - Aquecedor Solar com boiler horizontal de nível.

Batizado comercialmente de Boiler Horizontal de Nível e Nível, permite a instalação do boiler em nível com os coletores solares e em nível com a caixa d'água.

Um dispositivo de bloqueio de fluxo inverso, propicia a instalação do boiler em nível com os coletores solares, viabilizando, portanto, sua aplicação em telhados mais baixos. O dispositivo interno ao boiler impede o fluxo contrário de água quente na ausência de insolação suficiente para continuar a aquecer a água. O fluxo inverso, que ocorreria sem a existência desse dispositivo, resfria a água do boiler.

Quando existe insolação suficiente, a água circula naturalmente pelo sistema de aquecimento solar em razão das diferenças de densidade entre a água fria e a quente. Em instalações semelhantes, sem a tecnologia "Nível e Nível", com boiler ao lado dos coletores e da caixa d'água, esta circulação se dá também à noite, mas no sentido inverso. Com a utilização desse novo sistema, além de se viabilizar a instalação em telhados baixos, obtém-se também redução das perdas noturnas de temperatura da água nos sistemas instalados com desnível normal de cerca de 30 cm, nos quais sempre existe um pouco de recirculação (fluxo inverso).

2.6.5.4. Dimensionamento de um sistema de aquecimento solar

O dimensionamento correto de um sistema de aquecimento solar evita a falta de água quente para o consumo ou também o superdimensionamento que encarece a instalação.

Para dimensionar-se um sistema, deve-se levar em conta o volume de água de consumo, como indica a tabela 3.

Tabela 3 - Volume de água quente de acordo com o consumo

Componentes	Consumo diário
Ducha normal	40 litros por pessoa para banho de 10 min.
Lavatório	5 litros por pessoa
Bidê	7 litros por pessoa
Cozinha	20 litros por pessoa
Lavanderia	20 litros por kg de roupa seca
Banheira simples	100 litros por banho
Banheira dupla	200 litros por banho

Os cálculos são considerados para pressão de trabalho de 4 m.c.a entre o topo da caixa d'água e a saída de água quente.

É aconselhável uma reserva de 100 litros para atender possíveis excessos ou emergências.

Procedimentos necessários para dimensionar um aquecedor solar para uma residência com cinco moradores. A casa terá água quente na cozinha, uma banheira de hidromassagem simples, chuveiros (2 banheiros) e um lavatório.

Resolução: preenchendo a tabela 4, determina-se o volume de água quente necessária:

Tabela 4 - Consumo de água em litros.

Componentes	Consumo	Consumo Total (litros)
Ducha	40 x 5	200
Lavatório	5 x 5	25
Cozinha	20 x 5	100
Banheira	100 litros 1 vez ao dia	100
Reserva		100
Consumo total diário		525

2.6.5.5. Escolha do local de instalação

Para que os coletores tenham um ótimo aproveitamento da luz solar, é recomendado o seu posicionamento ao norte geográfico. Para a sua localização correta, é necessária a utilização de uma bússola.

O norte geográfico está situado sempre à direita do norte magnético e varia de acordo com o local.

Para a cidade de São Paulo, o norte geográfico está a 18° à direita do norte magnético. Em geral, ele se encontra aproximadamente a 20° para o Brasil.

2.6.5.6. Inclinação dos coletores

A inclinação dos coletores requer muito cuidado na hora de serem instalados. Para saber a inclinação ideal, utiliza-se a regra:

Latitude do local + 10°

Cidade	Latitude (graus)	Inclinação (graus)
São Paulo	24	34
Porto Alegre	30	40
Curitiba	25	35
Florianópolis	28	38
Rio de Janeiro	23	33
Campo Grande	20	30
Belo Horizonte	20	30
Salvador	13	23
Fortaleza *	4	14 *
Brasília	16	16
Manaus*	2	12 *

Cuiabá	16	26
Natal*	6	16 *
Recife*	8	18 *

Tabela 5 - Latitudes de algumas Cidades Brasileiras e a Inclinação dos Coletores.

Quando a inclinação for menor que 20° (*), é recomendada a instalação de um suporte, pois a inclinação mínima é de 20° para garantir o fluxo adequado de água.

2.7. Fontes de energia renovável

A energia renovável é aquela que pode ser explorada continuamente, isto quer dizer que sua quantidade disponível na terra não se esgota à medida que seja explorada.

Para um desenvolvimento sustentável, é necessário que as fontes renováveis de energia disponíveis na natureza, sejam utilizadas em constante progressão e administradas de forma adequada, buscando o desenvolvimento dos países, melhorando, assim, a qualidade de vida das pessoas.

A principal fonte de energia renovável é a emitida pelo sol, que envia para o nosso planeta energia radiante como luz visível, radiação infravermelha e a radiação ultravioleta.

Não obstante, a atmosfera transforma-se numa variedade de efeitos, alguns dos quais têm grande importância como o recurso energético: da energia eólica, da energia da biomassa, da diferença oceânica da temperatura e da energia das ondas.

2.8. Constante Solar

A constante Solar é determinada pelo fluxo de energia proveniente do sol, que incide sobre uma superfície perpendicular à direção de propagação da radiação solar por unidade de tempo e de área.

A unidade dessa constante é dada por: $\mathbf{J\ s^{-1}\ m^{-2}}$, equivalente a $\mathbf{Wm^{-2}}$.

O valor aceito para a constante solar $\mathbf{G_{sc}}$, nos últimos anos, segue as técnicas de medição que se tem empregado, que não indica que tenha variado na magnitude da energia que recebe do sol.

$$\mathbf{G_{sc} = 1353\ Wm^{-2}}$$

Este valor equivale a:

$$\mathbf{G = 1.940\ cal\ cm^{-2}\ min^{-1} = 428\ Btu\ ft^{-2}\ h^{-1} = 4871\ MJ\ m^{-1}}$$

2.9. Radiação normal extraterrestre

A excentricidade pequena da órbita terrestre faz com que, em torno de 4 de janeiro, quando a terra está mais próxima do sol, a radiação solar extraterrestre é máxima.

No entanto, seis meses mais tarde, em torno de 1 de julho, a terra está mais distante do sol e, então, a radiação solar extraterrestre é mínima.

A equação que descreve o fluxo da energia em um plano transversal do fluxo à radiação solar extraterrestre, durante todo o ano é:

$$G_{on} = G_{sc} \left[1 + 0,033 \cos \frac{360 n}{365} \right] \quad (2.10)$$

onde: G_{on} é o fluxo da radiação extraterrestre, a medida em um plano transversal do fluxo à radiação, e n o número de dias do ano.

Tabela 6 - Determinação do valor de n (dias do ano)

Mês	n para o i -ésimo dia do mês
Janeiro	i
Fevereiro	$31 + i$
Março	$59 + i$
Abril	$90 + i$
Maio	$120 + i$
Junho	$151 + i$
Julho	$181 + i$
Agosto	$212 + i$
Setembro	$243 + i$
Outubro	$273 + i$
Novembro	$304 + i$
Dezembro	$334 + i$

2.10. Tipos de radiação

A radiação direta é a recebida diretamente do sol, não sofrendo nenhuma dispersão atmosférica. A radiação extraterrestre é, conseqüentemente, radiação direta.

A radiação difusa é aquela que é recebida do sol, após o giro de lado. A radiação difusa é recebida através das nuvens.

A radiação terrestre é aquela que surge dos objetos terrestres. É aquela que uma parede branca, um lago refletem, etc.

A radiação total é a soma das radiações direta, difusa e terrestre que são recebidas por uma superfície.

A radiação global é a soma da direta mais difusa.

2.11. Determinação da Potência (fluxo de energia com a distância)

Considerando duas esferas concêntricas de raios r_1 e r_2 , muito maiores que a da fonte luminosa, cujo centro coincida exatamente com a posição dessa fonte. Medindo a intensidade luminosa na superfície da esfera com raio r_1 , e esse valor será designado G_1 .

A potência (energia por unidade de tempo) que passa através da esfera completa estará dada por G_1 multiplicada pela área da esfera.

$$\text{Potência}_1 = 4 \pi r_1^2 G_1 \quad (2.11)$$

Por outro lado, sendo G_2 a intensidade luminosa medida a distância r_2 , a potência avaliada na superfície da esfera 2 é:

$$\text{Potência}_2 = 4 \pi r_2^2 G_2 \quad (2.12)$$

Considerando que o espaço que separa as duas esferas é perfeitamente transparente, ou seja, não absorve radiação, então a energia pela unidade do tempo é igual para as duas esferas. Conseqüentemente,

$$\text{Potência}_1 = \text{Potência}_2 \quad (2.13)$$

$$4 \pi r_1^2 G_1 = 4 \pi r_2^2 G_2 \quad (2.14)$$

$$G_1 \cdot r_1^2 = G_2 \cdot r_2^2 \quad (2.15)$$

2.12. Irradiância (G)

A irradiância (**G**) é definida pela rapidez de incidência de energia radiante sobre uma superfície, por unidade de área.

Logo, tem-se **G_o**, **G_b**, **G_d**, para a irradiância extraterrestre, direta, difusa, etc.

A irradiância será máxima sobre um plano quando este estiver em posição normal à direção de propagação da radiação. No entanto, será mínima se o plano estiver paralelo à radiação. A intensidade da radiação sobre a superfície dependerá do ângulo θ formado entre a normal da superfície e a direção de propagação da radiação (ângulo de incidência).

$$G_T = G_n \cdot \cos \Theta \quad (2.16)$$

onde: G_T = irradiância sobre um plano com qualquer inclinação;

G_n = irradiância sobre um plano normal à direção de propagação da radiação.

O piranômetro é um instrumento utilizado para medir a irradiância global (direta mais difusa), usualmente sobre uma superfície (figura 21).

O tipo mais comum de piranômetro é constituído por dois sensores de temperatura, sendo que um deles fica exposto à radiação solar e o outro protegido da radiação. Isso faz com que haja uma diferença de temperatura entre ambos. Para evitar erros de leitura, causados por diversos fatores meteorológicos, dentre outros, o sensor exposto à radiação é protegido por um hemisfério de vidro, o qual possui características ópticas apropriadas.



Figura 21 - Esquema de um piranômetro

Com dois piranômetros pode-se medir separadamente a radiação direta e a difusa.

Para isso, um deles é instalado horizontalmente, determinando a radiação global e, o outro, que determinará a radiação difusa, recebe um disco (sombra) para obstruir a radiação direta.

A radiação direta é obtida pela diferença da radiação global e a radiação difusa.

2.13. Irradiação (I)

A determinação da irradiação é dada pela integral durante todo o período em questão. Geralmente usa-se I para a insolação por hora e H para insolação em período de um dia.

Logo, tem-se H_0 que simboliza a irradiação extraterrestre em um dia; I_d simboliza a irradiação difusa em uma hora, etc.

A relação entre a irradiação e a irradiância é dada por:

$$I = \int_{t_1}^{t_2} G(t) dt \quad (2.17)$$

2.14. Determinação da eficiência de um coletor solar

Pode-se representar a análise energética de um coletor solar plano por meio da seguinte equação:

$$Q_{abs} = Q_u + Q_L + du/dt \quad (2.18)$$

onde :

Q_{abs} = calor total incidente absorvido por unidade de tempo (W);

Q_L = perdas de calor (W);

Q_u = calor útil (transferido ao líquido do trabalho) (W);

du/dt = rapidez da energia interna armazenada no coletor (W).

Obs: o valor de **du/dt** é muito pequeno, portanto, geralmente é desprezado.

Sabe-se que:

$$Q_{abs} = H_T \cdot A_c (\tau \alpha) \quad (2.19)$$

$$Q_u = m \cdot C_p \cdot dT/dt \quad (2.20)$$

$$Q_L = U_L \cdot A_c \cdot (T_{p,m} - T_a) \quad (2.21)$$

$$(\tau \alpha) = \frac{(\tau \alpha)}{1 - (1 - \alpha) \rho d} \quad (2.22)$$

onde:

H_T = energia solar incidente ($W m^{-2}$);

A_c = área efetiva do coletor (m^2);

$\tau \alpha$ = produto da transmitância do vidro e a absorptância da placa coletora que representa a fração da radiação solar que é absorvida pelo coletor;

mC_p = capacidade calorífica do fluido de trabalho ($J ^\circ C^{-1}$);

dT/dt = rapidez de mudança da temperatura em relação ao tempo ($^\circ C/s$);

U_L = coeficiente global das perdas do calor pela radiação, ao convectivo e à condução ($Wm^{-2} ^\circ C^{-1}$);

$T_{p,m}$ = temperatura média da placa de absorção ($^\circ C$);

T_a = temperatura do ar ambiente ($^\circ C$);

ρ_d = refletância difusa.

Obs: O valor de ρ_d depende do número das tampas de vidro que é usado na placa solar. Assim, para 1, 2, 3 e 4 tampas, os valores do ρ_d são aproximadamente **0,16; 0,24; 0,29 e 0,32, respectivamente.**

$$Q_u = A_c [S - U_L (T_{p,m} - T_{amb})] \quad (2.23)$$

Onde : $S = H_T (\tau \alpha)$ = energia absorvida no coletor por unidade de área

$$\eta_c = \frac{Q_u}{H_T \cdot A_c} \quad (2.24)$$

Através da equação (4.14.7) pode-se calcular a eficiência do coletor.

2.14.1. Coeficiente total de perdas de calor (U_L)

A evolução numérica do coeficiente total de perdas de calor (U_L) requer uma análise detalhada. O modelo considera as distintas perdas de calor ao coeficiente total, analisando cada uma em separado.

$$U_L = U_t + U_b + U_e \quad (2.25)$$

onde:

U_L = soma de vários coeficientes de perdas de calor;

U_t = coeficiente total de transferência de calor para a parte superior do coletor;

$$U_b = \frac{K_a}{l} = \text{coeficiente de perda de calor pelo fundo}; \quad (2.26)$$

pelos lados.

$$U_e = \frac{K_a M P}{l' A_c} = \text{coeficiente de perda de calor por condução} \quad (2.27)$$

Sendo:

K_a = condutividade térmica do isolante ($\text{Wm}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}$);

l = espessura do isolante pelo fundo (m);

l' = espessura do isolante pelos lados (m);

P = perímetro do coletor (m);

M = altura do coletor (m);

A_c = área efetiva do coletor (m^2).

$$U_T = \left[\frac{N}{\left(\frac{C}{T_{p,m}} \right) \cdot \left(\frac{T_{p,m} - T_{amb}}{N + f} \right)^{0,33}} + \frac{1}{hw} \right]^{-1} +$$

$$+ \left[\frac{\sigma(T_{p,m} - T_{amb}) \cdot (T_{p,m}^2 - T_{amb}^2)}{\varepsilon_p + 0,005 \cdot N \cdot (1 - \varepsilon_p) - 1 + \left(\frac{2N + f - 1}{\varepsilon_g} \right) - N} \right]$$

Onde:

$$f = (1 - 0,004 \cdot hw + 0,0005 \cdot hw^2) \cdot (1 + 0,091) \quad (2.28)$$

$$C = 250 [1 - 0,004 \cdot (\beta - 90)] \quad (2.29)$$

$T_{p,m}$ = temperatura da placa (K);

T_a = temperatura ambiente (K);

N = número de coberturas transparentes;

σ = constante de Stefan-Boltzmann = $5,67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$;

hw = coeficiente de transferência de calor por convecção, devido ao vento
($\text{Wm}^{-2}\text{°C}^{-1}$)

O coeficiente de transferência de calor por convecção (**hw**) , devido ao ar, que mantém contato com a placa de vidro é dado por:

$$hw = 5,7 + 3,8 \cdot v \quad (2.30)$$

onde v é a velocidade do vento (m s^{-1}).

2.14.2. Calor Útil (Q_u)

A equação utilizada para determinar Q_u , de modo mais correto, é dada por:

$$Q_u = A_c \cdot F_3 [S - U_L (T_i - T_{amb})] \quad (2.31)$$

O calor útil (Q_u) depende de um fator global (F_3) e da temperatura do fluido ao entrar no coletor (T_i).

Para calcular F_3 , é necessário determinar os valores de dois outros fatores: F_1 o fator de eficiência da aleta e F_2 o fator de eficiência da secção.

2.14.3. Cálculo do fator de eficiência da aleta (F_1)

$$F_1 = \frac{\tanh [m (d - D/2)]}{m (d - D/2)} \quad (2.32)$$

onde:

$$m = \sqrt{\frac{U_L}{k \delta}} \quad (2.33)$$

m = fluxo de massa do fluído;

d = espaçamento entre tubos (m);

D = diâmetro exterior do tubo (m);

U_L = coeficiente total de perdas de calor ($\text{Wm}^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$);

k = condutividade térmica da aleta ($\text{Wm}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}$);

δ = espessura da placa (m).

2.14.4. Cálculo do fator de eficiência da secção (F_2)

$$F_2 = \frac{\frac{1}{U_L}}{d \cdot \left\{ \frac{1}{U_L [D + (d - D)]} \right\} + \frac{1}{\pi Di hf}} \quad (2.34)$$

Onde:

Di = diâmetro interior do tubo (m);

hf = coeficiente de transferência de calor por convecção na interface tubo-fluido ($\text{Wm}^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$);

U_L = coeficiente total de perdas de calor ($\text{Wm}^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$);

d = espaçamento entre tubos (m);

D = diâmetro exterior do tubo (m).

2.14.5. Cálculo do fator de eficiência global do coletor F_3

$$F_3 = \frac{\dot{m} C_p}{Ac U_L} \left[1 - \exp \left(\frac{-U_L F_2 Ac}{\dot{m} C_p} \right) \right] \quad (2.35)$$

Onde:

\dot{m} = fluxo de água (kg s^{-1});

C_p = calor específico da água ($\text{J kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$);

Ac = Área efetiva do coletor (m^2);

U_L = coeficiente total de perdas de calor ($\text{Wm}^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$).

Com esta equação, é possível avaliar o funcionamento de cada uma das partes da placa absorvedora, assim como as características do fluido de trabalho.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O objetivo deste trabalho foi determinar a eficiência de um equipamento solar de aquecimento d'água convencional, disponível no mercado, o qual passará por alterações em sua placa solar, acrescentando na mesma aletas de vidro, buscando um equipamento com melhor eficiência. Os coletores solares planos utilizados na pesquisa foram disponíveis na Universidade Estadual Paulista para serem avaliados, após a necessária modificação realizada pela empresa fabricante do equipamento.

Esses equipamentos foram instalados numa área aberta junto ao Departamento de Engenharia Rural, da Faculdade de Ciências Agrônomicas da Universidade Estadual Paulista (UNESP), na cidade de Botucatu, estado de São Paulo, localizada na latitude de 22°54' Sul e longitude de 48°27' Oeste. Para maximizar seu desempenho, foram instalados na direção leste-oeste, com a face absorvedora voltada para o norte, formando um ângulo de 23° com o plano horizontal.

O coletor é do tipo de placas planas com tubos de cobre soldados paralelamente entre si e nas suas extremidades, superior e inferior, são soldados dois tubos transversais em relação aos paralelos. Sobre os tubos paralelos e no sentido longitudinal, são soldados aletas, também de cobre, para promover uma maior área de captação da radiação e melhor condução térmica para o fluido de trabalho (Figuras 24 e 25).

A caixa lateral e o fundo são de alumínio e, na parte superior, há um vidro de 3,0 mm, sendo todo o conjunto selado com cola de silicone.

É um modelo padrão disponível comercialmente, sendo que especificamente este é fabricado pela firma Soletrol, tradicional neste setor, situada no Município de São Manuel, Estado de São Paulo.

Diante dos dados coletados, determinou-se a eficiência (ou rendimento) obtida pela razão entre a energia útil transferida para o fluido de trabalho (Q_u) e a energia global incidente (Q_i):

Equação a ser utilizada para cálculo do rendimento (η_c):

$$\eta_c = \frac{Q_u}{Q_i} \quad (3.1)$$

$$\text{Sendo } Q_i = I \cdot A \quad (2.2) \quad \text{e} \quad Q_u = m \cdot c \cdot (T_s - T_e) \quad (3.3)$$

Onde:

Q_u = Quantidade de calor útil (W);

Q_i = quantidade de calor total incidente (W);

I = intensidade da radiação solar (H_T) ($W \cdot m^{-2}$);

A = área do absorvedor (m^2);

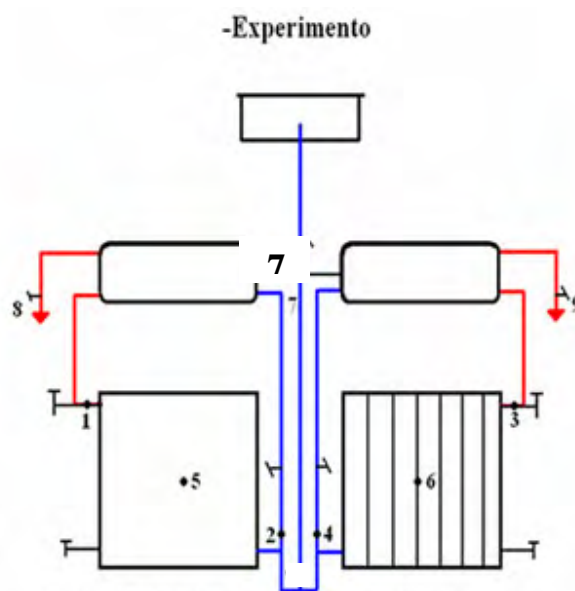
m = vazão mássica do fluido (kg s^{-1});

c = calor específico do fluido ($\text{J kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$);

T_s = temperatura do fluido na saída do coletor ($^\circ\text{C}$) e,

T_e = temperatura do fluido na entrada do coletor ($^\circ\text{C}$).

Foram coletadas medidas de temperatura, vazão e radiação no período entre 11 horas e 15 horas, de 10 em 10 minutos. Para a obtenção das temperaturas da água, que circula pelo equipamento, foi utilizado termopar (Figura 22). A vazão média da água também foi monitorada nesse mesmo período.



1 – termopar- determina a temperatura da água na saída da placa solar padrão.

2 - termopar- determina a temperatura da água na entrada da placa solar padrão.

5 - termopar- determina a temperatura do ar no interior da placa solar padrão.

8 - termopar- determina a temperatura da água no reservatório – placa solar padrão.

3 - termopar- determina a temperatura da água na saída da placa solar com aletas de vidro.

4 - termopar- determina a temperatura da água na entrada da placa solar com aletas de vidro.

6 - termopar- determina a temperatura do ar no interior da placa solar com aletas de vidro.

7- termopar- determina a temperatura da água do reservatório.

9 – termopar- determina a temperatura da água no reservatório – placa solar com aletas de vidro.



Figura 23: Vista frontal do coletor Solar Plano.



Figura 24: Vista lateral do coletor solar plano.

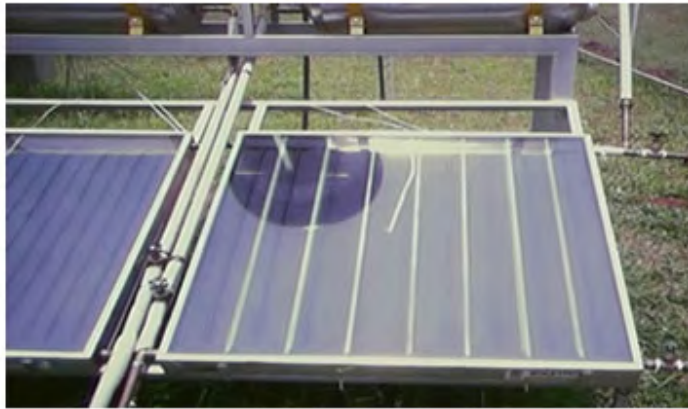


Figura 25: Placa de aquecimento solar com aletas de vidro.

O princípio de funcionamento dos coletores planos é mostrado nas figuras 26 e 27.

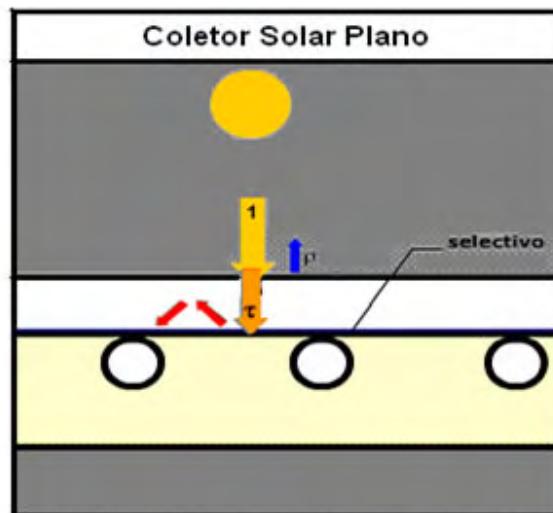


Figura 26: Incidência e reflexão da radiação na placa convencional

A radiação solar atinge a superfície do vidro do coletor (1).

Parte desta radiação é refletida pelo vidro para o exterior (ρ).

A maior parcela é transmitida para dentro do coletor (τ).

No interior do coletor, cria-se um efeito estufa quando a radiação atinge o absorvedor, o qual aquece, passando a emitir radiação num comprimento de onda

maior, para o qual o vidro é opaco, ficando retida no interior. Normalmente o absorvedor é revestido com uma superfície seletiva: emite pouca radiação e absorve muita.

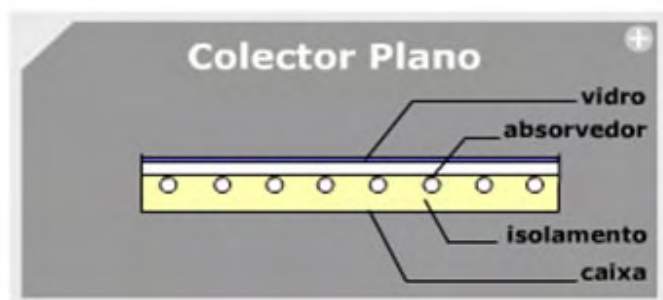


Figura 27: Componentes de uma placa solar plana

Os coletores CPC são constituídos por: vidro, isolamento, caixa e aletas de vidro: afixadas a cada 11 cm, no sentido longitudinal da placa coletora solar, deixando o tubo de cobre entre elas. Tem como finalidade refletir os raios, tornando o sistema uma “armadilha” para os mesmos, causando um aumento da temperatura do ar no interior da placa e conseqüente aumento da temperatura da água na saída da placa coletora. Estes efeitos são mostrados na figura 28.

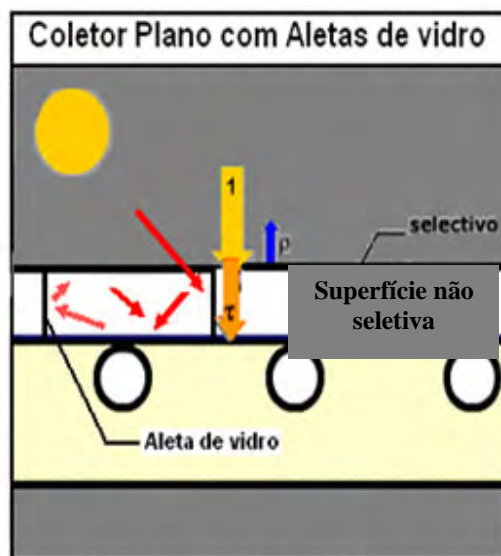


Figura 28: Incidência e reflexão da radiação na placa com aletas de vidro.

A placa absorvedora utilizada no experimento é de chapa não seletiva, de alumínio, pintada com tinta preta fosca, contendo aletas verticais de vidro, coberta por uma placa de vidro comum com espessura de 3 mm, com dimensões 1,0 m x 1,03 m, possuindo uma área efetiva de captação da radiação solar de 0,95 m², instalada sobre um suporte a 0,5 m do solo e inclinada de um ângulo de 33° com a direção horizontal.

A cobertura da placa de aquecimento solar foi de vidro comum transparente claro, com 3 mm de espessura, apresentando valor de transmitância de 0,877 muito próximo ao do vidro importado.

A espessura da placa absorvedora não seletiva de alumínio utilizada foi de 0,13 mm, pintada com tinta preta fosca com absorvância espectral para a luz solar de 0,90, para todo espectro de radiação solar.

À medida que a água quente do reservatório era utilizada, a caixa d'água recebia da rede de abastecimento a quantidade necessária para enchê-la, obedecendo a mesma proporção de utilização.

Os dados foram obtidos em vários dias, com tempo bom e sem nuvens, embora os que serviram a determinação da eficiência do equipamento foram os realizados no dia 04 de setembro de 2004.

O diâmetro dos condutores de cobre foi considerado ser de 3/8", por ser o mais utilizado nesses equipamentos.

Para o isolamento da base do coletor, utilizou-se o poliuretano com 5 mm de espessura, cuja condutividade térmica (K_{placa}) igual a 0,030 W/m °C.

O equipamento de aquecimento solar destina-se principalmente ao consumo de água quente para o banho sendo praticamente constante no final da tarde.

No experimento, o registro é aberto no final da tarde, e a água contida no boiler, é totalmente esgotada, simulando assim seu consumo para o banho.

Durante as tomadas de temperatura, verifica-se que tanto a temperatura da água na saída da placa solar plana, com aletas de vidro, quanto a da água que sai do boiler do mesmo equipamento, apresenta-se 3 °C a mais que a temperatura de saída da água da placa solar plana e do boiler do equipamento convencional.

A temperatura do ar contido entre a cobertura de vidro e a placa absorvedora, da placa solar plana, do equipamento modificado, apresenta-se a 1°C a mais que a temperatura do mesmo, no equipamento convencional.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O gráfico da figura 29, mostra que o período de maior incidência de radiação solar, ocorre das 11:00 horas às 15:00 horas, quando foram realizadas as leituras das temperaturas através dos termopares instalados em vários pontos do equipamento, definindo assim que esses valores seriam medidos no intervalo de 10 em 10 minutos.

Observa-se que valores das temperaturas medidas pelos termopares não sofreram grandes alterações durante esse período.

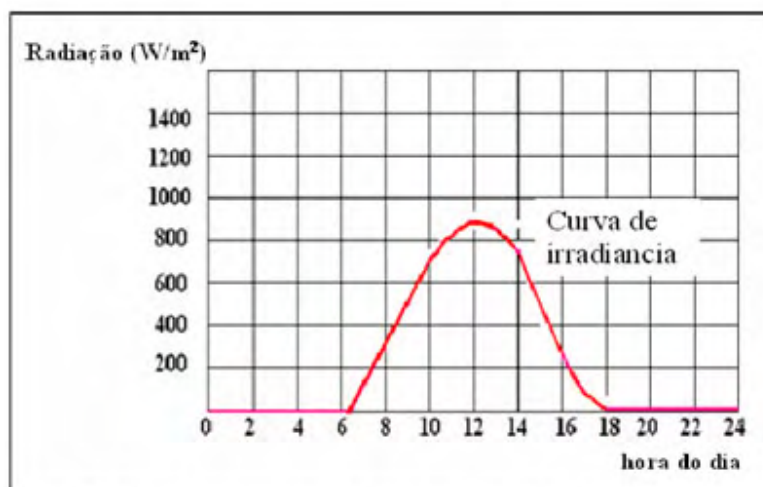


Figura 29 : Irradiância solar global incidente na superfície da placa absorvedora (04/09/2004-Botucatu, SP-Brasil).

Foram obtidos para o dia 4 de setembro de 2004, os valores da radiação incidente frontal, temperatura ambiente e a velocidade do vento a cada 10 minutos (Tabela 7).

Tabela 7: Valores de radiação incidente frontal, velocidade do vento e temperatura ambiente para o dia 04/09/2004-Botucatu, São Paulo.

DIA	ID	ANO	HORA	RADIÇÃO		DIA	TEMPERATURA	VELOCIDADE
				HORIZONTAL (W/m ²)	FRONTAL (W/m ²)			
247	110	2004	1100	774	847	4	26,80	1,901
247	110	2004	1110	784	863	4	27,29	2,556
247	110	2004	1120	796	879	4	27,07	2,631
247	110	2004	1130	808	894	4	28,14	2,385
247	110	2004	1140	799	895	4	28,13	2,24
247	110	2004	1150	814	903	4	28,83	2,185
247	110	2004	1200	797	899	4	28,81	1,974
247	110	2004	1210	814	908	4	29,40	1,897
247	110	2004	1220	808	904	4	29,37	1,435
247	110	2004	1230	773	899	4	29,17	2,245
247	110	2004	1240	791	883	4	29,64	1,751
247	110	2004	1250	782	873	4	29,77	1,527
247	110	2004	1300	775	864	4	30,06	1,93
247	110	2004	1310	767	862	4	30,12	2,062
247	110	2004	1320	746	838	4	30,51	1,409
247	110	2004	1330	740	835	4	30,39	1,426
247	110	2004	1340	719	809	4	30,48	1,785
247	110	2004	1350	701	790	4	30,58	1,343
247	110	2004	1400	689,2	778	4	30,58	2,178
247	110	2004	1410	671,8	763	4	30,82	1,762
247	110	2004	1420	640,6	730	4	30,78	1,417
247	110	2004	1430	602,9	675,8	4	31,07	2,047
247	110	2004	1440	629,4	712	4	31,15	1,302
247	110	2004	1450	530,4	594	4	30,92	0,809
247	110	2004	1500	404,4	446,2	4	31,03	2,161

Fonte - Departamento de Engenharia Rural da Faculdade de Ciências Agrônomicas-UNESP, Botucatu.

As temperaturas registradas, pelos sensores no dia 04/09/2004 (Tabela 8), mostram que no início do período, os valores das mesmas na saída da água da placa solar do equipamento modificado (T6) eram pouco maior, em torno de 2 °C, em relação ao convencional (T5) e chegando a 3 °C, quando a radiação solar era mais intensa.

Tabela 8 - Temperatura registrada pelos sensores

Horário	T1(C°)	T2(C°)	T3(C°)	T4(C°)	T5(C°)	T6(C°)	T7(C°)	T8(C°)	T9(C°)
11:00	45	35	46	35	50	52	21	43	45
11:10	45	35	46	35	52	54	24	43	46
11:20	45	37	46	37	52	54	24	43	46
11:30	45	37	47	37	52	54	26	43	46
11:40	45	37	47	37	52	54	26	44	47
11:50	45	38	47	38	52	54	26	44	47
12:00	45	38	47	38	52	55	26	44	47
12:10	45	38	48	38	53	55	26	44	47
12:20	45	39	48	39	53	55	26	44	48
12:30	45	39	48	39	53	55	26	44	48
12:40	46	40	48	40	53	55	26	45	48
12:50	46	40	48	40	53	55	26	45	48
13:00	46	40	48	40	53	55	26	45	48
13:10	46	40	48	40	53	55	26	45	48
13:20	46	40	48	40	53	55	26	45	48
13:30	46	42	48	42	53	55	27	46	49
13:40	46	42	48	42	54	56	27	46	49
13:50	46	42	49	42	54	56	27	46	49
14:00	46	42	49	42	53	56	27	46	49
14:10	47	42	49	42	54	58	29	46	49
14:20	47	43	49	43	54	58	29	46	49
14:30	47	43	49	43	54	58	29	47	50
14:40	48	44	49	44	54	57	30	47	50
14:50	48	44	49	44	54	57	29	47	50
15:00	48	44	50	44	54	58	29	47	50

O mesmo se observou com a temperatura da água, na saída do boiler do equipamento modificado (T9), água destinada ao consumo, em relação a temperatura em que se encontrava a água na saída do equipamento convencional (T8).

Com estes dados determinou-se a eficiência do equipamento utilizando as equações apresentadas no item anterior.

A tabela 9 fornece o rendimento do equipamento modificado ao longo do tempo considerado.

tempo	Tamb (°C)	Ti (°C)	HT (w/m ²)	HT' (MJ/m ²)	S' (MJ/m ²)	Perdas (MJ/m ²)	qu (MJ/m ²)	η
11:00	26,8	46	847	3,0492	2,510012	0,51	1,73	0,56601
11:30	28,14	47	894	3,2184	2,649296	0,52	1,84	0,57051
12:00	28,81	47	899	3,2364	2,664109	0,49	1,88	0,58088
12:30	29,17	48	899	3,2364	2,664109	0,51	1,85	0,57315
13:00	30,06	48	864	3,1104	2,560390	0,48	1,80	0,57806
13:30	30,39	48	835	3,0060	2,474451	0,46	1,75	0,58209
14:00	30,58	48	778	2,8008	2,305536	0,47	1,58	0,56477
14:30	31,07	48	675,8	2,4329	2,002676	0,45	1,34	0,54931
15:00	31,03	49	446,2	1,6063	1,322276	0,48	0,75	0,46412
Total				25,6968			14,52	

As equações utilizadas para construir a tabela 9 e determinação do rendimento diário estão a seguir.

$$HT' = HT \times 3600 / 1000000$$

$$S' = S \times 3600 / 1000000$$

$$Perdas = UL (Ti - Ta) \times 3600 / 1000000$$

$$qu = (Qu / Ac) \times 3600 / 1000000$$

$$\eta = qu / HT'$$

$$\eta = \frac{qu}{HT'} = \frac{14,52}{25,6968} = 0,5651 \times 100 = 56,51\%$$

A tabela 10 fornece o rendimento do equipamento convencional ao longo do tempo considerado.

Tabela 10 - Cálculo do rendimento instantâneo no sistema convencional

tempo	Tamb (°C)	Ti (°C)	HT (w/m ²)	HT' (MJ/m ²)	S (MJ/m ²)	Perdas (MJ/m ²)	qu (MJ/m ²)	η
11:00	26,80	45	847	3,0492	2,510012	0,48	1,75	0,57556
11:30	28,14	45	894	3,2184	2,649293	0,46	1,89	0,58709
12:00	28,81	45	899	3,2364	2,664109	0,43	1,93	0,59703
12:30	29,17	45	899	3,2364	2,664109	0,42	1,93	0,59672
13:00	30,06	45	864	3,1104	2,560390	0,39	1,87	0,60215
13:30	30,39	46	835	3,0060	2,474451	0,40	1,80	0,59896
14:00	30,58	46	778	2,8008	2,305537	0,41	1,63	0,58349
14:30	31,07	47	675,8	2,4329	2,002676	0,42	1,37	0,56115
15:00	31,03	48	446,2	1,6063	1,322276	0,45	0,75	0,46731
Total				25,6968			14,92	

$$\eta = \frac{qu}{HT'} = \frac{14,92}{25,6968} = 0,5806 \times 100 = 58,06 \%$$

Embora as temperaturas de saída da água do equipamento modificado (T6) tenham se mantido sempre maiores do que as similares do coletor normal (T5), o mesmo não ocorreu com o rendimento (η), muito embora as diferenças fossem pequenas.

Em relação a isto, pode-se inferir que os detalhes construtivos podem ter afetado as perdas de energia (maiores no equipamento modificado), pois para a mesma vazão, esperava-se que o rendimento fosse, no mínimo, igual.

Era também esperado que as placas de vidro internas pudessem funcionar como uma “armadilha” da radiação de ondas longas promovendo um aumento considerável das temperaturas internas.

O fato é que foram realizados poucos testes de campo, o que não permite dizer com precisão que o fator de perda é o mais importante.

Além da sugestão de que se realizem novos testes em prazo mais longo, pode-se sugerir também inclinar levemente as aletas de vidro internas para que elas passem a exercer o papel de concentrar sobre a placa absorvedora toda a radiação incidente na cobertura.

Diferentes vazões em várias condições climáticas também devem ser testadas.

Quanto ao rendimento dos coletores, ambos apresentam-se dentro do esperado para um produto comercial que usa materiais convencionais.

Todas as sugestões citadas não puderam ser realizadas no período experimental, uma vez que o projeto sofreu atrasos. Entretanto, todo o levantamento das perdas permite afirmar que com poucas modificações de baixo custo, pode-se elevar a eficiência do coletor plano para o patamar considerado de categoria A pelo INMETRO.

O rendimento do equipamento solar com aletas de vidro em função do tempo é mostrado na figura 30. O rendimento ou eficiência do equipamento modificado, isto é, sistema com placa coletora solar plana com aletas de vidro foi calculado a cada 30 minutos desde as 11:00 horas até as 15:00.

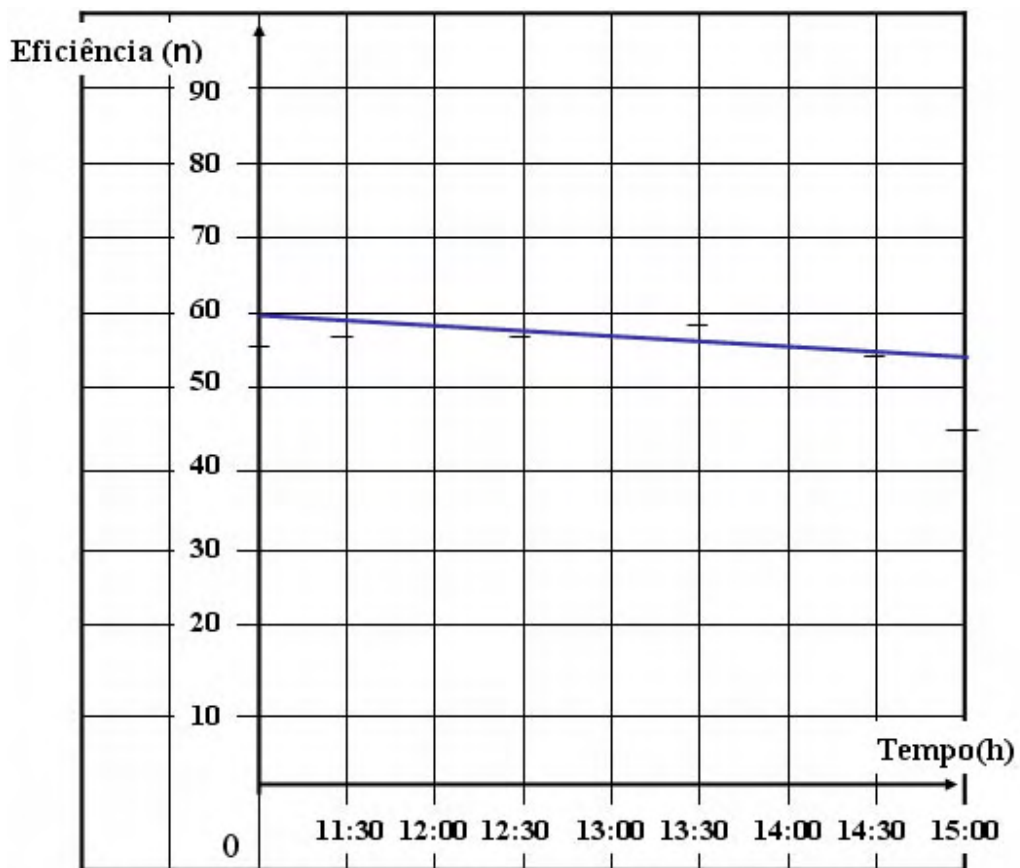


Figura 30: Rendimento em função do tempo (04/09/2004-Botucatu , São Paulo,Br) sistema modificado

5. CONCLUSÕES

Através desse estudo pode-se afirmar que o equipamento testado mostrou apresentou um rendimento de aproximadamente 56 % que, comparado a eficiência definida pelo INMETRO, como um equipamento de bom rendimento.

Pode este ser um equipamento ainda aperfeiçoado, embora sua utilização no aquecimento de água para uso doméstico seja alternativa conveniente.

Novos testes de longo prazo devem ser realizados uma vez que as mudanças propostas não apresentaram ganho na eficiência.

Uma nova geometria das placas de vidro internas deve ser investigada para que o coletor plano passe a ter características de um concentrador com fator de concentração ligeiramente maior que 1.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAVA. Introdução a aquecedores solares. In: O aquecedor solar de água para o setor elétrico e para o usuário final. São Paulo: 1996a. / cap. 1, p. 5-6.

ABRAVA. O mercado nacional de aquecedores solares. In: O aquecedor solar de água para o setor elétrico e para o usuário final. São Paulo: 1996b. / cap. 2, p. 7-9.

ABRAVA. O aquecimento solar, o setor elétrico e o problema do chuveiro elétrico. In: O aquecedor solar de água para o setor elétrico e para o usuário final. São Paulo: , 1996c. / cap. 7, p. 25-2.

CABRIOL, T.; PELISSOU, A.; ROUX, D. O aquecedor solar de água. 6. ed. Lisboa: Edições Cetop, 1980. 161 p.

CABRIOL, T.; ROUX, D. O aquecimento das habilitações e a energia solar. Lisboa: Edições Cetop, 1984. v. 2, 295 p.

CABRIOL, T.; FAURÉ, D.; ROUX, D. O aquecimento das habilitações e a energia solar. Lisboa: Edições Cetop, n 06 16011/068. Lisboa: Edições Cetop, 1984. 296 p.

CENSOLAR. Formação técnica em energia solar. Disponível em: <http://www.censolar.es/menuo.htm>. Acesso em: 25 abr. 1999

COMETTA, E. Energia solar. São Paulo: Hemus, 1982. 127 p.

COOPER, P. I. The effect of inclination on the heat loss from flat-plate solar collectors. Solar Energy, v. 27, p. 413 – 420, 1981.

DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. Available solar radiation. In: Solar engineering of thermal process. New York: John Wiley, 1980. p. 28-110.

FAGÁ, M. Energia solar ainda está no futuro. Jornal da USP. São Paulo, 16 a 22 Ago. 1991. p. 10.

FRALNHOFER, N. LIRA, F. Instituí Solare. Sistemas de energia solar. Disponível < <http://www.ise.fhg.de/pressinfo/pi798.html>>. Acesso em: 25 abr. 1999.

JANNUZZI, G. M.; et al. Pré-aquecedor solar de baixo custo para chuveiros elétricos. Campinas: Companhia Paulista de Força e Luz/Universidade Campinas, 1992. 104 p.

MESQUITA, L. C. Conquista de inserção de ICMS beneficia o setor. Boletim Informativo da ABRAVA, São Paulo. v. 3, n 5, Jul. Ago. 1998. Não paginado.

NEYELOFF, S.; BARTOK, J. R. Design, construction and evaluation of a low cost solar coilector for rural applications. Transactions of the ASAE, St Joseph, n 3-81, p. 106-109, 1981.

PALZ, W. Energia solar e fontes alternativas. São Paulo: Hermus, 1981. 357 p.

PEREIRA, M. D.; GARCIA, J. M.; Mesquita, L.C. S. A etiquetagem de coletores planos. Belo Horizonte: Green-Grupo de Energia Solar, Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica, s.d.

SILVA, L. A. Coletor de polietileno: uma alternativa de aproveitamento de energia solar a baixo custo. 1992. 46 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Energia na Agricultura) Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade de São Paulo, Botucatu.

