

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECATRÔNICA

ESTUDO DE UM AQUECEDOR SOLAR DOMICILIAR

Trabalho de formatura apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo para a
obtenção do título de Graduação em Engenharia

Miguel Chaves dos Santos

São Paulo

2010

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECATRÔNICA

ESTUDO DE UM AQUECEDOR SOLAR DOMICILIAR

Trabalho de formatura apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo para a
obtenção do título de Graduação em Engenharia

Miguel Chaves dos Santos

Orientador: Jurandir Itizo Yanagihara,
Professor Titular-Departamento de Engenharia Mecânica da EPUSP

Área de Concentração:
Engenharia Mecatrônica

São Paulo

2010

FICHA CATALOGRÁFICA

Santos, Miguel Chaves dos
Estudo de um aquecedor solar domiciliar / M.C. dos Santos.
-- São Paulo, 2011.
54 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos.

1. Aquecimento 2. Energia solar I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos II. t.

RESUMO

Este trabalho possui o objetivo de estudar diferentes projetos de aquecedores solares de baixo custo desenvolvidos a partir de materiais descartados pela sociedade (garrafas PET, embalagens TetraPak, raspa de pneu e latas de alumínio) e materiais não tradicionais no desenvolvimento desse tipo de produto (canos PVC e silicone). Dessa forma é necessário especificar os pontos importantes da pesquisa para disseminar a tecnologia de aquecedores solares de baixo custo em habitações de aglomerações subnormais¹. Para realizar o estudo do ponto de vista técnico, foram listados parâmetros dos aquecedores de baixo custo para que a partir de experimentos, consiga-se obter gráficos das temperaturas nos reservatórios de cada projeto e a irradiação no local em função do tempo. Sendo assim, a partir desses gráficos, foi possível monitorar os parâmetros e analisar a melhor relação entre os projetos.

ABSTRACT

The objective of this research is to study different projects of solar water heaters developed from wasted materials (PET bottles, TetraPak packing, tire and aluminium can) and materials no-traditions to develop this type of product (PVC pipe and Silicon). Therefore, it's necessary to plan the considerable points in this research to try to disseminate the low cost solar water heater technology in low-income household. To execute the research, It were listed main parameters of solar water heaters and through experiments, it were faced project's data taking note of the final temperature in the reservoir versus the time the event happened. Finally, from those results will be possible to analyze each parameter and diagnostic the better relation between the concepts.

¹ Aglomerações subnormais: O IBGE considera o termo favela pejorativo e, dessa forma, denominou aglomerações subnormais como “um conjunto constituído por, no mínimo, 51 unidades habitacionais (barracos, casas...), ocupando ou tendo ocupado até período recente, terreno de propriedade alheia (pública ou particular) dispostas, em geral, de forma desordenada e densa; e carentes, em sua maioria de serviços públicos e essenciais”.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1: Coletor solar tradicional..... | 13 |
| Figura 2: Espelhos parabólicos para concentração de raios solares no tubo..... | 14 |
| Figura 3: Reservatório Térmico..... | 14 |
| Figura 4: Aquecedor solar doméstico passivo de circuito fechado..... | 15 |
| Figura 5: Coletor de tubo a vácuo..... | 17 |
| Figura 6: Coletor Integrado ao Tanque de Armazenamento..... | 18 |
| Figura 7: Reservatório com dispositivo para não causar turbulência interna (Alano, 2009).... | 20 |
| Figura 8: Fenômenos da transferência no coletor solar do aquecedor de baixo custo..... | 21 |
| Figura 9: Projeto das células do ASBC (Alano, 2009)..... | 22 |
| Figura 10: Utilização de carteiras para suporte dos coletores..... | 24 |
| Figura 11: Módulos com diferentes tamanhos de garrafas situados lado a lado..... | 25 |
| Figura 12: Tubos de PVC, cobre e PPR situados a 100 mm de distância..... | 27 |
| Figura 13: Termopar Tipo T..... | 30 |
| Figura 14: Piranômetro..... | 30 |
| Figura 15: Circuito para aquisição de voltagem de acordo com a mudança de temperatura.... | 31 |
| Figura 16: Gráfico do primeiro teste do sensor A LM335..... | 32 |
| Figura 17: Gráfico do segundo teste do sensor A LM335..... | 32 |
| Figura 18: Gráfico do primeiro teste do sensor B LM335..... | 33 |
| Figura 19: Gráfico do segundo teste do sensor B LM335..... | 33 |
| Figura 20: Gráfico comparativo dos testes dos sensores A e B..... | 34 |
| Figura 21: Termômetro Digital modelo Gulterm 180..... | 34 |
| Figura 22: Célula fotovoltaica utilizada para o experimento..... | 35 |
| Figura 23: Gráfico da V x t da célula fotovoltaica em um dia de sol sem nuvens..... | 36 |
| Figura 24: Gráfico da Voltagem x Irradiação do Sol da célula em um dia de sol..... | 37 |
| Figura 25: Falta de Linearidade no coletor solar..... | 38 |
| Figura 26: Molde de madeira de corte dos tubos com marcação de 1 metro..... | 38 |
| Figura 27: Gráfico da Temperatura x Tempo dos tamanhos de garrafas..... | 40 |
| Figura 28: Gráfico da Voltagem x Tempo no experimento Tamanho da Estufa..... | 41 |
| Figura 29: Gráfico da Temperatura x Tempo dos tubos constituídos de diferentes materiais.. | 42 |
| Figura 30: Gráfico da Voltagem x Tempo no experimento Material do Tubo..... | 42 |
| Figura 31: Gráfico da Temperatura x Tempo dos diferentes materiais internos de insolação.. | 43 |
| Figura 32: Gráfico da Voltagem x Tempo no experimento Material Interno..... | 43 |
| Figura 33: Gráfico da Temperatura x Tempo da estufa vedada e não vedada..... | 44 |
| Figura 34: Gráfico da Voltagem x Tempo no experimento Material do Tubo..... | 44 |

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| FICHA CATALOGRÁFICA..... | 3 |
| INTRODUÇÃO..... | 8 |
| OBJETIVO..... | 10 |
| 3.SISTEMAS DE AQUECIMENTO DE ÁGUA..... | 11 |
| 3.1.Chuveiro Elétrico..... | 11 |
| 3.2.Aquecedor à Gás..... | 11 |
| 3.3.Boiler Elétrico..... | 12 |
| 3.4.Aquecedor Solar Tradicional..... | 12 |
| 3.4.1.Aquecedor solar doméstico passivo..... | 15 |
| 3.4.2.Aquecedor solar doméstico ativo..... | 16 |

| | |
|---|----|
| 3.4.3.Coletor de Placa..... | 16 |
| 3.4.4.Coletor de Tubo à Vácuo..... | 17 |
| 3.4.5.Coletor Integrado ao Tanque de Armazenamento..... | 18 |
| 3.5.Sistema Híbrido: Aquecedor Solar e Fonte de energia auxiliar..... | 18 |
| 3.6.Aquecedores Solares de Baixo Custo..... | 19 |
| 4.PROCEDIMENTO DA ANÁLISE..... | 23 |
| 4.1.Descrição dos experimentos..... | 23 |
| 4.2.Aparato Experimental..... | 24 |
| 4.2.1.Tamanho da Estufa..... | 25 |
| 4.2.2.Material do Tubo..... | 26 |
| 4.2.3.Material Interno..... | 28 |
| 4.2.4.Vedação da Estufa..... | 29 |
| 4.3.Aparato Instrumental..... | 29 |
| 4.3.1.Dispositivos de Auxílio..... | 37 |
| 5.RESULTADOS..... | 39 |
| 3.1.Tamanho da Estufa..... | 40 |
| 3.2.Material do Tubo..... | 42 |
| 3.3.Material Interno..... | 43 |
| 3.4.Vedação da Estufa..... | 44 |
| 4.ANÁLISE..... | 45 |
| 4.1.Tamanho da Estufa..... | 45 |
| 4.2.Material do Tubo..... | 46 |
| 4.3.Material Interno..... | 47 |
| 4.4.Vedação da Estufa..... | 48 |
| 4.5.Análise da Viabilidade Econômica..... | 49 |
| CONCLUSÃO..... | 53 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 55 |

INTRODUÇÃO

A partir do final do século XX, alguns pensadores começaram a questionar as características sobre a forma como o capitalismo estava sendo implantado. O objetivo de uma empresa, diferentemente do que o senso comum acredita, não é apenas maximizar o lucro, mas sim, a necessidade de aumentar a riqueza da instituição (Gitman, 1997). A riqueza seria a maximização dos objetivos da organização de acordo com os anseios dos seus sócios.

Cada vez mais empresas têm-se focado não apenas na obtenção do lucro (questo esse que é vital para a sobrevivência de uma companhia), mas tem colocado no mesmo patamar, o impacto social gerado pela organização. Um exemplo desse fato é Muhammad Yunus que criou o Grameen Bank em Bangladesh e devido a isso ganhou o prêmio Nobel da Paz de 2006. Suas palavras resumem esse novo conceito chamado empreendedorismo social: “Isso não é caridade. Isso é negócio: negócio com um objetivo social que ajuda as pessoas a saírem da pobreza” (Yunus, 2003).

Dessa forma, o conceito de sustentabilidade começou a ser empregado amplamente. A sustentabilidade empresarial está sustentada sobre os pilares econômicos, sociais e ambientais da humanidade (Elkington, 2007), ou seja, lucro, pessoas e planeta. Para garantir esses três pilares, as empresas modernas se viram na necessidade de criar produtos que tenham características sustentáveis em toda a sua cadeia.

A área energética encontra-se entre as necessidades vitais para a sobrevivência de qualquer sociedade, tornando-se uma das áreas mais atacadas por esse novo conceito de mercado. Atualmente, o mercado de aquecedores solares é dominado pela Europa, China, Índia e Japão. Muitos tipos de aquecedores solares começaram a ser desenvolvidos a partir de materiais de baixo custo ou descartados pela sociedade chamados assim de Aquecedor Solar de Baixo Custo (ASBC). O ASBC, considerado um *appropriate technology*², é característico de climas tropicais e quentes que pelo ambiente ser favorável viabiliza projetos de custos menores e simplificados garantindo o acesso das camadas mais pobres da população ao dispositivo. Entretanto, por sua eficiência ser relativamente baixa aos aquecedores solares projetados com materiais mais nobres, o ASBC caracteriza por exercer a função de pré-

² Appropriate technology é uma solução tecnológica com aplicação em pequena escala, com trabalho humano, eficiência energética e controlada localmente. Além disso, a tecnologia é desenvolvida com foco nas pessoas que vão utilizá-la.

aquecedor no intuito de reduzir a potência necessária da fonte elétrica de aquecimento da água.

OBJETIVO

Este trabalho possui o objetivo de estudar diferentes projetos de aquecedores solares de baixo custo desenvolvidos a partir de materiais descartados pela sociedade (garrafas PET, embalagens TetraPak, raspa de pneu e latas de alumínio) e materiais não tradicionais no desenvolvimento desse tipo de produto (tubos de PVC e silicone).

- 1.**
- 2.**

3. SISTEMAS DE AQUECIMENTO DE ÁGUA

No intuito de melhor entender a tecnologia que será estudada, nesse capítulo abordou-se diferentes produtos que possuem a mesma funcionalidade dos aquecedores solares de baixo custo: chuveiro elétrico, aquecedor a gás, boiler elétrico, aquecedor solar tradicional.

3.1. Chuveiro Elétrico

Também chamado de ducha, o chuveiro é o terminal da rede de água em uma residência que possui minúsculos orifícios que possibilitam a dispersão do fluido, garantido um maior perímetro molhado e uniforme. Dessa forma, o dispositivo é usado para a função de banho e higiene pessoal.

O chuveiro elétrico é constituído de um elemento chamado “resistência” usado para aquecer a água, composto de um fio espiralado na maioria das vezes de níquel, cromo ou uma liga dos dois metais (metais com alto ponto de fusão) anexado de um sistema abre/fecha a água e liga/desliga a eletricidade anexado ao terminal já descrito acima.

Apesar de o chuveiro elétrico possuir desvantagens como o alto consumo de energia enquanto em uso e o perigo no contato direto de energia elétrica à água, essa solução tem se mostrado eficiente no Brasil. Isso decorre do baixo investimento inicial e da fácil manutenção do dispositivo.

3.2. Aquecedor à Gás

Há dois tipos de aquecedores a gás: aquecedor por passagem e aquecedor por acumulação.

- Aquecedor por passagem: a água é aquecida gradualmente na medida em que passa pelo aparelho, pois este possui um sistema de serpentina disposta ao redor de uma câmara de combustão, não exigindo assim reservatório para acumulação.

- Aquecedor por acumulação: a água é aquecida da mesma forma que o aquecedor por passagem, entretanto, esse possui um reservatório de acumulação em que a água aquecida fica armazenada em boilers instalados no forro ou em falsos armários.

O aquecimento a gás possui a vantagem de obter pressão de água melhor que nos modelos de passagem elétricos, ter água quente para uso imediato e pressão de água melhor que no similar elétrico. Entretanto, possui a desvantagem de risco de vazamento se não seguir especificações e há certa dificuldade em manter a temperatura da água baixa.

3.3. Boiler Elétrico

Também conhecido como aquecedor de água de acumulação elétrica, este aparelho proporciona a não utilização de gás ou fogo para o aquecimento da água caracterizando por não ser poluente. Além disso, o volume e a temperatura da água são controlados facilmente e com total precisão. Por fim, há modelos horizontais e verticais, que se adaptam a cada tipo de necessidade e espaço disponível. Os modelos de alta pressão são utilizados quando a pressão da água fria que entra no Boiler elétrico é significativamente alta, enquanto que os de baixa pressão são utilizados quando a pressão é menor.

3.4. Aquecedor Solar Tradicional

O termo aquecedor solar é dado à totalidade do sistema responsável pelo aquecimento de um respectivo fluido, no caso desse trabalho, a água, a partir da energia solar para uso doméstico (banho ou piscina) ou uso industrial. Os três componentes básicos do aquecedor são o coletor, o reservatório (boiler) e as tubulações que conectam o reservatório ao coletor. Diferentes otimizações podem ser dados aos aquecedores solares, desde a estufa até a forma de fluxo do fluido. Busca-se a instalação do reservatório em nível superior ao coletor para que seja possível dispensar o uso de bombas para geração de circulação forçada (sistema ativo). O processo de circulação do fluido sem a necessidade de bombas é chamado termossifão que é a

circulação natural do fluido devido às diferenças de densidade dentre a água mais aquecida e a menos aquecida (sistema passivo).

A principal grandeza que caracteriza os aquecedores solares é a capacidade de absorção de calor por área de exposição. Esse parâmetro tem sido utilizado eficientemente para aquecedores solares baseados em placa de exposição.

Geralmente os projetos de coletores solares são feitos de uma placa de vidro simples no topo anexado de placas estruturais isolantes em seu contorno (alumínio ou inox com isolamento térmico interno em poliuretano – Soletrol, 2010) formando uma caixa. Na parte interior da caixa, logo abaixo da placa de vidro, coloca-se uma placa de metal com alto coeficiente de condutibilidade térmica (geralmente de alumínio) pintada de cor negra. Encostados abaixo da placa de metal encontram-se tubos de cobre por onde a água a ser aquecida flui (figura 1).



Figura 1: Coletor solar tradicional.

Em indústrias, colocam-se espelhos parabólicos para concentrar os raios solares para um único ponto. Nesse caso, um tubo construído de material transparente e resistente a altas temperaturas (geralmente o vidro) está localizado nessa linha de concentração que através da irradiação permite que o fluido aqueça-se (figura 2).



Figura 2: Espelhos parabólicos para concentração de raios solares no tubo.

O calor é armazenado em um tanque de armazenamento de água quente (reservatório térmico), usualmente chamado de Boiler, confeccionado de material inoxidável revestido internamente por material isolante térmico (figura 3). O volume desse tanque deve ser dimensionado especificamente para ocorrência de climas frios e chuvosos para garantir o pior cenário na questão do aquecimento. Em climas não tropicais, caso o fluido seja água é necessário conter anti-descongelante e inibidor de corrosão para o tubo.



Figura 3: Reservatório Térmico.

A mínima eficiência de um aquecedor solar é determinada pela temperatura obtida durante o inverno (quando maior montante de água aquecida é requisitada), enquanto que a máxima eficiência é obtida durante o verão.

Os aquecedores solares domésticos podem ser subdivididos em dois grupos: passivo (compacto) e ativo (bombeado). Já os coletores podem ser subdivididos em outros três

subgrupos: coletor de placa, coletor de tubo a vácuo e coletor integrado ao tanque de armazenamento.

3.4.1. Aquecedor solar doméstico passivo

Também conhecido como sistema compacto ou monobloco, o aquecedor solar doméstico passivo possui um tanque de armazenamento da água aquecida e um coletor solar. Ele funciona através de convecção natural ou mais especificamente através do conceito de termossifão sem que haja a necessidade de uma bomba mecânica de fluxo.

O movimento de convecção do líquido inicia-se quando o fluido aquecido expande-se e torna-se menos denso com uma força de empuxo maior que o fluido não aquecido. Com a movimentação ascendente do fluido aquecido no sistema, o fluido não aquecido desloca-se para aquele local devido à força gravitacional. O líquido tende a fluir facilmente quando ocasionado por um bom termossifão, ou seja, pouca resistência hidráulica.

A circulação passiva pode ser de circuito aberto, quando o líquido armazenado em um tanque passa apenas uma vez por um coletor solar e é enviado para outro compartimento, ou circuito fechado, quando o líquido armazenado após passar pelo coletor solar retorna ao compartimento de onde veio (Figura 4).

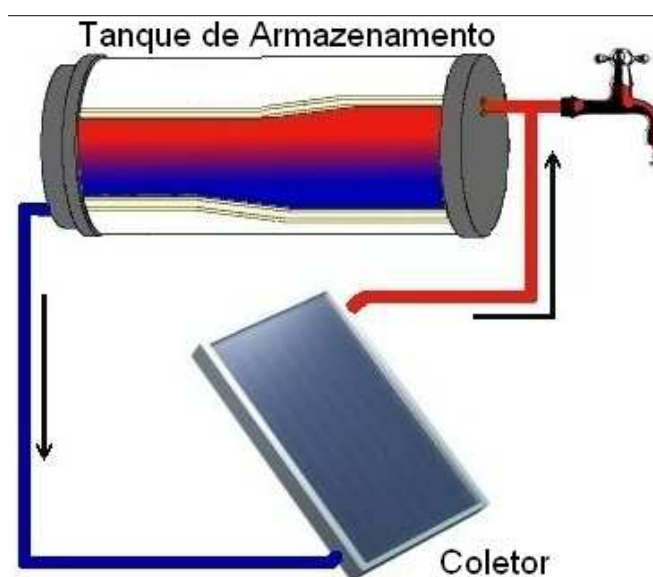


Figura 4: Aquecedor solar doméstico passivo de circuito fechado.

3.4.2. Aquecedor solar doméstico ativo

O aquecedor solar doméstico ativo possui uma bomba de circulação do fluido entre o coletor e o tanque de armazenamento. Como a bomba deve operar apenas quando o fluido no coletor está mais aquecido que o fluido do tanque de armazenamento, esse sistema requer um controle para a ativação da bomba de fluxo. Apesar de esse sistema possuir um custo maior quando comparado com o aquecedor solar passivo, há diversos benefícios que podem resultar na sua adoção. Dentre essas vantagens destacam-se:

- O tanque de armazenamento pode estar localizado em nível inferior ao do coletor solar (geralmente encontrado em piscinas);
- O tanque de armazenamento pode estar localizado em locais de menor índice de perda de calor;
- A bomba pode evitar superaquecimento em aquecedores solares de alta eficiência impulsionando o fluido aquecido do tanque de armazenamento para o coletor durante as noites, onde o ambiente está não aquecido;

Geralmente, aquecedores solares domésticos ativos podem tolerar maiores temperaturas dos fluidos que aquecedores passivos. Consequentemente, esses sistemas são mais eficientes. Entretanto, usualmente, eles são mais complexos, mais custosos e possuem procedimentos de instalação mais complicados.

3.4.3. Coletor de Placa

Esse conceito é normalmente encontrado ao se visualizar uma casa com aquecedor solar. Como já descrito, ele é composto por uma robusta placa de vidro anexada de materiais isolantes e estruturais formando uma caixa (Figura 1). O coletor é orientado ao sol e enclausura uma série de tubos. Aletas ou flanges de coloração negra conectados aos tubos possuem o objetivo de aumentar o volume de absorção de calor ou simplesmente implanta-se uma placa de metal com significativo coeficiente de condutibilidade térmica conectado aos

tubos para exercer essa função. Outra característica importante desse tipo de coletor ocorre devido a sua alta eficiência que ocasiona o aumento das temperaturas dos componentes inseridos nas caixas que consequentemente possuem seus índices de irradiação aumentados (a radiação é proporcional ao aumento da temperatura).

3.4.4. Coletor de Tubo à Vácuo

Esse conceito é composto por linhas de dois tubos concêntricos com mínima quantidade de ar entre eles beirando ao que é chamado de vácuo sendo que esses tubos são anexados diretamente ao reservatório térmico por conexões isoladas termicamente (Figura 5). O tubo interior da linha possui coloração preta para absorver maior radiação solar e uma menor perda de calor para o ambiente devido à falta de material entre os dois tubos (esse fato caracteriza a vantagem desse tipo de coletor perante o coletor de placas). Além disso, por não haver contato com o ambiente externo o fluido possui pouca perda por convecção se comparado ao coletor de placa.



Figura 5: Coletor de tubo a vácuo.

3.4.5. Coletor Integrado ao Tanque de Armazenamento

Assim como o próprio nome designa, esse tipo de coletor possui a característica de atuar tanto como coletor solar como tanque de armazenamento. Ele é basicamente um tanque de armazenamento envolvido por uma caixa isolante que aumenta o percentual de calor absorvido e diminui o percentual de calor perdido pelo tanque de armazenamento (Figura 6). Esse tipo de coletor pode ser pressurizado e depende da gravidade para garantir o fluxo da água aquecida. Apesar de ser simples, eficiente e menos custoso que o Coletor de Tubo à Vácuo e o Coletor de Placa, eles são eficientes apenas para climas com alto índice de radiação e moderada temperatura ambiente.

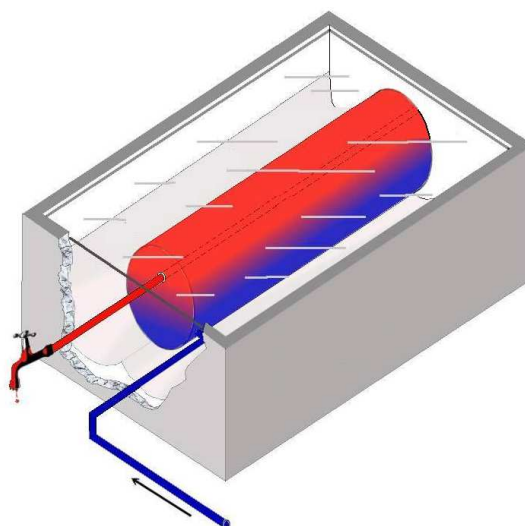


Figura 6: Coletor Integrado ao Tanque de Armazenamento.

3.5. Sistema Híbrido: Aquecedor Solar e Fonte de energia auxiliar

Os aquecedores solares na maioria das vezes são construídos de forma híbrida, isto é, são conectados a uma fonte de energia auxiliar, geralmente elétrica, para garantir que a água atinja a temperatura ideal mesmo em climas desfavoráveis. Esse fato mostra umas das principais desvantagens desse aquecedor solar no uso tradicional (uso apenas do aquecedor solar) e por consequência a resistência à adesão da tecnologia em muitas regiões: necessidade de fonte auxiliar de energia.

O Boiler pode conter essa resistência elétrica. Quando esse fato ocorre, essa resistência possui a função de garantir a mínima temperatura de conforto necessária para que a água esteja na temperatura ideal ao entrar em contato com o usuário. Sendo assim, é necessário o uso de um controlador.

Entretanto, em diversos climas, um aquecedor solar pode prover até 85% da água aquecida que uma casa necessita. Esse fato diminui o gasto de um chuveiro elétrico significativamente visto que a água já foi previamente aquecida, mesmo que não à temperatura ideal. Sendo assim, quando anexado a um chuveiro elétrico, o aquecedor solar doméstico passivo é visto como uma solução eficiente.

3.6. Aquecedores Solares de Baixo Custo

A primeira aparição de um aquecedor solar de baixo custo (ASBC) no Brasil foi durante a feira industrial que complementava o evento ECO 92 no Rio de Janeiro. Anos depois, a Sunpower Engenharia (atualmente chamada de Sociedade do Sol) foi convidada para participar do CIETEC na USP onde faz parte desde 1999. O ASBC foi desenvolvido com o objetivo de fornecer água aquecida para uma casa popular a um custo equivalente ao de um chuveiro de qualidade. Entretanto, a tecnologia possui um caráter ambiental significativo visto que se utilizado em escala pode propiciar a redução das emissões do gás carbônico por possibilitar a diminuição do uso de usinas termoeletricas e hidroelétricas nacionais. Por fim, tendo em vista um ponto mais humano gerado pela tecnologia, ela pode acarretar um reforço de auto-estima e da consciência de cidadania, ao ampliar sua independência das estruturas de distribuição de energia.

O Brasil possui algumas características que cooperam para a criação de um aquecedor solar de custo menor. A temperatura média no país possui índice diário alto, mesmo no inverno, facilitando o uso de coletores simplificados que podem aquecer água de banho acima de 40°C. A iluminação solar é bem distribuída durante os meses. Essa característica da irradiação solar permite o uso intenso do aquecedor, reduzindo o prazo de retorno de investimento. Além disso, a água vinda da rede pública possui alta pressão. Sendo assim, é possível manter o reservatório do coletor solar com água da companhia de tratamento sem ter um custo por isso (em outros países essa característica não é padrão). O PVC, material básico para construção dos dutos, tem abrangência nacional devido à simplicidade e baixo preço. Por

fim, a disseminação do chuveiro elétrico é importante, pois em dias que o tempo não permite elevar a água até a temperatura desejada de banho, o chuveiro pode funcionar como aquecedor de apoio a custo praticamente nulo (esse fato assemelha-se ao sistema híbrido).

No ASBC, a caixa d' água tradicional exerce a função também de reservatório térmico para o coletor solar. Camadas de águas (camada de água quente, camada de transição e camada de água fria) são produzidas no interior do reservatório devido à entrada de água quente na parte superior da caixa e saída de água fria na parte inferior. Há também um sistema de “dutos furados” no interior do reservatório para que as entradas da água não causem turbulências que podem ocasionar a mistura das camadas de água (Figura 7). Como a própria caixa d' água é utilizada como reservatório, é necessário uma ligação do chuveiro ao duto de água anterior à caixa d' água para obter também água fria. Isso é feito a partir de um registro que regula a entrada de água fria que se mistura à água aquecida pelo aquecedor.

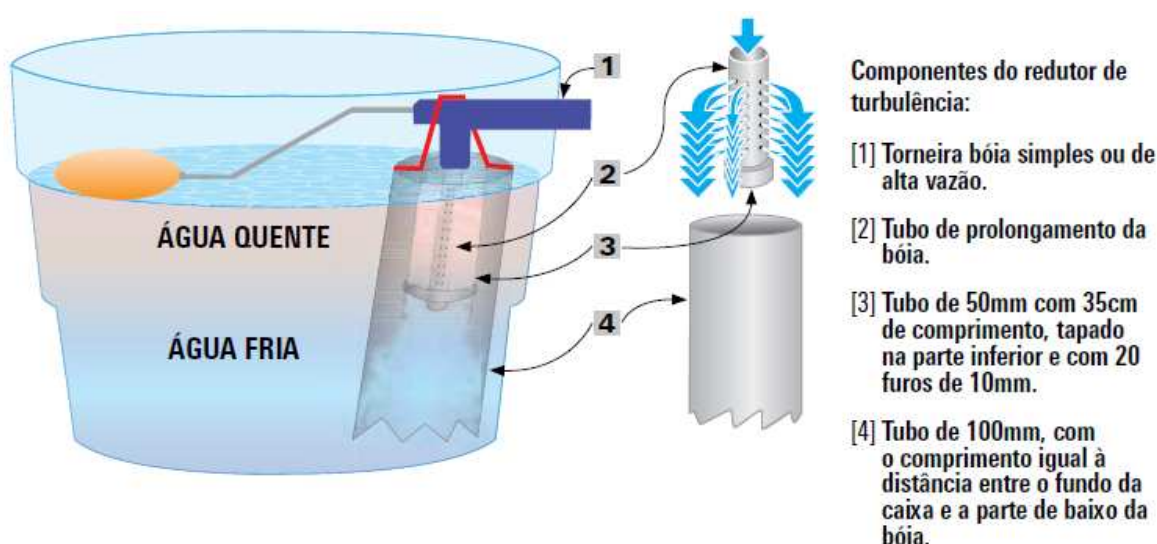


Figura 7: Reservatório com dispositivo para não causar turbulência interna (Alano, 2009)

Além disso, é importante mencionar que o ASBC não possui bomba para circulação forçada com o objetivo de diminuir seu custo, portanto são trabalhados sempre com circulação passiva.

Embora possa haver outros consumidores, o usuário previsto para o ASBC é o proprietário de uma casa popular, capacitado para serviços de construção ou reforma. Sendo assim, o aquecedor solar busca um custo ao redor de R\$300,00 por família. Além disso, a alta eficiência e durabilidade se refletem diretamente no custo. Esse fato leva a ter que prever limitações significativamente controladas das variáveis em um projeto de ASBC.

A ONG Sociedade do Sol possui duas famílias de aquecedores solares:

- ASBC Tradicional: aquecedor solar com custo entre R\$100,00 e R\$200,00 para 150 e 250 litros de água.
- ASBC Integrado: aquecedor solar de 150 a 200 litros em filmes plásticos de PVC. Um produto industrial destinado à população rural de baixa renda e possui custo de produção de R\$25,00.

Na maioria das vezes, os projetos de ASBC possuem objetivo social e, portanto, de disseminação em escala do conceito. Sendo assim, muitas das patentes são depositadas apenas com o objetivo de proteção contra anseios comerciais. Mas a construção e dispersão do conhecimento podem ser oferecidas gratuitamente.

No caso de um tipo de coletor solar de baixo custo (Figura 8), uma fração da radiação solar é transmitida através da placa de vidro e é absorvida pela placa de metal de cor negra. Com o aumento de temperatura da placa de metal, há uma diferença entre as temperaturas da placa e a temperatura do tubo, ocasionando uma transferência de calor por condução. Por fim, a água, no primeiro instante sem movimento, inicia um fluxo lento que se baseia no fenômeno de convecção natural acarretando a termossifão. Além de a caixa ser vedada para não permitir o escape de ar quente do ambiente interno, há um isolamento no interior da caixa que busca diminuir a transferência de calor através de condução do interior para fora da caixa e posteriormente através de convecção para o ambiente.

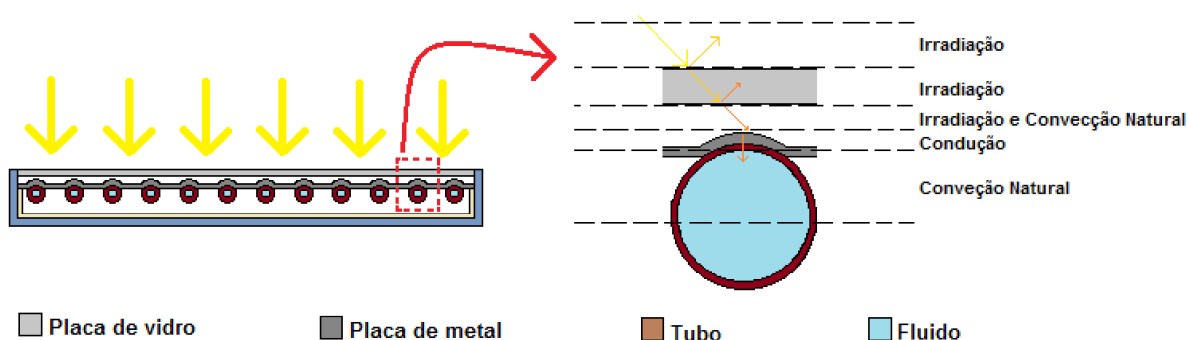


Figura 8: Fenômenos da transferência no coletor solar do aquecedor de baixo custo.

No ano de 2004, Sr. José Alcino Alano desenvolveu um ASBC a partir de materiais descartáveis. Ele foi testado posteriormente pela universidade do Estado do Rio de Janeiro, pela universidade de Santa Catarina e pelo LACTEC – Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (a pedido da COHAPAR – Companhia de Habitação do Paraná). Esse

modelo de ASBC ganhou expressão nacional já que é possível construir tal coletor sem qualquer necessidade de processamento industrial, ou seja, através apenas da reciclagem direta de materiais descartados pela sociedade. A distribuição tem ocorrido no estado de Santa Catarina em parceria com a Celesc.

Os reservatórios dos ASBCs embora possuam diferenças particulares, no geral são projetados da mesma forma (Figura 7). Já o coletor solar confeccionado por José Alano possui invólucros em cada célula construído por garrafas PETs (Figura 9) ao invés das habituais caixas com material transparente e suporte de madeira. Possui também materiais de insolação construídos a partir de embalagens TetraPak pintadas de preto que são conectadas aos tubos por onde passa o fluido.

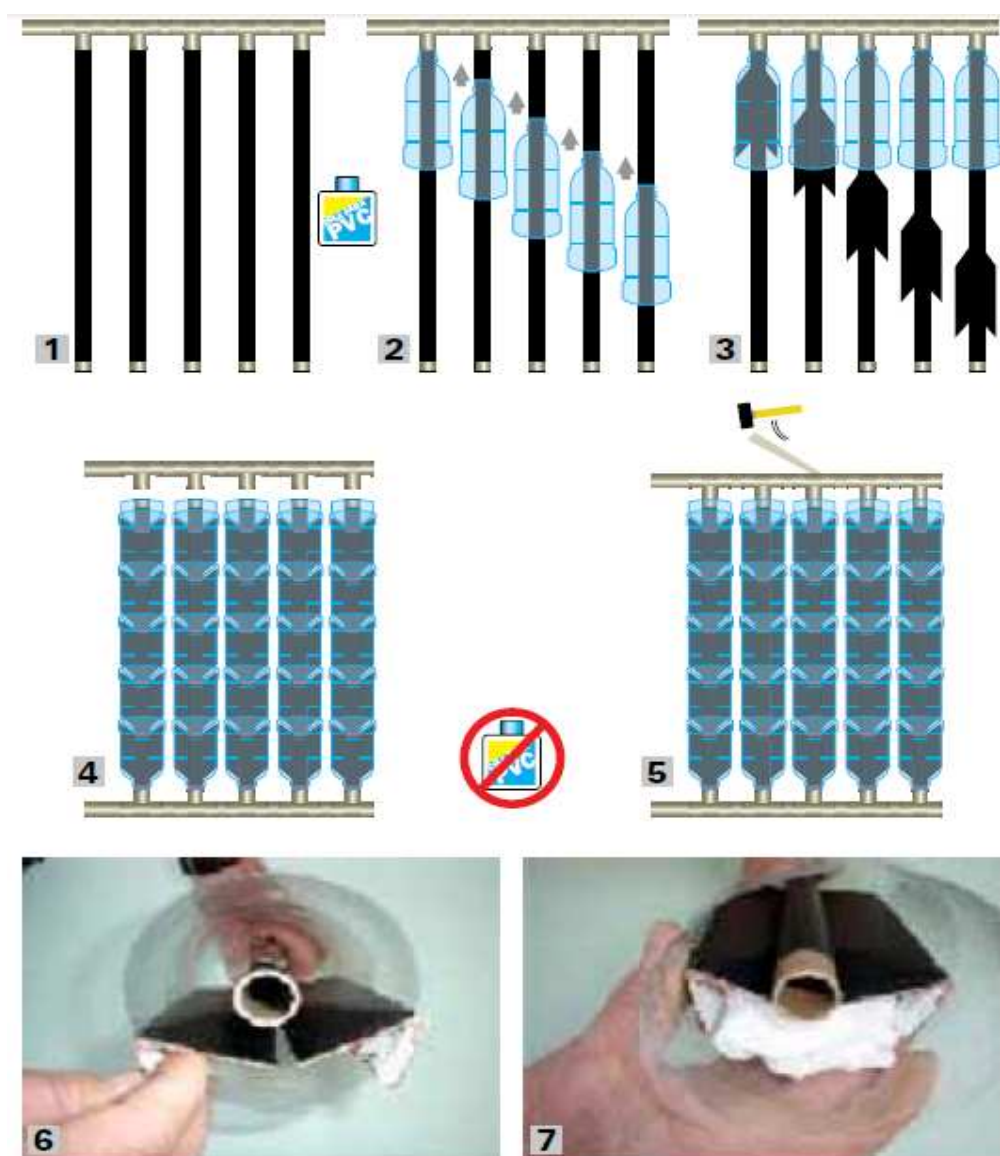


Figura 9: Projeto das células do ASBC (Alano, 2009).

4. PROCEDIMENTO DA ANÁLISE

4.1. Descrição dos experimentos

Esse trabalho abordará a experimentação relativa que será caracterizada pela aquisição de dados de diferentes módulos com iguais configurações mudando-se apenas o parâmetro estudado. Por exemplo, se o parâmetro estudado é o tamanho da estufa, construir-se-ão módulos similares mudando-se apenas o tamanho da estufa dentre os módulos. Essa situação possibilita a não necessidade da medição de alguns parâmetros específicos do aquecedor solar, mas somente a medição da temperatura da água no reservatório e da radiação solar no decorrer do tempo. Definido esses experimentos, é possível diagnosticar os resultados dos parâmetros do aquecedor solar e construir o resultado mais apropriado relacionando esses parâmetros. Esse método foi utilizado para avaliar o tamanho da estufa, material do tubo, material interno e a vedação da estufa. Entretanto, além dos quatro experimentos desenvolvidos no projeto, constatou-se que mais variáveis são significativas para a otimização do produto. São elas:

- a) Diâmetro do Tubo;
- b) Coloração do Tubo;
- c) Comprimento do Tubo;

Devido à facilidade em encontrar alguns materiais no mercado (adequação a fornecedores) e por questão de projeto, o diâmetro do tubo limitou-se ao encaixe no bocal da garrafa PET, ou seja, 20 mm de diâmetro externo. O mesmo ocorre com o comprimento do tubo que por ser vendido em tamanho de 6 metros, o corte em unidade de 1 m viabiliza processos menos custosos na produção. A conclusão do resultado do item b foi obtida por teoria da transferência de calor, visto que a coloração preta possui maior índice de absorção solar.

Uma segunda fase possível seria a elaboração de experimentos absolutos medindo-se as principais propriedades da solução encontrada no método anterior. Nesse ponto, instrumentação mais sofisticada deve ser utilizada medindo-se assim a radiação solar, temperatura de entrada e saída no coletor e no reservatório e a vazão do fluido no sistema.

4.2. Aparato Experimental

Para que os coletores solares pudessem estar na mesma posição foi necessário desenvolver suportes padronizados. Essa situação foi resolvida com a utilização de carteiras escolares antigas (Figura 10) que apresentassem as mesmas características.



Figura 10: Utilização de carteiras para suporte dos coletores.

Sendo assim, o reservatório foi fixado no assento da carteira e suas partes superior e inferior foram conectadas, respectivamente, aos dutos horizontais inferior e superior do coletor solar. Os reservatórios foram mantidos fechados durante todo o experimento para minimizar a transferência de calor por convecção na região superior do reservatório.

Por fim, foi necessário fixar o duto horizontal de cada coletor solar à coluna da carteira para que os dutos conectados ao reservatório não sofressem um excesso de carga ocasionando

uma inclinação indesejável dos coletores. Essa fixação acarretou uma angulação por volta trinta graus de cada coletor em relação ao chão.

Para o experimento de material do tubo foi desenvolvido um suporte de madeira em forma de L para que os tubos tivessem um ângulo de quarenta e cinco graus em relação ao chão.

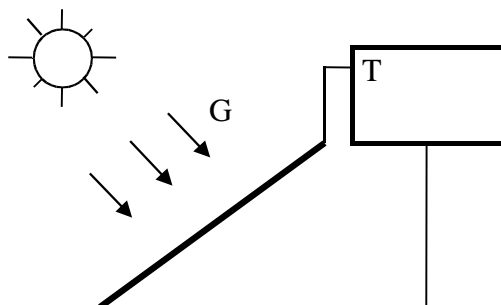
4.2.1. Tamanho da Estufa

O primeiro experimento visou descobrir as propriedades da insolação de diferentes tamanhos de garrafas PET que afetam a temperatura do aquecedor solar no reservatório (figura 11). Para isso foi desenvolvido quatro módulos com diferentes tamanhos de garrafas sem material interno de insolação com quatro reservatórios de 20 litros sendo que a configuração dos tubos retém mais 1 litro de água.



Figura 11: Módulos com diferentes tamanhos de garrafas situados lado a lado.

O modelo para estudo do experimento é demonstrado a seguir:



As entradas do experimento serão o tamanho das garrafas PET, ou seja, $x = 600\text{ml}$; 1L; 2L; 2,5L; o tempo, ou seja, $t=9\text{h}$, 9h15min, 9h30min..., $t=18\text{h}$; a irradiação nos determinados tempos, o tamanho de cada placa ($600\text{ml}=1,04\times0,44\text{m}$; 1L= $1,04\times0,45\text{m}$; 2L= $1,04\times0,47\text{m}$; 2,5L= $1,04\times0,48\text{m}$) e o volume de água do sistema de 21 litros. A saída do experimento será um gráfico de $T(x,t)$ que será medido na superfície superior do reservatório.

4.2.2. Material do Tubo

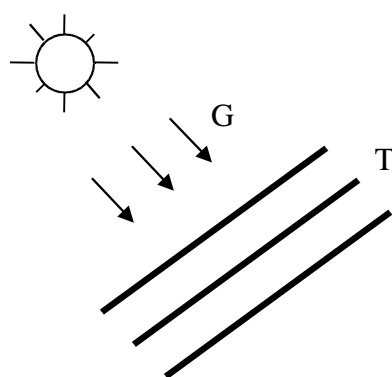
O segundo experimento procurou as relevâncias das propriedades dos materiais que afetam a temperatura do aquecedor solar no reservatório (Figura 12). Para isso foi preenchido com água três tubos de diferentes materiais (PVC, cobre e PPR³) pintados de preto. Além disso, esse experimento possuiu uma especificidade: foi necessário moldar-se aos dimensionamentos e materiais encontrados no comércio, pois nesse primeiro momento objetiva-se também o desenvolvimento do projeto de acordo com matéria-prima de fácil obtenção no mercado. Esse fato resultou na aquisição de tubo de cobre com diâmetro externo de 15mm, tubo de PVC com diâmetro externo de 20mm e tubo de PPR com diâmetro externo de 20mm. Para isso foi adquirido três tubos de cada material com um metro cada e alocados lado a lado com uma distância de 100 mm entre eles e com uma inclinação de 45 graus.

³ Cano de plástico PPR possui características mais robustas que o cano de PVC usual. Possui coloração esverdeada. Pode se citar como exemplo a utilização de materiais não tóxicos (uso apenas de elementos de hidrogênio e carbono), maior isolamento térmica ($0,21\text{ w/mk}$), boa resistência térmica (ponto de fusão de $131,5\text{C}$) e longa vida útil.



Figura 12: Tubos de PVC, cobre e PPR situados a 100 mm de distância.

O modelo para estudo do experimento é demonstrado a seguir:



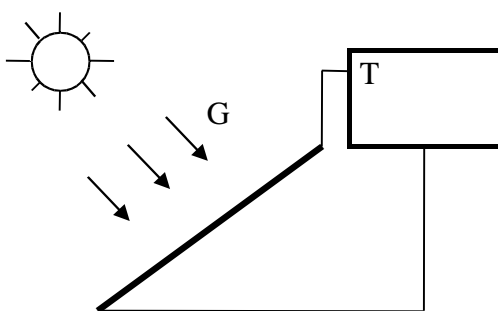
As entradas do experimento serão os materiais dos tubos, ou seja, x = cobre; PPR; PVC; o tempo, ou seja, $t=9h$, $9h15min$, $9h30min...$, $t=18h$; a irradiação nos determinados tempos, o tamanho da face de cada tubo orientada ao sol (PVC: $0,020 \times 1m$; Cobre: $0,015 \times 1m$; PPR: $0,020 \times 1m$) e o volume de água de cada tubo (PVC: $0,056 m^3$; Cobre: $0,044 m^3$; PPR:

0,053 m³). A saída do experimento será um gráfico de $T(x,t)$ que será medido no orifício superior de cada tubo.

4.2.3. Material Interno

Esse experimento é caracterizado por ser um dos mais importantes no desenvolvimento do projeto. O material interno é responsável pela maior porcentagem na eficiência do aquecedor. Dessa forma, esse experimento visa descobrir as propriedades de insolação de diferentes configurações e materiais que preenchem o interior da garrafa PET e afetam a temperatura do aquecedor solar no reservatório. Para isso foi desenvolvido quatro módulos com diferentes tipos de material de preenchimento: utilização de lata de alumínio sem pintura na superfície superior com raspa de pneu na superfície inferior (Exp. A), utilização de TetraPak pintada de preto como placa de absorção (Exp. B), lata de alumínio pintada de preto na superfície superior e sem película de raspa de pneu na superfície inferior (Exp. C), lata de alumínio pintada de preto na superfície superior com película de raspa de pneu na superfície inferior (Exp. D). Por questão de praticidade, as garrafas PET de 600 ml foram utilizadas para esse experimento.

O modelo para estudo do experimento é demonstrado a seguir:

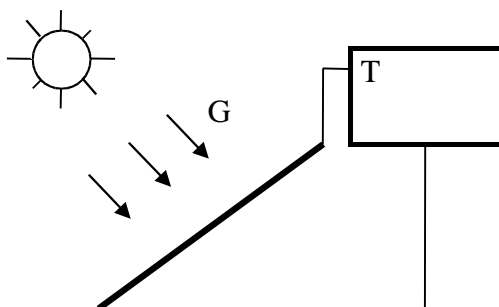


As entradas dos experimentos serão as quatro configurações descritas anteriormente; o tempo, ou seja, $t=9h$, $9h15min$, $9h30min...$, $t=18h$; a irradiação nos determinados tempos, o tamanho de cada placa que no caso são iguais entre si com o valor de $1,02 \times 0,3m$ e o volume de água do sistema de 21 litros. A saída do experimento será um gráfico de $T(x,t)$ que será medido na superfície superior do reservatório.

4.2.4. Vedação da Estufa

Esse experimento visa descobrir a influência da convecção interna causada pela vedação das garrafas PET em uma mesma célula e afetando assim a temperatura do aquecedor solar no reservatório. Para isso foi desenvolvido dois módulos: um selado (A) e outro não selado (B) com o material interno que obteve melhor resultado.

O modelo para estudo do experimento é demonstrado a seguir:



As entradas dos experimentos serão as duas configurações descritas anteriormente; o tempo, ou seja, $t=9h$, $9h15min$, $9h30min...$, $t=18h$; a irradiação nos determinados tempos e o volume de água do sistema de 21 litros. A saída do experimento será um gráfico de $T(x,t)$ que será medido na superfície superior do reservatório. Por questão de praticidade, as garrafas PET de 600 ml foram utilizadas para esse experimento.

4.3. Aparato Instrumental

É conhecido que a melhor forma de garantir os resultados experimentais dos testes é a utilização de um piranômetro para medição da radiação solar, termostatos para medição da temperatura de entrada e saída no coletor e no reservatório e um hidrômetro para a medição da vazão do fluido no sistema. Além disso, é necessário o auxílio de um Datalogger para obter

os dados experimentais em tempo real e de forma digitalizada. Dessa forma, após uma pesquisa constatou-se que a especificação dos materiais necessários seria o seguinte:

- 12 Termopares tipo T, isolamento mineral, diâmetro externo de 1.5mm, haste de 12 mm, pote de 3mm de diâmetro externo, rabicho de 200mm com conector macho tipo miniatura. Bucin de 1/4". Cabo de compensação tipo T, PVC - PVC com conector fêmea tipo miniatura (figura 13).



Figura 13: Termopar Tipo T.

- Hidrômetro com faixa compatível a 0,02 l/s com saída analógica. Faixa de 0 a 0,04 l/s.
- Piranômetro ou Radiômetro solar (figura 14);



Figura 14: Piranômetro.

Entretanto, devido ao número de testes necessários a serem feitos, o tempo designado para o desenvolvimento do estudo ao local reservado para o estudo e ao custo x tempo necessário para obter tais equipamentos, optou-se que esses materiais poderiam ser utilizados em uma segunda fase do projeto, ou seja, após a definição do projeto do aquecedor solar onde seja necessária a obtenção de dados absolutos e aprofundados do dispositivo. Dessa forma, a primeira solução encontrada foi à utilização de um circuito (figura 15) utilizando o transistor LM335 isolado ao meio com o auxílio de uma fita isolante pelo custo baixo característico dessa solução.

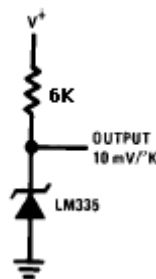


Figura 15: Circuito para aquisição de voltagem de acordo com a mudança de temperatura.

Dessa forma, dois circuitos foram montados e calibrados com o auxílio de água fervente para obter as medidas e a diferença de potencial relacionada a essas medidas e assim poder testar sua eficiência. Dessa forma, foram obtidos os seguintes gráficos:

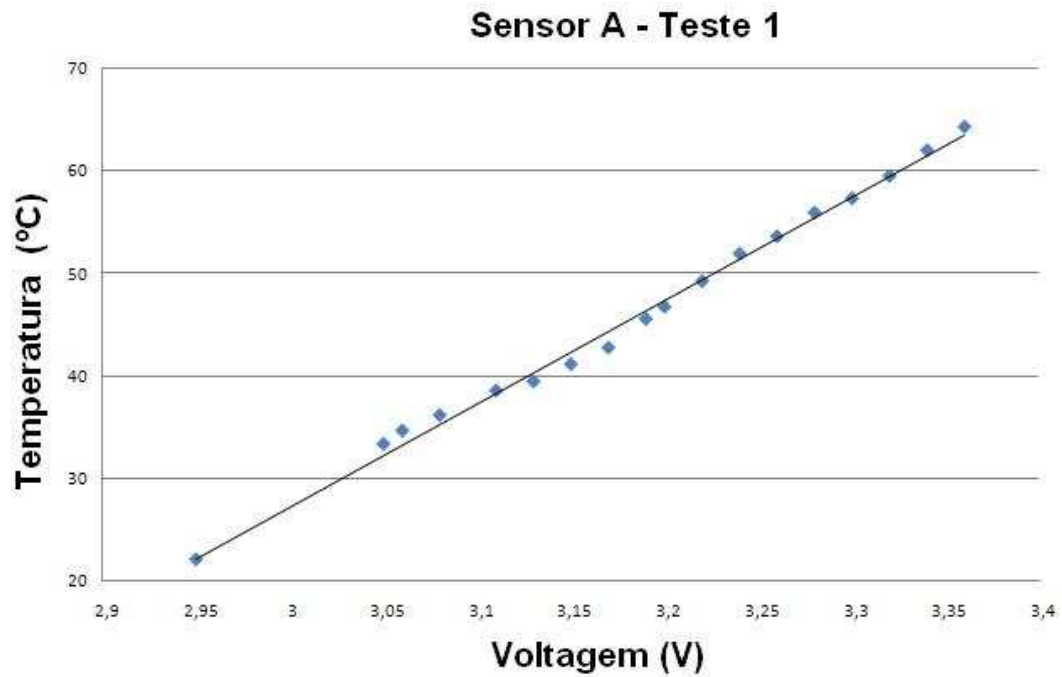


Figura 16: Gráfico do primeiro teste do sensor A LM335.

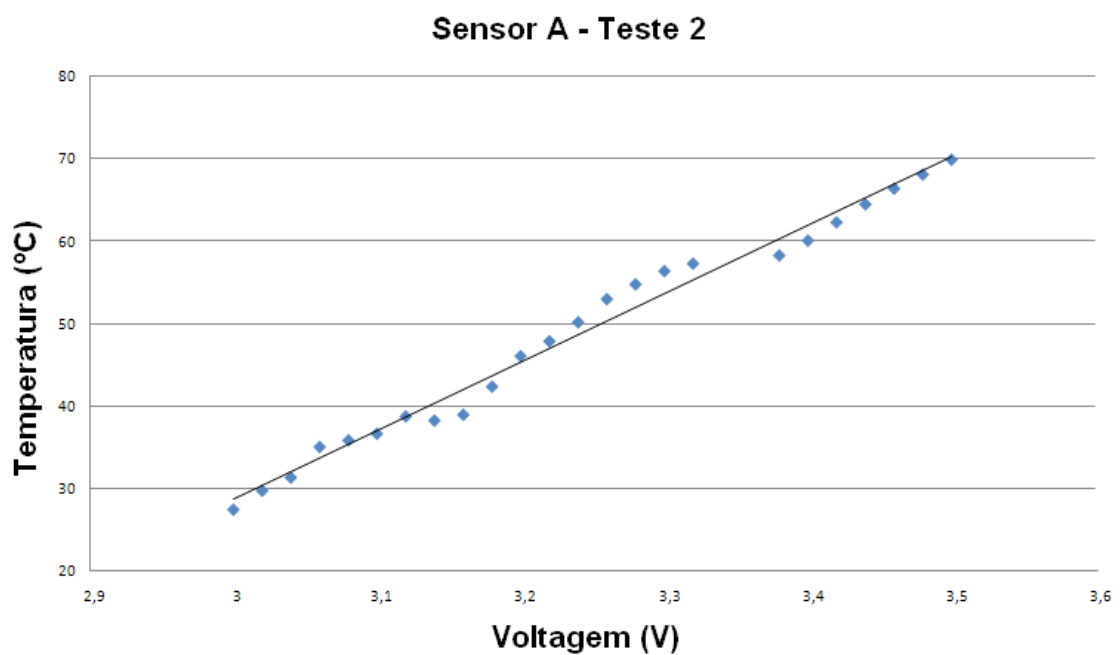


Figura 17: Gráfico do segundo teste do sensor A LM335.

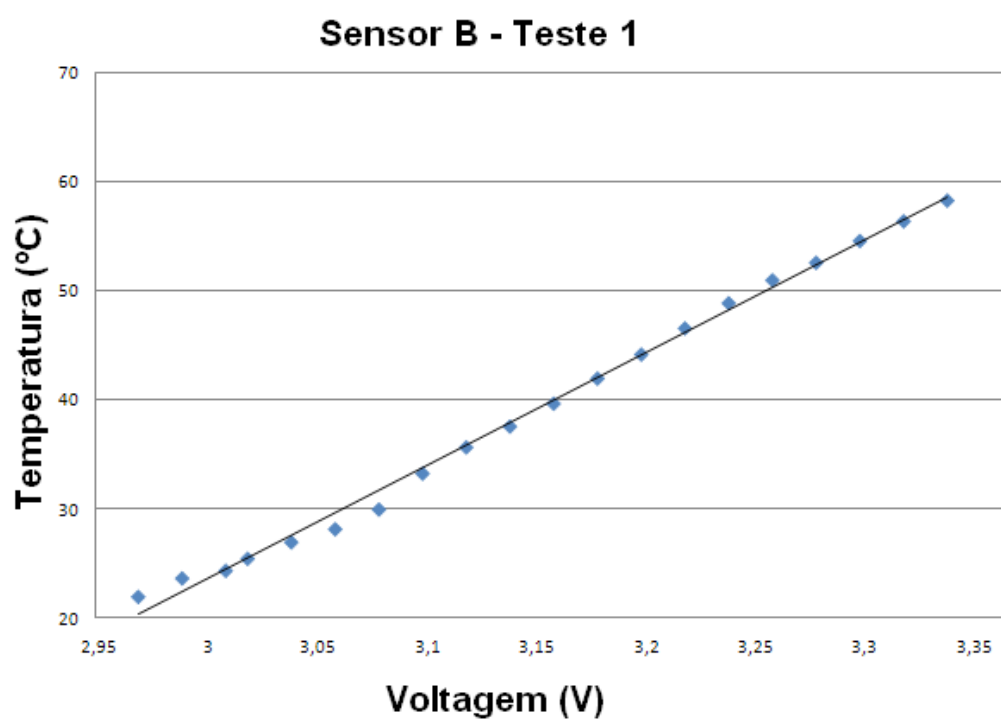


Figura 18: Gráfico do primeiro teste do sensor B LM335.

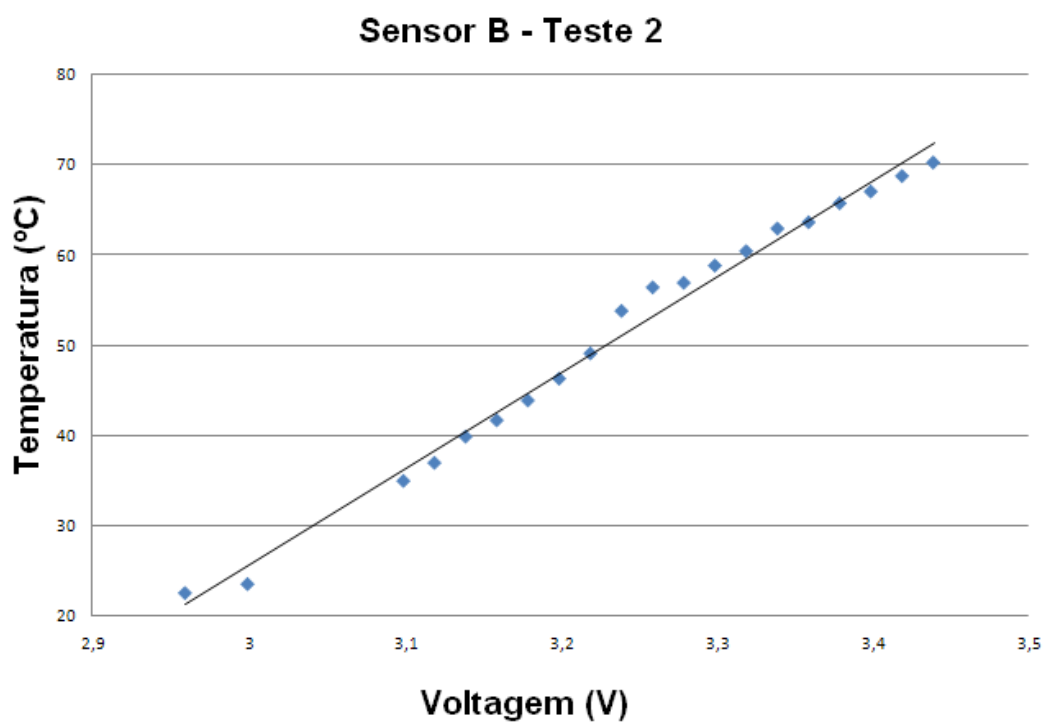


Figura 19: Gráfico do segundo teste do sensor B LM335.

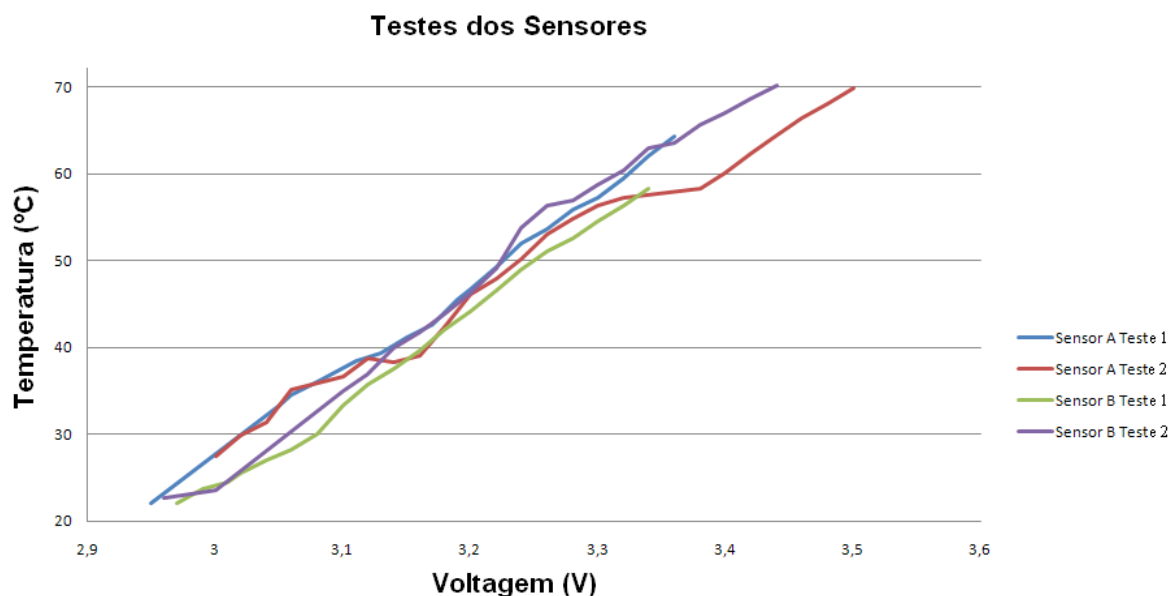


Figura 20: Gráfico comparativo dos testes dos sensores A e B.

Como pode observar apesar dos sensores mostrarem uma linearidade no incremento da voltagem no decorrer do aumento da temperatura, concluiu-se que essa alternativa para a aquisição de dados nos experimentos não foi satisfatória para o nosso caso, pois a oscilação na temperatura excede a precisão de $0,1^{\circ}\text{C}$.

Sendo assim, foi adquirido um termômetro digital modelo Gulterm 180, Faixa: $-30,0$ a $+180,0^{\circ}\text{C}$, Resolução $0,1^{\circ}\text{C}$, Precisão $0,8\%$, com sonda pontiaguda para imersão/penetração com haste em aço inox $\varnothing 3 \times 180$ mm punho e rabicho espiral flexível $1,5$ m (figura 21).



Figura 21: Termômetro Digital modelo Gulterm 180.

Além disso, para uma medição superficial da radiação solar, foi obtida um painel monocristalino fotovoltaico de voltagem máxma de 5V, com tamanho de 110mmx110mm, Material Silicone Monocristalino, potência max de 1.25W e corrente de 250 Mah (Figura 22).



Figura 22: Célula fotovoltaica utilizada para o experimento.

Sendo assim, ela foi exposta ao sol em um dia sem nuvens obtendo-se o seguinte gráfico.

V



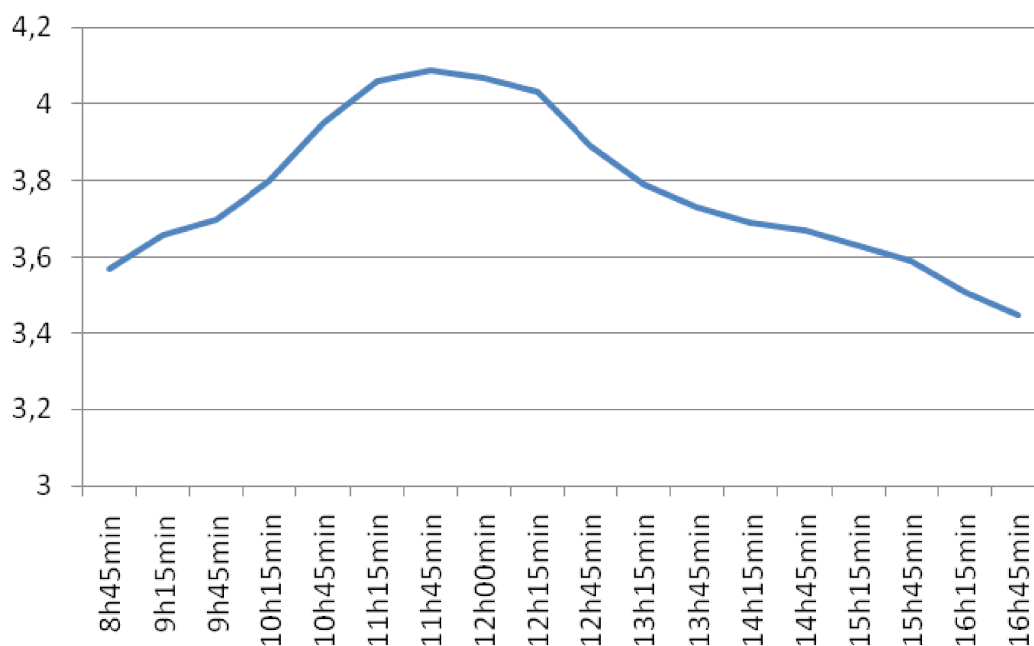


Figura 23: Gráfico da V x t da célula fotovoltaica em um dia de sol sem nuvens.

Como se sabe que a radiação solar média por volta das 12h30min em um dia de sol em janeiro na cidade de São Paulo é de $2,5 \text{ MJ/m}^2$ (Oliveria e Machado, 2000), ou seja, por volta de 658 W/m^2 , esse valor foi atrelado ao valor máximo obtido no mesmo período pela célula fotovoltaica de $4,08\text{V}$ e os valores da célula das horas restantes foram relacionadas proporcionalmente aos valores em W/m^2 , obtendo-se por consequência, o gráfico a seguir (Figura 24):

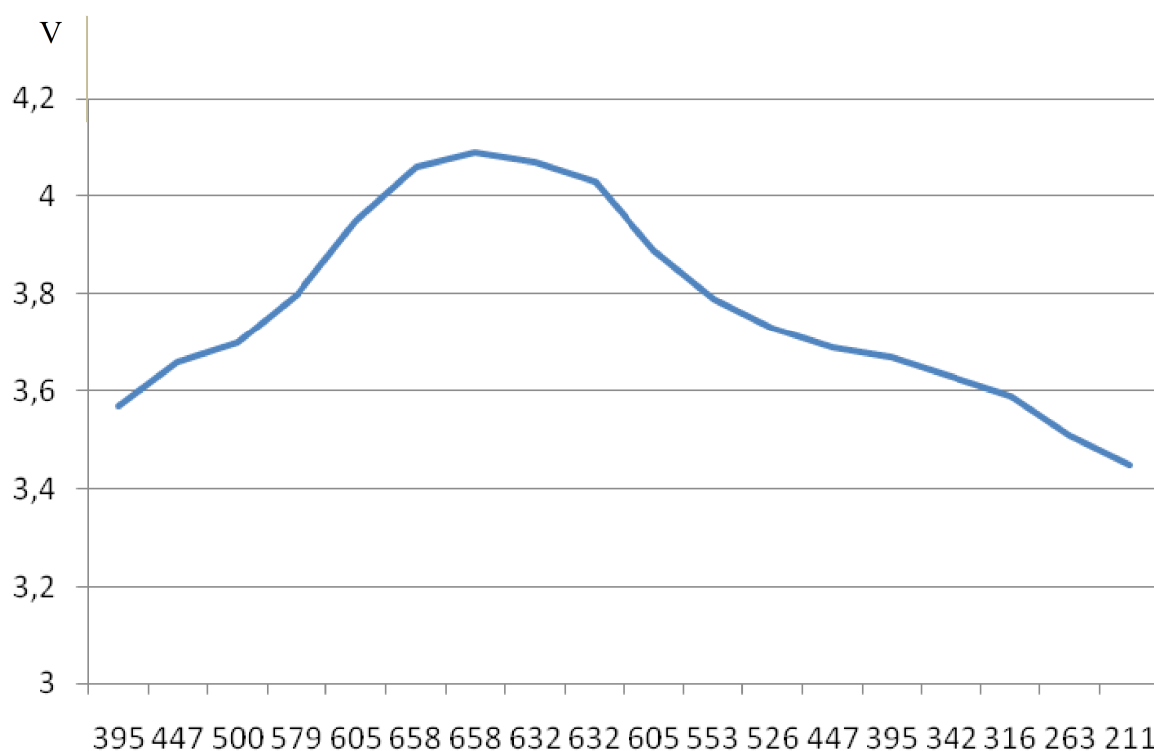


Figura 24: Gráfico da Voltagem x Irradiação do Sol da célula em um dia de sol.

4.3.1. Dispositivos de Auxílio

Durante a pesquisa, o estudo, o planejamento e a execução dos experimentos muitas tarefas tornam-se de difícil realização podendo até danificar os resultados obtidos. Dessa forma, no decorrer do projeto alguns dispositivos tiveram que ser desenvolvidos ou adaptados para uma construção mais precisa das amostras experimentais. Além disso, esses dispositivos possuem um benefício secundário visto que o estudo desse projeto possui um objetivo futuro de implantação em larga escala, dessa forma, dispositivos auxiliares podem trazer rapidez, qualidade e segurança no processo de produção.

- **Molde de corte dos tubos**

Um problema específico que se encontra na construção dos protótipos é a inconsistência no comprimento de corte dos tubos quando se utiliza o procedimento de medir com uma régua e cortar o cano com uma serra. Além disso, essa inconsistência ocasiona uma

pré-tensão ao conectarem-se os tubos para formação dos módulos devido à falta de linearidade entre as células (figura 25) podendo gerar futuros vazamentos.



Figura 25: Falta de Linearidade no coletor solar.

Dessa forma, foi desenvolvida uma placa de madeira (figura 26) para servir de molde e guia para assegurar a mesma dimensão de cada célula (Alano, 2009).



Figura 26: Molde de madeira de corte dos tubos com marcação de 1 metro.

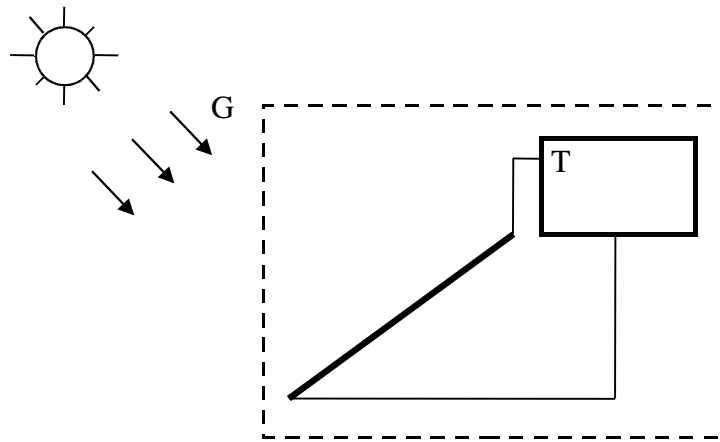
- **Esmeril para corte do anel superior e inferior da lata de alumínio**

Para retirar o anel superior e inferior da lata de alumínio foi constatado que a utilização do processo de usinagem através da raspagem das bordas superiores e inferiores trariam melhor qualidade no menor espaço de tempo perante processos básicos como a utilização de uma tesoura de corte. Dessa forma, foi utilizado um esmeril para realização de tal tarefa.

Entretanto, o ruído intensivo e o contato direto das mãos com o esmeril fez-se perceber que para uma possível produção em larga escala questões de perigo bem como o desenvolvimento de dispositivos para facilitar e garantir a segurança da atividade deveriam ser considerados.

5. RESULTADOS

O estudo dos experimentos 2.2.1, 2.2.3 e 2.2.4, basear-se-á no sistema descrito abaixo.



Sendo assim, pela primeira lei da termodinâmica no sistema, tem-se:

$$Q_{12} = m(U_2 - U_1)$$

Sendo que a máxima quantidade de calor absorvida Q_{12} pelo coletor é dada pelo produto da massa da água e a variação da energia interna entre a mínima temperatura e a máxima temperatura na superfície do reservatório em cada experimento.

Sabe-se ainda que:

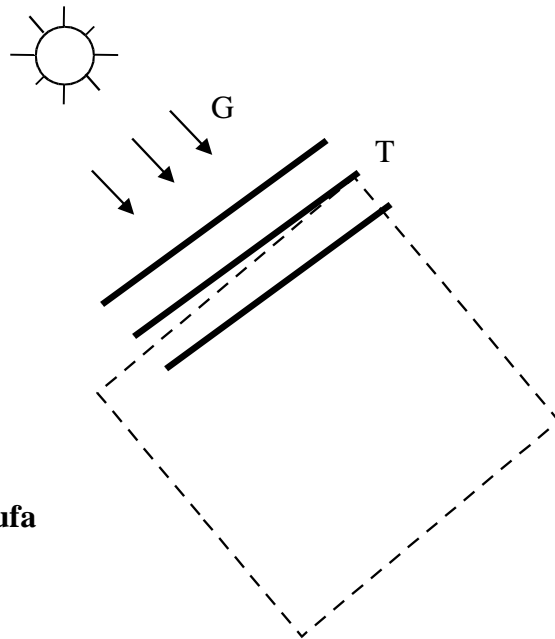
$$Q_T = A \int_0^t G(t) dt$$

Sendo que Q_T é a máxima quantidade de calor irradiada na área determinada pelo coletor.

Portanto, para obter-se a eficiência da troca de calor de energia solar para energia térmica, é usado:

$$\eta = Q_{12}/Q_T$$

Já o experimento 2.2.2, apresenta outro sistema, como descrito abaixo, entretanto a base matemática a ser utilizada será a mesma.



3.1. Tamanho da Estufa

Ao realizar o experimento, o dia encontrava-se ensolarado com poucas nuvens. Dessa forma, ao fim do dia obteve-se a figura 27 e figura 28.

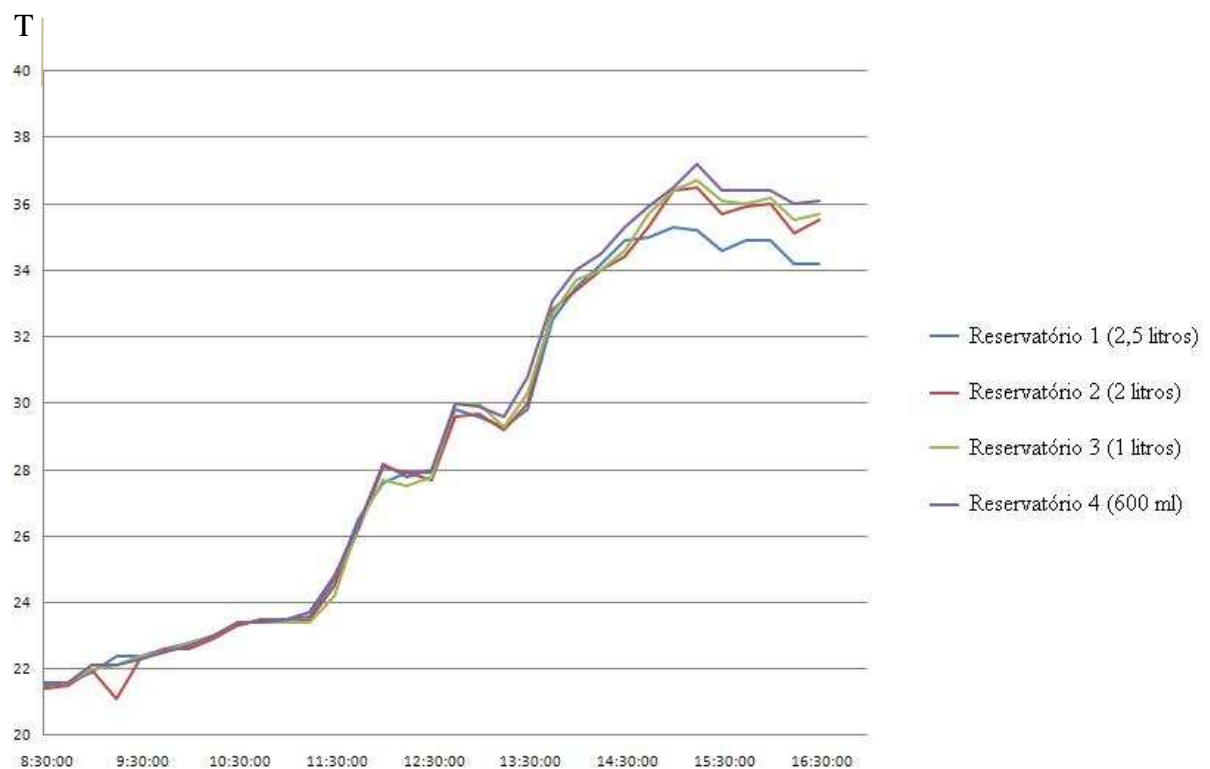


Figura 27: Gráfico da Temperatura x Tempo dos tamanhos de garrafas.

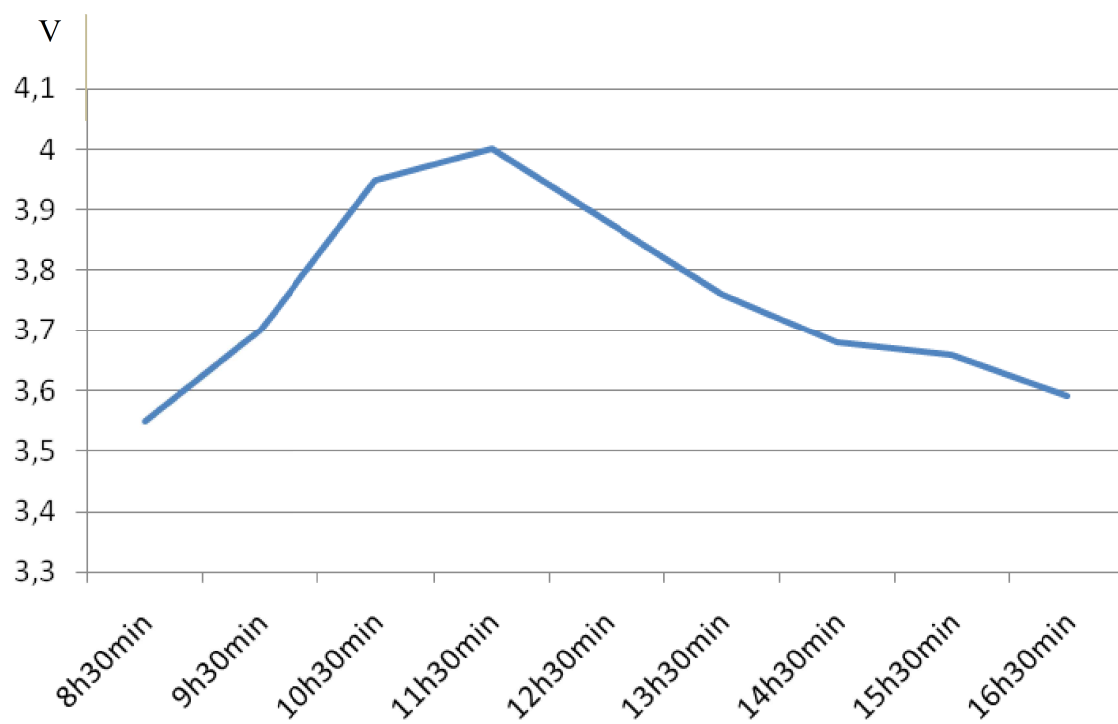


Figura 28: Gráfico da Voltagem x Tempo no experimento Tamanho da Estufa.

3.2. Material do Tubo

Ao realizar o experimento, o dia encontrava-se ensolarado com poucas nuvens. Dessa forma, ao fim do dia obteve-se a figura 29 e figura 30.

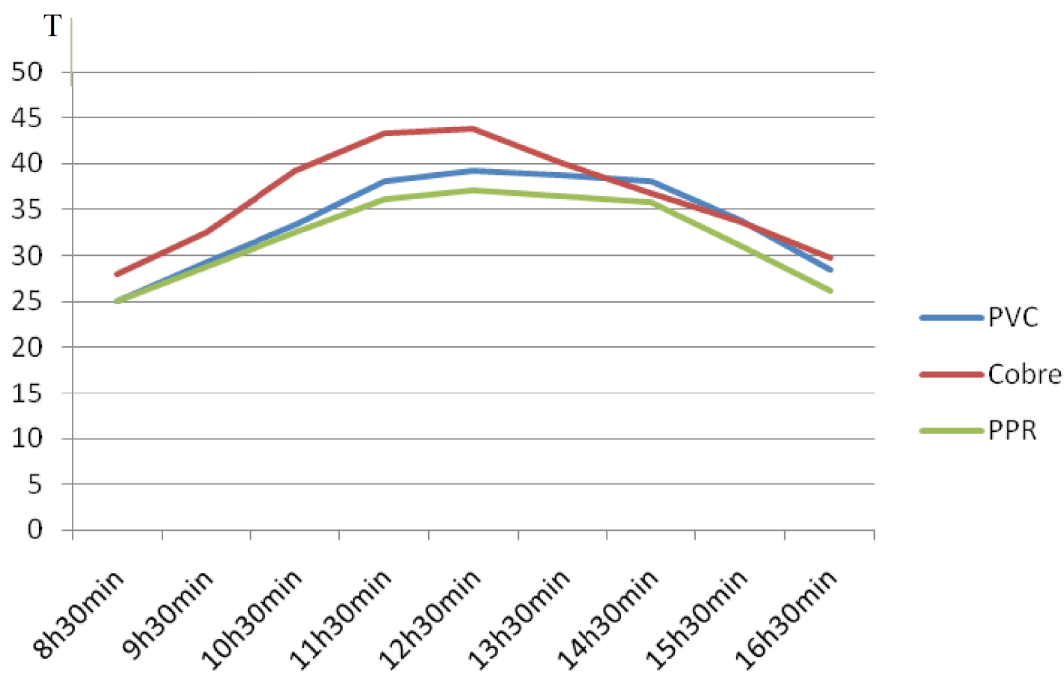


Figura 29: Gráfico da Temperatura x Tempo dos tubos constituídos de diferentes materiais.

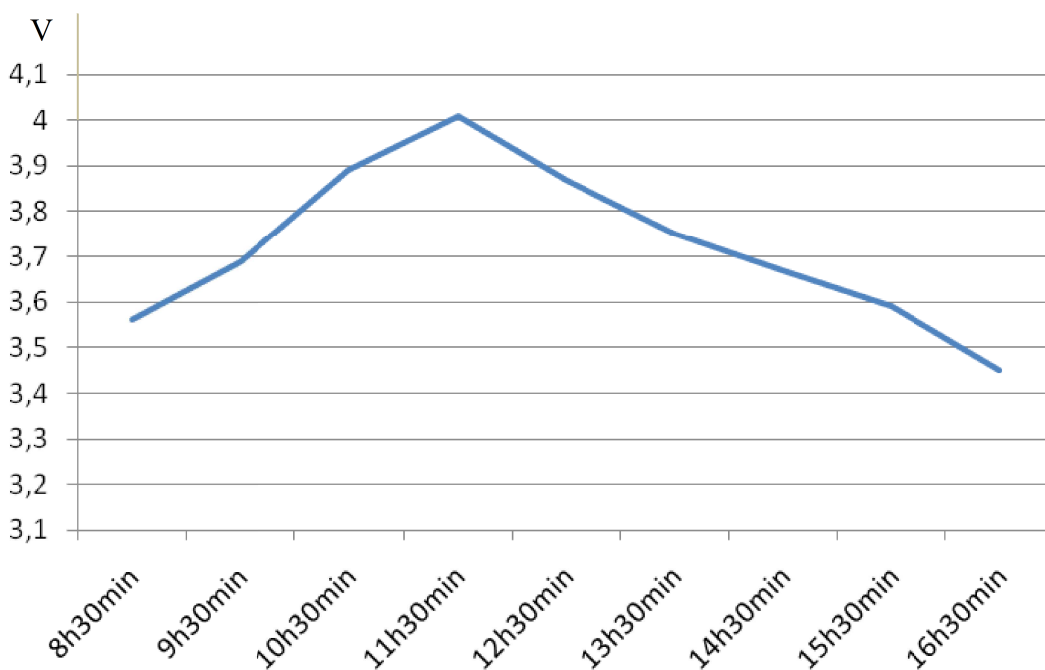


Figura 30: Gráfico da Voltagem x Tempo no experimento Material do Tubo.

3.3. Material Interno

Ao realizar o experimento, o dia encontrava-se ensolarado com poucas nuvens. Dessa forma, ao fim do dia obteve-se a figura 31 e figura 32.

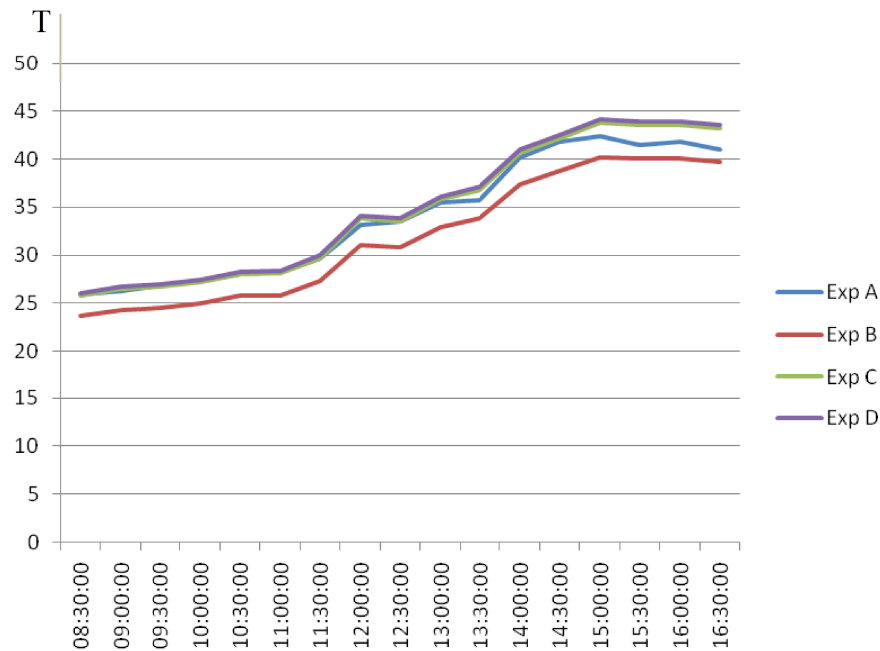


Figura 31: Gráfico da Temperatura x Tempo dos diferentes materiais internos de insolação.

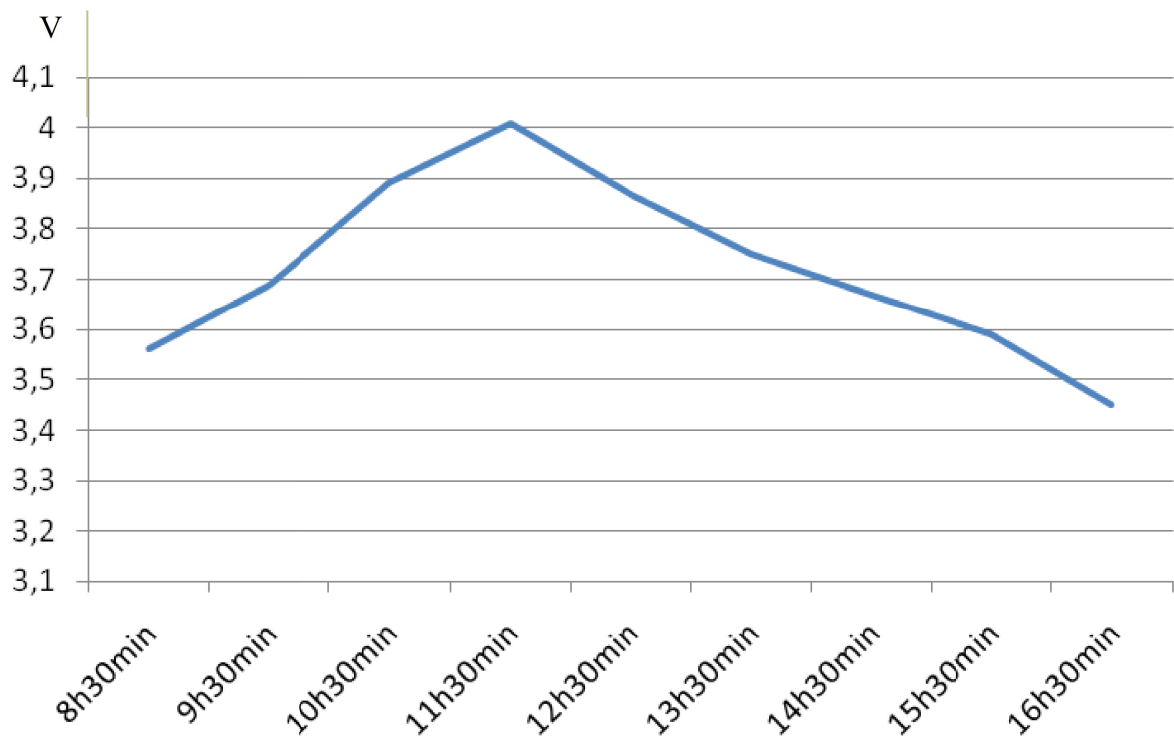


Figura 32: Gráfico da Voltagem x Tempo no experimento Material Interno.

3.4. Vedação da Estufa

Ao realizar o experimento, o dia encontrava-se ensolarado com poucas nuvens. Dessa forma, ao fim do dia obteve-se a figura 33 e figura 34.

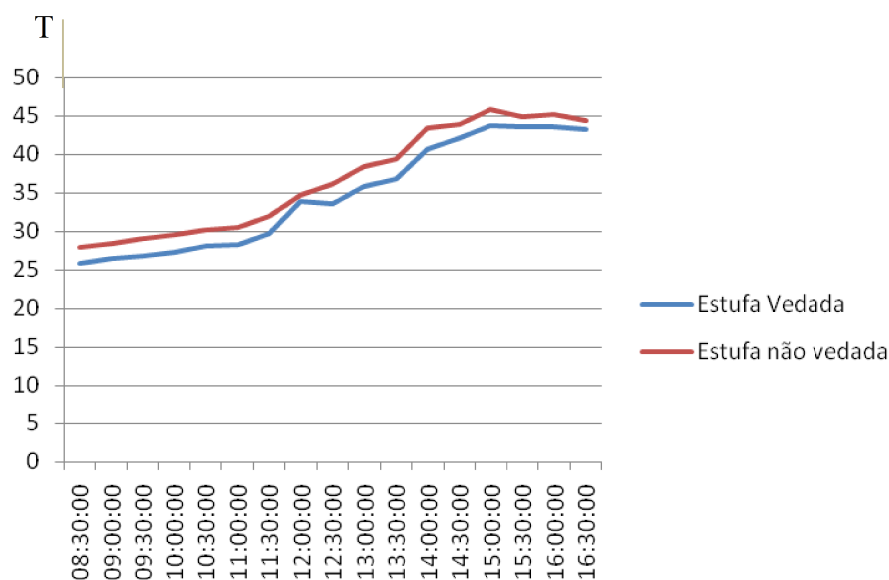


Figura 33: Gráfico da Temperatura x Tempo da estufa vedada e não vedada.

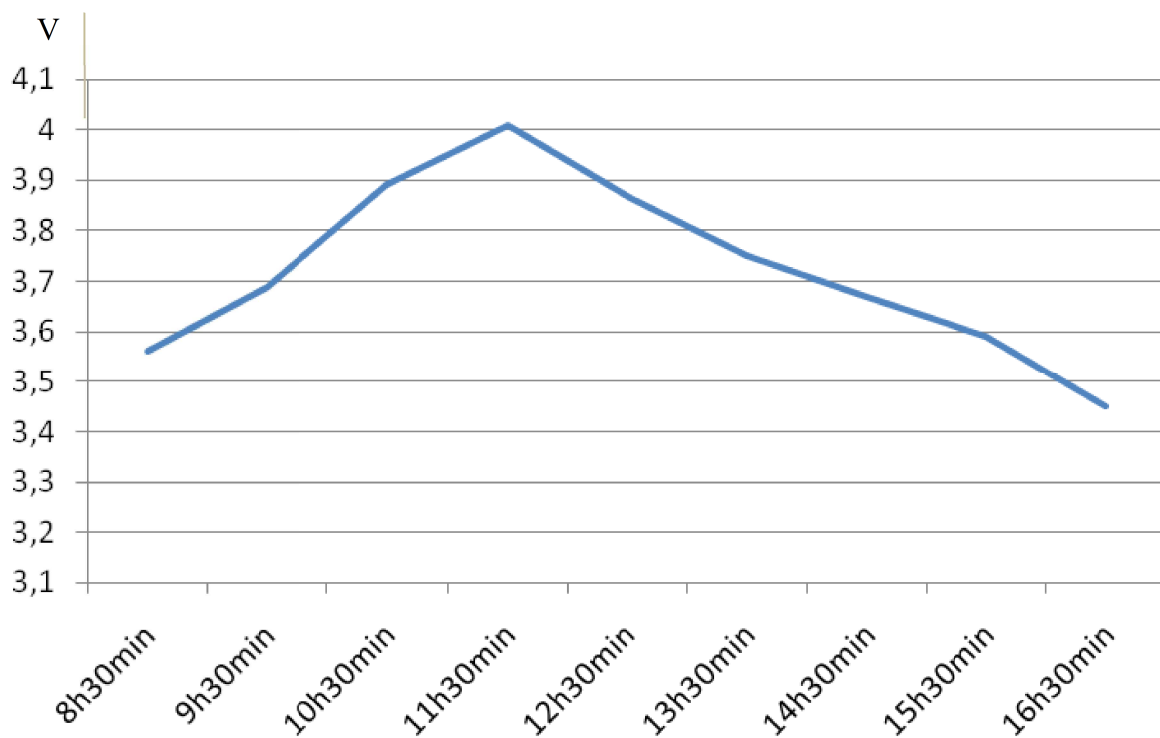


Figura 34: Gráfico da Voltagem x Tempo no experimento Material do Tubo.

4. ANÁLISE

A partir dos gráficos de cada experimento e através das equações mostradas no tópico 2.2, foram obtidos as seguintes análises.

4.1. Tamanho da Estufa

| | $Q_{12}(\text{J})$ | $Q_T(\text{J})$ | $\eta(\%)$ |
|---------------|--------------------|-----------------|------------|
| Exp. A | 306600 | 6642979 | 4,6 |
| Exp. B | 285600 | 6793956 | 4,2 |
| Exp. C | 294000 | 7095910 | 4,1 |
| Exp. D | 264600 | 7246886 | 3,6 |

Analisando os resultados, pode-se perceber que o sistema construído com garrafas PET de 600 ml apresentou maior eficiência. A hipótese para que isso tenha ocorrido advém do menor diâmetro dessa garrafa. As curvas de todos os tamanhos de garrafa são ligeiramente semelhantes já que a irradiação é a mesma para todos os sistemas. Entretanto, há uma parcela baixa de perda de energia que se refere ao aquecimento do ar do interior da garrafa pelo tubo pintado de preto. Como a garrafa PET de 600 ml possui diâmetro menor, o volume de ar interno para ser aquecido também é menor. Dessa forma, com a mesma quantidade de fluxo de energia absorvido pela célula, mas menor volume de ar para ser aquecido, mais energia é utilizada no aquecimento da água no tubo. Além disso, é importante notar que o aumento do diâmetro da garrafa ocasiona o aumento da área do coletor. Mas como a absorção é ocasionada simplesmente pelos tubos pintados de preto e todos os sistemas possuem a mesma área superficial de tubos, o aumento do coletor devido ao aumento do diâmetro da garrafa gera uma diminuição da eficiência do coletor. A partir das conclusões anteriores e da comparação desse experimento com o experimento “material do tubo”, é possível verificar que a principal função das garrafas ao redor do tubo é a não perda de energia através da convecção pelo ar externo em movimento que poderia ocorrer caso o tubo estivesse sem proteção.

Além disso, nota-se duas variações acentuadas no gráfico. Dentre as explicações, pode-se ter como hipótese que nesses momentos, o sol foi encoberto por nuvens deixando constante a temperatura das 12h às 12h30min e das 13h às 13h30min.

4.2. Material do Tubo

| | $Q_{12}(\text{J})$ | $Q_T(\text{J})$ | $\eta(\%)$ |
|---------------|--------------------|-----------------|------------|
| Exp. A | 840 | 286918 | 0,29 |
| Exp. B | 754 | 215189 | 0,35 |
| Exp. C | 250 | 286918 | 0,08 |

Observou-se uma queda bruta na temperatura no decorrer da tomada de dados. Entretanto, ao mesmo tempo não foi visualizada nenhuma mudança na insolação e presença de nuvens. Mas, percebeu-se que ao entardecer o índice de vento aumentou. Dessa forma, concluiu-se que não foi possível obter os dados com os tubos em exposição direta ao ambiente. Isso ocorreu, pois o coeficiente de condutibilidade térmica dos materiais experimentados são significativamente altos fazendo com que a transferência de calor por convecção devido ao vento atuasse de forma expressiva.

Para resolver esse problema, o experimento necessitaria ser desenvolvido com uma proteção contra o vento a fim de se medir apenas a influência da radiação. Entretanto, mesmo assim foi possível diagnosticar que dentre os materiais trabalhados, o cobre apresentou maior diferença de temperatura dentre o início do experimento até o ponto de maior radiação do dia. Sendo assim, nesse tubo o volume d'água absorveu maior quantidade de energia. Mas como já comentado, seria necessário garantir que essa energia não fosse perdida por outros meios de transferência de calor como a convecção.

Mesmo o cobre apresentando a melhor curva na absorção de calor, esse material não foi escolhido para desenvolver o projeto final por ter um preço quatro vezes maior que o material mais barato. Entretanto, pode-se argumentar que o cobre também apresenta propriedades que aumentam o tempo de vida útil do aquecedor. Mesmo assim, é necessário enfatizar que um dos objetivos é deixar o custo do projeto o menor possível mesmo que para isso seja necessário baixar o tempo de vida útil. Outro fator é que o mercado não disponibiliza tubos de cobre de 20mm de diâmetro. Sendo assim, não há um ajuste fino entre o tubo e a

Garrafa PET. Portanto, seria necessário projetar uma espécie de coxim para suportar o tubo na região central da boca da garrafa.

4.3. Material Interno

| | $Q_{12}(\text{J})$ | $Q_T(\text{J})$ | $\eta(\%)$ |
|---------------|--------------------|-----------------|------------|
| Exp. A | 317520 | 4475923 | 7,0 |
| Exp. B | 337260 | 4475923 | 7,5 |
| Exp. C | 367500 | 4475923 | 8,2 |
| Exp. D | 369600 | 4475923 | 8,3 |

O experimento A é feito com latas de alumínio sem pintura na superfície superior com raspa de pneu na parte inferior. A partir disso busca-se receber radiação direta do sol e através da reflexão na lata de alumínio (a superfície do alumínio por não estar pintada exerce a função de espelho) que se encontra na parte inferior da garrafa. Não há contato entre o tubo e a lata de alumínio. Além disso, a raspa de pneu concentrada na face inferior da lata de alumínio possui o objetivo de diminuir qualquer tipo de transferência de calor por condução que pudesse acontecer da lata para a superfície da garrafa. Entretanto, esse experimento apresentou a menor porcentagem de absorção solar, demonstrando não ser um meio eficaz para tal função.

O experimento B teve a embalagem Tetrapak pintada de preto (Alano, 2009) em contato direto com o tubo aumentando a área de absorção solar. Entretanto, talvez pela questão de ter sido utilizadas garrafas PET de 0,6ml ao invés de 2.0L como o projeto original indica, a eficiência se mostrou baixa. Embora nesse caso a utilização de garrafas PET de 0,6ml possa ter parecido como um problema para esse específico experimento, é interessante frisar que o foco final desse estudo é otimizar a tecnologia de aquecedores solares de baixo custo para habitações de aglomerações subnormais. Sendo assim, qualquer diminuição na área da placa de absorção é significativamente eficiente para a implantação da solução.

O experimento C teve a lata de alumínio com a superfície superior pintada de preto em contato direto com o tubo aumentando também a área de absorção solar. Esse experimento apresentou um dos melhores resultados. Esse resultado deve ter surgido devido às propriedades do alumínio. O alumínio quando pintado de preto exerce a mesma função da embalagem de TetraPak do experimento anterior, entretanto, o alumínio possui um coeficiente

de condução térmico maior que o outro material. Dessa forma, uma maior porcentagem do calor obtido por radiação tende a ser absorvido pelo tubo central.

O experimento D foi igual ao experimento C, entretanto apresentou a raspa de pneu anexada a lata de alumínio na região inferior. Esse experimento foi desenvolvido no intuito de determinar o grau de eficiência de um isolante térmico na região inferior do absorvedor de radiação levando em conta o experimento anterior. Entretanto, embora possua uma eficiência maior, a razão dessa eficiência em relação com o não uso da raspa de pneu não foi significativo, visto que o trabalho apresentado para anexar a raspa de pneu a lata de alumínio foi extremamente excessivo.

4.4. Vedação da Estufa

| | $Q_{12}(\text{J})$ | $Q_T(\text{J})$ | $\eta(\%)$ |
|---------------|--------------------|-----------------|------------|
| Exp. A | 367500 | 4475923 | 8,2 |
| Exp. B | 401100 | 4475923 | 8,9 |

Como pode ser observado nos gráficos obtidos, o experimento com as garrafas PET vedadas entre si apresentou um resultado melhor que o experimento sem vedação entre as garrafas. Isso ocorre, pois o tubo interior ao aquecer-se devido à radiação, por consequência aquece também o ar interno da estufa. Isso ocasiona o aumento da pressão interna, fazendo com que o ar quente seja expelido para fora da estufa e juntamente à energia absorvida por essa porção do gás. Esse fato pode ser caracterizado como uma convecção natural. Caso haja a vedação, esse ar não possui escape. Dessa forma, o ar interno mantém-se aquecido garantindo melhor eficiência quando as garrafas PET encontram-se vedadas. Mas um ponto deve ser considerado: é necessário encontrar a máxima pressão interna para que se consiga validar a resistência da garrafa PET e dos pontos de vedação para que a estufa não se rompa. Pode-se também dimensionar uma válvula de escape para caso ocorra um aumento significativo da pressão interna devido ao aumento da temperatura na estufa. Além disso, deve-se levar em conta a temperatura a que esses componentes estarão no momento que se obter tal pressão visto que as propriedades dos materiais podem se alterar.

Por fim, a estufa ao ser selada garante que não haja entrada de água do ambiente (chuva) quando o coletor estiver no telhado. Dessa forma, quando o ar interno aquecer-se a

garrafa não apresentará gotículas de água na superfície interna, também conhecida como “suor”. Caso não haja vedação, esse fato ocorrerá ocasionando a opacidade da garrafa e consequentemente diminuição da absorção solar.

4.5. Análise da Viabilidade Econômica

Como já mencionado, esse estudo possui o objetivo de especificar os pontos importantes da pesquisa para disseminar a tecnologia de aquecedores solares de baixo custo em habitações de aglomerações subnormais. Para isso, um dos pontos que resultou na motivação do desenvolvimento desse projeto foi a descoberta de uma pesquisa que ressaltou que durante o banho, a composição híbrida é mais rentável que o chuveiro elétrico, os aquecedores solares tradicionais, os aquecedores a gás e o boiler elétrico.

“Um banho de oito minutos custa, em média, R\$ 0,27 (entre consumo de água e energia elétrica) no chuveiro híbrido solar e R\$ 0,30 no chuveiro elétrico. O mesmo banho sai por R\$ 0,46 (53,3% a mais do que o chuveiro elétrico) com aquecedores solares tradicionais, R\$ 0,59 (96,6% mais caro) com os aquecedores a gás e R\$ 1,08 (246,6% a mais) com o boiler elétrico” (Cirra., 2010). A tabela a seguir mostra os pontos importantes desse estudo para esse trabalho.

| | Custo (água + energia) | Custo energético |
|--------------------------|------------------------|------------------|
| Chuveiro Elétrico | R\$0,27 | R\$0,09 |
| Sistema Híbrido | R\$0,30 | R\$0,08 |
| Aquecedor Solar | R\$0,46 | R\$0,04 |
| Aquecedor a Gás | R\$0,59 | R\$0,30 |
| Boiler Elétrico | R\$1,08 | R\$0,53 |

A partir dessa motivação, verificou-se que alguns pontos deveriam ser considerados ao adotar a utilização do aquecedor solar de baixo custo. O investimento inicial e o custo de manutenção são os mais importantes deles. O custo da matéria-prima para desenvolver um protótipo do melhor resultado encontrado nesse trabalho com mesma área de um aquecedor solar tradicional está por volta de R\$300,00. Os custos por item podem ser verificados na tabela a seguir.

| Matéria – Prima | Custo (R\$) | Qtde | Total (R\$) | % |
|--------------------------------------|--------------------|-------------|--------------------|----------|
| Reservatório (unidade de 310L) | R\$ 98,47 | 1 | R\$ 98,47 | 33,97 |
| Tubo Central (metro) | R\$ 1,55 | 40 | R\$ 62,00 | 21,39 |
| Tubo de Conexão (metro) | R\$ 1,55 | 4 | R\$ 6,20 | 2,14 |
| Conexão T (unidade) | R\$ 0,63 | 78 | R\$ 49,14 | 16,95 |
| Conexão L (unidade) | R\$ 0,35 | 2 | R\$ 0,70 | 0,24 |
| Lixa (unidade) | R\$ 2,00 | 1 | R\$ 2,00 | 0,69 |
| Garrafa PET (kg) | R\$ 1,15 | 8,96 | R\$ 10,30 | 3,55 |
| Lata de Alumínio (kg) | R\$ 5,00 | 2,24 | R\$ 11,20 | 3,86 |
| Pincel (unidade) | R\$ 15,00 | 1 | R\$ 15,00 | 5,17 |
| Cola (unidade) | R\$ 8,50 | 1 | R\$ 8,50 | 2,93 |
| Conexão do Reservatório (unidade) | R\$ 7,00 | 2 | R\$ 14,00 | 4,83 |
| Tubo de Conexão do Reserv. (unidade) | R\$ 1,55 | 8 | R\$ 12,40 | 4,28 |
| Preço Total | | | 289,91 | |

Verificando a tabela anterior, percebe-se que mais que 30% do custo da construção do produto é referente ao reservatório. Dessa forma, percebe-se que um estudo mais aprofundado no reservatório com o intuito de aumentar sua eficiência e diminuir seu custo é algo que deve ser analisado.

Já o custo de mão de obra pode ser feita de diversas formas. A construção do aquecedor pela mesma pessoa que vai utilizar ou pagar para alguém construir são as duas opções mais utilizadas. Se a solução escolhida for o desenvolvimento próprio, pode-se dizer que o custo é praticamente nulo. Entretanto, caso seja necessário contratar mão de obra para construção e instalação, o custo aumenta por volta de R\$160,00. Os custos dos serviços podem ser vistos a seguir.

| Serviço | Custo (R\$) | Qtde | Total (R\$) |
|------------------------------|--------------------|-------------|--------------------|
| Mão de Obra – Construção (h) | R\$ 4,00 | 21,80 | R\$ 87,17 |
| Mão de Obra – Instalação (h) | R\$ 4,00 | 8 | R\$ 32,00 |
| Refeição (dia) | R\$ 4,00 | 4 | R\$ 16,00 |
| Seguro Médico | R\$ 6,23 | 4 | R\$ 24,92 |

Por fim, um cenário que se pode desenvolver é a produção em escala a partir de uma organização com ou sem fins lucrativos. Dessa forma, os custos administrativos podem aumentar o produto por volta de 10%, ou seja, R\$ 50,00.

No intuito de comparação, três empresas que vendem aquecedores solares tradicionais que atendem a um público-alvo semelhante que o aquecedor solar desse trabalho visa atender, foram pesquisadas. Os valores encontrados estão a seguir:

| Empresa | Reserv. | Tipo de Reserv. | Painel | N de Painéis | Instalação | Total |
|------------|--------------|-----------------|-----------|--------------|--------------|--------------|
| Aqua Therm | R\$ 1.231,00 | 300 L | R\$418,00 | 2 | R\$ 590,00 | R\$ 2.657,00 |
| Aquece Bem | R\$ 1.411,00 | 400 L | R\$405,00 | 4 | R\$ 1.590,00 | R\$ 4.621,00 |
| Confor Sol | R\$ 1.837,50 | 300 L | R\$577,50 | 3 | R\$ 500,00 | R\$ 4.070,00 |

Apesar dos aquecedores solares tradicionais possuírem um custo relativamente alto, eles possuem outras vantagens como a possível utilização de água aquecida 24h/dia e a vida útil é de quinze a vinte anos.

Sendo assim, a partir dos dados anteriores foi possível obter uma análise anual entre as principais tecnologias de aquecimento desse trabalho:

| | Capital (R\$) | Energia Total (kWh) | Energia Aquecedor (kWh) | Custo Energético (R\$) | Manutenção (R\$) | Total (R\$) |
|-------------------|---------------|---------------------|-------------------------|------------------------|------------------|-------------|
| Chuveiro Elétrico | 20,00 | 460 | 0 | 131,58 | 0,00 | 151,58 |
| Híbrido (ASBC) | 60,00 | 460 | 128 | 94,97 | 20,00 | 174,97 |
| Aquecedor Solar | 132,85 | 460 | 460 | 58,4 | 50 | 241,25 |

Apesar do sistema híbrido com ASBC não apresentar melhor desempenho que o chuveiro elétrico, pode-se dizer que é possível obter melhores resultados levando em conta as hipóteses a seguir:

- **Classes D e E como público alvo:** O aquecedor solar desse trabalho busca ser utilizado no fim do dia para banho diário e tem durabilidade de um ano e meio (após esse período, como o tubo PVC não é apropriado para altas temperaturas por um longo tempo, os tubos apresentaram mudanças de propriedades como baixa rigidez - quebradiço - e deformação devido ao peso da água). Sendo assim, apesar de em longo prazo, o aquecedor solar construído nesse trabalho apresentar um custo à primeira vista maior que os aquecedores solares tradicionais, ao se analisar o público alvo em que o mesmo busca atingir, esse custo não se torna fator trivial. Possui-se o intuito de atingir pessoas que moram em aglomerações subnormais. Os moradores dessas regiões não possuem orçamento para um alto investimento inicial em uma solução desse tipo. Pode-se pensar em financiamento, mas a realidade das financeiras com juros orbitantes e necessidade de comprovação de renda mostra que tal alternativa piora a

situação de vida dessas classes. Além disso, a casa onde vivem por ser desenvolvida de materiais sem alta durabilidade não atinge mais de 10 anos de vida útil.

- **Escalabilidade:** Por fim, é interessante considerar que os materiais utilizados para construir os experimentos foram obtidos em lojas de varejo. Além disso, foram comprados em pequena quantidade. Esse fato resultou em uma porcentagem do custo de construção do aquecedor de mais de 50% referente apenas a tubos e conexões. Sendo assim, caso haja algum tipo de produção que deixe a solução em escala e, portanto, possibilite a compra direta de fornecedores, sabe-se que os custos por unidade tendem a diminuir.
- **Construção e Instalação própria:** O custo para construir e instalar é quase 1/3 do valor do projeto como um todo. Portanto, se a pessoa que vai utilizar a solução se propor a construir e instalar o projeto ela mesma, visto que tais tarefas não requerem conhecimentos específicos, ou seja, podem ser desenvolvidas com conhecimento básico, o custo torna-se relativamente menor que as soluções tradicionais.

CONCLUSÃO

Com o objetivo de estudar diferentes projetos de aquecedores solares de baixo custo, esse projeto iniciou-se com uma revisão bibliográfica sobre diferentes conceitos dessa tecnologia. Essa ação teve o objetivo de verificar projetos já desenvolvidos e entender os fenômenos que ocorrem no funcionamento do aquecedor solar. Além disso, outros projetos que buscam a mesma atividade fim como chuveiro elétrico, aquecedor a gás, boiler elétrico e aquecedor solar tradicional foram também estudados para buscar soluções já implementadas e comparar essas soluções com o resultado final desse trabalho. Posteriormente, desenvolveu-se o aparato experimental e instrumental. Devido ao baixo custo, testou-se um circuito eletrônico com um sensor de temperatura na ponta para medir o aquecimento e resfriamento da água. Entretanto, esse circuito ao ser calibrado apresentou um desvio muito acentuado não sendo assim satisfatório para a experimentação. Dessa forma, optou-se por adquirir um termômetro do modelo Gulterm 180. Observou-se também que a melhor forma para medir a radiação é a utilização de um piranômetro. Entretanto, o acesso ao mesmo não foi viável devido ao seu custo. Portanto, utilizando-se uma célula fotovoltaica e um estudo (Oliveria e Machado, 2000) sobre a irradiação anual na cidade de São Paulo a fim de estimar a irradiação nos dias de experimentação. Portanto, sabendo-se também o volume a ser estudado em cada experimento, foi possível ter os três parâmetros necessários (temperatura, irradiação e volume do fluido) para o cálculo da quantidade de energia ao qual o sistema seria exposto e a quantidade de energia realmente utilizada para o aquecimento da água. Então, a partir desses dois resultados, foi possível estimar a eficiência do protótipo de aquecedor solar.

Após esses estudos, os experimentos foram desenvolvidos. Primeiramente, confeccionaram-se ferramentas que pudessem ajudar na fabricação dos protótipos. Posteriormente, cada experimento foi desenvolvido: quatro coletores com diferentes tamanhos de garrafas PET, três tubos de mesmo tamanho, mas diferentes materiais, quatro coletores do melhor resultado do experimento *tamanho da estufa* com diferentes materiais internos e dois coletores do experimento C do experimento *material interno* com garrafas PET vedadas e não-vedadas. A análise *Tamanho da Estufa* foi realizada em um dia anterior as outras análises. Essas análises posteriores foram desenvolvidas todas no mesmo dia. Isso explica a semelhança em seus gráficos de irradiação.

Obtida as medições, foram construídos gráficos para melhor entender os sistemas. Além disso, as quantidades de calor total e de cada experimento, bem como a relação entre eles, ou seja, a eficiência foi determinada. Tendo-se esses dados em mãos, foi possível concluir os melhores resultados em cada experimento. Eles são mostrados a seguir:

- Experimento “Tamanho da Estufa”: garrafa PET de 600 ml;
- Experimento “Material do tubo”: tubo de cobre;
- Experimento “Material Interno”: lata de alumínio pintada de preto na superfície superior e sem película de raspa de pneu na superfície inferior;
- Experimento “Vedação da Estufa”: garrafas PET seladas entre si.

Portanto, a partir dos dados de aquecedores solares tradicionais e chuveiros elétricos, optou-se por compará-los com os do experimento que utilizou latas de alumínio pintadas de preto na superfície superior e sem película de raspa de pneu na superfície inferior. Os resultados mostraram que, apesar do sistema híbrido com ASBC apresentar uma maior economia de energia em relação às outras tecnologias, ele não se mostrou mais viável economicamente que o chuveiro elétrico.

Entretanto, ao levantar características essenciais desse projeto: classes C e D como público alvo do projeto; escalabilidade e construção e instalação própria, observa-se que custos importantes que compõem o total podem ser diminuídos melhorando significativamente o desempenho da solução.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABINEE, G. C.; CIRRA, **Avaliação do consumo de insumos (água, energia elétrica e gás) em chuveiro elétrico, aquecedor a gás, chuveiro híbrido solar, aquecedor solar e aquecedor de acumulação elétrico**, Escola Politécnica da USP, 2010.

ALANO, J. A., **Manual do Aquecedor Solar**, Assessoria de Responsabilidade Social Empresarial, Assessoria de Comunicação Social, CELESC, Maio de 2009.

ELKINGTON, J., **Cannibals with Forks: The Triple Bottom Line of 21st Century Business** (The Conscientious Commerce Series), New Society Publishers, 1998.

GADGIL, A., **Design for Sustainable Communities**. Domestic Solar Water Heater for Developing Countries - Energy & Resources Group ER 291, Final Report, 2007.

GITMAN, L. J., **Princípios de Administração Financeira**, 7.ed. São Paulo: Editora Harbra, 1997.

INCROPERA F. P.; DE WITT, D. P., **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**, 4ªEd, Editora LTC, 1998.(Livro texto).

MARKEN C., **Solar collectors - behind the glass**. Homepower magazine 133,70-76, 2009

OLIVEIRA, A. P. ; ESCOBEDO, J. F. ; MACHADO, A. J., **Estudo Observacional da Radiação Solar na Cidade de São Paulo..** In: XI Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2000, Rio de Janeiro. Anais do XI Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2000.

SCHMIDT, C.; GOEZTBERGER, A., **Single-tube integrated collector storage systems with transparent insulation and involute reflector**, Solar Energy, Volume 45, Issue 2, Pages 93-100, 1990.

SCHUMACHER E. F., **Small is beautiful: Economics as if people mattered harper Perennial**, 2nd edition, September 27, 1989.

SMYTH, M.; EAMES, P.C.;NORTON, B. **Integrated collector storage solar water heaters**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 10, 503-538, 2006.

WYLEN, G. J. V., SONNTAG, R. E. , BORGNAKKE, C., **Fundamentos da Termodinâmica**, 7.ed., Editora Edgard Blucher, 2009 (Livro texto)

YUNUS, M., **Banker to the poor: micro-lending and the battle against world poverty**, New York: PublicAffairs, 2003.