

APERFEIÇOAMENTO DE UM COLETOR SOLAR CONSTRUÍDO COM MATERIAIS RECICLÁVEIS

Fábio Alexandre da Palma (mcn030145@feg.unesp.br)

Víctor Orlando Gamarra Rosado (victor@feg.unesp.br)

UNESP - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, R. Ariberto Pereira da Cunha, 333 CEP 12516-410 – Guaratinguetá, SP, Brasil

Resumo. Neste trabalho foram associadas diferentes técnicas de aquecimento de água através de coleta da energia solar, de maneira a oferecer melhorias aos coletores solares construídos com materiais recicláveis. As melhorias se baseiam no emprego de espelhos parabólicos de baixo custo associados aos modelos de coletores já existentes, de modo que a capacidade de aquecimento destes seja aumentada. Foram construídos dois modelos baseados nos coletores solares confeccionados com garrafas PET (politereftalato de etileno), caixas Tetrapak e canos de PVC (polyvinyl chloride) pintados com tinta preta. Um dos modelos segue o mesmo padrão adotado comumente na construção de coletores desse gênero, enquanto o outro emprega um espelho construído com gesso e papel laminado como elemento refletor, concentrando a radiação solar incidente na superfície do espelho sobre o cano que contém a água a ser aquecida. Ao submeter os dois modelos simultaneamente a exposição ao sol sob condições idênticas, foi efetuada medições periódicas da temperatura da água nos dois modelos, temperaturas estas que geraram curvas de resposta para cada um dos coletores e permitiram a determinação das capacidades de aquecimento de cada um dos modelos, bem como permitiram a comparação entre os resultados.

Palavras-Chave: Coletor solar, Aquecedor solar, Material reciclável.

1. INTRODUÇÃO

O crescimento populacional, o desenvolvimento tecnológico e industrial gera um consumo cada vez maior de energia. Este fato aliado a uma possível escassez de recursos energéticos em um futuro não muito distante tem levado a comunidade científica a voltar seus olhos cada vez mais para as fontes de energia renováveis, como é o caso do emprego da energia solar no aquecimento de água para uso doméstico. Este trabalho tem o objetivo de sugerir alterações nos modelos de coletores solares construídos com materiais recicláveis empregados atualmente, de maneira a permitir o aumento de sua capacidade de aquecimento mantendo o emprego de materiais recicláveis em sua construção.

O consumo de energia para aquecimento de água através de chuveiros elétricos representa 45% dos gastos com eletricidade de uma família de baixa renda (SOUZA & BERTOLETI, 2008), e de acordo com Incropera & Dewitt (1998), o emprego de água aquecida através de energia solar gera para cada 5° da temperatura da água acima da temperatura ambiente uma economia de cerca de 1% de energia elétrica consumida. Tais dados comprovam que o emprego de energia solar para aquecimento de água garantiria uma economia considerável de energia elétrica, correspondente a 0,77% do PIB brasileiro segundo a Folha on-line (2007), e que poderia ser revertida para atender ao crescimento industrial.

O emprego da energia solar no aquecimento de água para uso doméstico de maneira massiva diminuiria a sobrecarga nas redes de fornecimento nos horários de pico, que correspondem aos horários de banho da população.

2. MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA

A matriz energética brasileira atualmente se baseia na queima de combustíveis derivados do petróleo e na energia elétrica proveniente de usinas hidrelétricas, tendo também uma contribuição razoável de recursos renováveis como a energia eólica e a queima de biomassa (Figura 1).

Mas existe uma tendência de que o emprego das fontes de energia renováveis diminua com as descobertas de novas jazidas de petróleo e a construção de novas hidrelétricas, isto porque as tecnologias envolvidas na obtenção de energia através destas fontes já estão desenvolvidas e são mais baratas que os investimentos necessários para o desenvolvimento de fontes alternativas de energia.

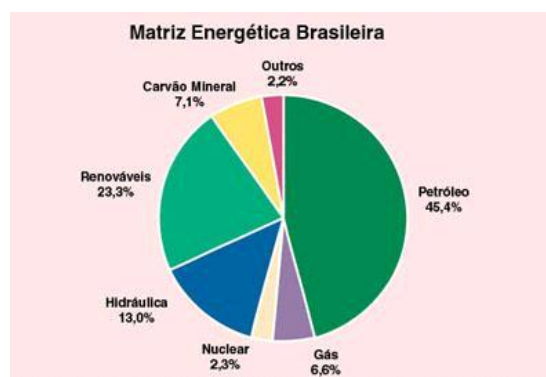


Figura 1. Matriz energética brasileira. Fonte: site da Eletrobrás (2001).

Esta tendência vai de encontro com a idéia pregada pelos pesquisadores da área, que afirmam que a matriz energética ideal é aquela baseada na diversificação de recursos, dando ênfase para o desenvolvimento de fontes de energia renováveis e limpas. Porém, como o Brasil é privilegiado com sua hidrologia e novas fontes de petróleo e gás natural tem sido descobertas, dificilmente o panorama atual será alterado nas próximas décadas, o que não impede os esforços da comunidade científica brasileira em desenvolver tecnologias para o desenvolvimento de fontes de energia alternativas, mesmo que para aplicação em pequena escala.

A aplicação de energia solar representa menos que 1% da fatia correspondente às fontes de energia renováveis da matriz energética brasileira, o que é muito pouco representativo para um país tropical em que em dois dias de insolação sobre todo seu território, o sol fornece energia correspondente a todas as reservas de remanescentes de petróleo em todo o mundo, havendo assim a necessidade de desenvolvimento de meios para a captação e emprego dessa fonte abundante de energia limpa.

2.1. Aplicações da Energia Solar

Pode-se citar dentre as tecnologias existentes para a aplicação e captação da energia solar o emprego de painéis construídos com células fotovoltaicas capazes de converter diretamente a energia solar em energia elétrica; Fornos solares capazes de alcançar temperaturas superiores a 3800°C; Usinas empregando turbinas a vapor; e Aquecedores solares de água para uso doméstico (Figuras 2, 3, 4 e 5, respectivamente).



Figura 2. Coletores fotovoltaicos. Fonte: USP. Instituto de Eletrotécnica e Energia – IEE. São Paulo (2000).



Figura 3 - Forno solar. Fonte: site portal São Francisco (2010)



Figura 4. Sistema térmico de geração solar de energia elétrica (Califórnia – EUA). Fonte: National Renewable Energy Laboratory (EUA) – NREL (2000).

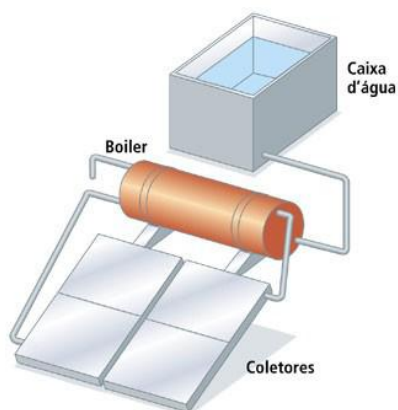


Figura 5. Esquema geral de um aquecedor solar de água. Fonte: GREEN, M. A. et al. Research and Applications, Sydney, v. 8, p. 377-384 (2000).

2.2. Aquecimento de Água para Uso Doméstico

Desde a década de 60 a tecnologia do aquecedor solar vem sendo usada no Brasil, época em que surgiram as primeiras pesquisas. De acordo com informações da Associação Brasileira de Refrigeração, Ar Condicionado, Ventilação e Aquecimento – ABRAVA (2002) existiam até recentemente cerca de

500.000 coletores solares residenciais instalados no Brasil. Somente com aquecimento doméstico de água para banho, são gastos anualmente bilhões de kWh de energia elétrica, os quais poderiam ser supridos com energia solar, com enormes vantagens socioeconômicas e ambientais. Mais grave ainda é o fato de que quase toda essa energia costuma ser consumida em horas específicas do dia, o que gera uma sobrecarga no sistema elétrico (ANEEL, 2010). Além disso, há uma enorme demanda em prédios públicos e comerciais, que pode ser devidamente atendida por sistemas de aquecimento solar central (Figura 6).



Figura 6. Aquecedor solar comercial. Fonte: site da empresa Sategel Solar (2010).

Um dos principais entraves à difusão da tecnologia de aquecimento solar de água é o custo de aquisição dos equipamentos, particularmente para residências de baixa renda. Mas a tendência ao longo dos anos é a redução dos custos, em função da escala de produção, dos avanços tecnológicos, do aumento da concorrência e dos incentivos governamentais. Fatores que têm contribuído para o crescimento do mercado são: a divulgação dos benefícios do uso da energia solar; a isenção de impostos que o setor obteve; financiamentos, como o da Caixa Econômica Federal, aos interessados em implantar o sistema; e a necessidade de reduzir os gastos com energia elétrica durante o racionamento em 2001 (ABRAVA, 2002). Também são crescentes as aplicações em conjuntos habitacionais e casas populares, como nos projetos Ilha do Mel, Projeto Cingapura, Projeto Sapucaias em Contagem, Conjuntos Habitacionais SIR e Maria Eugênia – COHAB em Governador Valadares (ABRAVA, 2002).

2.3. Aquecedor Solar Convencional Construído com Materiais Descartáveis

De acordo com Souza & Bertoleti (2008), o aquecedor solar construído com materiais recicláveis tem por finalidade possibilitar o aquecimento de água para uso doméstico reaproveitando materiais descartáveis em sua construção, de forma a oferecer às populações mais carentes uma alternativa aos sistemas de aquecimento solar disponíveis no mercado a custos inacessíveis. Este aquecedor tem ampla aplicação em regiões onde não há disponibilidade de energia elétrica, como zonas rurais e regiões inóspitas do território brasileiro (Figura 7), além de oferecer uma redução considerável nos gastos com energia elétrica de famílias de baixa renda.



Figura 7. Sistema de aquecimento construído com garrafas PET. Fonte: José Alcino (2004).

2.4 Construção de um Aquecedor Solar Construído com Materiais Descartáveis

Diversas ONGs (Organizações não governamentais), institutos de pesquisa e sociedades sem fins lucrativos tem se empenhado em desenvolver sistemas de aquecimento solar de baixo custo, porém o modelo mais difundido é o construído com garrafas PET (politereftalato de etileno), canos de PVC (polyvinyl chloride) e caixas de leite Tetrapak.

2.4.1. Construção do coletor solar

Segundo Alano (2007), o coletor é o elemento do aquecedor solar responsável por captar a radiação solar e possibilitar o aquecimento da água bem como a sua circulação. A construção do coletor solar é feita segundo os seguintes passos: a) seleção das garrafas; b) pintura dos canos de PVC e das caixas de leite com tinta preta; e c) montagem do encanamento e das garrafas. As figuras 8 e 9, respectivamente, mostram com detalhes a construção do coletor solar.

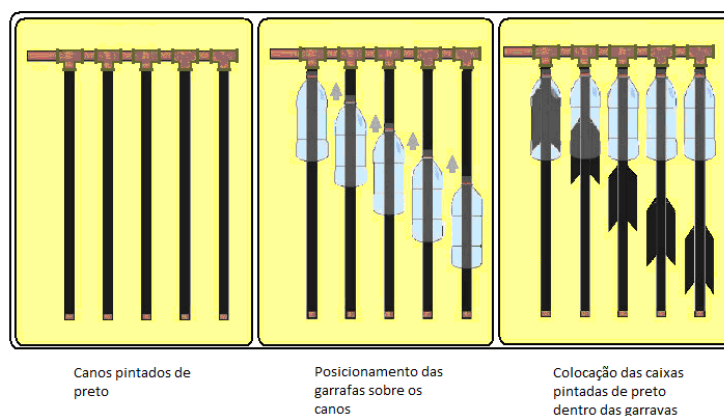


Figura 8. Posicionamento dos elementos de um coletor solar de baixo custo. Fonte: José Alcino (2004).



Figura 9. Posicionamento da caixa de leite pintada de preto dentro da garrafa PET. Fonte: José Alcino (2004).

2.4.2. Construção do reservatório

O reservatório empregado em um aquecedor solar de baixo custo pode ser uma caixa d'água comum ou isolada com isopor ou manta de fibra de vidro (o detalhamento da construção e do posicionamento do reservatório foge ao escopo deste estudo podendo ser encontrado na bibliografia de referência)

2.4.3 Princípios de funcionamento de um aquecedor solar

Segundo Alano (2007), o coletor solar fica exposto ao sol, aquecendo a água contida em seu interior. Os canos e as caixas Tetrapak pintados na cor preta favorecem a absorção da radiação solar e a retenção do calor dentro da garrafa PET (Incropera & Dewitt, 2008), que promove um a espécie de efeito

estufa, permitindo que os canos não troquem calor com o ambiente por convecção através de sua superfície.

Convecção Natural

De acordo com Incropera & Dewitt (2008), o fenômeno da convecção natural se dá quando um fluido, ao ser aquecido tem a massa específica reduzida na região exposta ao aquecimento em relação à vizinhança não exposta. A diferença de massas específicas faz com que o fluido mais quente sofra ação do empuxo levando-o a se deslocar para regiões mais altas, sendo o espaço que antes por ele ocupado preenchido pelo fluido mais frio da vizinhança. Essa movimentação gera um fluxo de fluido entre a vizinhança e a região exposta ao aquecimento.

No caso do coletor solar, aproveita-se este fluxo para aquecer a água contida no reservatório. A água contida no coletor fica exposta ao sol e é aquecida, sofrendo convecção natural e provocando a circulação da água contida no reservatório (ALANO, 2007). A figura 10 ilustra a circulação da água, em que a água fria sai da parte de baixo do reservatório e passa pelo coletor onde é aquecida, retornando quente ao reservatório pela parte de cima onde é coletada e distribuída

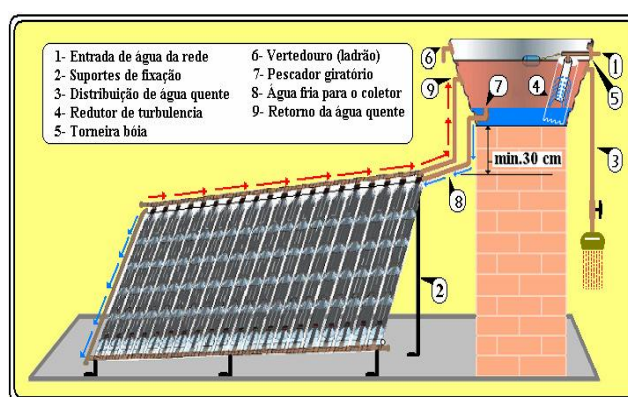


Figura 10. Representação da circulação de água quente (cor vermelha) e fria (cor azul). Fonte: José Alcino (2004).

2.5. Aquecimento da Água

Segundo Van Wylen et al. (2003), a quantidade de calor necessário para aquecer uma determinada massa de água pode ser obtida a partir da aplicação da primeira lei da Termodinâmica em um sistema com volume constante, conforme a equação (1),

$$Q_{\text{água}} = m c_v (T_a - T_i) \quad (1)$$

onde; $Q_{\text{água}}$ é a quantidade de calor responsável pelo aquecimento da água; m é a massa de água; c_v é o calor específico a volume constante da água; T_i é a temperatura inicial da massa de água; e T_a é a temperatura final da massa de água.

2.6. Calor Fornecido pelo Sol

Além das condições atmosféricas (nebulosidade, umidade relativa do ar, etc.), a disponibilidade de radiação solar, também denominada energia total incidente sobre a superfície terrestre, depende da latitude local e da posição no tempo (hora do dia e dia do ano). Isso se deve à inclinação do eixo imaginário em torno do qual a Terra gira diariamente (movimento de rotação) e à trajetória elíptica que a Terra descreve ao redor do Sol (translação ou revolução). Desse modo, a duração solar do dia – período de visibilidade do Sol ou de claridade – varia, em algumas regiões e períodos do ano, de zero hora (Sol abaixo da linha do horizonte durante o dia todo) a 24 horas (Sol sempre acima da linha do horizonte).

A maior parte do território brasileiro está localizada relativamente próxima da linha do Equador, de forma que não se observam grandes variações na duração solar do dia. Contudo, a maioria da população brasileira e das atividades socioeconômicas do País se concentra em regiões mais distantes do Equador. Em Porto Alegre, capital brasileira mais meridional (cerca de 30° S), a duração solar do dia

varia de 10 horas e 13 minutos a 13 horas e 47 minutos, aproximadamente, entre 21 de junho e 22 de dezembro, respectivamente (ANEEL, 2010).

Desse modo, para maximizar o aproveitamento da radiação solar, pode-se ajustar a posição do coletor ou painel solar de acordo com a latitude local e o período do ano em que se requer mais energia. No Hemisfério Sul, por exemplo, um sistema de captação solar fixo deve ser orientado para o Norte, com ângulo de inclinação similar ao da latitude local.

Como indicado anteriormente, a radiação solar depende também das condições climáticas e atmosféricas. Somente parte da radiação solar atinge a superfície terrestre, devido à reflexão e absorção dos raios solares pela atmosfera. Mesmo assim, estima-se que a energia solar incidente sobre a superfície terrestre seja da ordem de 10 mil vezes o consumo energético mundial (Centro de Referência de Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Britto – CRESESB, 1999).

A irradiação solar incidente sobre as diversas regiões do território brasileiro é objeto de estudos Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE e Laboratório de Energia Solar/Universidade Federal de Santa Catarina – LABSOLAR/UFSC, instituições que em parceria desenvolveram modelos computacionais capazes de estimar a irradiação solar incidente sobre todo território brasileiro durante todo o ano, gerando um mapa de irradiação para todo território (Figura 11).

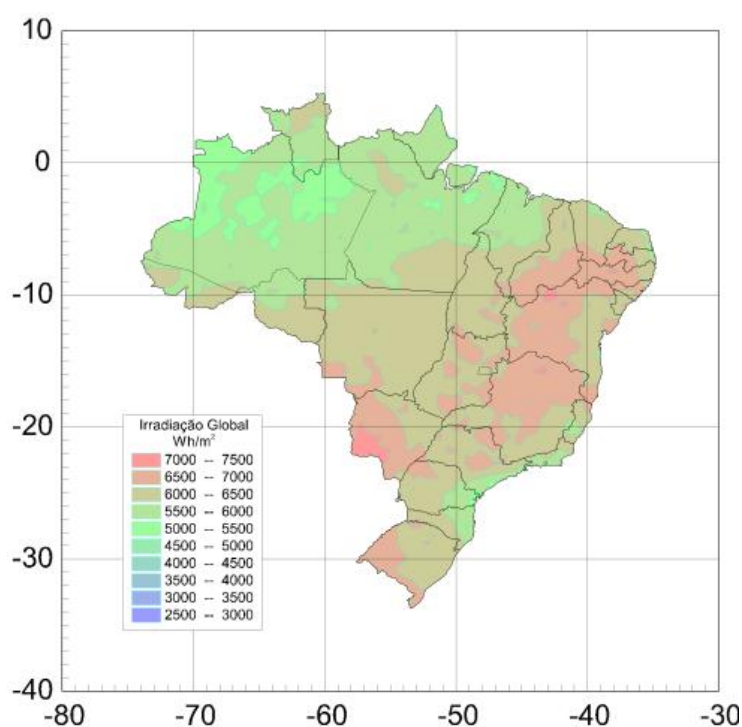


Figura 11. Mapa de irradiação solar sobre o território brasileiro. Fonte: Instituto Nacional de Meteorologia (1998).

Segundo Souza & Bertoleti (2008) o valor de radiância (I) obtida no mapa de irradiação, dada em $[Wh/m^2]$ pode ser obtido em $[cal/m^2]$ através da equação (2).

$$I[cal/m^2] = I_{Figura} \cdot 859,8452 [Wh/m^2] \quad (2)$$

Os valores obtidos no mapa correspondem ao fluxo médio de energia diário, que para um mesmo podem variar durante o ano de acordo com a posição da terra em relação ao sol e as condições atmosféricas de cada estação, por isso segundo a Sociedade do Sol é recomendável recorrer a obras como o Atlas Solarimétrico do Brasil (2002).

2.7. Calor Perdido pelo Coletor

Segundo Gillett & Moon (1985), o calor perdido pelo coletor pode ser aproximado partindo da diferença de temperatura entre a água e o ar em sua vizinhança através da equação (3),

$$Q_{perdas} = A_s \cdot U \cdot (T_{\infty} - T_a) \quad (3)$$

onde; Q_{perdas} é a quantidade de calor perdida pelo coletor; A_s é a área da superfície exposta à vizinhança; U é o coeficiente de perdas do coletor; T_a é a temperatura da água; e T_{∞} é a temperatura da vizinhança. O coeficiente de perdas do coletor é uma aproximação para as perdas devidas a convecção e radiação de calor pela superfície para a sua vizinhança (Incropera & Dewitt, 2008).

2.8. Eficiência do Coletor Solar (η)

De acordo com Gillett & Moon (1985), a eficiência do coletor é dada pela razão entre o calor fornecido à água e a radiação solar incidente sobre a superfície do coletor, conforme a equação (4).

$$\eta = \frac{Q_{\acute{a}gua}}{Q_{sol}} \quad (4)$$

Ainda segundo Gillett & Moon (1985), através do balanço energético na superfície do coletor obtém-se a equação (5).

$$Q_{perdas} = Q_{sol}(1 - \eta) \quad (5)$$

2.9. Possibilidades de Melhorias para a Capacidade de Aquecimento do Coletor Solar de Baixo Custo

Alano (2007) recomenda em sua obra o emprego de uma garrafa para cada litro de água comportada pelo reservatório, sendo que a temperatura da água obtida ao fim do dia depende da radiância I (SOUZA & BERTOLETI, 2008). Espera-se a concentração da incidência dos raios do sol sobre o cano pintado de preto do coletor, aumente o seu rendimento, tendo em vista que tal a concentração dos raios solares seria equivalente ao aumento da densidade média do fluxo energético incidente sobre o coletor. Uma forma de se obter tal concentração seria o emprego de um espelho parabólico com o cano posicionado no seu foco.

2.9.1 Espelhos parabólicos

Segundo Winterle (2000), uma superfície parabólica é capaz de refletir para um único ponto, o seu foco, qualquer feixe de ondas que incida paralelamente ao seu eixo principal, conforme ilustrada na figura 12.

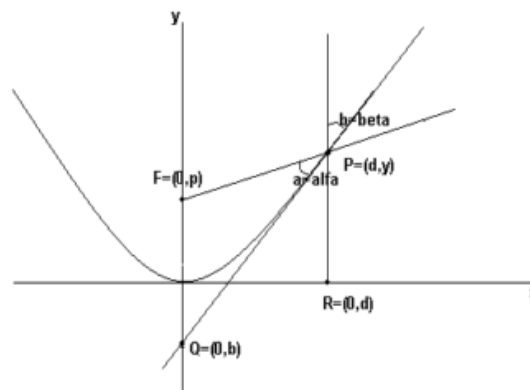


Figura 12. Parábola. Fonte: de Paula (2007).

2.9.2 Definição do perfil parabólico

De acordo com Winterle (2000), um perfil parabólico é obtido da equação reduzida (6),

$$y^2 = 2px \quad (6)$$

onde; $p/2$ é a distância entre o vértice da parábola e seu foco e x e y são as coordenadas de um ponto qualquer da parábola.

2.9.3 Espelho parabólico de baixo custo

Segundo de Paula (2007), é possível se construir um espelho parabólico empregando materiais de baixo custo, usando como superfície refletora papel laminado, o mesmo usado em “marmitex”. O modelo consta de um método de obtenção de uma calota parabólica partindo de uma bacia com gesso que gira a uma velocidade angular constante em relação a um referencial inercial por um longo intervalo de tempo e está exposta ao campo gravitacional da terra, conforme indicado na figura 12.

O molde de gesso obtido tem a superfície parabólica polida e recebe uma camada de fibra de vidro e resina, que se solidifica e forma um contra molde, conforme a figura 13(a).

Paralelamente a construção do contra-molde, o papel laminado é preparado, sendo molhado e tendo removida parcialmente a camada de papel existente em seu verso. Após esta preparação o papel laminado é posto para secar. O papel laminado é recortado na forma de um círculo de raio maior que o do contra-molde e recebe recortes no sentido radial, conforme a figura 13(b).

O papel laminado é então esticado sobre o contra-molde com a sua superfície espelhada voltada para baixo e é esticada com o auxílio de fita adesiva. A superfície exposta do papel laminado recebe então uma camada de gesso pastoso que adere fortemente ao papel laminado graças ao papel retirado parcialmente na sua preparação. Após a camada de gesso secar o aspecto do espelho obtido é o apresentado na figura 13(c).

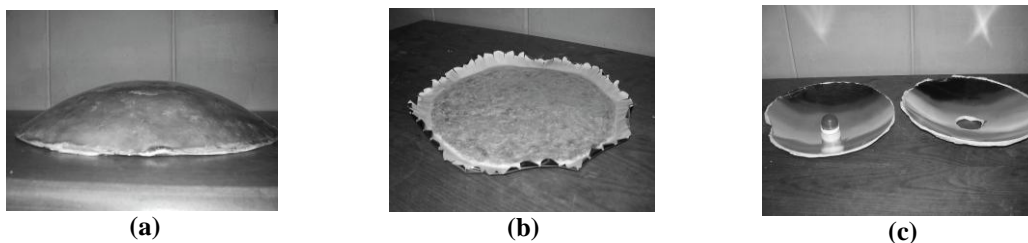


Figura 13. Espelho parabólico de baixo custo. Fonte: de Paula (2007).

3. PARTE EXPERIMENTAL

3.1. Materiais Utilizados

- 2 (duas) garrafas PET idênticas;
- 2 (dois) canos de PVC de ½” com comprimento de 30cm;
- 2 (dois) canos de PVC de ½” com comprimento de 5cm;
- 2 (dois) cotovelos de PVC de ½”;
- 2 (dois) tampões de ½”;
- Tinta esmalte opaca na cor preta;
- 1 (uma) caixa de leite Tetrapak;
- 1 (uma) folha de papel laminado de 80 por 50cm
- 2 Kg de Gesso de secagem rápida;
- Estrutura em madeira para apoiar os modelos; e
- 2 (dois) Termômetros analógicos.

3.2. Diagrama do Experimento

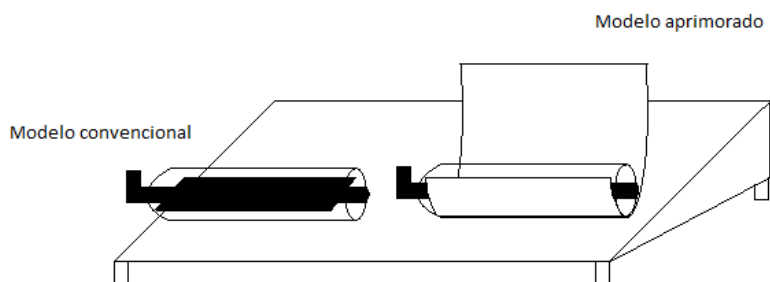


Figura 14 – Diagrama do experimento.

A figura 14 ilustra o experimento desenvolvido neste estudo, seja para o modelo convencional como para o modelo aprimorado.

3.3. Construção dos Modelos de Coletores

3.3.1. Construção do modelo convencional

O modelo convencional foi construído conforme o manual de Alano (2007), dado na figura 15.



Figura 15. Modelo de coletor solar convencional.

3.3.2. Construção do espelho de baixo custo

Para determinação do perfil do espelho emprega-se a equação (6), com o parâmetro “p” dado pelo diâmetro da garrafa PET, de maneira que o cano se localize no foco do espelho parabólico. Sendo o diâmetro da garrafa de 10 cm, obtêm-se o perfil do espelho dado por:

$$y^2 = 20x \quad (7)$$

Com esta equação obtêm-se os pontos da curva, e assim, foi construído um gabarito do perfil que serviu de modelo para a construção do molde para o espelho (Figura 16).



Figura 16. Perfil parabólico e gabarito da estrutura do molde para o espelho.

O molde foi construído com várias peças de papelão recortadas no formato do gabarito parabólico dispostos paralelamente entre si, de maneira a possibilitar a resistência necessária. Sobre as peças de papelão foi colada uma folha de papel cartão (Figura 17.a) sobre a qual foi esticado o papel laminado com a cobertura de papel retirada suas costas (Figura 17.b). Após o papel laminado ser esticado sobre o molde, foi aplicado sobre ele uma camada de gesso de secagem rápida, conforme a figura 17.c.

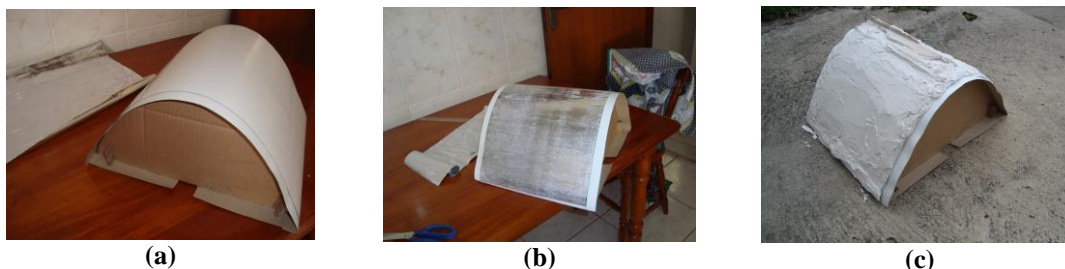


Figura 17. Molde do espelho parabólico em construção.

3.3.3. Construção do suporte para os modelos

O emprego do suporte para os modelos tem como finalidade a simulação da montagem dos coletores sobre um telhado. Segundo Alano (2004) a inclinação em relação ao plano do solo ideal para o coletor solar deve corresponder ao valor da latitude do local da instalação acrescida de 10° . Como o experimento foi realizado na cidade de Cachoeira Paulista cuja latitude local corresponde a aproximadamente a 22° , o suporte foi construído com a inclinação de 32° , que se aproxima da inclinação comumente aplicada em telhados, que corresponde a 30° .

3.3.4. Construção e montagem do modelo aprimorado

A construção do modelo aprimorado se deu através da associação do modelo convencional ao espelho parabólico de baixo custo, sendo eliminada a caixa Tetrapak contida dentro da garrafa PET.

O experimento foi montado de forma a expor os dois modelos simultaneamente às mesmas condições de insolação, permitindo uma comparação efetiva dos resultados obtidos nos dois casos (Figura 18).

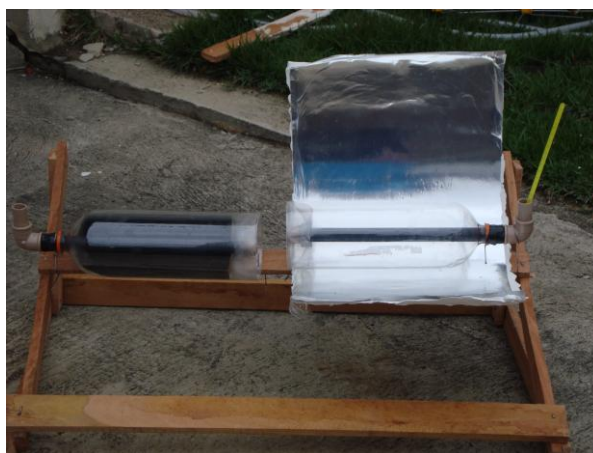


Figura 18. Experimento do modelo convencional e o modelo aperfeiçoado.

3.5. Métodos

3.5.1. Determinação das condições ambientais e das condições iniciais

Foram verificadas a temperatura do ambiente, a temperatura inicial da água dentro dos modelos, a irradiação solar local, o horário de início do experimento e a posição dos modelos em relação aos pólos terrestres.

3.5.2. Metodologia empregada nos ensaios dos modelos

Após iniciada a exposição dos modelos ao sol, foi verificada as temperaturas de ambos os modelos com auxílio do termômetro em intervalos regulares de tempo, sendo estes valores anotados em uma tabela.

De posse dos valores de temperatura obtidos foram traçadas curvas de aquecimento para cada um dos modelos e com os valores iniciais e finais de temperatura aplicados a equação (1) foram determinadas as quantidades de calor absorvidas pela água durante o experimento, valores estes empregados como parâmetro de comparação entre os modelos.

Com os valores tabelados de radiância (I) adotados para a localização onde foi realizado o experimento foram determinadas as quantidades de energia incidentes sobre cada coletor. As quantidades de energia incidentes sobre cada coletor foram obtidas através da equação (8).

$$Q_{sol} = \frac{I}{t_{dia}} \cdot t_{exp} \cdot A_{coleta} \quad (8)$$

onde: I é a radiância em cal/m^2 ; t_{dia} é a duração solar do dia em minutos; t_{exp} é a duração do experimento em minutos; e A_{coleta} é a área de coleta de irradiação do coletor em m^2 .

Com os valores de energia incidentes sobre os coletores e os valores de energia absorvidos pela água em ambos os modelos, foram determinadas as eficiências energéticas dos mesmos para efeito de comparação. Os procedimentos foram repetidos em três experimentos realizados sob diferentes condições.

4. RESULTADOS

Dados empregados:

Radiância local (I): $5.350 Wh/m^2$ (fonte: ATLAS Solarimétrico do Brasil, 2000) em $cal/m^2 = 4.600.171,82 cal/m^2$;

Calor específico da água: $c_v = 1 cal/g^{\circ}C$ (Van Wylen et al., 2003);

Área de coleta do coletor convencional: $A_{conv} = 0,030m^2$ (área da superfície de papel pintada com tinta preta);

Área de coleta do coletor convencional: $A_{apr} = 0,120m^2$ (área da abertura da calha parabólica).

1° Experimento:

O primeiro ensaio foi realizado sob as seguintes condições:

- Posição do experimento: frente voltada para o norte;
- Temperatura ambiente: $20^{\circ}C$ (tempo nublado);
- Temperatura inicial da água: $19^{\circ}C$;
- Massa de água: 162,20g;
- Horário local do início do experimento: 11:20h;
- Radiância local (I): $5.000 Wh/m^2$ (ATLAS Solarimétrico do Brasil, 2000) em $cal/m^2 = 4.600.171,82 cal/m^2$;
- Duração do experimento: 60 minutos;
- Intervalos de medição: 5 minutos
- Duração solar do dia: 660 minutos (ANEEL, 2010).

O ensaio foi conduzido chegando-se às curvas de aquecimento apresentadas na figura 19. Aplicando as equações (1), (8) e (4) obtêm-se os resultados apresentados na tabela 1.

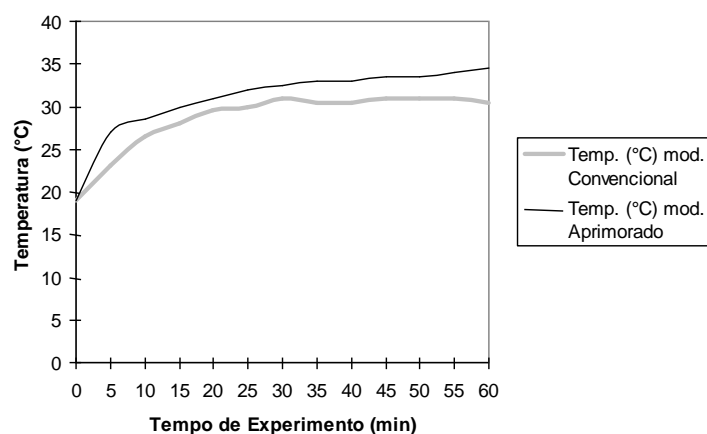
Curvas de Aquecimento dos Coletores


Figura 19. Curvas de aquecimento obtidas através dos dois modelos em tempo nublado.

Tabela 1. Resultados obtidos no 1º experimento.

Temperatura inicial (°C)	19	Temperatura final (°C)	Calor absorvido (cal)	Calor Incidente (cal)	Calor perdido (%)	Eficiência (%)
Modelo convencional		30,5	1.865,30	11.725,16	84,09%	15,91%
Modelo aprimorado		34,5	2.514,10	46.900,65	94,64%	5,36%
Diferença entre modelos (%)		4,0	34,78%	300,00%		

2º Experimento:

O segundo ensaio foi realizado sob as seguintes condições:

- Posição do experimento: posição ajustada de maneira que a frente do experimento sempre esteve voltada para a direção do sol;
- Temperatura ambiente: 27,0°C (tempo ensolarado);
- Temperatura inicial da água: 25,7°C;
- Massa de água: 162,20g;
- Horário local do início do experimento: 14h20minh;
- Radiância local (I): 5.500 Wh / m² (ATLAS Solarimétrico do Brasil, 2000) em cal / m² = 4729148,6;
- Duração do experimento: 30 minutos;
- Intervalos de medição: 2 minutos;
- Duração solar do dia: 660 minutos (ANEEL, 2010).

Os procedimentos experimentais foram repetidos obtendo-se os resultados dados pela figura 20 e tabela 2.

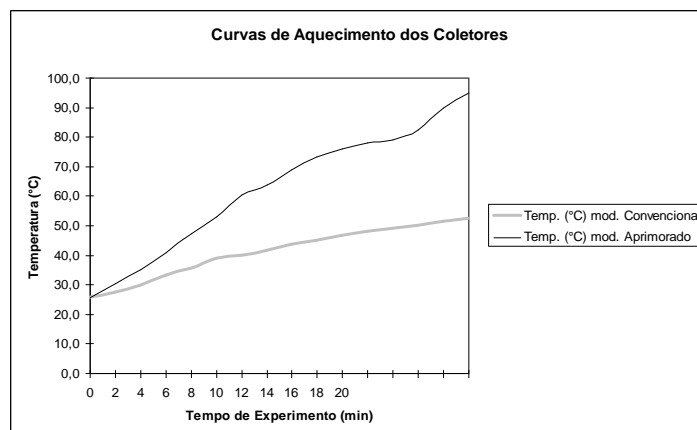


Figura 20. Curvas de aquecimento obtidas através dos dois modelos em tempo ensolarado com experimento.

Tabela 2. Resultados obtidos no 2º experimento.

Temperatura inicial (°C)	25,6	Temperatura final (°C)	Calor absorvido (cal)	Calor Incidente (cal)	Calor perdido	Eficiência
Modelo convencional		52,40	4.346,96	6.448,84	32,59%	67,41%
Modelo aprimorado		95,00	11.256,68	25.795,36	56,36%	43,64%
Diferença entre modelos		42,6	158,96%	300,00%		

3º Experimento:

O terceiro ensaio foi realizado sob as seguintes condições:

- Posição do experimento: coletores posicionados com a frente voltada para o lado contrário da direção do sol;
- Temperatura ambiente: 27,8°C (tempo ensolarado);
- Temperatura inicial da água: 26,7°C;
- Massa de água: 162,20g;
- Horário local do início do experimento: 15h00min;
- Radiância local (I): 5.500 Wh/m^2 (ATLAS Solarimétrico do Brasil, 2000) em $cal/m^2 = 4729148,6$;
- Duração do experimento: 30 minutos;
- Intervalos de medição: 2 minutos
- Duração solar do dia: 660 minutos (ANEEL, 2010).

Também os procedimentos experimentais foram repetidos e assim obtendo os resultados dados pela figura 21 e tabela 3.

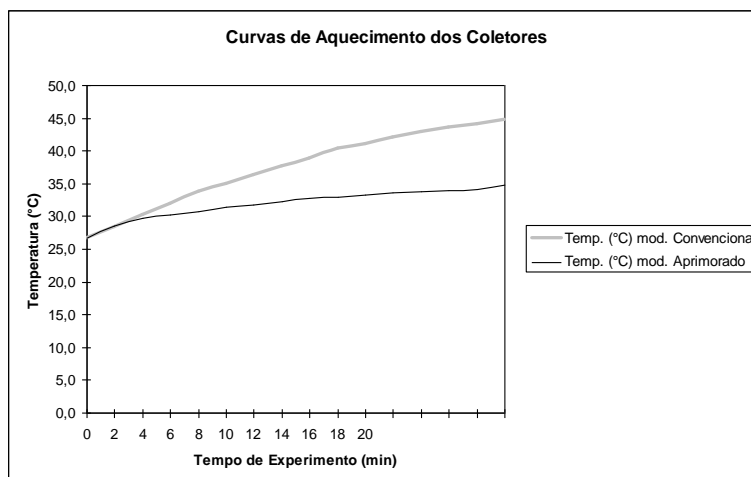


Figura 21. Curvas de aquecimento obtidas através dos dois modelos em tempo ensolarado com experimento voltado para o lado oposto ao sol.

Tabela 3. Resultados obtidos no 3º experimento.

Temperatura inicial (°C)	26,6	Temperatura final (°C)	Calor absorvido (cal)	Calor Incidente (cal)	Calor perdido	Eficiência
Modelo convencional		44,80	2.935,82	6.448,84	54%	46%
Modelo aprimorado		34,80	1.313,82	25.795,36	95%	5%
Diferença entre modelos		-10,0	-55,25%	300,00%		

5. DISCUSSÕES

Observando-se as curvas de aquecimento da água nos dois modelos verificou-se que o modelo aprimorado responde mais rapidamente à exposição à irradiação solar, além de manter o aquecimento ao longo do tempo de exposição, diferentemente do modelo convencional que aquece rapidamente a água, porém estabiliza a temperatura em um determinado patamar, demonstrando um equilíbrio entre o calor absorvido e as perdas a partir desse ponto.

Durante a condução do primeiro experimento as condições de tempo se alteraram de uma condição nublada abafada para uma condição nublada com bastante vento, foi percebido que no modelo aprimorado a temperatura continuou a subir enquanto que no modelo convencional a temperatura se estabilizou em determinado patamar.

Comparando os resultados dos experimentos, verificou-se que a posição do modelo de coletor aprimorado em relação ao sol tem grande influência sobre a sua capacidade de aquecimento, tendo em vista que o poder de refletir os raios solares incidentes para o foco do espelho parabólico depende diretamente do fato dos raios incidirem paralelamente ao eixo principal do espelho, e quando a frente do coletor não está voltada para a direção do sol essa condição não é atendida. Este problema não afeta com a mesma gravidade a capacidade de aquecimento do coletor convencional, já que independentemente da posição do coletor em relação à direção dos raios solares a superfície do cano e da caixa tetrapak pintadas de tinta preta são expostas à irradiação solar.

A aplicação do espelho parabólico de baixo custo associado ao coletor solar construído com garrafas PET é viável tendo em vista que o custo do espelho não é maior que R\$ 3,00 por garrafa, o que representa o único acréscimo ao custo de construção do modelo convencional.

6. CONCLUSÕES

As conclusões deste estudo vão de encontro com a teoria apresentada neste desenvolvimento. Assim, dos resultados obtidos no experimento pode-se concluir o seguinte:

I – A aplicação do espelho parabólico de baixo custo permite que a irradiação solar incidente sobre a abertura da calota parabólica seja concentrada sobre a superfície do cano que contém água, o que não ocorre no modelo convencional que capta a energia solar incidente sobre a caixa Tetrapak apenas mantendo o calor no interior da garrafa, não necessariamente o transmitindo para a água contida no cano.

II – O modelo de coletor aprimorado demonstrou maior capacidade de aquecimento sob as mesmas condições de tempo em todas as situações avaliadas (mau e bom tempo), sobretudo em condições de tempo ensolarado, situação em que a energia absorvida pela água no modelo aprimorado chegou a ser 158,96% maior que a absorvida no modelo convencional.

III – É possível aumentar o tamanho do espelho de baixo custo aumentando assim a área de coleta de energia solar, o que permitiria um aumento ainda maior da capacidade de aquecimento do coletor.

IV – Como foi discutida, a capacidade de aquecimento do coletor aprimorado é dependente da posição deste em relação à direção dos raios solares, portanto para se obter o maior aproveitamento do coletor este deve ser empregado associado a algum sistema que permita a sua movimentação e mantenha a frente do coletor voltada para a direção do sol.

VI – A eficiência do coletor aprimorado é menor que a do coletor convencional, e isso se dá devido ao fato do espelho parabólico refletir para o seu foco apenas os raios que incidem paralelamente ao seu eixo principal, portanto quando a posição do espelho não está exatamente alinhada com a direção do sol, parte considerável da energia que passa pela abertura da calota parabólica é refletida para o meio e não para o cano, sendo perdida. Uma maneira de maximizar o rendimento do modelo é o emprego de um sistema que permita que o eixo principal do espelho esteja sempre alinhado com a direção do sol.

Portanto, conforme verificado durante este estudo, a aplicação do espelho parabólico de baixo custo na construção do coletor solar construído com materiais descartáveis exige que o coletor solar esteja voltado para a direção do sol de forma que seja explorada a sua máxima capacidade de aquecimento. Para tanto existe a possibilidade de que em um trabalho futuro seja desenvolvido um sistema automatizado capaz de corrigir a posição do coletor à medida que a direção do sol se altere no decorrer do dia.

REFERÊNCIAS

- ABRAVA – Associação Brasileira de Refrigeração, Ar Condicionado, Ventilação e Aquecimento, 2002.
- ALANO, J. A. Manual sobre a Construção e Instalação do Aquecedor Solar com Descartáveis. Instituto de Física ‘Gleb Wataghin’ – Unicamp Campinas – SP, 2007.
- ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica, http://www.aneel.gov.br/energia_solar/, 2010.
- ATLAS Solarimétrico do Brasil - Banco de Dados Terrestres. Coordenador Chigueru Tiba. Ed. Universidade da UFPE, 2000.
- DE PAULA, L. A. N. Uma Contribuição à Construção de Espelhos Parabólicos. Instituto de Física ‘Gleb Wataghin’ – Unicamp Campinas – SP, 2007.
- GILLET, W. B.; MOON J. E. Solar Collectors: Test Methods and Design Guidelines. Series A, v. 6 Holland: D. Reidel, 1985.
- INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.. Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa. 6 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.
- SOUZA, T. M.; BERTOLETI, P. H. F. Dimensionamento de um Aquecedor Solar de Água Feito com Garrafas Pet. Centro de Energias Renováveis – UNESP, Campus Guaratinguetá, 2008.
- VAN WYLEN, G. J.; SONNTAG, R. E.; BOORGGNAKKE, G. Fundamentos da Termodinâmica. 6 ed. Edgard Blücher Ltda, 2003.
- WINTERLE, P. Vetores e geometria analítica. São Paulo: Makron Books, 2000.