

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPIRITO SANTO  
CENTRO TECNOLÓGICO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**ALESSANDRO APOLINARIO DE ALMEIDA**

**COLETOR SOLAR ALTERNATIVO**

VITÓRIA  
2005/02

**ALESSANDRO APOLINARIO DE ALMEIDA**

**COLETOR SOLAR ALTERNATIVO**

Projeto de Graduação apresentado  
ao Departamento de Engenharia  
Mecânica da Universidade  
Federal do Espírito Santo, como  
requisição para obtenção do Grau  
de Engenheiro Mecânico.  
Orientador: Prof. Dr. Juan Sérgio  
Romero Saenz.

VITÓRIA

2005/02

## **ALESSANDRO APOLINÁRIO DE ALMEIDA**

### **COLETOR SOLAR ALTERNATIVO**

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisição para obtenção do Grau de Engenheiro Mecânico.

Aprovado em 04 de Janeiro de 2006-01-04

#### **Comissão Examinadora:**

---

Prof. Juan Sérgio Romero Saenz, D.S.c.

Orientador

---

Prof. João Luiz Marcon Donatelli, D.S.c.

Examinador

---

Prof. Rogério Ramos, D.S.c

Examinador

Aos nossos pais, familiares, amigos, professores pela  
ajuda nesta grande caminhada.

## AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Professor Juan Sérgio Romero, pela colaboração, amizade, compreensão e sabedoria que conduziu esta dissertação.

Agradecemos ainda aos nossos amigos de turma, pela alegria dada nesses cinco anos de convivência.

## RESUMO

Consciente dos danos que causam ao meio ambiente tais embalagens PET, caixa TETRA PAK, bandejas de isopor, sacolas plásticas acreditam-se por bem guardá-las, aguardando a implantação da coleta seletiva no município, o que felizmente começa a acontecer.

Mas com o propósito de dar um destino útil as mesmas, surgiu à idéia de aplicá-las em um coletor solar alternativo. Em consequência dos resultados obtidos, com um projeto extremamente simples e barato, sentimos que poderíamos dar um destino coletivo, à implantação do mesmo.

A energia solar se apresenta a cada dia como a grande solução energética para o planeta. É uma fonte inesgotável, totalmente limpa que promove a total preservação do meio ambiente, além de atender a todas as pessoas de forma gratuita.

Nessa experiência os gastos com materiais utilizados foram poucos em relação ao coletor convencional, e isso torna o projeto viável em matéria de custo. Neste projeto busca-se a economia de energia através do lixo, uma vez que é um recurso barato e inesgotável. O investimento feito de forma responsável provocará, sem dúvida, ótimos resultados.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Variação da radiação solar extraterrestre com o período do ano.(Duffie e Beckman, 1991).....	6
Figura 2- Espectro da radiação eletromagnética. (Duffie e Beckman, 1991).....	7
Figura 3- Curva de irradiância espectral padrão WRC para a distância média Terra-Sol.(Duffie e Beckman, 1991).....	8
Figura 4- Um exemplo dos efeitos do espalhamento Rayleigh e da absorção atmosférica sobre a distribuição espectral da irradiância direta .....	10
Figura 5- A Terra recebe energia através da radiação solar e perde energia através da radiação infravermelha térmica para o espaço. O balanço entre energia ganha e perdida determina a temperatura da Terra.....	10
Figura 6- Ângulo de zênite, ângulo azimutal da superfície ( $\gamma$ ) e ângulo azimutal solar para uma superfície inclinada. (Duffie e Beckman 1991) [5]. .....	13
Figura 7- O verão no Hemisfério Sul (22 de dezembro). .....	17
Figura 8- O inverno no Hemisfério Sul (21 de junho). .....	18
Figura 9- Coletor solar de placa plana.....	23
Figura 10- Transmitância do vidro comum em função do comprimento de onda .....	24
Figura -11 Apresentação típica do rendimento de coletores solares. .....	30
Figura 12- Média da Radiação diária (mês de outubro).CPTEC/INPE[20] .....	32
Figura 13- Mapa da Irradiância Média Horária. CPTEC/INPE [20].....	33
Figura 14- Coletor solar Alternativo montado .....	36
Figura 15- Reservatório Térmico (Garrafa de 20 litros).....	37
Figura 16- Isolamento do barramento superior .....	40
Figura 17- Reservatório Termico .....	43
Figura 18- de medição de temperatura 43° .....	43
Figura 19- medição de temperatura 60° .....	43
Figura 20- Distância entre as tubulações das colunas e o comprimento do coletor. .....	44
Figura 21- desenho de instalação do coletor solar alternativo.....	44

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Diferenças entre o coletor alternativo e convencional .....	45
Tabela 2- Sistema Auxiliar de Aquecimento .....	45
Tabela 3 – Eficiência Térmica (dia 25/11/2005) .....	47
Tabela 4 – Eficiência Térmica (dia 25/11/2005) .....	47
Tabela 5 – Eficiência Térmica (dia 26/11/2005) .....	48
Tabela 6 – Eficiência Térmica (dia 26/11/2005) .....	48
Tabela 7 – Eficiência Térmica (dia 04/12/2005) .....	49
Tabela 8 – Eficiência Térmica (dia 04/12/2005) .....	49

### ***SIMBOLOGIA***

pé	Unidade de medida de comprimento correspondente a 0,3048 m
$J/m^2$	Unidade de medida de energia. Um MJ/m <sup>2</sup> corresponde a 23,88 cal/cm <sup>2</sup>
$W/m^2$	Unidade de potência. 1 W corresponde a 1 J/s.
$Gon$	Irradiância extraterrestre normal
$Gsc$	Constante Solar
To	Temperatura de saída
Ti	Temperatura de entrada
<b><i>m</i></b>	vazão mássica
$C_p$	calor específico
$\alpha_s$	Ângulo da altitude solar
$\phi$	Latitude
$\delta$	Declinação
$\beta$	Inclinação
$\omega$	Ângulo horário
$\theta_z$	Ângulo de zênite
$\gamma_s$	Ângulo de azimute solar
$\theta_{s.}$	Ângulo de incidência
$\gamma$	Ângulo azimutal da superfície

## SUMÁRIO

1-INTRODUÇÃO.....	1
1.1- OBJETIVOS.....	2
2-FUNDAMENTOS TEÓRICOS DA RADIAÇÃO SOLAR.....	3
2.1- O SOL.....	3
2.2- CONSTANTE SOLAR.....	5
2.3- VARIAÇÃO DA RADIAÇÃO EXTRATERRESTRE .....	5
2.4- DISTRIBUIÇÃO ESPECTRAL DA RADIAÇÃO EXTRATERRESTRE .....	7
2.5- DISTRIBUIÇÃO ESPECTRAL DA RADIAÇÃO NA SUPERFÍCIE TERRESTRE ..	8
2.6- RADIAÇÕES DIRETAS, DIFUSAS E GLOBAIS.....	10
2.7- DEFINIÇÃO DE TERMOS.....	12
2.8- CÁLCULO DA RADIAÇÃO SOLAR SOBRE UMA SUPERFÍCIE.....	12
3- APROVEITAMENTO DA ENERGIA SOLAR PARA AQUECIMENTO DE ÁGUA.....	15
3.1- RADIAÇÃO DO CORPO NEGRO.....	18
4- A HISTÓRIA DA ENERGIA SOLAR.....	20
4.1- PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DOS COLETORES SOLARES .....	22
4.2- COLETORES SOLARES.....	22
4.3- EFEITO ESTUFA.....	24
5- EFICIÊNCIA TÉRMICA DOS COLETORES.....	26
6- MAPAS DA RADIAÇÃO SOLAR.....	31
7- METODOLOGIA E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS.....	34
7.1- CIRCULAÇÃO LIVRE.....	34
7.2- COMPONENTES DO SISTEMA DE AQUECIMENTO.....	35
7.2.1- ANALISE TECNICA DA CONSTRUÇÃO DO COLETOR SOLAR .....	35
7.3- CAIXA D'ÁGUA OU RESERVATÓRIO.....	36
7.4- ISOLAMENTO TÉRMICO DO RESERVATÓRIO.....	38
7.5- TÓPICOS REFERENTES À INSTALAÇÃO DO CONJUNTO.....	38
7.5.1- DIMENSIONANAMENTO DO SISTEMA CONFORME O CONSUMO E REGIÃO DO PAÍS .....	38
7.6- SUPORTE DE FIXAÇÃO DO COLETOR SOLAR .....	39
7.7- ISOLAMENTO TÉRMICO DOS DUTOS DE AGUA QUENTE.....	40

7.8- DISTÂNCIA ENTRE O COLETOR E A CAIXA OU RESERVATÓRIO.....	40
7.9- TEMPO NECESSÁRIO DE EXPOSIÇÃO SOLAR.....	41
8- RESUMO DA MONTAGEM EXPERIMENTAL E MATERIAL.....	42
9- COMPARAÇÃO ENTRE COLETOR ALTERNATIVO E CONVENCIONAL.....	45
10- CÁLCULO DA EFICIÊNCIA TÉRMICA.....	46
11-CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	50
12- REFERENCIAS BIBLIOGRAFIA.....	51

## 1-INTRODUÇÃO

Muitas são as vantagens para que a energia solar torne-se definitivamente uma realidade e deixe de aparecer nas estatísticas brasileiras somente como uma fonte de energia de uso inexpressivo. É natural que a demanda energética continuará crescendo a passos largos e a reprodução do cenário energético, atualmente em uso, terá muitas dificuldades de sustentar com qualidade este crescimento.

Captando-se adequadamente a radiação solar, pode-se obter calor e eletricidade. O calor se alcança mediante coletores térmicos e a eletricidade através de módulos fotovoltaicos. Ambos os processos nada tem a ver entre si, nem quanto à tecnologia nem quanto aplicação prática. O calor capturado nos coletores térmicos pode, por exemplo, servir para aquecer a água para consumo doméstico, comercial e industrial. Mesmo que pareça estranho, pode-se aproveitar a energia solar para o resfriamento, visto que, para gerar baixas temperaturas, é necessário uma fonte de calor que perfeitamente pode ter sua origem nos coletores solares. Outra aplicação menos comum consiste no aproveitamento da energia solar numa planta de purificação de água salgada para doce, sem nenhum consumo de combustível.

O Brasil, com dimensões continentais e atravessadas pelo Trópico de Capricórnio e pela linha do Equador, com farta insolação anual, parece elementar o uso racional de energia solar. Entretanto, o Brasil ainda é o país que utiliza forma maciça o chuveiro elétrico. Este cenário retrata a cada dia um problema que se agrava: o contínuo crescimento do pico da demanda de energia elétrica residencial. A falta de intervenção do poder público através do uso da energia solar sobre as habitações, reserva tal tecnologia para as classes mais privilegiada, em número insignificante para resolver o problema energético que o Brasil atravessa. Sabe-se que por mais baixo que seja o custo de um aquecedor solar, o seu preço será maior que o do chuveiro elétrico, por tratar-se de sistema de acumulação de água quente composto por um reservatório térmico, coletores, tubulações, conexões e misturadores de água apropriados para resistirem a temperaturas maiores que a do Ambiente.

## 1.1- OBJETIVOS

O projeto tem como objetivo a utilização de matérias descartáveis na construção do coletor solar alternativo. O estudo em questão mostra a realidade que ocorre no Brasil com o grande desperdício de materiais recicláveis que poderiam ser usados para o aquecimento de água através do coletor em estudo

Este projeto apresenta um estudo sobre a disponibilidade da radiação solar, por ser ela uma fonte de energia ampla e ao alcance de todos que desejarem utilizá-la.

A grande maioria das pesquisas busca uma forma melhor e mais eficiente de realizar uma ação de qualquer natureza. Neste trabalho busca-se uma metodologia mais adequada de previsão de valores de radiação solar. Portanto, esta dissertação tem como principais objetivos:

- Calcular a eficiência térmica
- Aproveitamento do lixo na construção do coletor

Para atingir estes objetivos, diversas tarefas foram realizadas, constituindo etapas que tiveram também resultados independentes entre as quais destacam-se:

- Realizar um levantamento histórico sobre os modelos
- Alguns pesquisadores não se preocuparam em cálculo a eficiencia do coletor alternativo

Além de economizar energia elétrica, beneficiar diretamente o meio ambiente, o nosso projeto tem como objetivo despertar nas pessoas de um modo geral, a consciência de que todas essas embalagens pós-consumo podem transformar-se em algo útil no lado social.

Torna-se oportuno ressaltar a intenção de várias pessoas e entidades na implantação de inúmeros projetos em todo Brasil, ou optando pelo aquecedor convencional de mercado, demonstrando com esse gesto de cidadania e responsabilidade, os reflexos diretos no alívio do sistema gerador e de distribuição de energia elétrica que possam acontecer nos horários de pico de uma região.

## 2-FUNDAMENTOS TEÓRICOS DA RADIAÇÃO SOLAR

### 2.1- O SOL

A vida na Terra é possível graças a uma combinação de fatores que juntos permitem ao planeta ter energia suficiente e na medida certa para todos seus fenômenos biológicos e físicos.

Essa energia provém da estrela mais próxima chamada Sol. É a radiação solar. A radiação solar mantém a superfície terrestre a uma temperatura confortável, além de fornecer quase toda a energia necessária. O Sol é uma estrela de porte médio com um diâmetro equatorial de  $1,39 \times 10^9$ m.

O Sol é uma esfera de plasma, constituído de partículas nucleares entre as quais encontram-se, principalmente, os núcleos de hidrogênio (prótons). A fusão nuclear, de acordo com modelos atuais, iniciou-se quando o núcleo solar atingiu altíssima temperatura, aproximadamente  $1,5 \times 10^7$  K. Os núcleos de Hidrogênio atingiram energia suficiente, cerca de 1keV, para, em uma cadeia de reações, formar núcleos de hélio e liberar, além de neutrinos e raios gama, grande quantidade de energia. Essa cadeia de reações foi proposta, pela primeira vez, por Bethe, citado por (Tipler e Llewellyn, 2001) e recebeu o nome de ciclo próton-próton.

As reações nucleares que ocorrem no núcleo solar são responsáveis por 90% da energia gerada. O núcleo tem apenas 15% do volume solar, mas tem uma densidade de  $105 \text{ kg/m}^3$ .

Cerca de 40% da massa solar encontra-se no núcleo. O raio do núcleo é de 0,23 do raio total do Sol.

"A sucessão de processos radioativos e convectivos ocorrem com sucessivas emissões, absorções e re-irradiação, a radiação no núcleo solar está na parte do espectro solar correspondente aos raios-X e raios gama, com o comprimento de onda

da radiação aumentando com a temperatura que diminui ao longo da distância radial" (Duffie e Beckman, 1991).

Além do núcleo, radialmente para fora, encontra-se a zona radioativa, com 47% do raio solar, onde a densidade diminui radialmente para fora, a partir do núcleo, para  $70 \text{ kg/m}^3$  e a temperatura atinge apenas 130.000K. Na seqüência encontra-se a zona convectiva com densidade e temperatura iguais a zona radioativa.

A superfície solar é chamada fotosfera e aparece formada de grânulos (células de convecção irregular), com dimensões 1000 a 3000 km, tem uma temperatura aproximada de 5000 K e densidade de apenas  $10^{-5} \text{ kg/m}^3$ . A fotosfera é a fonte da maior parte da radiação solar. É responsável pela luz que torna o Sol visível.

Em seqüência, além da fotosfera, encontra-se a camada de reversão, a cromosfera e finalmente a coroa solar. A temperatura da coroa solar é da ordem de  $10^6 \text{ K}$  com densidade muito baixa.

Os cientistas ainda debatem o modelo teórico atual do Sol principalmente no tocante a emissão de neutrinos, que são utilizados para estudar o interior do Sol. Além disso, existem fenômenos solares transitórios que ocorrem na superfície solar, e que tem influência sobre o meio ambiente terrestre, tecnologias humanas e que não são totalmente explicados. Esses fenômenos de interesse são chamados manchas solares. As manchas solares, segundo o modelo solar atual, têm origem nas flutuações do campo magnético solar que é altamente variável devido ao comportamento convectivo da matéria solar. Nestas manchas solares a temperatura é menor. Ao mesmo tempo ocorrem violentas explosões solares, chamadas labaredas, que enviam para o espaço partículas carregadas além de uma maior quantidade de energia. Fato conhecido é o de que a polaridade magnética do Sol se inverte aproximadamente a cada 11 anos, culminando com um máximo de manchas solares e de labaredas. Estes fenômenos têm influência sobre o valor da constante solar,  $G_{sc}$ . A constante solar é a quantidade de radiação solar que chega em uma superfície perpendicular aos raios solares, fora da atmosfera terrestre e sua unidade é  $\text{W/m}^2$ .

A constante solar será Segundo (Tipler e Llewellyn, 2001), a potência total irradiada pelo Sol ou qualquer outra estrela é conhecida como luminosidade e é representada pela letra L. A luminosidade do Sol é da ordem de  $3,85 \times 10^{26}$  W. Já a intensidade (potência por unidade de área) irradiada pelo Sol é de aproximadamente  $6,42 \times 10^7$  W/m<sup>2</sup>. Ainda, segundo este autor, a temperatura efetiva da fotosfera é da ordem de 5800 K.

“Irradiância é a quantidade de energia solar radiante que atinge uma unidade de área de superfície numa unidade de tempo” (Kreith e Kreider, 1978).

## 2.2- CONSTANTE SOLAR

Como a órbita da Terra em torno do Sol é elíptica, à distância entre o Sol e Terra varia em 1,7%, segundo (Duffie e Beckman, 1991). Uma Unidade Astronômica (UA) é a distância média entre o Sol e a Terra e equivale a  $1,495 \times 10^{11}$  m.

Devido à distância e a relação espacial entre o Sol e Terra, a quantidade de radiação solar que chega em uma superfície perpendicular aos raios solares, fora da atmosfera terrestre, é quase fixa, e é chamada de constante solar. Seu valor atual, citado por (Duffie e Beckman, 1991), é de 1367 W/m<sup>2</sup>. A constante solar representa a energia proveniente do Sol, por unidade de tempo sobre uma unidade de área de superfície perpendicular à direção de propagação da radiação, à distância média entre Sol e Terra (UA), fora da atmosfera. A constante solar é um valor médio, pois a emissão de energia solar não é constante com o passar do tempo.

## 2.3- VARIAÇÃO DA RADIAÇÃO EXTRATERRESTRE

A emissão de energia por parte do Sol não é constante, havendo períodos de máximas emissões que são sentidas pelo meio intergalácticas, e consequentemente pela Terra, onde seus efeitos podem ser sentidos por instalações elétricas e até mesmo danificar sistemas eletrônicos de satélites e prejudicar comunicações de longa distância.

A ocorrência de manchas solares e das labaredas tem implicação na variação da intensidade de radiação solar que chega a Terra, no entanto, não existe consenso entre os cientistas, quanto ao percentual desta variação.

Outra fonte de variação da energia que chega a Terra, como foi discutido, é à distância entre o Sol e a Terra que não é constante devido à excentricidade da órbita elíptica da Terra, tendo o Sol em um de seus focos. A variação no fluxo de radiação extraterrestre está em 3%. A dependência da radiação extraterrestre do período do ano é indicada pela equação (1) e mostrada na (Figura 1).

$$\mathbf{G}_{\text{on}} = \mathbf{G}_{\text{sc}} \cdot \cos(\theta_z) \quad (1)$$

Onde,  $\mathbf{G}_{\text{on}}$  -radiação extraterrestre

$\mathbf{G}_{\text{sc}}$  -é a constante solar.

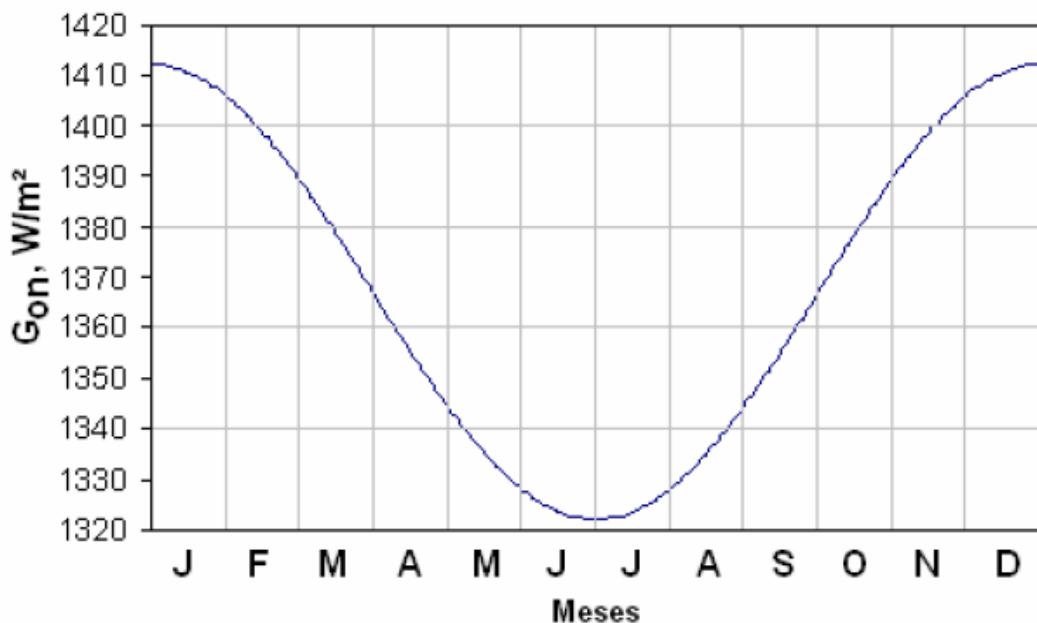


Figura 1 - Variação da radiação solar extraterrestre com o período do ano.(Duffie e Beckman, 1991)

## 2.4- DISTRIBUIÇÃO ESPECTRAL DA RADIAÇÃO EXTRATERRESTRE

A fotosfera solar emite energia em todos os comprimentos de onda ou freqüências, mas principalmente entre 200 e 3000 nanômetros (ou 0,2 - 3 microns). A (Figura 2) mostra o espectro completo da radiação eletromagnética. O máximo de emissão se verifica no comprimento de onda de 0,48 microns. A ( Figura 3) mostra a curva de irradiância espectral padrão do Centro de Radiação Mundial – World Radiation Center (WRC), para a distância média Terra-Sol, fora da atmosfera terrestre. A distribuição corresponde aproximadamente àquela de um corpo negro a 5770K. Por definição, corpo negro é um perfeito absorvedor de energia. Não importa o comprimento de onda ou a direção de onde vem, o corpo negro absorve toda a radiação. É um conceito ideal, pois todas as substâncias reais vão refletir alguma radiação. Um corpo negro também é um perfeito emissor de radiação térmica.

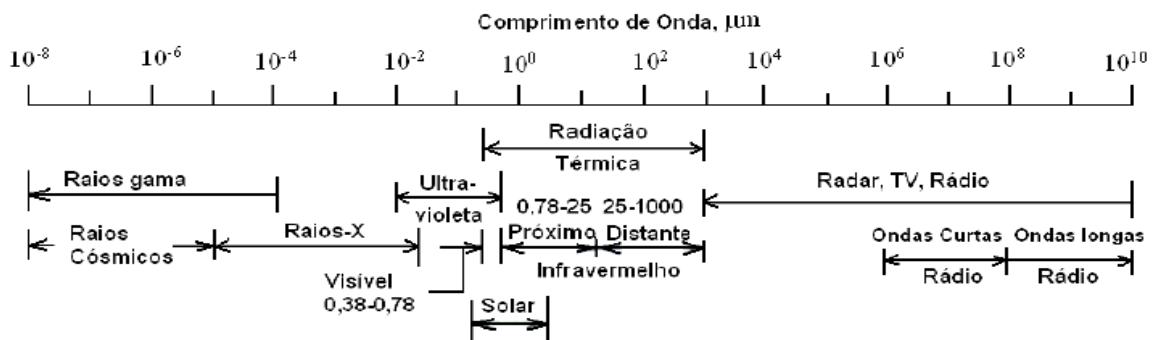


Figura 2- Espectro da radiação eletromagnética. (Duffie e Beckman, 1991)

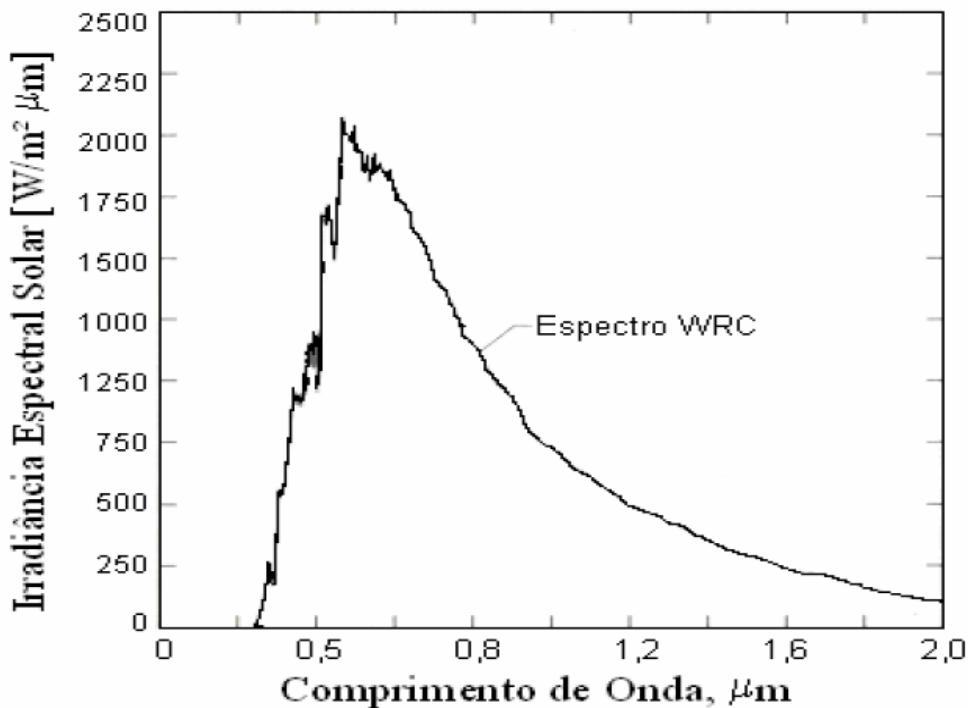


Figura 3- Curva de irradiância espectral padrão WRC para a distância média Terra-Sol.(Duffie e Beckman, 1991)

## 2.5- DISTRIBUIÇÃO ESPECTRAL DA RADIAÇÃO NA SUPERFÍCIE TERRESTRE

Da energia total que incide logo acima da atmosfera terrestre apenas parte chega até a superfície terrestre. (Iqbal1983), apresenta estudos minuciosos da influência de elementos espalhadores e atenuadores da energia solar, presentes na atmosfera.

A curva de irradiância na superfície terrestre é diferente da curva mostrada na (Figura 3), correspondente a irradiância extraterrestre. A radiação solar direta, quando atravessa a atmosfera terrestre sofre espalhamento, absorção e reflexão nos vários elementos constituintes da atmosfera. Como elementos que espalham a radiação solar encontra-se em grande quantidade na atmosfera terrestre, o nitrogênio e o oxigênio, assim como as moléculas de água e aerossóis, estes últimos variáveis. A parte da radiação solar que é espalhada por estes elementos dá origem à Radiação Difusa. O espalhamento depende do número de moléculas que a radiação atravessa e do

tamanho das partículas em relação ao comprimento de onda da radiação. O comprimento relativo do caminho que a radiação atravessa é chamado de massa de ar.

O vapor de água, alguns gases como o ozônio e o dióxido de carbono combinado pode absorver parcela importante de radiação solar. Os aerossóis, já citados, que são partículas em suspensão na atmosfera, são capazes também de absorver radiação. As nuvens têm importante contribuição na diminuição da radiação solar que atinge o solo, pois tem grande poder reflexivo e absorvem radiação solar no infravermelho próximo. A insolação, número de horas de brilho de sol, ou seja, número de horas sem que a radiação solar direta seja interceptada por nuvens, é utilizado para estimar a radiação solar, devido a sua importância na quantidade de radiação solar que atinge a superfície. A (Figura 4) mostra o efeito do espalhamento Rayleigh pelas moléculas de ar e a absorção pelo  $O_3$ ,  $H_2O$  e  $CO_2$  sobre a distribuição espectral da irradiância direta. De acordo com a teoria de espalhamento Rayleigh, o coeficiente de espalhamento varia com  $\lambda^{-4}$ . As moléculas gasosas, principalmente oxigênio e nitrogênio, são os maiores espalhadores de Rayleigh e são os principais espalhadores em uma atmosfera limpa. Já em atmosferas turbinadas, com muitos aerossóis, o espalhamento de Mie é quase tão importante quanto o espalhamento de Rayleigh em comprimentos de ondas no azul e ultravioleta (UV), dominante no visível longínquo e infravermelho e para atmosferas altamente poluídas, é dominante em todos os comprimentos de onda. O espalhamento de Mie ocorre quando o tamanho das partículas é tão grande (ou maior) quanto o comprimento de onda da radiação. O espalhamento Rayleigh é significativo somente para comprimentos de ondas pequenos, até 0,6, devido ao tamanho reduzido das moléculas de ar.

A (Figura 5) mostra um esquema ilustrativo da distribuição da provisão de energia recebida pela Terra proveniente do Sol.

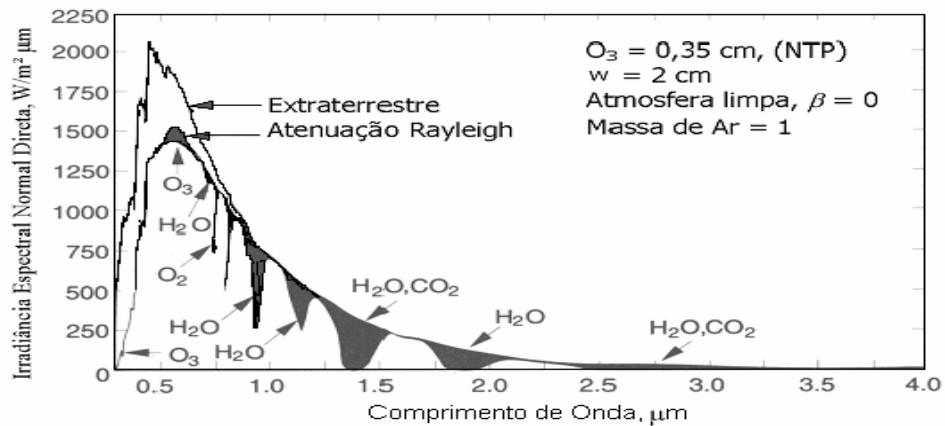


Figura 4- Um exemplo dos efeitos do espalhamento Rayleigh e da absorção atmosférica sobre a distribuição espectral da irradiância direta.

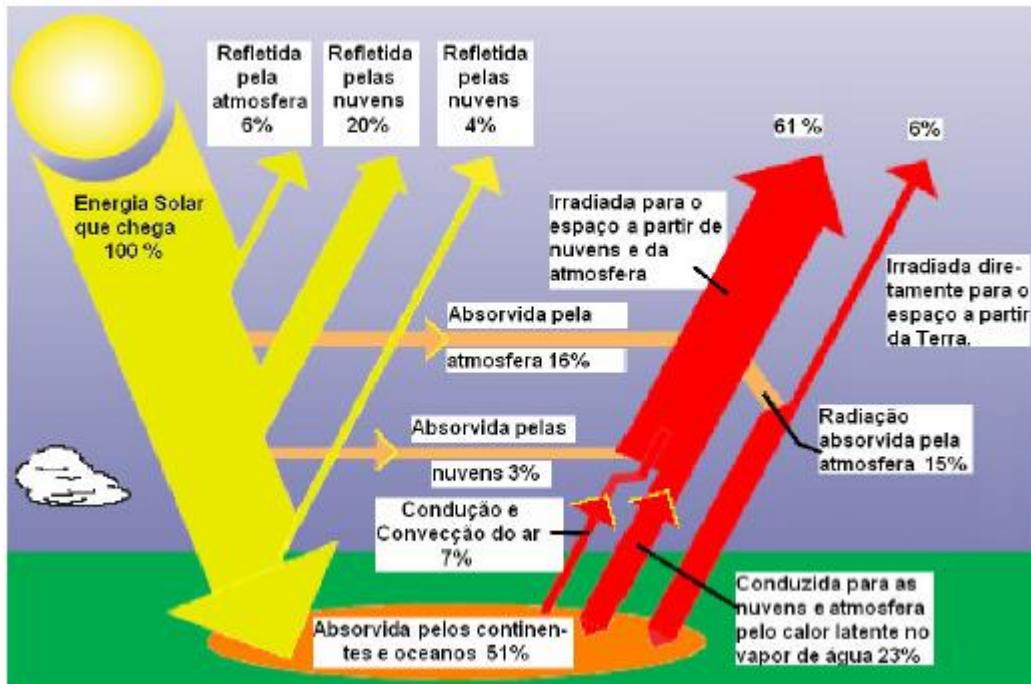


Figura 5- A Terra recebe energia através da radiação solar e perde energia através da radiação infravermelha térmica para o espaço. O balanço entre energia ganha e perdida determina a temperatura da Terra.

## 2.6- RADIAÇÕES DIRETAS, DIFUSAS E GLOBAIS.

Radiação Direta é a radiação solar recebida do Sol menos as radiações espalhadas, absorvidas ou refletida por componentes atmosféricos.

A Radiação Difusa é a parcela da radiação solar que é espalhada por componentes atmosféricos. Além disso, da radiação difusa, também faz parte o albedo que é à parte da radiação refletida pelas superfícies terrestres. O albedo depende da refletância da superfície. Uma superfície coberta de vegetação é bastante absorvente no visível. Isto é devido à clorofila, que absorve especialmente no azul, laranja e vermelho. No entanto, a clorofila absorve menos no verde, sendo especialmente refletido, dando às plantas sua cor característica. Já no infravermelho próximo, nossos olhos não o percebem, mas as superfícies com cobertura vegetal têm refletância alta. Superfícies minerais têm refletância alta, e algumas (como a neve) refletem a maior parte da radiação solar que chega a elas. A água tem refletância pequena no visível, que vai diminuindo ainda mais com o comprimento de onda, mas aumenta com a diminuição da altura solar e depende do índice de refração da água.

A radiação solar global é a soma da radiação direta e da radiação difusa sobre uma superfície. A medida mais comum de radiação solar é a radiação solar global sobre uma superfície horizontal.

A radiação solar global horizontal,  $H$ , tem uma distribuição durante o ano que apresenta tendência sazonal com flutuações diárias superpostas.

A tendência determinística pode ser eliminada das seqüências de radiação solar para tornar sua distribuição independente da época do ano. Segundo (Mustacchi, 1989 e Aguiar 1979), citados por (Macagnan, 1989), existem diversas maneiras de diminuir a sazonalidade intrínseca nos dados de radiação solar, entre elas:

- 1 – Divisão dos dados de radiação solar pelo valor da radiação extraterrestre no mesmo plano, ou seja, o  $H / H_0$ , razão também conhecida como  $K_T$ , ou índice de transparência da atmosfera.
- 2 – Subtração dos dados de radiação pela harmônica anual (primeira harmônica de sua análise de Fourier).
- 3 – Subtração de cada dado de radiação do valor obtido fazendo-se a média móvel sobre 2d+1 dia centrados naquele ponto.

4 – Subtração ou divisão dos dados de radiação pelo valor da radiação obtido de um modelo físico, o qual considera a radiação extraterrestre e os efeitos de absorção e espalhamento pela atmosfera.

## 2.7- DEFINIÇÃO DE TERMOS

Algumas definições dentro de radiação solar são importantes. Entre elas:

IRRADIÂNCIA – é a taxa com que a energia radiante incide sobre uma superfície, por unidade de área de superfície. Sua unidade é o  $\text{W/m}^2$ . O símbolo  $G$  é utilizado para irradiância com subíndices apropriados para radiação direta ( $b$ ), difusa ( $d$ ) ou espectral( $s$ ).

IRRADIAÇÃO – É a energia incidente por unidade de área sobre uma superfície. É encontrada por integração da irradiância sobre um tempo especificado, normalmente, hora ou dia. Sua unidade é  $\text{J/m}^2$ . O símbolo  $H$  é utilizado para a irradiação em um dia. O símbolo  $I$  é utilizado para uma hora ou outro período escolhido. Os símbolos  $H$  e  $I$  podem representar radiação direta, difusa ou total e superfícies com qualquer orientação.

Os símbolos  $G$ ,  $H$  e  $I$  podem ser utilizados com os seguintes subíndices: o refere-se à radiação extraterrestre;  $b$  para radiação direta e  $d$  para radiação difusa;  $T$  e  $n$  referem-se, respectivamente, a plano inclinado e a plano normal a direção de propagação. Se nem  $T$  e nem  $n$  aparecerem significa que o plano é horizontal.

## 2.8- CÁLCULO DA RADIAÇÃO SOLAR SOBRE UMA SUPERFÍCIE

Nesta seção serão apresentadas as equações utilizadas para os cálculos de grandezas da radiação solar. Inicialmente algumas definições são importantes.

Segundo (Benford e Bock, 1939) citado por (Duffie e Beckman, 1991), as relações geométricas entre um plano e qualquer orientação relativa a Terra em qualquer instante

e a radiação solar direta incidente, pode ser escrita em termos de alguns ângulos. A (Figura 6) mostra alguns destes ângulos.

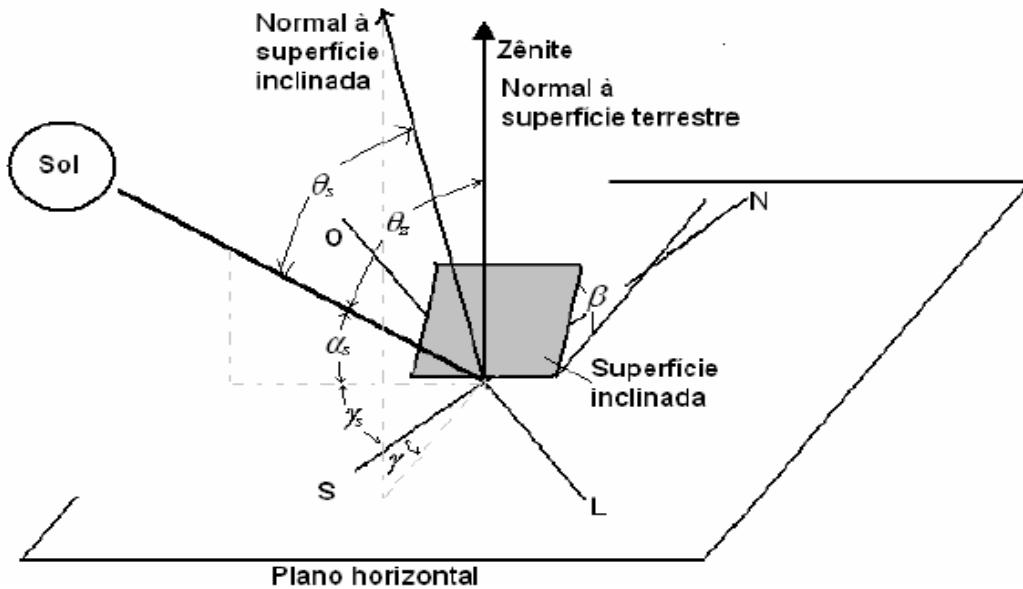


Figura 6- Ângulo de zênite, ângulo azimuthal da superfície ( $\gamma$ ) e ângulo azimuthal solar para uma superfície inclinada. (Duffie e Beckman 1991) [5].

Os ângulos considerados são os seguintes:

$\phi$ - *Latitude*, posição angular norte ou sul em relação ao Equador, norte positivo;

$$-90^\circ \leq \phi \leq 90^\circ.$$

$\delta$ - *Declinação*, posição angular do Sol ao meio dia solar (quando o Sol está sobre o meridiano local) com relação ao plano do Equador, norte positivo.  $-23,45^\circ \leq \delta \leq 23,45^\circ$ .

$\beta$ - *Inclinação*, ângulo entre o plano de uma superfície em questão e o plano horizontal;  $0^\circ \leq \beta \leq 180^\circ$ .

$\gamma$  - *Ângulo azimuthal da superfície*, é o afastamento, em relação ao meridiano local, da projeção normal da superfície no plano horizontal.

$\omega$ - *Ângulo horário*, é o ângulo, medido no pólo celeste, entre o meridiano do observador e o meridiano do Sol. Vale  $0^\circ$  ao meio dia no tempo solar verdadeiro (TSV) e diminui  $15^\circ$  a cada hora pela manhã e soma  $15^\circ$  a cada hora pela tarde.

$\theta_s$ - *Ângulo de incidência*, é o ângulo entre a radiação direta sobre a superfície e a normal desta superfície.

$\theta_z$  – *Ângulo de zênite*, é o ângulo de incidência da radiação direta sobre a superfície horizontal.

$\gamma_s$  - *Ângulo da altitude solar*, é o ângulo entre a horizontal e a linha do Sol. É o complemento do ângulo de zênite.

$\gamma_s$  – *Ângulo de azimute solar*, é o ângulo entre a projeção da radiação direta sobre o plano horizontal e a linha que indica o pólo Sul. Deslocamentos a leste do sul são negativos e a oeste, são positivos.

### 3- APROVEITAMENTO DA ENERGIA SOLAR PARA AQUECIMENTO DE ÁGUA

O processo de aquecimento de água através do aproveitamento de energia solar consiste, basicamente em absorver a radiação solar e transferi-la para um reservatório térmico na forma de calor.

Um corpo que recebe energia solar pode ser dosado em frações de: absorbância (A), refletância® e transmitância(T). A primeira parte é a fração absorvida, a segunda parte é a fração refletida e a última parte é a transmitida. A soma dessas três frações gera o índice 1. As substâncias que possuem absorbância unitária, são o negro de fumo, a platina negra e o bismuto negro, absorvendo de 0,98 a 0,99 da radiação total incidente. Um corpo negro que possui refletância e transmitância nulas é considerado um “corpo negro” .(Kern, 1950).

O efeito estufa ocorre quando a luz penetra numa região cuja fronteira, obviamente transparente para a luz, não é transparente para o calor. Nesse caso, os corpos internos à região absorvem parte da luz nela incidente e se aquecem, passando a irradiar o calor como onda eletromagnética, que, não podendo atravessar fronteira, volta a incidir sobre esses corpos, aquecendo-os cada vez mais, enquanto dura o processo.

Basicamente, o princípio de funcionamento de um aquecedor solar é o mesmo que se verifica quando deixamos, sob a ação do sol, um veículo fechado e estacionado por algumas horas na via pública. A ação da radiação solar se faz cada vez mais presente à medida que o interior do veículo se aproxima de um corpo negro. Você pode estar curioso com essa comparação. Se levarmos em consideração o efeito térmico que ocorre entre ambos esta comparação faz sentido.

Deve-se imaginar, a princípio uma caixa de forma geométrica retangular, hermeticamente fechada, tendo dentro dela uma chapa preta fosco e cobertura de vidro plano transparente. Então, coloca-se esta caixa sob a ação da luz solar visível e da

respectiva radiação infravermelho as quais podem atuar juntas ou separadamente, dependendo das condições atmosféricas locais. A radiação solar atravessará o vidro e ao encontrar a chapa preta sofre uma nova emissão em um outro comprimento de onda, o que a torna impotente para atravessar o vidro (de volta), dando origem a uma re-emissão desta radiação no sentido vidro/chapa/vidro. Como a caixa se encontra hermeticamente fechada ocorre o efeito estufa, responsável pelo aumento progressivo da temperatura da chapa preta enquanto durar a ação da radiação solar.

Para aproveitar todo esse calor de dentro do coletor basta colocar tubos em contato direto com a chapa preta, por onde possa correr a água. Como a chapa preta está sendo aquecida pela radiação solar e estando os tubos em contato direto com a respectiva chapa, verifica-se uma transferência de calor (temperatura da chapa), para os tubos e desta para a água que se encontra em seu interior.

Numa aplicação residencial, a necessidade de água quente é bem maior do que o volume de água existente no interior dos tubos. Para aquecer a água de uma casa, é necessário ligar, por meio de tubos, o coletor solar a um reservatório termicamente isolado.

Nos sistemas de aquecimento de água através do sol, para que o fenômeno da convecção ocorra, é necessário de fato que as massas diferenciais em temperatura que realizam o fenômeno, fiquem em desnível.

Os coletores operando no Hemisfério Sul devem ser orientados para o Norte verdadeiro. Pois quando é verão no Hemisfério Sul, como mostrado na (Figura 7), os raios incidem perpendicularmente a superfície da Terra no Solstício de verão (22 de dezembro). (Figura 7): O verão no Hemisfério Sul (22 de dezembro).

Quando é inverno no Hemisfério Sul, como mostrado na (Figura 7), os raios incidem com outro ângulo na superfície da Terra. No dia 21 de junho, ao meio dia local a luz solar incide perpendicularmente sobre o Trópico de Câncer, enquanto que, no Trópico de Capricórnio o ângulo de incidência é de aproximadamente  $43^\circ$  graus com a superfície, calculado facilmente por trigonometria. (Figura 8): O inverno no Hemisfério Sul (21 de junho).

No caso de sistema de circulação forçada (bombas), o ângulo de inclinação do coletor poderá ser igual ao da latitude do lugar. Para sistema de circulação natural (termossifão), o ângulo de inclinação do coletor será igual ao da latitude acrescido de aproximadamente  $10^\circ$ , segundo Bezerra [3] e [4]. Esse aumento dado ao ângulo da latitude permite ainda um aproveitamento melhor da radiação incidente em virtude da variação anual da declinação solar, observado nas (Figuras 7 e 8).

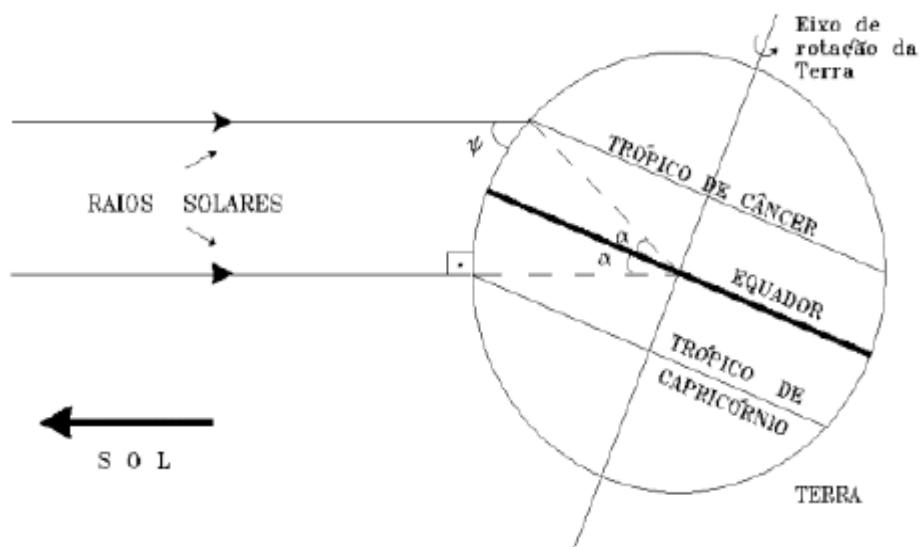
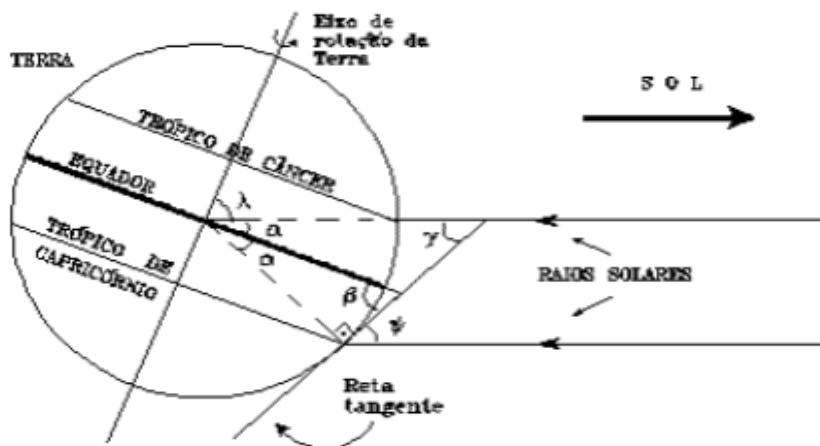


Figura 7- O verão no Hemisfério Sul (22 de dezembro).



$$\begin{aligned}
 \lambda &= \text{Ângulo de inclinação do eixo terrestre de rotação} \\
 \lambda &= 66,5^\circ & \beta &= \alpha + \gamma \\
 \alpha &= 90^\circ - \lambda = 90^\circ - 66,5^\circ & \gamma &= \beta - \alpha \\
 \alpha &= 23,5^\circ & \gamma &= 66,5^\circ - 23,5^\circ \\
 \alpha + \beta + 90^\circ &= 180^\circ & \gamma &= 43^\circ \\
 \beta &= 90^\circ - \alpha = 90^\circ - 23,5^\circ & \psi &= \gamma \\
 \beta &= 66,5^\circ & \psi &= 43^\circ
 \end{aligned}$$

Figura 8- O inverno no Hemisfério Sul (21 de junho).

### 3.1- RADIAÇÃO DO CORPO NEGRO

Ao se descreverem as características radiativas das superfícies reais, é útil introduzir o conceito de corpo negro. O corpo negro é uma superfície ideal que tem as seguintes propriedades:

1. O corpo negro absorve toda a radiação incidente, independentemente do comprimento de onda e da direção.
2. Numa dada temperatura, e num certo comprimento de onda nenhuma superfície pode emitir mais energia que um corpo negro.
- 3- Embora a radiação emitida por um corpo negro seja uma função do comprimento de onda e da temperatura, é independente da direção. Ou seja, o corpo negro é um emissor difuso.

Como um observador perfeito e como um emissor perfeito, o corpo negro serve de padrão contra o qual as propriedades, radiativas das superfícies reais podem ser comparadas.

Embora algumas superfícies se aproximem bastante do corpo negro, é importante notar que não há superfície que tenha exatamente as propriedades de um corpo negro. A aproximação mais exata se consegue por uma cavidade cuja superfície interna esteja numa temperatura uniforme. Se um feixe de radiação entrar na cavidade, através de uma pequena abertura, sofrerá, possivelmente, muitas reflexões antes de reencontrar a abertura de entrada. Por isso, é quase inteiramente absorvida pela cavidade, e o comportamento da cavidade é, aproximadamente, o de um corpo negro.

#### 4- A HISTÓRIA DA ENERGIA SOLAR.

Mais do que nunca em grande evidência na mídia e nos centros de pesquisas especializados no mundo, a energia solar dentro do campo das energias renováveis juntamente com a eólica e biomassa, apresenta um potencial bastante expressivo em sua utilização de forma intensiva.

A utilização prática da energia solar remonta aos primórdios da humanidade quando se utilizava o sol para secar peles e alimentos. A humanidade está ligada à energia solar por séculos. A partir de achados históricos de arqueólogos comprova-se que, já no século 7 A.C, se utilizava simples lentes de vidro para concentrar a luz do sol e desta forma queimar pequenos pedaços de madeira e assim obter fogo.

Na Grécia antiga já se fazia uso de conhecimentos da arquitetura passiva visando melhorar o aquecimento natural das residências e assim economizar lenha e carvão. Outros exemplos existem ao longo do processo evolutivo, mas dispositivos ativos datam ao século XVII quando foi testado o primeiro coletor solar (Horácio de Saussure, Suíço, 1767), atingindo temperaturas superior ao ponto de ebulição da água (101°C).

A aplicação da energia solar para produção de energia mecânica, se realizou no período posterior da Revolução industrial, e em meados do século passado vários motores solares foram desenvolvidos por Augusto Mouchot ( Francês, atuação entre 1864/1878). Na mesma época outros pesquisadores na Europa, como também nos Estados Unidos, realizaram experiências no campo solar basicamente em aquecimento d'água e motorização.

Um importante desenvolvimento foi obtido pelo invento de Greeley Abbot, astrofísico americano em 1936, de uma caldeira solar. A indústria começou nos inícios dos anos 20 alcançando seu auge até as vésperas da II Guerra Mundial. Este crescimento veio declinando até meados dos anos 50 quando o baixo custo do gás natural do petróleo o tornou principal meio de aquecimento dos lares Norte-americanos. O mundo permaneceu indiferente sobre as possibilidades da energia solar até a crise do petróleo

dos anos 70. Hoje em dia pessoas usam a energia solar para aquecimento interno, de água e para gerar eletricidade para as mais diversas finalidades.

Quanto à geração de eletricidade pelo efeito Fotovoltaico, ou seja, a transformação da luz em energia elétrica, é conhecida desde 1839 em experiências realizadas por Bequerel, teve uma evolução lenta e somente em 1941 é fabricada a primeira fotocélula de silício monocristalino, sendo aperfeiçoada ao longo do tempo. Neste momento, não havia demanda por tal tecnologia que gerava pouca quantidade de energia e era muita cara.

No final da década de 50, quando se iniciaram os programas espaciais, marcam uma nova aplicação da energia solar que praticamente não encontram concorrentes, e também onde altos custos dos painéis Fotovoltaicos não impediam sua utilização. Assim sendo, a partir dos anos 60 em diante as naves e satélites espaciais proporcionaram um desenvolvimento da tecnologia FV, melhorando-a quanto ao rendimento, forma de fabricação e menores custos. Sem dúvida, tecnologicamente, a partir dos programas espaciais americano e russo, houve uma melhora significativa na qualidade das células, seu peso e outros avanços foram obtidos, mas ainda a um custo extremamente elevado, quando comparado com outras fontes energéticas disponíveis. No entanto, para o fim espacial o custo não era relevante, e sim a possibilidade de geração de energia elétrica no espaço para alimentar todos os equipamentos elétricos de uma nave ou satélite.

Um outro importante marco dentro da análise das fontes energéticas mundiais foi a crise do petróleo em 1973, quando repentinamente foram majorados os preços do petróleo, além de ter sido feito um boicote temporário. O mundo percebeu que os combustíveis fósseis eram finitos, e sujeito a grandes perturbações. Houve desde então um despertar do mundo para as limitações impostas pelas fontes tradicionais de energia e a necessidade de se buscar fontes alternativas aquelas já existentes. Vale salientar que houve grandes variações nos preços do petróleo, repercutindo sempre sobre a pesquisa e utilização de outras fontes de energia, como a energia solar. No entanto, hoje em dia após longa maturação, a energia solar se firma respaldada por

todo o potencial que representa e pela tecnologia para o seu aproveitamento já existente e disponível, com custos cada vez mais competitivos quando comparados às fontes convencionais. Ressalta-se, que quando da crise do petróleo, todas as outras fontes de energia foram elevadas em sua importância (hidráulica, nuclear, eólica, álcool, metanol, etc).

Espera-se que a energia solar não mais altere períodos de auge e falta de interesse, como se comportou até os anos 80 e 90, e se afirme com os resultados alcançados nos inúmeros projetos já instalados em todo mundo, como uma energia plenamente viável e eficiente.

#### **4-1- PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DOS COLETORES SOLARES**

Num sistema de aquecimento solar, o coletor é o equipamento responsável pela conversão da energia solar em calor. Conhecer o processo desta conversão é essencial para que se possa aproveitar ao máximo sua capacidade de fornecer aos fluidos (água, ar) temperaturas muito superiores às temperaturas do meio ambiente.

#### **4.2- COLETORES SOLARES**

Os coletores solares podem ser classificados em duas categorias: os de placa plana e os de concentração. Os coletores de concentração utilizam lentes ou espelhos para concentrar a luz solar sobre um elemento absorvedor e assim atingem temperaturas bastante elevadas.(Salvadoretti, 1983), fez análises das características básicas dos principais tipos de coletores concentradores.

Para o aquecimento de água de uso doméstico, no entanto, os concentradores são mais caros e menos eficientes que os coletores planos. Devido a isto nesta dissertação serão abordados apenas os coletores planos. Os coletores planos são essencialmente constituídos por uma caixa, com uma cobertura transparente à radiação solar (vidro) e uma placa metálica (absorvedor), formada de pequenos tubos por onde escoa o fluido

ou sobre a qual é soldada uma grade de tubos por onde escoa o fluido. Esta placa metálica é pintada de preto fosco e instalada na caixa com isolamento lateral e inferior conforme mostra a (Figura 9).

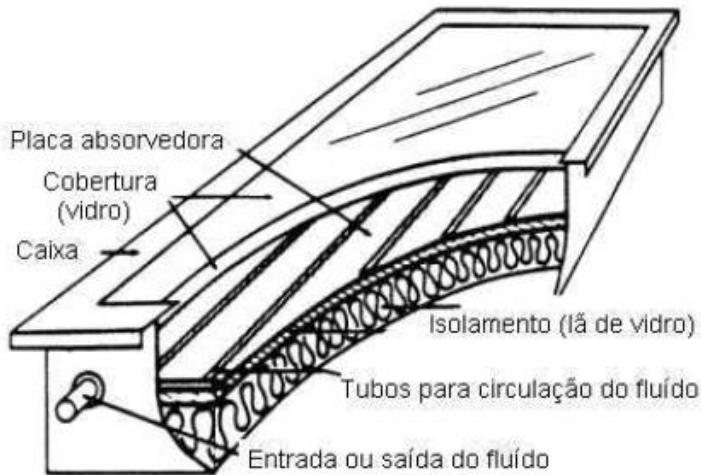


Figura 9- Coletor solar de placa plana

Coletores como o da (Figura 9), quando bem construídos podem aquecer a água da temperatura ambiente até cerca de 100 °C, dependendo da temperatura ambiente e da radiação solar e funciona muito bem para temperaturas em torno de 60 °C. Já o coletor solar sem vidro, oferece baixa temperatura, ocasionada pela perda de calor por radiação infravermelha emitida pela placa absorvedora, e principalmente pelas perdas de calor devido à convecção do ar. Sua aplicação torna-se bastante interessante para situações onde se deseja temperaturas pouco superiores a do ambiente. Estes coletores podem ser utilizados para preaquecimento industrial e aquecimento de piscinas. (Mveh, 1999), analisou a eficiência térmica de coletores solares sem cobertura, obtendo rendimento superior a 40%. Pelo fato destes coletores não possuírem cobertura e de não precisarem de materiais que suportem altas temperaturas, seus custos são bastante reduzidos.

### 4.3- EFEITO ESTUFA

O vidro comum utilizado na maioria dos coletores solares comporta-se de maneira extremamente diferente em relação aos comprimentos de onda das radiações que incidem sobre suas superfícies. Este comportamento é mostrado na (Figura 10) que apresenta o espectro da transmitância para o vidro comum. (Figura 10) - Transmitância do vidro comum em função do comprimento de onda (Palz, 1981).

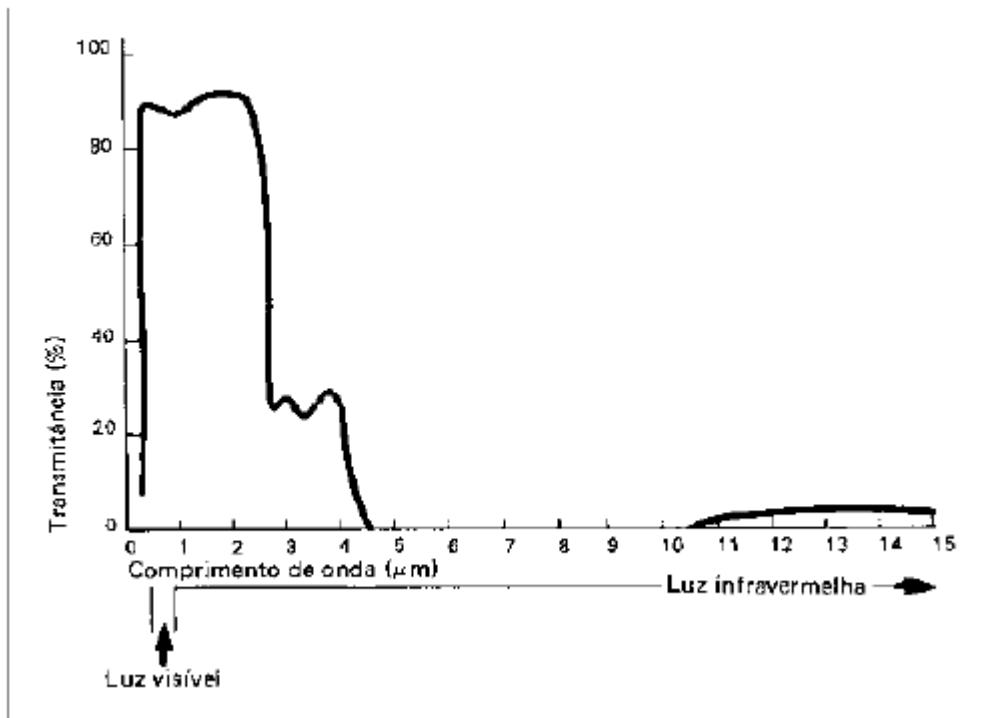


Figura 10- Transmitância do vidro comum em função do comprimento de onda.

Observa-se pela (Figura 10) que o vidro é bastante transparente à radiação para comprimentos de onda de  $0,3 \mu\text{m}$  a  $2,5 \mu\text{m}$  (espectro solar) e altamente absorvedor para comprimentos de onda próximos e maiores que  $5 \mu\text{m}$  (infravermelho). Devido a esta propriedade seletiva, o vidro absorve a radiação emitida pela placa absorvedora que está aquecida. Tendo o vidro a característica de ser bom absorvedor desta radiação, é também bom emissor, com isso, uma pequena parcela da energia absorvida aquece a superfície interna do vidro e a parcela restante é reemitida à placa

absorvedora que a absorve novamente, contribuindo para o aumento de sua temperatura (processo conhecido como efeito estufa). O vidro exerce notável influência neste processo. Além de permitir que a energia solar incidente seja transmitida à placa absorvedora, evita a perda de calor por radiação emitida pela placa absorvedora, e impede as perdas por convecção, que seria a perda de energia mais significativa, devido às correntes de ar.

## 5- EFICIÊNCIA TÉRMICA DOS COLETORES

Para que os coletores solares ofereçam vantagens significativas, algumas precauções básicas devem ser consideradas:

- A cobertura deve possuir alta transparência para a radiação solar e alta absorvidade para radiação infravermelha;
- A placa absorvedora deve ser preta para garantir maior absorção de energia e possuir alta condutividade térmica para transferir esta energia ao fluido;
- A caixa deve ter um excelente isolamento térmico na parte lateral e na parte inferior, que minimize as perdas de calor para o ambiente, e possuir uma eficiente vedação para impedir a entrada de umidade.

As características acima contribuem para que o rendimento do coletor seja satisfatório, embora o cálculo do rendimento dos coletores solares envolva uma série de outros parâmetros e certa complexidade experimental. A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), estabelece o método de ensaio para determinação do rendimento térmico de coletores solares, através da NBR 10184 – Coletores Solares Planos Para Líquida Determinação do Rendimento Térmico.

Em suma, o rendimento de um coletor solar é dado pela equação (2):

$$\eta = \frac{\int_{t_1}^{t_2} Q_u}{A_c \int_{t_1}^{t_2} G_T dt} \quad (2)$$

Onde:

$\eta$ -rendimento;

$Q_u$  - energia transferida ao fluido de trabalho

$G_T$  - radiação solar incidente no plano do coletor

$A_c$  - área do coletor

Em regime permanente, a energia transferida ao fluido de trabalho ( $Q_u$ ), é definida pela diferença entre a energia solar absorvida pelo coletor e as perdas térmicas, ou seja:

$$Q_u = A_c [S - U_L (T_{tm} - T_a)] \quad (3)$$

Onde:

$S$  - radiação solar absorvida;

$U_L$  - coeficiente global de perdas térmicas do coletor;

$T_{pm}$  - temperatura média da placa absorvedora;

$T_a$  - temperatura ambiente;

A simplicidade da equação (3) é apenas visual. Na prática a temperatura média da placa absorvedora ( $T_{pm}$ ) é de difícil obtenção, essa grandeza está relacionada com a radiação solar incidente, com as condições de entrada do fluido (vazão e temperatura) e com as características de construção do coletor, entre eles: o diâmetro, o número e espaçamento entre os tubos elevadores.

Devido a esta dificuldade, a equação (3) pode ser reformulada, e é expressa em termos da temperatura de entrada do fluido e de um fator denominado fator de remoção de calor (FR). FR é definido como a razão entre a energia útil real retirada do coletor e a energia útil que poderia ser retirada se toda a superfície absorvedora estivesse à temperatura de entrada do fluido.

Este fator pode ser representado matematicamente pela da equação (4).

$$F_r = \frac{m C_p (T_o - T_i)}{A_c [S - U_L (T_i - T_a)]} \quad (4)$$

Onde:

$m$  - vazão mássica do fluido;

$C_p$  - calor específico do fluido;

$T_o$  - temperatura de saída do fluido;

$T_i$  - temperatura de entrada do fluido.

A radiação solar absorvida ( $S$ ), depende dos materiais empregados na construção do coletor e do ângulo de incidência da radiação solar.

Nas condições em que são realizados os testes de rendimento, a fração da radiação solar direta é muito superior às frações das radiações difusas e do albedo. (Zilles, 1988), que realizou ensaios experimentais para caracterização da eficiência térmica de coletores solares planos, afirma que, em seus ensaios, a porcentagem da radiação difusa mais a radiação refletida pelo meio circundante (albedo) não assumiram valores maiores que 10%.

Nesta situação, a radiação solar absorvida ( $S$ ) pode ser definida pelo produto:

$$S = G_T (\tau\alpha)_{eff} \quad (5)$$

sendo  $(\tau\alpha)_{eff} = 1,02\tau\alpha$

Onde:

$(\tau\alpha)_{eff}$ - produto transmitância-absortância efetivo;

$\tau$  -transmitância da cobertura do coletor solar;

$\alpha$ - absortância da placa absorvedora.

Da equação (3) e da consideração admitida para a radiação solar absorvida ( $S$ ), pode-se escrever a equação (6), que é a equação utilizada para análises dos coletores solares. Como pode ser observada a energia útil é calculada em função da temperatura de entrada do fluido, que é uma grandeza que pode ser facilmente controlada e determinada experimentalmente.

$$Q_u = A_c F_R [G_T (\tau\alpha)_{eff} - U_L (T_i - T_a)] \quad (6)$$

De modo geral, na realização dos testes de rendimento, os coletores são expostos à radiação solar para a determinação da energia transferida ao fluido de trabalho ( $Q_u$ ). Para determinação direta dessa energia, é necessário o conhecimento das seguintes

grandezas: radiação solar incidente no coletor, vazão mássica do fluido que circula no coletor e as temperaturas do fluido na entrada e saída do coletor.

Para cada temperatura de entrada do fluido no coletor é obtido um valor da eficiência instantânea ( $\eta_i$ ), definido pelas equações (7) e (8).

$$\eta_i = \frac{Q_u}{A_c G_T} = \frac{m C_p (T_o - T_i)}{A_c G_T} \quad (7)$$

$$\eta_i = F_R(\tau\alpha)_{eff} \cdot \frac{F_R U_L (T_i - T_a)}{G_T} \quad (8)$$

A apresentação dos resultados em forma de gráficos é muito útil pois, permite extrair com muita facilidade dois parâmetros que descrevem, de forma simplificada, o comportamento dos

coletores: a grandeza  $FR(\tau\alpha)_{eff}$  que exprime a energia absorvida; e a grandeza  $FRUL$  que exprime as perdas de energia. Para que estas informações possam ser extraídas diretamente, os gráficos tipicamente apresentam em sua ordenada, a eficiência instantânea ( $\eta_i$ ); e na abscissa, a razão entre a diferença de temperatura do fluido na entrada do coletor e a temperatura ambiente, e a radiação solar no plano do coletor ( $T_i - T_a / G_T$ ).

A Figura (11) apresenta o resultado de um teste de rendimento para coletores solares. Após a realização do teste, os pontos são plotados conforme a (Figura 11). Através destes pontos discretos, é feita uma aproximação (método dos mínimos quadrados), para uma função contínua. A melhor aproximação é caracterizada por uma reta, sendo o coeficiente angular desta reta, a grandeza que representa as perdas de energia ( $FRUL$ ), e o coeficiente linear, a grandeza que representa a energia absorvida ( $FR(\tau\alpha)_{eff}$ ).

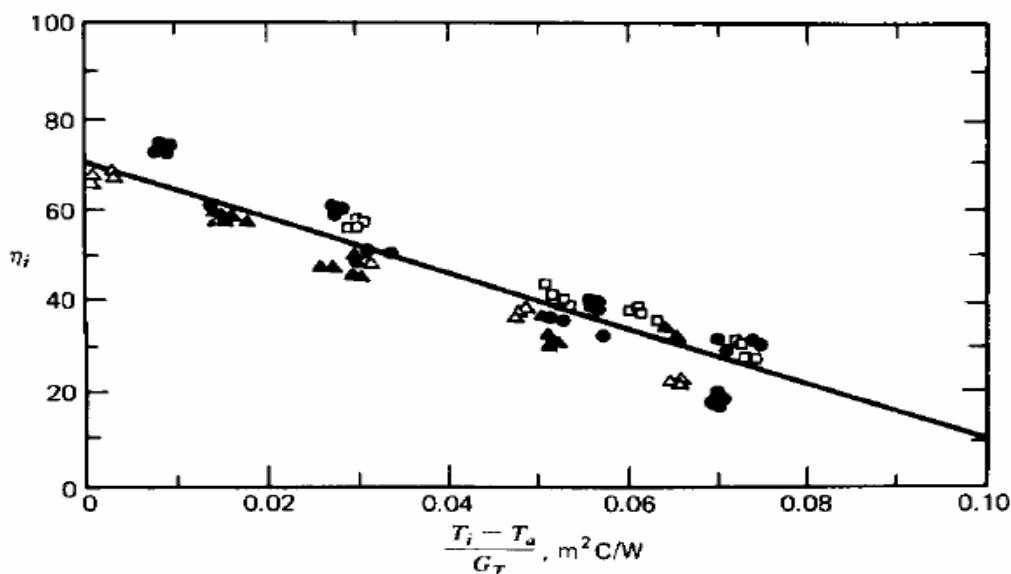


Figura -11 Apresentação típica do rendimento de coletores solares.

## 6- MAPAS DA RADIAÇÃO SOLAR

Muito se discute sobre a importância da utilização da energia solar como uma fonte alternativa de energia para os mais variados fins nas atividades humanas. De fato, é indiscutível a importância da energia solar, no entanto, é preciso determinar sua disponibilidade em termos estatísticos. Como já discutido em capítulos anteriores a estatística faz sua parte analisando os dados disponíveis de variáveis relacionadas com a energia solar e determinando equações que permitam estimá-la em locais onde dados medidos são inexistentes. Como última etapa no processo de disponibilidade destes dados para pessoas interessadas e que normalmente são leigas em termos de tratamento de dados, estão os mapas (Figura 12 e 13). Mapas são apresentações em papel ou mídia digital, esquemas que podem ser linhas ou cores, sobre a representação gráfica de um país, estado ou região, representando os valores da variável desejada. No caso da radiação solar, poderá estar disponível em valores médios: diária, mensal, anual ou ambas.

Media da Radiacao Diaria Mod. GL1.2 (W/m<sup>2</sup>)  
Periodo: Outubro 2005

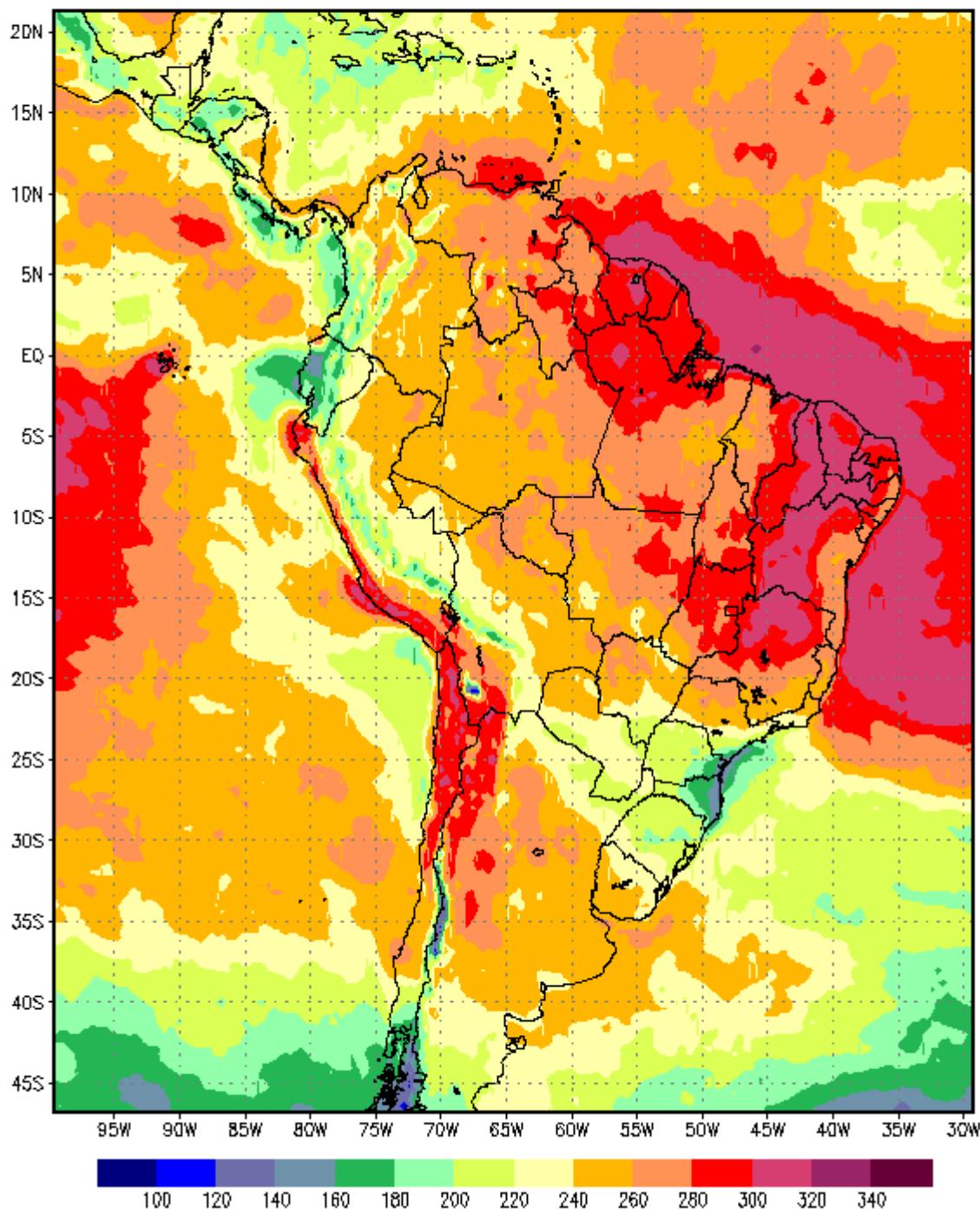


Figura 12- Média da Radiação diária (mês de outubro).CPTEC/INPE[20]

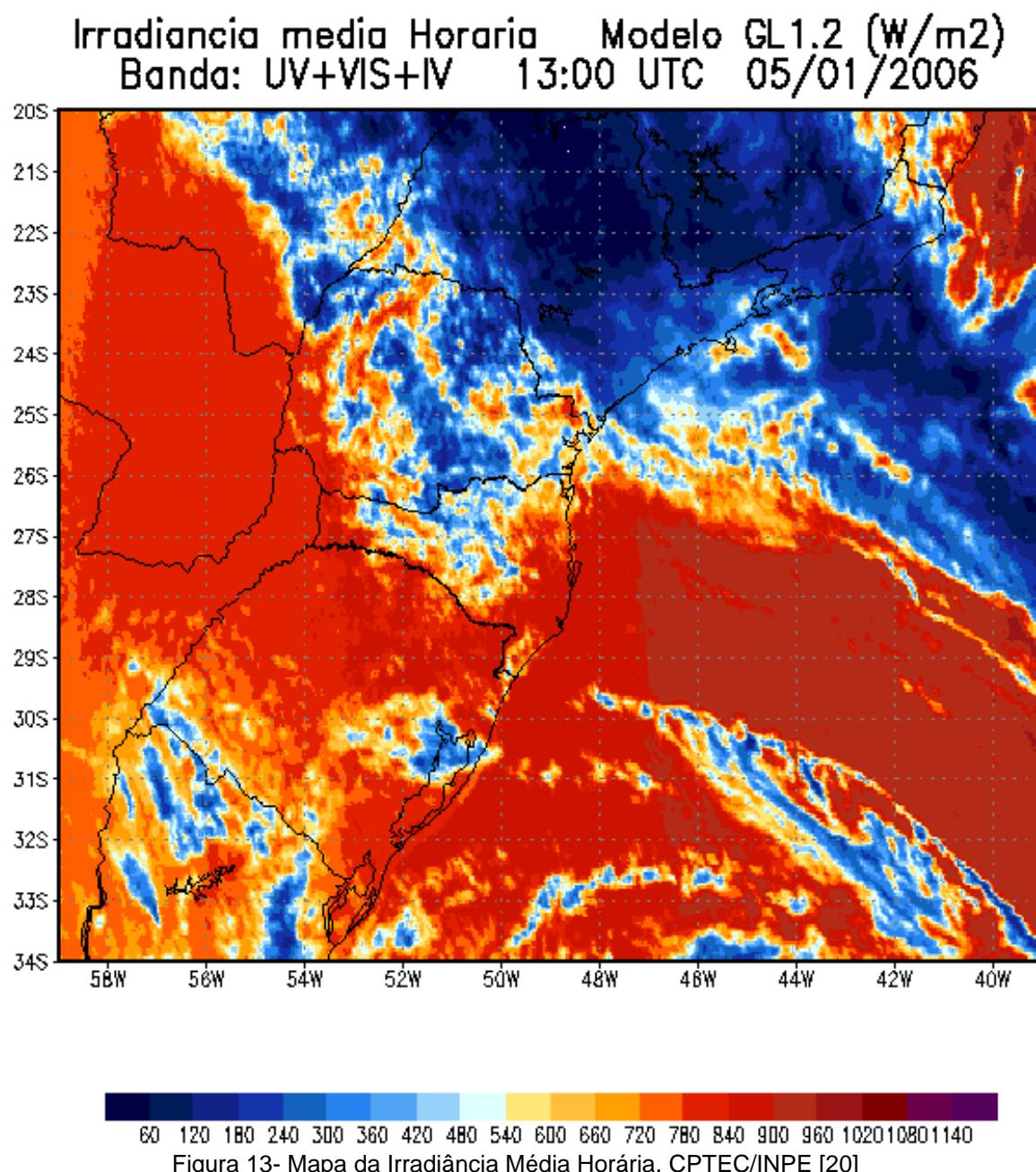


Figura 13- Mapa da Irradiância Média Horária. CPTEC/INPE [20]

## 7- METODOLOGIA E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

### 7.1- CIRCULAÇÃO LIVRE

O princípio de funcionamento por circulação livre( termo sifão) é o que mais se adapta á sistemas simples como esse projeto, pois desde que tenha a possibilidade de instalação do coletor com a parte superior do mesmo, ou seja, a barra superior do retorno da água quente, fique entre 10cm e no máximo 3 metros abaixo do nível inferior (fundo) da caixa ou reservatório.

Esse desnível é necessário para garantir a circulação da água no coletor com diferença de densidade entre a água quente e a fria, sendo que á medida que esquenta a água nas colunas do coletor, ela sobe para a parte superior da caixa ou reservatório, ao mesmo tempo em que a água fria por ser mais pesada dirige-se a parte inferior do coletor empurrando à água quente para a caixa ou reservatório, mantendo esse movimento enquanto houver irradiação solar. Processo idêntico aos aquecedores convencionais do mercado com sistema termo sifão, diferenciando-se apenas nos materiais aplicados na sua fabricação.

O aquecimento de piscinas é um grande exemplo de sistema em que o coletor fica mais alto do que a caixa ou reservatório. O sistema é dotado de um termosensor, sendo o mesmo responsável pelo acionamento de uma motobomba, assim que o coletor solar estiver produzindo água quente, pois sem a qual, não haveria a troca de água quente pela fria no coletor.

Faz-se necessário à instalação de uma válvula de retenção para que nos horários em que o coletor solar não esteja aquecendo, evite o ciclo inverso, já que a água do coletor está fria e mais pesada do que a água da caixa ou reservatório, e o coletor passe a funcionar como um dissipador de calor, esfriando toda água quente armazenada ou sendo aquecida, quando disponível no sistema, de aquecimento elétrico complementar.

## 7.2- COMPONENTES DO SISTEMA DE AQUECIMENTO

### 7.2.1- ANALISE TECNICA DA CONSTRUÇÃO DO COLETOR SOLAR

O coletor solar é o componente que merece especial atenção, por ser o responsável direto pelo bom desempenho de um sistema de aquecimento solar.

Esse coletor solar(alternativo) diferencia-se dos convencionais no que tange a materiais utilizados na sua construção e rendimento térmico, pois por questão de baixar custos, foi utilizado nas colunas de absorção térmica, tubos de PVC menos eficiente do que os tubos de cobre aplicados nos coletores convencionais de mercado, e ao mesmo tempo limitar a temperatura a níveis que mantenham a rigidez do PVC, sem causar o amolecimento dos mesmos, e por consequência, comprometer a estrutura do aquecedor solar na parte superior, provocando vazamentos. Sem esquecer da caixa ou reservatório, se os mesmos forem de materiais com limites de temperatura para acumulação.

As garrafas PET e as caixas TETRA PAK devidamente encaixadas, fazem o papel da caixa, do painel de absorção solar e do vidro nos coletores convencionais, que em ambos tem como função proteger o interior do coletor de interferências externas, principalmente dos ventos e oscilações de temperatura, criando o efeito estufa. Apesar de simples, contém detalhes indispensáveis na sua confecção. Na (Figura 12) um coletor montado.



Figura 14- Coletor solar Alternativo montado

### 7.3- CAIXA D'ÁGUA OU RESERVATÓRIO

Devido a algumas dificuldades técnicas será utilizado como reservatório térmico uma garrafa de armazenagem de água de 20 litros (Figura 13).

O ideal seria usar a própria caixa d'água existente no local onde poderia ser aproveitada no fornecimento de água quente e fria, desde que a mesma tenha no mínimo a capacidade de 500 litros, para que torne disponível mais ou menos 250 litros de água quente, será utilizada como reservatório a metade superior da caixa para o sistema de aquecimento solar. Mas como é para fins experimental será utilizada a garrafa já mencionada anteriormente. O ideal e recomendável, seria um reservatório só para a água quente, com o tamanho correspondente ao consumo diário do número de pessoas, e próximo dos pontos de consumo, para evitar o desperdício, até que chegue a água quente do reservatório.

Sendo o reservatório, responsável em acumular a água quente, faz-se necessário um bom isolamento térmico, o que é encontrado nos acumuladores convencionais de mercado, nos quais usam-se isotérmicos de alta eficiência.

Tais acumuladores em sua maioria dispõem de aquecimento auxiliar para os dias encobertos ou chuvosos, com energia elétrica ou a gás, controlados por termostatos que acionam este recurso sempre que a temperatura da água fique abaixo do pré-estabelecido pelo usuário.

Esse projeto por ter a característica de torná-lo viável economicamente a todos, não dispõe de tal recurso.

O aproveitamento de materiais disponíveis basicamente em todas as regiões, será de extrema importância. Utiliza-se no projeto uma garrafa plástica de 20 litros como reservatório, mas isso não indica que garrafas de outros materiais sejam dispensadas, porém tenha muito cuidado, e não use recipientes que continham produtos químicos, pesticidas, inseticidas, etc., pois mesmo que bem lavados continuarão contaminados e oferecendo riscos em potencial à saúde. Portanto evite transtornos, tendo a certeza da origem dos mesmos.



Figura 15- Reservatório Térmico (Garrafa de 20 litros)

## 7.4- ISOLAMENTO TÉRMICO DO RESERVATÓRIO

Quanto ao isolamento térmico há inúmeras opções: dentre tantas destacamos o isopor encontrado em diversas embalagens de supermercados, dessas que vem com frios (ex.com queijo, presunto, etc.) e em eletrodomésticos e eletrônicos, também bolsas plásticas, papéis, como sendo uma alternativa para quem reside no meio urbano. Em outras regiões temos também ótimos isotérmicos, tais como: serragem, cascas de trigo, cascas de arroz, grama seca, etc., mas sem umidade.

Torna-se extremamente fácil o uso de tais isolantes, enchendo caixas tetra pak de 1 litro (sem deixar espaços vazios), fechando-as novamente, resultando cada caixa num bloco isotérmico. Para fixar tais blocos na caixa ou reservatório use cola ou fita adesiva, enfim do modo que você achar melhor, tomando o cuidado de preencher os espaços entre as caixinhas, quando fixadas em recipientes redondos ou de cantos arredondados, com sacolas plásticas, papéis, etc.

Outro tipo de isolamento térmico simples e eficaz, porém mais caro, é colocar um garrafa d'água dentro de um compartimento feito de madeira, tijolos, ou mesmo dentro de uma outra caixa maior, o suficiente para ter uma folga nas laterais de no mínimo 6 cm, para o devido preenchimento com qualquer um dos isolantes acima citados, não esquecendo que é obrigatório o isolamento da tampa da caixa.

Aplique o isolamento térmico, somente após ter feito todos os furos e ligações necessárias à instalação do conjunto.

## 7.5- TÓPICOS REFERENTES À INSTALAÇÃO DO CONJUNTO

### 7.5.1- DIMENSIONANAMENTO DO SISTEMA CONFORME O CONSUMO E REGIÃO DO PAÍS

Ao botar em prática o projeto em outubro de 2005, foi construído um coletor solar com 20 garrafas PET, 20 caixas TETRA PAK de 1 litro, dispostas em 5 colunas com 4

garrafas cada, totalizando uma área útil de absorção de 0,4136 m<sup>2</sup>, e uma caixa plástica de 20 litros na função de reservatório, revestida com isopor de 20 mm. Vale ressaltar que essa espessura de isolamento térmico, não é suficiente para manter ou armazenar a água quente até tarde da noite.

Como foi instalado praticamente no verão, e que com exposição solar em torno de 7 horas, aquece a água até 60 °C, sendo necessário misturar com água fria.

Para aqueles que já tenham, ou possam instalar uma caixa ou reservatório com volume igual ou acima do que necessitam, uma solução bastante interessante e simples de encontrar a temperatura e o volume de água quente, que atenda às suas às necessidades de consumo, é a de instalar a saída de água fria para o coletor solar o mais baixo possível.

Diante do exposto, fica mais viável que cada um encontre o dimensionamento próximo às necessidades de consumo de cada habitação, pois cada projeto requer a observação de diversos fatores, e entre os quais:

#### Exemplos

- Posição do coletor solar em relação ao norte geográfico
- Inclinação do coletor solar em relação à latitude
- Região e local a ser instalado

## 7.6- SUPORTE DE FIXAÇÃO DO COLETOR SOLAR

Fica a critério de cada um o material a ser usado como suporte de fixação do coletor solar, que fique registrado que pelo menos os dois barramentos sejam amarrados a barras de cano galvanizados de  $\frac{3}{4}$ , ou a algo que garanta o alinhamento do coletor.

Deve-se muita atenção para evitar que bolhas de ar atrapalhem a circulação da água no coletor, é necessário um desnível de 2 cm por cada metro corrido, e jamais deixe curvas nos barramentos. Outro fator importante é que jamais deixe faltar água no coletor, sob risco de superaquecimento e destruição do mesmo.

Caso queira fixar direto sobre o telhado sem levar em conta a latitude local, deverão instalar o coletor solar com no mínimo 10° de inclinação e voltado para o norte

geográfico o mais próximo possível, e que terão de aumentar a área quadrada de absorção solar, ampliando o coletor para compensar a perda por posicionamentos.

Torna-se oportuno ressaltar que quase todos os problemas de eficiência térmica de qualquer aquecedor solar, deixam de existir à medida que nos aproximamos do norte e nordeste.

Uma vez escolhido o sistema de circulação por termo sifão, torna-se obrigatório que o fundo da caixa ou reservatório térmico, fique sempre acima em relação á parte superior do coletor solar, o que cabe a cada um escolher a melhor alternativa para o local, sem esquecer que ao falar em caixa ou reservatório, estamos falando de peso, portanto mais uma vez, não improvise em lugares duvidosos que possam ruir e causar sérios problemas. (Lembre-se que cada litro de água pesa 1 quilo)

## 7.7- ISOLAMENTO TÉRMICO DOS DUTOS DE AGUA QUENTE

Envolve-se o barramento superior do coletor (Figura 14) e o tubo que leva água quente até a caixa, com isopor, prendendo o mesmo aos tubos com tiras cortadas de garrafas pet verde. Obs: isopor não resiste por muito tempo exposto ao sol.



Figura 16- Isolamento do barramento superior

## 7.8- DISTÂNCIA ENTRE O COLETOR E A CAIXA OU RESERVATÓRIO

O mais próximo possível no intuito de minimizar perdas térmicas, sem deixar de levar em conta também, ás distâncias dos pontos de consumo, evitando dessa forma o desperdício até chegar á água quente.

## 7.9- TEMPO NECESSÁRIO DE EXPOSIÇÃO SOLAR

O aquecedor solar em dias ensolarados, atinge a temperatura máxima, após 7 horas, mas a partir das 10 horas da manhã, é que começamos a notar o aumento da temperatura da água da caixa ou reservatório. Mesmo em dias encobertos, mas não chuvosos e dependendo da região, pode apresentar rendimento satisfatório e parcial economia de energia elétrica.

## 8- RESUMO DA MONTAGEM EXPERIMENTAL E MATERIAL

- Os materiais utilizados na construção do coletor e na coleta de dados foram:
- Caixa de Tetra Pak revestida com tinta preta fosca;
- Tubo de PVC 20 mm
- Garrafa de 2 litros Pet
- Termopar tipo K
- Inclinação do telhado: 21°
- Inclinação do coletor: 21+10°
- Tempo de exposição ao sol: 7 horas
- Vazão de água= 0,000793651 kg/s
- Temperatura água fria: 23° C
- Variação da temperatura do ar no interior das garrafas = 40° - 65° C
- Variação da temperatura da água = 37° – 62° C (Figura 17)
- Área da superfície = 0,4136 m<sup>2</sup>
- Latitude = 21°
- Garrafas de água de 20 litros uma para reservatório de água fria outro de água quente
- Fita de Auto-fusão que tem como objetivo a vedação da tubulação
- Inclinação do coletor foi usada à inclinação do telhado.
- Distância entre os tubos da coluna: 0,85 cm (Figura 7.4)
- Comprimento da tubulação: 92 cm (Figura 7.4)



Figura 17- Reservatório Termico



Figura 18- de medição de temperatura 43º



Figura 19- medição de temperatura 60º

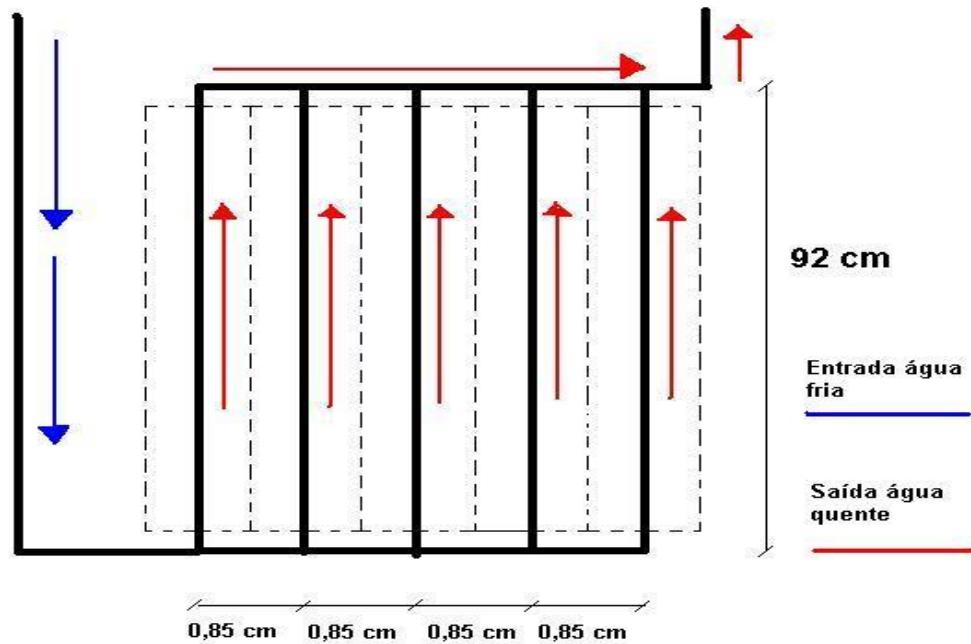


Figura 20- Distância entre as tubulações das colunas e o comprimento do coletor.

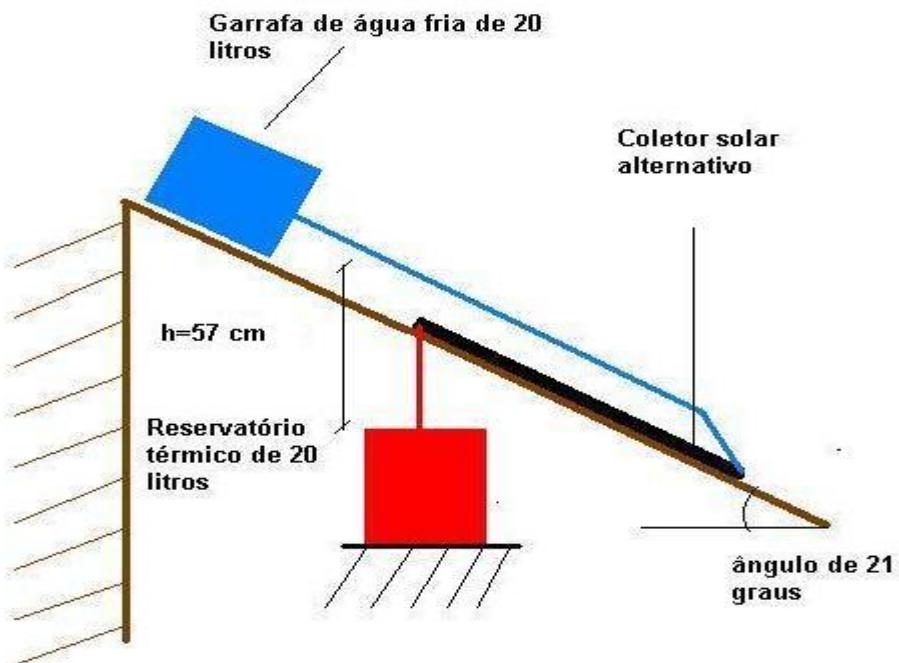


Figura 21- desenho de instalação do coletor solar alternativo

## 9- COMPARAÇÃO ENTRE COLETOR ALTERNATIVO E CONVENCIONAL.

Abaixo será mostrada uma (Tabela 1 e 2) comparativa entre os tipos de materiais usado para construção do coletor solar. Sendo que a temperatura de trabalho do coletor convencional é em torno de 45º C.

**Tabela 1- Diferenças entre o coletor alternativo e convencional**

<b>Coletor Solar Convencional</b>	<b>Coletor Solar Alternativo</b>
Vidro Plano Transparente	Garrafas Pet (Plástico)
Placa Absorvedora de Alumínio ou Cobre	Caixa Tetra Pak (Caixa de Leite)
Tubulação em cobre	Tubulação em PVC
Isolamento Térmico em Lã de Vidro	Isopor, Plástico.
<b>Reservatório Térmico Convencional</b>	<b>Reservatório Alternativo</b>
Corpo Interno de Alumínio	Corpo Interno de Plástico
Isolamento térmico em poliuretano expandido	Caixa tetra pak e isopor
Corpo externo em chapa de alumínio	Papel laminado

**Tabela 2- Sistema Auxiliar de Aquecimento**

<b>Sistema Auxiliar de Aquecimento</b>	<b>Coletor Solar Alternativo</b>	<b>Coletor Solar Convencional</b>
<b>Auxiliar elétrico</b>	Não Possui	Possui
<b>Auxiliar a Gás</b>	Não Possui	Possui

## 10- CÁLCULO DA EFICIÊNCIA TÉRMICA

Neste capítulo será calculada a eficiência térmica do coletor solar para diversos ângulos zenital, onde também será variada a temperatura de saída. Essa temperatura foi medida de duas formas:

- Uma na saída do coletor solar (em determinado instante)
- E a outra dentro do reservatório térmico

Feita a medição de temperatura na saída do coletor obtivemos a eficiência térmica instantânea e com um determinado ângulo zenital. Feita a medição de temperatura no reservatório calculou-se a eficiência do coletor na hora do consumo dessa água aquecida.

A vazão mássica de água foi encontrada da seguinte forma:

$$m = m/t \cdot 3600 \text{ (Kg/s)} \quad (9)$$

Onde,

m- massa

t- tempo de exposição

Abaixo segue algumas tabelas em seus respectivos dias:

- No dia 25/11/2005(Primeiro dia) inicio das medições. Com uma temperatura de saída de 43º C(Tabela 3 e 4).
- No dia 26/11/2005(Segundo dia com chuva à tarde). Com uma temperatura de saída de: 39º C (Tabela 5 e 6).
- No dia 04/12/2005 aumento considerável na temperatura de saída. Temperatura na saída do coletor: 60º C (Tabela 7 e 8). (Figura 17)

Formula usada para o cálculo equação:

$$\eta = \frac{mc_p(T_o - T_i)}{A_c G_{on}} = \frac{mc_p(T_o - T_i)}{A_c (G_{sc} \cos(\theta_z))} \quad (10)$$

Onde,

$G_{on}$ - Irradiância extraterrestre normal

$G_{sc}$ - Constante Solar

$T_o$ - Temperatura de saída

$T_i$ - Temperatura de entrada

$m$ - vazão mássica

$C_p$ - Calor específico

**Tabela 3 – Eficiência Térmica (dia 25/11/2005)**

Temperatura de Entrada ( $T_i$ ) C°	23
Temperatura de Saída ( $T_o$ ) C°	43
$m$ (kg/s)	0,000793651
Calor Específico ( $C_p$ ) J/Kg.K	4180
Área do coletor ( $A_c$ )	0,4136
$G_{sc}$ (W/m²)	1353

**Tabela 4 – Eficiência Térmica (dia 25/11/2005)**

Ângulo Zenital( $\theta_z$ )	Radiação Solar Extraterrestre( $G_T$ )	Eficiencia Termica( $\eta$ )
0	1353	0,118565246
10	1333	0,120344169
20	1272	0,126115391
30	1172	0,13687609
40	1037	0,15469506
50	869	0,184601585
60	677	0,236955358
70	463	0,346476841
80	234	0,685550331

**Tabela 5 – Eficiência Térmica (dia 26/11/2005)**

Temperatura de Entrada (Ti) C°	23
Temperatura de Saida (To) C°	39
m(kg/s)	0,000793651
Calor Especifico(cp) J/Kg.K	4180
Area do coletor(Ac)	0,4136
Gsc ( W/m <sup>2</sup> )	1353

**Tabela 6 – Eficiência Térmica (dia 26/11/2005)**

Ângulo Zenital( $\theta_z$ )	Radiação Solar Extraterrestre( $G_T$ )	Eficiencia Termica( $\eta$ )
0	1353	0,094852197
10	1333	0,096275335
20	1272	0,100892313
30	1172	0,109500872
40	1037	0,123756048
50	869	0,147681268
60	677	0,189564286
70	463	0,277181473
80	234	0,548440265

**Tabela 7 – Eficiência Térmica (dia 04/12/2005)**

Temperatura de Entrada (Ti) C°	23
Temperatura de Saida (To) C°	60
m(kg/s)	0,000793651
Calor Especifico(cp) J/Kg.K	4180
Area do coletor(Ac)	0,4136
Gsc (W/m^2)	1353

**Tabela 8 – Eficiência Térmica (dia 04/12/2005)**

Ângulo Zenital( $\theta_z$ )	Radiação Solar Extraterrestre( $G_T$ )	Eficiencia Termica( $\eta$ )
0	1353	0,219345705
10	1333	0,222636713
20	1272	0,233313473
30	1172	0,253220766
40	1037	0,286185861
50	869	0,341512932
60	677	0,438367413
70	463	0,640982156
80	234	1,268268112

Conclui-se que a eficiência térmica do coletor varia entre 0 e 0,69. O resultado da eficiência encontrado na (Tabela 8) para o ângulo zenital de 80º está acima do valor permitido então este valor não é válido, pois a eficiência varia de 0 até 1. Esses cálculos são apenas estimativas pois o ângulo zenital depende de vários parâmetros para ser calculado(dia, ano).

## 11-CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com esse simples projeto espera-se contribuir na conscientização, chamando a atenção das pessoas para problemas sobre o meio ambiente, de energia elétrica e sociais.

Imagine o volume de caixas tetra pak, garrafas pet e outros descartáveis, que pode-se tirar do meio ambiente, com a reciclagem direta na aplicação no aquecedor solar, ou em outros projetos existentes como, na fabricação de telhas, mantas térmicas, tubos para esgoto, etc.

Conclui-se que com um material de fácil acesso e de custo razoável, é possível construir experimentos de grande importância didática e prática. Nesse experimento foram gastos cerca de 30 reais em materiais, e não foram tidos gastos com aparelhos de medidas. Para fazer esse experimento foi comprado multímetro e termopar, o acréscimo no custo seria próximo de 60 reais.

Observando, percebe-se que a temperatura interna do coletor se estabiliza em torno de 65º C. Esta temperatura é suficiente para ser aproveitada, por exemplo, para o aquecimento de água.

Independente do rendimento, não o torna inviável, pois a energia solar é fornecida naturalmente, sem nenhum custo. Esse rendimento poderia ser melhorado, utilizando tubos de metal de maior diâmetro. Porém, a maior importância do experimento foi mostrar a facilidade de se obter aquecimento por meio de energia solar.

## 12- REFERENCIAS BIBLIOGRAFIA

- [1] ALANO, José Alcino, Manual Sobre a Construção e Instalação do Aquecedor Solar Composto de Embalagens Descartáveis (Lixo Vira Água Quente). Para baixar este manual, acesse <http://josealcinoalano.vilabol.uol.com.br/manual.htm>
- [2] BENFORD, F. and J. E. Bock, Trans. of the American Illumination Engineering Soc., 34, 200 (1939). "A Time Analysis of Sunshine."
- [3] BEZERRA, Arnaldo Moura. Aplicações Práticas da Energia Solar. São Paulo, Livraria Nobel S.A. 1990.
- [4] BEZERRA, Arnaldo Moura. Energia Solar – Aquecedor Solar. São Paulo, Livraria Nobel S.A. 1990.
- [5] DUFFIE, J. A. e Beckman, W. A., 1991. "**Solar Engineering of Thermal Processes**", John Wiley & Sons, Inc. New York.
- [6] MARTINAZZO, Claodomir Antonio, (2004) "Modelos de Estimativa de radiação solar para elaboração de mapas solarímetro", Dissertação de Mestrado, UFRGS, Porto Alegre, Brasil.
- [7] INCROPERA Frank P, Dewitt David P, 1992. "Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa, LTC, School of Mechanical Engineering Purdue University.
- [8] Jose Mariano da Rocha, Francisco, (1992) "Projeto e Construção de um Pireliometro Fotovoltaico para operação Sistemática" Dissertação de Mestrado, UFRGS, Porto Alegre, Brasil.

- [9] TIPLER, PP. e Llewellyn, R. A., 2001. “**Física Moderna**”. 3<sup>a</sup> ed. Ed. LTC, Rio de Janeiro.
- WMO – World Meteorological Organization, 1961. **Guide to Meteorological Instrument and Observing Practices**. Second Edition. WMO – nº 8. TPP.3.
- [10] KREITH, F. e Kreider, J. F., 1978. “**Principles of Solar Engineering**”, McGraw-Hill Book Company, EUA.
- [11] Iqbal, M., 1983. “**An Introduction to Solar Radiation**”, Academic Press, Toronto. Landim, PP. M. B., Monteiro, R.C. e Corsi, A. C. 2002. “Introdução à Confecção de mapas pelo SURFER”. Geomatemática, Texto Didático 08. DGA, IGCE, UNESP/Rio Claro. Disponível em: <http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/Surfer.pdf>.
- [12] MACAGNAN, M. H. 1989. “Estudo de Modelos de Sintetização de Dados de Radiação Solar”. Dissertação de Mestrado pela UFRGS.
- [13] Mveh, J. D. B. M., 1999. “Análise Teórica e Experimental da Eficiência Térmica de Coletores Solares sem Cobertura e de Baixo Custo”, **Dissertação de Mestrado**, PROMEC, UFRGS, Porto Alegre, Brasil.
- [14] PALZ, W., 1981. “**Energia Solar e Fontes Alternativas**”, Hemus, São Paulo.
- [15] SALVADORETTI, J. L., 1983. “Modelo Matemático para Análise do Desempenho Térmico de Coletores Solares Cilindro-Parabólicos”, **Dissertação de Mestrado**, PROMEC, UFRGS, Porto Alegre, Brasil.
- [16] ZILLES, R., 1988. “Comparação Experimental de Testes de Coletores Solares Planos com Simulador e com Radiação Solar”, **Dissertação de Mestrado**, PROMEC, UFRGS, Porto Alegre, Brasil.

- [17] D. O. Kern, "Process Heat Transfer", McGraw Hill Book Company, New York, 1950.
- [18] MUSTACCHI, C., CENA, V., ROCCHI, M., *Stochastic simulation of hourly global radiation sequences*, Solar Energy, vol. 23, 1979.
- [19] AGUIAR, R., COLLARES-PEREIRA, M., *Simple procedure for generating sequences of daily radiation values using a library of Markov transition matrices*, Solar Energy, vol. 40, n°3, 1988
- .
- [20] CPTEC – Centro de previsão de tempo e estudos Climáticos Disponível em:  
[http://satelite.cptec.inpe.br/htmldocs/radiacao/fluxos/radiacao\\_new.htm](http://satelite.cptec.inpe.br/htmldocs/radiacao/fluxos/radiacao_new.htm).
- [21] A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), NBR 10184 Coletores Solares Planos Para Líquida Determinação do Rendimento Térmico.