

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**IMPLANTAÇÃO DE UM SISTEMA DE AQUECIMENTO SOLAR DE ÁGUA  
DE BAIXO CUSTO**

Erik Seifer Januska

São Paulo

2017

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

Implantação de um sistema de aquecimento solar de água de baixo custo

Trabalho de conclusão de curso  
apresentado ao Departamento de  
Engenharia Mecânica da Escola  
Politécnica para obtenção do diploma de  
Engenheiro Mecânico.

Erik Seifer Januska

Orientador: Prof. Dr. Marcos de Mattos  
Pimenta

Área de Concentração: Engenharia  
Mecânica

São Paulo

2017

### **Catálogo-na-publicação**

Januska, Erik Seifer

Implantação de um sistema de aquecimento solar de água de baixo custo / E. S. Januska. -- São Paulo, 2017.  
41 p.

Trabalho de Formatura – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Aquecimento solar 2. Coletor plano 3. Termossifonagem  
I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica II.t.

## **Resumo**

Neste projeto leva-se em conta o consumo residencial de água e energia elétrica no Brasil, com foco na parcela devido ao chuveiro elétrico, e coloca-se em discussão alternativas viáveis de sistemas de coleta de água proveniente da chuva e aquecimento da mesma para fins não potáveis. É abordada a forma como a radiação proveniente do sol pode realizar um aquecimento autossuficiente sem a utilização de nenhuma forma de energia que não a do sol. Aspectos construtivos e teóricos sobre transferência de calor são discutidos de forma a elaborar uma bancada de aquecimento d'água de baixo custo e fácil manuseamento que eleve a temperatura da água até 52°C. A banca foi exposta no Espaço Vida localizado no Parque Villa-Lobos, onde foram registradas as temperaturas ao longo do dia.

Palavras-chave: Aquecimento solar. Coletor plano. Termossifonagem.

### **Abstract**

This project takes into account the residential demand of water and electric power in Brazil, focusing on the energy consumed by the shower, and puts in discussion possible alternatives to collect water from the rain and increase its temperature for domestic non potable uses for water. It is discussed the way sun radiation can heat up without using any power input other than radiation. Aspects regarding structure aspects and heat transfer are discussed with the intent to result in a low-cost and easy-handling system which can heat water up to 52°C. The didactic physical model was exhibited in Espaço Vida located at Parque Villa-Lobos and the temperatures were measured through the day.

Keywords: Solar heating. Plain collector. Siphoning.

## ÍNDICE

|                                                                    |    |
|--------------------------------------------------------------------|----|
| 1. INTRODUÇÃO.....                                                 | 1  |
| 2. REVISÃO DA LITERATURA .....                                     | 5  |
| 2.1 Cenário energético brasileiro .....                            | 5  |
| 2.2 Modelos .....                                                  | 7  |
| 2.2.1 Arranjo estrutural e elementos básicos .....                 | 9  |
| 2.2.2 Fluxo do fluido .....                                        | 11 |
| 2.2.3 Radiação solar .....                                         | 12 |
| 2.2.4 Transferência de Calor.....                                  | 18 |
| 2.3 Coletor solar plano e dimensionamento – Lei de São Paulo ..... | 19 |
| 3. COMPONENTES DO SISTEMA.....                                     | 22 |
| 3.1 Reservatório .....                                             | 24 |
| 3.2 Coletor .....                                                  | 26 |
| 3.3 Coleta de águas pluviais.....                                  | 27 |
| 3.4 Filtragem de impurezas .....                                   | 28 |
| 3.5 Melhorias no rendimento .....                                  | 30 |
| 3.6 Arranjo estrutural .....                                       | 30 |
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....                                    | 34 |
| 5. CONCLUSÃO .....                                                 | 38 |
| 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....                                | 40 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1-1 Municípios interconectados pelo Sistema Interligado Nacional - SIN - 2015 (Fonte: IBGE).....                                                                                                                                                                                            | 3  |
| Figura 2-1 Consumo de Energia no Brasil por Setor - 1990, 2000, 2010 e 2012 (Fonte: EPE, 2014). ....                                                                                                                                                                                               | 5  |
| Figura 2-3: Sistemas de aquecimento auxiliar para o solar. (Disponível em: <a href="http://wgsol.com.br/sistemas-de-aquecimento-auxiliar-para-o-solar/">http://wgsol.com.br/sistemas-de-aquecimento-auxiliar-para-o-solar/</a> . Acessado em: 03 de Março de 2017.) .....                          | 10 |
| Figura 2-4: Radiação solar total $GT$ e as interferências ao longo do trajeto. ....                                                                                                                                                                                                                | 16 |
| Figura 2-5: Radiação solar direta e sua componente normal, no caso de um coletor plano e um inclinado. (Fonte: Laerte, 2004).....                                                                                                                                                                  | 16 |
| Figura 1-6: Irradiação solar no plano horizontal para três localidades próximas ao ponto de instalação. (CRESESB, 2016) .....                                                                                                                                                                      | 17 |
| Figura 3-1 Esquema representativo do sistema de aquecimento de água. Fonte: LAERTE, 2004.....                                                                                                                                                                                                      | 23 |
| Figura 3-3: Exemplos de disposição dos tubos do coletor. Disponível em <a href="http://www1.eere.energy.gov/solar/sh_basics_collectors.html">http://www1.eere.energy.gov/solar/sh_basics_collectors.html</a> . Fornecido por US Dept. of Energy. Acessado em 08 de Abril de 2017. ....             | 27 |
| Figura 3-3: Filtro de água da chuva de baixo custo. Disponível em: <a href="http://www.sempresustentavel.com.br/hidrica/minicisterna/filtro-de-agua-de-chuva.htm">http://www.sempresustentavel.com.br/hidrica/minicisterna/filtro-de-agua-de-chuva.htm</a> . Acessado em: 01 de Maio de 2017. .... | 29 |
| Figura 3-4: Perfil alveolar do forro de PVC. ....                                                                                                                                                                                                                                                  | 31 |
| Figura 3-5: Vista isométrica do modelo do coletor solar desenvolvido .....                                                                                                                                                                                                                         | 32 |
| Figura 3-6: Vista explodida do conjunto do coletor .....                                                                                                                                                                                                                                           | 33 |
| Figura 4-1: Equipamento montado no Espaço Vida do Pq. Villa-Lobos .....                                                                                                                                                                                                                            | 36 |
| Figura 4-2: Temperaturas ao longo do dia de ensaio (24/11/2017) .....                                                                                                                                                                                                                              | 37 |
| Figura 5-1: Custos do projeto, por subsistema .....                                                                                                                                                                                                                                                | 39 |

## ÍNDICE DE TABELAS

|                                                                                 |    |
|---------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 3-1: Parâmetros de Qualidade de água pluvial para usos não-potáveis..... | 20 |
| Tabela 3-2: Lista de peças do coletor.....                                      | 33 |
| Tabela 4-1: Custos relativos à aquisição de materiais do coletor.....           | 34 |
| Tabela 4-2: Custos relativos à aquisição de materiais do reservatório.....      | 35 |
| Tabela 4-3: Custos relativos à aquisição de outros materiais.....               | 35 |
| Tabela 4-4: Dados do ensaio (24/11/2017).....                                   | 37 |



## 1. INTRODUÇÃO

Em um levantamento realizado pelo IBOPE [2], foi constatado que 1 em cada 4 brasileiros atribui nota zero, numa escala de zero a dez, à maneira com que a energia elétrica tem sido tratada no Brasil pelas autoridades, com destaque para os preços cobrados e os racionamentos de energia realizados ao longo do ano.

Da capacidade total de geração de energia elétrica, apenas 0,01% é constituída por painéis fotovoltaicos [1], não representando um auxílio confiável para a geração pública de energia no Brasil; seu uso é restringido a locais específicos do território nacional, tendo como principal representante o estado do Ceará, com aproximadamente 67% da produção nacional. O restante do território ainda avança timidamente no uso da luz solar para geração de energia. O cenário aponta uma grande urgência para que sejam adotadas medidas alternativas de geração e distribuição de energia ao longo do território brasileiro, que apresenta diversas regiões em que o acesso à rede elétrica ainda não é possível.

O estudo Logística de Energia 2015 - Redes e Fluxos do Território, realizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) [3], mostra dados alarmantes sobre a questão, destacando como grande desafio a questão de distribuição e atendimento da demanda das regiões menos favorecidas pelo sistema elétrico e pelos centros de produção de energia. O estudo indica uma excessiva concentração do poder de geração e distribuição de energia elétrica nas regiões Sul, Sudeste e parte da Centro-Oeste do país, sendo o estado do Rio de Janeiro, sozinho, responsável pela produção de 68,4% da produção de petróleo e 34,8% da produção de gás natural, e São Paulo 39% da capacidade de refino de petróleo. A densidade, tanto da malha energética (Fig. 1-1) quanto das unidades produtoras, se distribuiu historicamente de acordo com a presença ou não de centros industriais nessas regiões, que demandam uma quantidade maior de energia para alimentar seus processos.

Porém, para um país com as dimensões do Brasil, a logística para que a energia produzida seja igualmente aproveitada em outras regiões esbarra em dificuldades financeiras, políticas e topológicas, constituindo um complexo desafio para o país. Nesse contexto, mostra-se como uma alternativa a adoção de fontes de energia renovável, em que pequenos centros de geração localizados em lugares mais afastados e com pouca densidade demográfica podem suprir parcialmente a demanda energética e até mesmo desafogar a malha de transmissão dos grandes centros urbanos através da inserção de fontes secundárias de geração. Para tanto, é urgente a difusão do papel das fontes renováveis como alternativa para atender uma demanda tão descentralizada e marginal da realidade dos centros urbanos, fornecendo informações como custos, desempenho e manutenção.

Apesar do Brasil já dispor, em alguns locais, de políticas subsidiárias à microgeração de energia renovável, a prática ainda está distante do cotidiano da população, tendo uma participação ainda tímida na matriz nacional. A energia eólica, por exemplo, mostrou um acentuado crescimento, com expansão de aproximadamente 560% de 2010 a 2014 [4], porém a participação dessa fonte de energia na matriz brasileira ainda se mostra insatisfatória, constituindo 2,1% do total de 2014.

Assim, o presente projeto encontra sua utilidade na aproximação entre conceito de geração de energia renovável e o cidadão que, ao ser apresentado a um sistema físico que funcione e seja de simples implementação e resultados imediatos, tem a possibilidade de visualizar a tecnologia solar como algo que não está tão distante de sua realidade cotidiana.

O projeto tem como objetivo o desenvolvimento de uma bancada didática que seja capaz de integrar a captação de água pluvial e o aquecimento da mesma. Os materiais a serem utilizados em sua construção deverão ser eficientes a ponto de elevar a temperatura da água a um patamar agradável (50L, em

torno de 52°C), ao mesmo tempo em que se apresentam acessíveis financeiramente, de forma que o projeto como um todo mantenha seu caráter de baixo custo. Tendo tal fator como crítico do projeto, procura-se realizar um processo iterativo de busca de materiais e configurações físicas adequadas, de forma a encontrar a melhor alternativa dentro do escopo do presente trabalho. A água acumulada no sistema não é potável, sendo destinada para fins específicos, como piscinas, banhos, limpeza de superfícies, etc. O propósito é que, ao final do projeto, a bancada seja cedida ao Parque Villa-Lobos ou outro potencial local

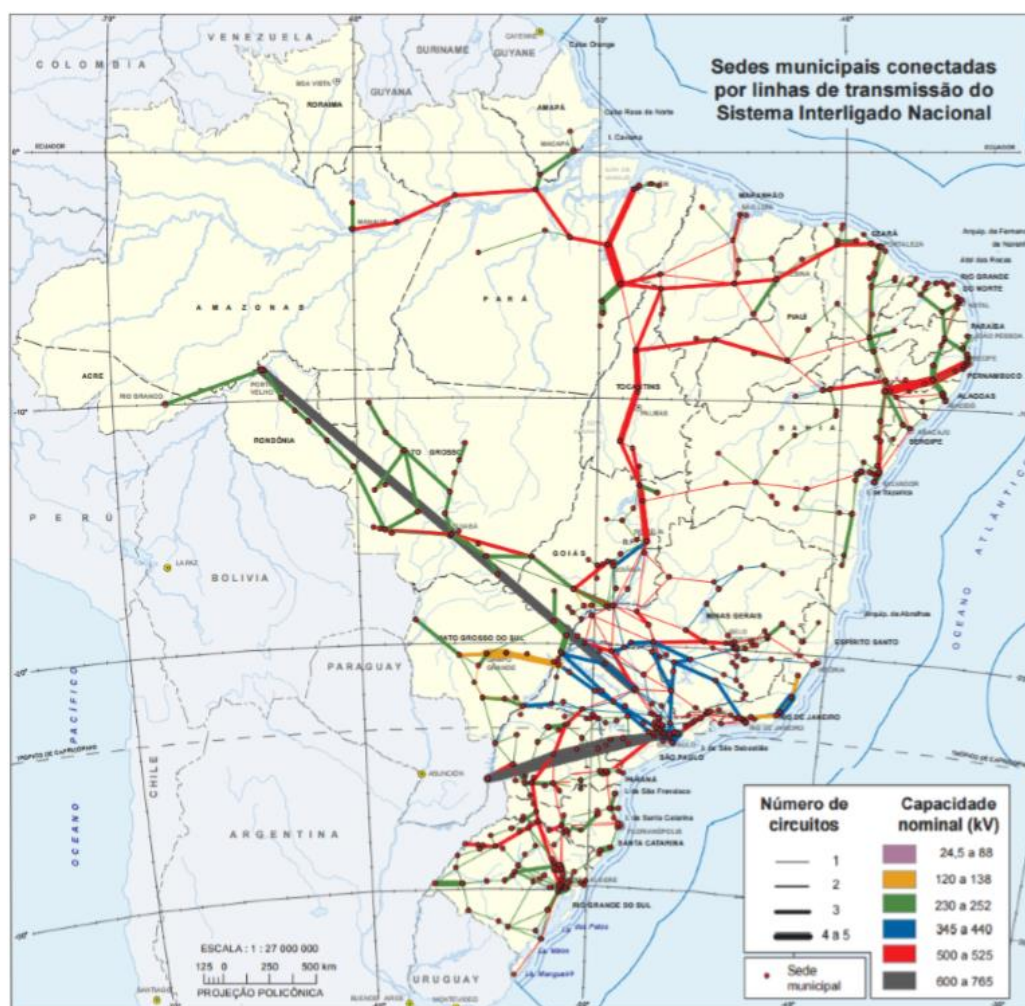


Figura 1-1 Municípios interconectados pelo Sistema Interligado Nacional - SIN - 2015

(Fonte: IBGE)

parceiro para exposição ao público, com enfoque em crianças do Ensino Fundamental e Médio, como forma de conscientização sobre o uso de formas

renováveis de energia como a solar, mostrando a simplicidade dos processos envolvidos e das matérias primas utilizadas. Os conceitos físicos envolvidos, como a transferência de calor por radiação e o fluxo convectivo da água quente e da água fria no interior dos tubos, serão adaptados para um formato de discurso adequado para o público alvo, de forma que o conhecimento sobre os fenômenos térmicos do processo sejam eficientemente comunicados e aplicáveis posteriormente por futuros usuários da bancada. Como uso secundário, o aquecedor solar poderia se destinar a outras funções que o parque possa eventualmente julgar positivas.

## 2. REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 Cenário energético brasileiro

O consumo de energia no Brasil é, historicamente, concentrado para as atividades do Setor Industrial e o de Transporte que, juntos, constituem mais da metade do consumo nacional (EPE, 2014). Tal análise pode erroneamente levar à conclusão de que a demanda residencial de energia não influi significativamente nos problemas e falhas apresentadas pela rede de distribuição brasileira, já que o consumo residencial foi o que mais diminuiu ao longo dos últimos 22 anos (Fig. 2-1). Porém, é essencial levar em consideração as variações desse consumo dia a dia e seus impactos na distribuição energética, tal como o fato da rede residencial possuir graves problemas de sobrecarga em horários de pico, ao mesmo tempo em que apresenta amplos intervalos de tempo com consumo mínimo, fazendo com que frequentemente ocorram interrupções no fornecimento de energia elétrica, danificação de equipamentos, entre outras questões relacionadas a uma demanda excessiva em um determinado horário do dia.

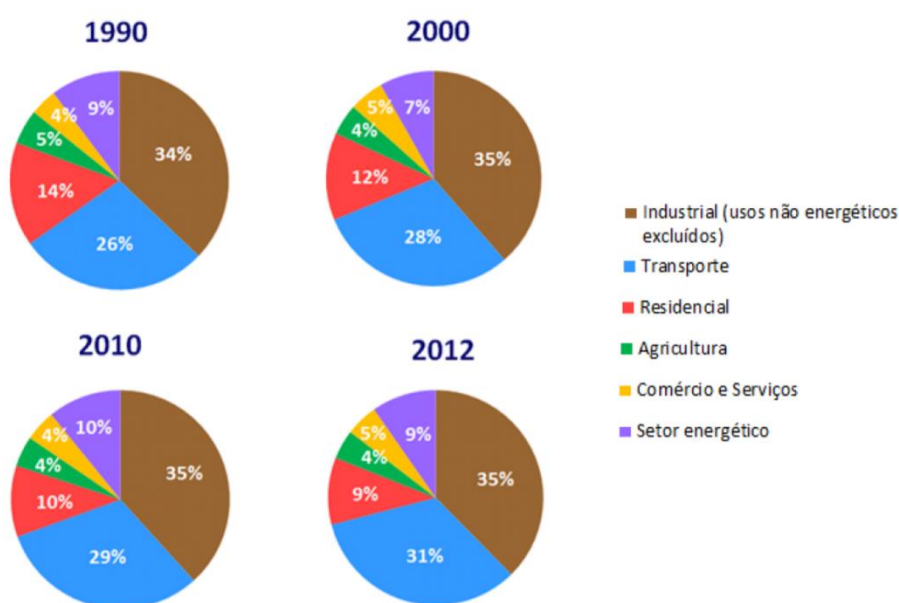


Figura 2-1 Consumo de Energia no Brasil por Setor - 1990, 2000, 2010 e 2012 (Fonte: EPE, 2014).

A energia elétrica consumida residencialmente é destinada a diversos usos, desde a alimentação de eletrodomésticos, condicionadores de ar e refrigeradores, até o aquecimento de água. O perfil de consumo de cada edificação social é decorrente de diversos fatores, como padrões sociais dos residentes, características climáticas da região e época do ano. Para se definir com exatidão qual o modelo adequado de sistema de aquecimento solar para uma determinada residência, deve-se levar em consideração esse perfil de consumo de energia, que pode mudar significativamente entre uma região e outra do país ou até mesmo entre bairros de uma mesma cidade.

No início da década de 90, em instalações residenciais, 32% do consumo total de energia elétrica era destinado ao chuveiro elétrico (PRADO; GONÇALVES, 1992), constituindo uma parte significativa do total gasto em uma residência. Com o decorrer dos anos, o percentual consumido por esse eletrodoméstico nas residências brasileiras foi reduzido como se pode verificar na Figura 2-2, provinda de estudos mais recentes sobre o perfil de consumo de energia elétrica no Brasil. Parte desse fenômeno é explicado pela ainda tímida migração do consumidor brasileiro para formas alternativas de obter água quente para o banho, como o chuveiro a gás e os novos chuveiros híbridos, que utilizam energia elétrica para aquecer a água apenas enquanto a energia do gás ainda não foi capaz de aquecer suficientemente a água.

Apesar de sua participação ter sofrido redução, o aquecimento de água ainda permanece influenciando significativamente a demanda residencial, somando-se a isso a existência de horários de pico em que o consumo conjuntural é extremamente elevado, como citado no parágrafo anterior. Dessa forma, repensar o uso dos chuveiros elétricos nas residências é parte essencial da política de uso consciente de energia.

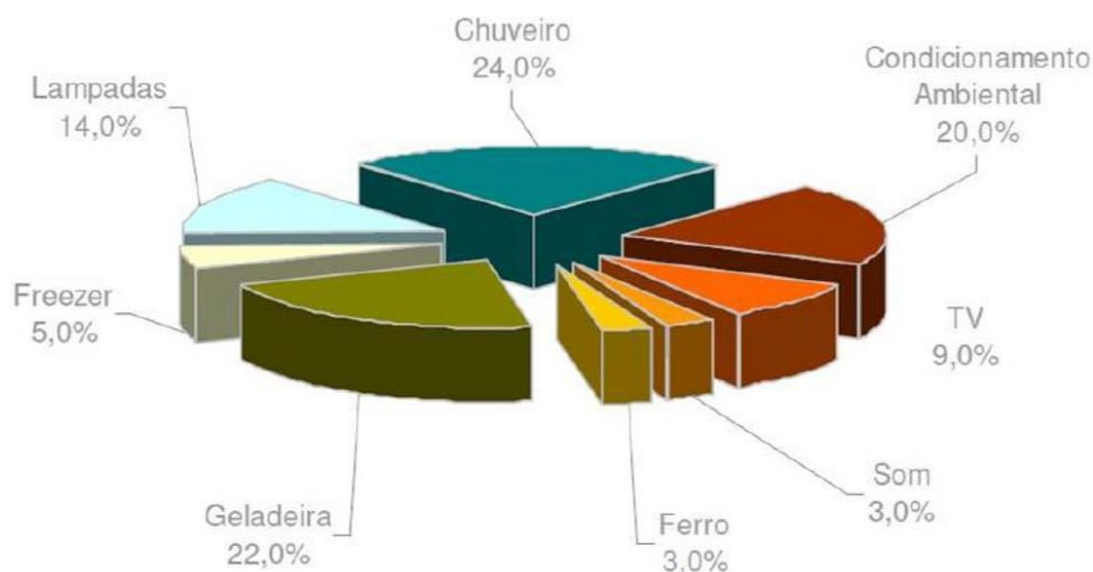


Figura 2-2: Consumo percentual dos eletrodomésticos nas residências brasileiras (Fonte: Eletrobrás, 2017).

## 2.2 Modelos

Para se realizar o aproveitamento da energia proveniente do Sol no aquecimento de água, existem inúmeras maneiras que diferem entre si estruturalmente, variando em questão de materiais utilizados, arranjo físico e formas de transferir o calor ao fluido. O propósito a ser atingido normalmente é o que direciona a escolha do que fazer: se é pretendido atingir uma temperatura de 100°C, não há muita escolha a não ser utilizar um coletor solar de foco, que concentre o calor em uma região mínima. O coletor plano, por sua vez, dificilmente atinge temperaturas superiores a 60°C e destina-se, portanto, a situações em que não são exigidas temperaturas tão altas. Dessa forma, é necessário que se tenha em mente, desde o início, quais os aspectos mais relevantes do projeto, que guiarão a escolha dos parâmetros ao longo do trabalho.

Entre as utilizações mais comuns de sistemas de aproveitamento da energia solar, podem ser destacadas:

- aquecimento de água para uso doméstico
- usos industriais

- calefação de ambientes (irradiação de calor) (hoje em dia usa-se mais o elétrico)
- climatização de piscinas
- uso combinado (aquecedor solar e gerador fotovoltaico)

A partir da revisão da literatura, é possível levantar particularidades de diferentes sistemas de aquecimento solar, desde aqueles utilizados em centros de geração, mais robustos, até os desenvolvidos para análise experimental ou aplicações residenciais, apresentando um nível menor de complexidade e maior acessibilidade para ser instalado. Independente da categoria em que se enquadrem, os sistemas consultados na bibliografia fornecem uma visão ampla dos problemas e limitações encontrados ao se desenvolver um sistema desse tipo. Também é possível ter uma perspectiva sobre rendimentos térmicos, custos de instalação e temperaturas de trabalho, sendo a análise desses parâmetros essencial para planejar um sistema que seja ao mesmo tempo simples, funcional e educativo.

A transformação de energia solar radiante em energia elétrica, no caso dos painéis fotovoltaicos, é normalmente realizada através de painéis solares a base de alguma variação do silício em sua massa maior, com uma eficiência que normalmente gira em torno de 10-20% dependendo do grau de pureza. Tais células fotovoltaicas são excelentes transformadores de energia radiante do sol em energia elétrica. Porém, quando o objetivo é aquecer diretamente a água utilizando tal radiação, como é o caso do presente projeto, é comum se utilizar uma estrutura mais simples, baseada em tubos e vedações, como será descrito nas seções posteriores.

Em seu trabalho de formatura, Garcia e Palmisano (2005) tiveram como objetivo desenvolver um gerador de vapor que apresentasse energia solar como fonte de calor, e para isso optaram por utilizar um coletor parabólico. Essa forma construtiva foi escolhida por ser capaz de atingir diferenças de temperatura mais elevadas do que um coletor plano, a ponto da água atingir sua temperatura de ebulição. Os autores avaliaram a angulação do coletor e,



com base na latitude do local de instalação, definiram qual a inclinação ótima do equipamento. Com base em uma pré-avaliação do calor necessário para levar a temperatura ambiente até 100°C, encontraram um valor de área de troca necessária, mas acabaram optando por ajustes a esse valor por conta dos tamanhos de chapas e outros componentes disponíveis no mercado, de forma a minimizar os custos de fabricação. Por fim, analisaram as temperaturas atingidas e compararam os valores de calor trocado com a radiação solar diária incidente.

### 2.2.1 Arranjo estrutural e elementos básicos

O arranjo de um sistema de aquecimento de água através da energia solar pode se configurar de inúmeras maneiras, nas quais seus componentes (tubulações, coletores, reservatórios e trocadores de calor) podem estar dispostos de diferentes maneiras de acordo com o projeto do sistema e os objetivos a serem atingidos por ele. As peculiaridades de cada sistema incluem, por exemplo, altura dos reservatórios, a forma como o fluxo de água é desenvolvido, a inclinação do coletor em relação ao solo e seu isolamento térmico. É denominada coletor a parte do sistema que é a principal responsável pelas trocas de calor do equipamento com o sol, normalmente inclinada em relação ao solo.

Caso o sistema possua uma bomba que forneça um fluxo de água que percorra o aquecedor, não há necessidade de posicionar os elementos de uma forma específica. Porém, caso não haja uma bomba, é necessário que se posicione o reservatório em uma altura manométrica suficientemente superior ao restante do aparato para que nele seja desenvolvido um fluxo. A conexão, tanto entre a calha e o reservatório quanto entre este e o coletor, pode se dar por meio de canos de PVC, tubos flexíveis feitos de polímeros, ou até mesmo dutos de metal. O diâmetro destes componentes pode variar bastante dependendo da demanda energética a ser suprida.

Após ser coletada nas calhas, armazenada no reservatório e dirigida ao coletor, a água pode seguir diferentes rumos dependendo da exigência do projeto. Há a opção de se extrair água quente logo após ela ter passado pelo coletor, principalmente no caso em que o aquecimento já é o suficiente para garantir a temperatura desejada. Pode-se, também, dirigi-la a outro reservatório que apresente isolamento térmico adequado, de forma a garantir que ela permaneça numa temperatura elevada até que seu uso seja requerido. Caso o projeto do coletor não garanta um aquecimento suficiente, é comum redirecionar o fluxo ao reservatório que contém a água fria. Dessa forma, o processo pode ser repetido ciclicamente com toda a água em reserva, promovendo um maior aproveitamento da radiação solar ao longo do dia.

Há ainda a possibilidade de se adicionar uma fonte auxiliar de aquecimento, cujo papel é suprir a demanda de água quente de dias em que a radiação solar não é suficiente para elevar a temperatura da água até o patamar desejado. A maneira mais comum de compensar essa deficiência de radiação solar é adicionar ao reservatório uma resistência elétrica, semelhante às utilizadas em um chuveiro residencial.

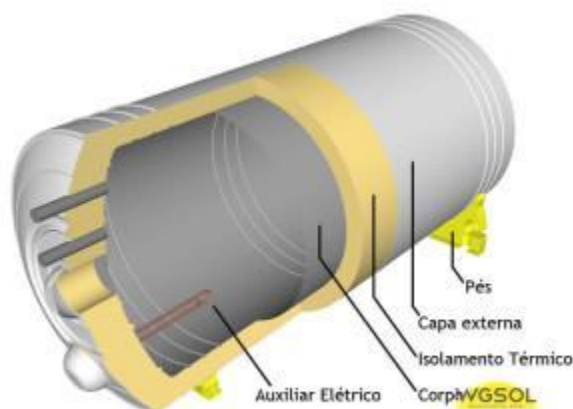


Figura 2-3: Sistemas de aquecimento auxiliar para o solar. (Disponível em: <http://wgsol.com.br/sistemas-de-aquecimento-auxiliar-para-o-solar/>. Acessado em: 03 de Março de 2017.)

Como o projeto possui apenas fins didáticos, não será realizada a instalação de resistores auxiliares, já que o projeto não se destina a cumprir uma demanda de carga térmica. Porém, em uma aplicação residencial ou industrial em que há de fato atividades que necessitem uma quantia diária de água em uma temperatura constante, é imprescindível que haja uma fonte auxiliar de calor, pois independentemente da região em que seja instalado o sistema sempre funcionará em regimes caóticos de temperaturas, radiação solar e chuvas, sendo altamente aconselhável utilizar um sistema secundário para manter a água do reservatório à temperatura desejada. Nessa situação, o aparato deve contar com um sistema de controle que detecte a deficiência de calor a partir da leitura da temperatura de saída da água e assim ative as resistências acopladas ao reservatório de água, até que se atinja a temperatura de trabalho desejada. Na prática, quando se dimensiona um aparato desse tipo, faz-se um estudo prévio e minucioso do regime climático do local, para que possa se determinar com exatidão as exigências do projeto estando ciente das particularidades pluviais e de temperatura de todas as estações do ano.

### 2.2.2 Fluxo do fluido

Quanto à forma como é gerado o fluxo do fluido de aquecimento através do equipamento, que é uma característica chave para se definir a taxa de transferência de calor, há duas possibilidades: bombeamento ou termossifonagem. Na primeira, também apresentada na literatura como sistema ativo, o deslocamento da água é realizado por meio de uma bomba hidráulica, que força a água a transitar pelos elementos do sistema através do consumo de energia elétrica. No outro cenário, denominado sistema passivo, há a combinação entre a energia potencial do reservatório e o fenômeno da termossifonagem, que promove a circulação através da diferença de

temperatura entre o fluido aquecido no coletor e o fluido de entrada, proveniente da parte inferior do reservatório e que possui temperatura inferior.

A grande vantagem em se utilizar do termossifão como forma de promover a circulação da água é a não utilização de energia elétrica em nenhuma etapa do processo, solução que harmoniza com os objetivos propostos pelo presente projeto, que tem como foco a questão da economia energética nas residências. Porém, apesar do sistema passivo ter a vantagem de aproveitar a energia potencial e fenômenos térmicos espontâneos, sua utilização é limitada a fatores como gradiente de temperatura, desnível e isolamento dos componente. A influência dessas condições na eficiência do sistema termossifão foi estudada por Vaxman; Sokolov (1986).

Há ainda a distinção entre sistemas de aquecimento diretos e indiretos. Essa classificação se refere a se a água é aquecido diretamente pela radiação solar ou não, sendo um sistema indireto aquele que se utiliza de um fluido refrigerante adicional, que circula na tubulação do coletor e absorve o calor, posteriormente o transferindo por meio de um trocador de calor. Essa configuração é mais comumente utilizada em países que apresentam temperaturas baixas onde parte ou toda a água poderia congelar durante o processo.

### 2.2.3 Radiação solar

No projeto de um sistema de aquecimento solar, é necessário ser capaz de prever qual será o desempenho térmico do coletor. Uma medida dessa performance é a eficiência do coletor, definida pela razão entre o ganho útil ao longo de um período de tempo e a energia solar incidente no mesmo período de tempo:

$$\eta = \frac{\int \dot{Q}_u dt}{A_C \int G_T dt} \quad (2.1)$$

Na Eq. (2.1),  $\dot{Q}_u$  representa a taxa útil de transferência de calor, enquanto a parcela de baixo é a multiplicação da área do coletor pela integral que representa a radiação solar que incide sobre o coletor, já levando em conta as perdas atmosféricas sofridas no caminho da luz até o coletor. Se as condições podem ser consideradas constantes ao longo do período escolhido, a eficiência se resume a:

$$\eta = \frac{Q_u}{I_T A_C} \quad (2.2)$$

O parâmetro  $I_T$  representa a irradiação solar total que incide sobre o coletor. É comum os valores de energia serem expressos na base horária, inclusive quando se trata de bancos de dados a respeito desses parâmetros. Dessa forma, é essencial o conhecimento do calor útil, ou seja, das dissipações de calor que ocorrem no coletor.

Para estimar o calor útil envolvido no aquecimento da água, deve ser realizado um estudo da transferência de calor do coletor, se baseando em um modelo físico para representá-lo e hipóteses simplificadoras, que envolvem: regime permanente, tubos paralelos ao isolamento do coletor, fluxo unidimensional de calor na cobertura, desconsideração do gradiente de temperaturas ao redor do tubo e da poeira e sujeiras presentes no equipamento e desconsideração das sombras.

Em um coletor plano, que foi o tipo construtivo escolhido para o presente projeto, a obtenção do calor útil se dá através do balanço energético que indica a distribuição da energia solar incidente entre ganho útil, perdas térmicas e perdas ópticas.

$$Q_u = A_C [S - U_L (T_{pm} - T_a)] \quad (2.3)$$

S indica a radiação solar incidente ( $W/m^2$ ),  $U_L$  o coeficiente de transferência de calor entre os tubos e a atmosfera ( $W/m^2K$ ),  $T_{pm}$  a temperatura média de parede do tubo que absorve a energia (K) e  $T_a$  a temperatura ambiente .O

problema dessa equação é que a temperatura média de parede é difícil de calcular ou medir por ser uma função do design do coletor.

A equação é então reformulada para estar em função apenas da temperatura de entrada do fluido e do fator de remoção,  $F_R$ , que pode ser obtido analiticamente utilizando princípios básicos de projeto, ou então experimentalmente. Esse parâmetro é introduzido pois é conveniente definir a quantidade que relaciona o ganho útil de energia de um coletor se ele apresentasse ao longo de toda sua extensão a temperatura de entrada da água ( $T_i$ ), o que se configura a situação de máximo ganho de energia (transferência de calor). Dessa forma, a Eq. (3) se torna:

$$Q_u = A_c F_R [S - U_L (T_i - T_a)] \quad (2.4)$$

O coeficiente global  $U_L$  de transferência de calor representa as perdas térmicas que ocorrem entre os condutos de fluido e a atmosfera, e é obtido através de um levantamento dos coeficientes de cada uma das camadas nesse caminho. Nesse contexto, é útil utilizar a analogia de transferência de calor com circuitos elétricos, em que se consideram os trechos como resistências e faz-se a combinação dos resistores de forma a obter a resistência equivalente (global).

Para analisar com confiabilidade os fenômenos envolvidos na obtenção de água quente e sua influência no desempenho do aparato, é essencial analisar a forma com que a radiação extraterrestre proveniente do sol atinge a Terra e se distribui ao longo de sua superfície, o que fornecerá o valor de  $S$ . Essa energia, composta majoritariamente por radiação eletromagnética, possui componentes invisíveis a olho nu, que são a infravermelha e a ultravioleta, além da luz visível, que representa 48% do total de radiação que chega à Terra (Littlefair, 1985).

A energia solar que chega ao planeta passa ainda por processos durante seu trajeto até um determinado ponto da superfície terrestre. O calor absorvido pelo sistema de aquecimento depende dos fatores atmosféricos da região, sujeitos a flutuações ao longo das horas de um dia e ao longo dos meses do ano. Ao analisar a literatura, percebe-se que a grande incerteza sobre as taxas de incidência solar ao longo de um dia torna árdua a tarefa de se dimensionar as dimensões do equipamento com segurança, principalmente se o objetivo é generalizar o equipamento necessário para uma residência em um determinado lugar do país. As flutuações de incidência de calor são tão intensas que é comum se adicionar um conjunto resistivo auxiliar ao sistema de aquecimento solar, já que é impraticável fornecer um sistema que garanta água aquecida independentemente do dia do ano.

Para um determinado ponto da superfície, a radiação solar é composta pela parcela direta, difusa e a refletida pela vizinhança. A difusão de parte da radiação solar ocorre por conta das moléculas de ar e água, além de sólidos em suspensão, que redistribui parcela da energia para a superfície e para fora da atmosfera. Embora Littlefair (1985) tenha revisado os resultados de diversos autores e elaborado um estudo sobre perdas de energia solar na atmosfera, a melhor forma de avaliar a disponibilidade de radiação é a medição direta dos níveis de energia incidentes no local a ser estudado. Tais medidas podem ser feitas, por exemplo, utilizando-se um piranômetro, instrumento capaz de medir a radiação total incidente em um local. Através de um estudo anual com o auxílio desse equipamento, é possível estabelecer padrões de radiação característicos da localidade, e assim dimensionar com maior segurança um sistema de aquecimento de água.

Dessa forma, do total da energia proveniente do sol, definida pela constante solar ( $G_T = 1367 \text{ W/m}^2$ ), uma parte se dissipa na atmosfera. Assim, o valor lido por instrumentos de medida localizados na superfície terrestre define, na verdade, o valor de  $I_R$ . Essa radiação ainda sofre mais uma dissipação devido aos efeitos ópticos que acontecem quando os raios entram no coletor. Um

diagrama ilustrativo do caminho da radiação até chegar à água é apresentado na Fig. 2-4, e inclui o fator do plano inclinado.

$$\begin{array}{c}
 G_T = 1367 \text{ W/m}^2 \\
 \downarrow \text{perdas atmosféricas} \\
 I_R \\
 \downarrow \text{perdas ópticas} \\
 S = \tau_c \alpha_c I_R(0^\circ) \\
 \downarrow \text{inclinação do coletor} \\
 S_\alpha = \tau_c \alpha_c I_R(\alpha)
 \end{array}$$

Figura 2-4: Radiação solar total  $G_T$  e as interferências ao longo do trajeto.

Como visto na Fig. 2-4, um importante ponto a ser discutido é a inclinação na qual está disposta a parte coletora do equipamento, responsável pelo aquecimento da água. Para um coletor solar plano, uma determinada inclinação é fixada e o coletor é direcionado para o norte, no caso do hemisfério Sul (Laerte, 2004). Dessa forma, é necessário corrigir os dados de radiação solar incidente em uma área, já que essas informações são normalmente expressas para uma superfície horizontal.

O valor escolhido para a inclinação do coletor foi de  $\text{Latitude} + 10^\circ$ , depois de se verificar a predominância dessa escolha na literatura. Essa prática se relaciona com o fato de, em grande parte do ano, a radiação solar ser reduzida a ponto de exigir um direcionamento extra para o céu.

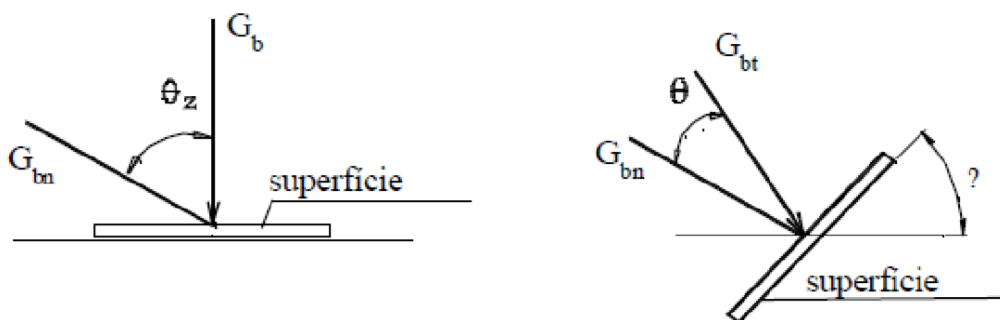


Figura 2-5: Radiação solar direta e sua componente normal, no caso de um coletor plano e um inclinado. (Fonte: Laerte, 2004)



Para determinação da eficiência do conjunto, que será realizada após a montagem e os primeiros testes, deve-se obter a razão entre a energia transferida ao fluido e a energia disponível por meio da radiação solar direta. Pode-se ignorar a parcela da radiação solar que incide indiretamente sobre o aparato, pois se sabe que sua contribuição pro aquecimento propriamente dito é pequena.

A tarefa de se obter dados a respeito da radiação solar, assim como demais parâmetros atmosféricos, é árdua: um panorama climático local depende de informações históricas sobre o contexto climático global como um todo, e essas informações são, normalmente, desorganizadas. Felizmente, o programa *SunData*, desenvolvido pelo CRESESB – Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Britto, dispõe diversas informações reunidas a respeito de parâmetros que dão base a projetos de dimensionamento de painéis fotovoltaicos, como radiação solar incidente ao longo do dia e um aplicativo para cálculo de irradiação em planos inclinados. Dessa forma, é possível se desenvolver um acompanhamento histórico da intensidade solar ao longo das estações do ano e, com maior precisão e confiabilidade, se determinar o rendimento do equipamento ao final do projeto.

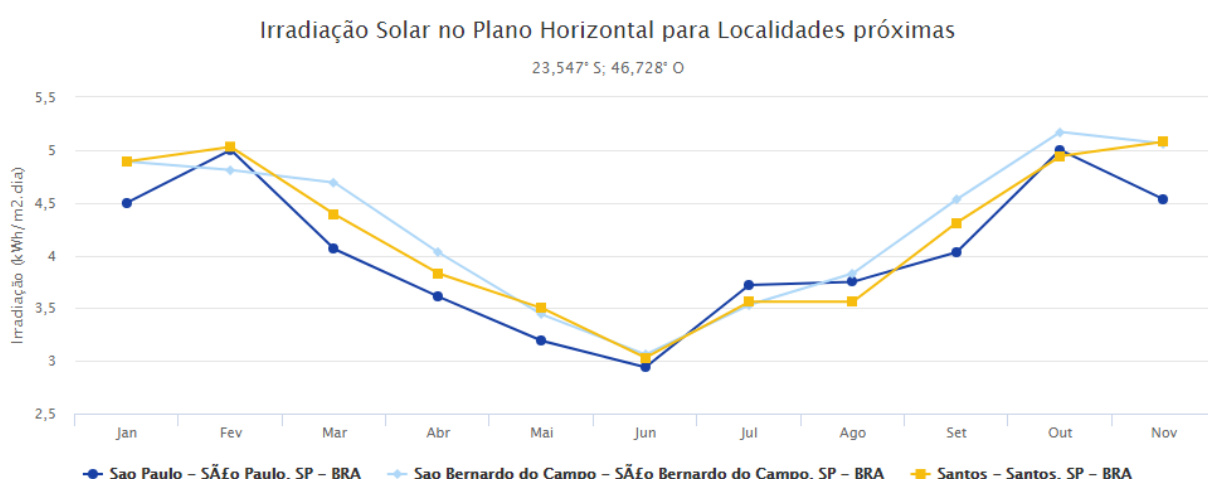


Figura 1-6: Irradiação solar no plano horizontal para três localidades próximas ao ponto de instalação. (CRESESB, 2016)

### 2.2.4 Transferência de Calor

Para a determinação do calor útil é necessário se obter o coeficiente global de transferência de calor entre a água e o ambiente (ver Eq. 2.4). Devido a sua composição as paredes do reservatório são compostas de camadas de materiais diferentes, sendo camadas de aço tendo entre elas uma camada de isolante. As perdas de calor através dessas paredes compostas são calculadas por (INCROPERA e DE WITT, 2003):

$$Q_x = UA(\Delta T) \quad (2.4)$$

Onde  $Q_x$  é a taxa de transferência de calor,  $U$  é o coeficiente global de transferência de calor,  $A$  é a área da parede normal à direção da transferência de calor e  $\Delta T$  é a diferença de temperatura.

Para calcularmos o produto  $UA$  usamos uma relação importante da transferência de calor que é a resistência térmica total para parede compostas, onde (INCROPERA e DE WITT, 2003):

$$UA = \frac{1}{B_T} \quad (2.5)$$

onde  $B_T$  é a resistência térmica total.

A resistência térmica total é calculada a partir das somas de resistências dos tipos de transferência de calor (condução, convecção e radiação) que a parede composta estiver sujeita. Uma ilustração das camadas que compõem o trajeto do calor que flui pelo coletor é apresentada na Fig. 2-7.

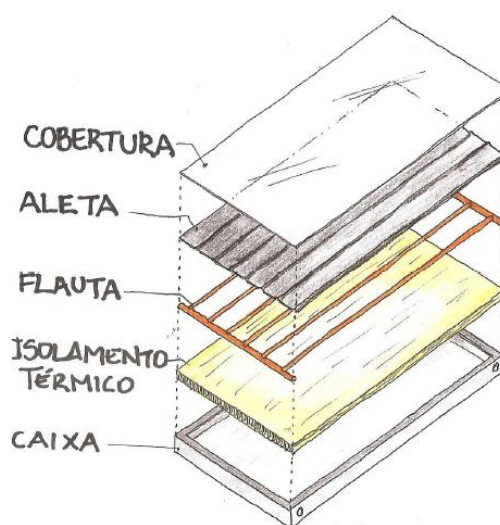


Figura 2-7: Ilustração das camadas que compõem o coletor plano (Oliveira, 2014).

### 2.3 Coletor solar plano e dimensionamento – Lei de São Paulo

Nesta seção é abordado especificamente as particularidades e o equacionamento de um sistema de aquecimento solar da água para uso humano com base em um coletor plano, com enfoque no contexto brasileiro de aquecedores solares. Dentre os coletores disponíveis no mercado, observam-se os seguintes tipos (Moreira et. al., 2017):

- Coletor solar plano fechado: é a estrutura escolhida para o presente projeto. Consiste em uma caixa que abriga o coletor solar, fechada por uma ou mais camadas de vidro para criar o efeito estufa, adicionando-se isolamento térmico ao fundo. Utiliza-se normalmente alumínio para transferir o calor aos tubos, que são de cobre, ambos com pintura escura, e opera com temperaturas de até 90°C.
- Coletor solar plano aberto: é construído sem a proteção contra perdas térmicas, ou seja, quase não possui isolamento. Utilizado para o aquecimento de piscinas, pode chegar a temperaturas por volta de 50°C. Apesar de

apresentar uma eficiência inferior, seu custo mais baixo torna essa alternativa mais popular, principalmente no projeto de grandes áreas coletoras.

- Coletor solar com tubos a vácuo: nesta configuração, o fluxo também é feito de forma tubular, e o funcionamento se assemelha com o coletor fechado, com o vácuo atuando como isolamento térmico

Os coletores planos podem ser agrupados em série ou em paralelo, de forma a combinar o aquecimento fornecido por eles e possibilitar a obtenção de mais água ou temperaturas mais elevadas (Fig. 2-8). Se for o caso, é mais interessante organizá-los assim do que confeccionar um coletor de tamanho elevado, que encarece o processo de produção e diminui o rendimento. Quando em paralelo, a diferença gerada de temperatura (saída menos entrada) é praticamente igual em cada um dos coletores, diferente de quando são dispostos em paralelo, que o acréscimo de temperatura é maior na entrada e é reduzido ao longo do percurso do fluido. Dessa forma a temperatura final é maior, porém a eficiência média dos coletores é reduzida.

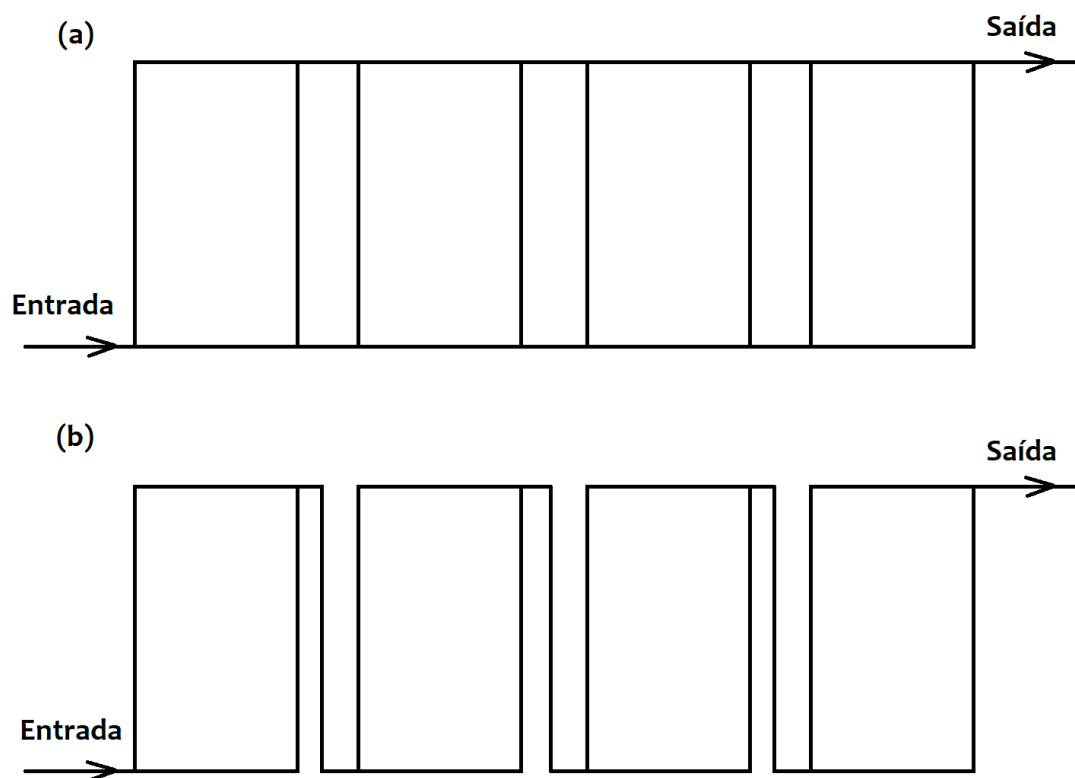


Figura 2-8: Arranjo dos coletores solares em: (a) paralelo e (b) série.

Assim como diversas outras cidades do mundo, São Paulo dispõe de uma legislação que incentiva o uso de energia solar no aquecimento da água em instalações prediais (Moreira, et al., 2017). O decreto nº 49.148, de 21 de janeiro de 2008, regulamenta a Lei nº 14.459, de 3 de julho de 2007, que acrescenta o item 9.3.5 à seção 9.3 – Instalações Prediais do Anexo I da Lei nº 11.228, de 25 de junho de 1992 (Código de Obras e Edificações), e estabelece diretrizes a respeito da instalação de sistemas de aquecimento de água por energia solar em novas edificações do município paulistano.

Para que seja possível a instalação do equipamento, é necessário que se realize uma análise prévia de viabilidade. Caso se mostre viável atender a pelo menos 40% da demanda de água quente através da energia solar, é obrigação do construtor preparar a estrutura necessária para a instalação do sistema. O anexo da lei apresenta uma metodologia simplificada de dimensionamento que torna possível estimar a área necessária de coleta para atender o consumo do local, que pode ser: academias, hotéis, escolas, hospitais, e residências com três ou mais banheiros por unidade habitacional.

Para o dimensionamento de um coletor plano, deve-se atentar aos seguintes passos (Moreira, et al., 2017):

1. Estimar o volume de água a ser utilizada diariamente na edificação. Isto deve contabilizar o consumo de toda a edificação a ser atendida. Recomenda-se adotar um volume de 70 litros por pessoa por dia a 45°C.
2. Calcular, para o volume encontrado, qual a energia necessária por dia para aquecimento;
3. Determinar a produção de energia térmica dos coletores solares no município de São Paulo;
4. Determinação da área de coleta solar necessária para atendimento da fração solar segundo requisito da lei.

### 3. COMPONENTES DO SISTEMA

Com base na análise dos fenômenos pertinentes ao projeto e das possíveis formas construtivas da bancada, optou-se pelo sistema direto, no qual a água é o único fluido presente no sistema. Nessa configuração, a radiação proveniente do sol incide diretamente sobre os tubos do coletor que carregam a água. A partir do seu aquecimento e dos demais materiais que constituem o painel coletor, o calor é transferido à água em circulação no interior, por meio dos fenômenos de condução e de convecção. Vale ressaltar que, além da convecção que ocorre no interior dos dutos que é responsável pelo aquecimento da água, existe um outro convectivo que ocorre externamente ao coletor, decorrente do fluxo de ar nos arredores, responsável por remover parte do calor disponível no subsistema do coletor, como visto na seção 2.2.4.

Em relação ao fluxo de água, determinou-se que o método de circulação empregado será o passivo, através do fenômeno da termossifonagem, que possibilita o aproveitamento da energia potencial do reservatório para desenvolver a corrente no aparato. Para isso, é necessário que os elementos do sistema sejam posicionados de forma adequada: o reservatório deve ser posicionado em um nível manométrico superior ao do topo do coletor (Fig. 3-1).

A estrutura do coletor é desenvolvida de tal forma que uma única passagem da água por ele não é suficiente para que a água atinja a temperatura desejada. Dessa forma, ela é redirecionada ao reservatório após passar pelo coletor, para que passe outra vez pelo sistema de aquecimento. Na Fig. 3-1,

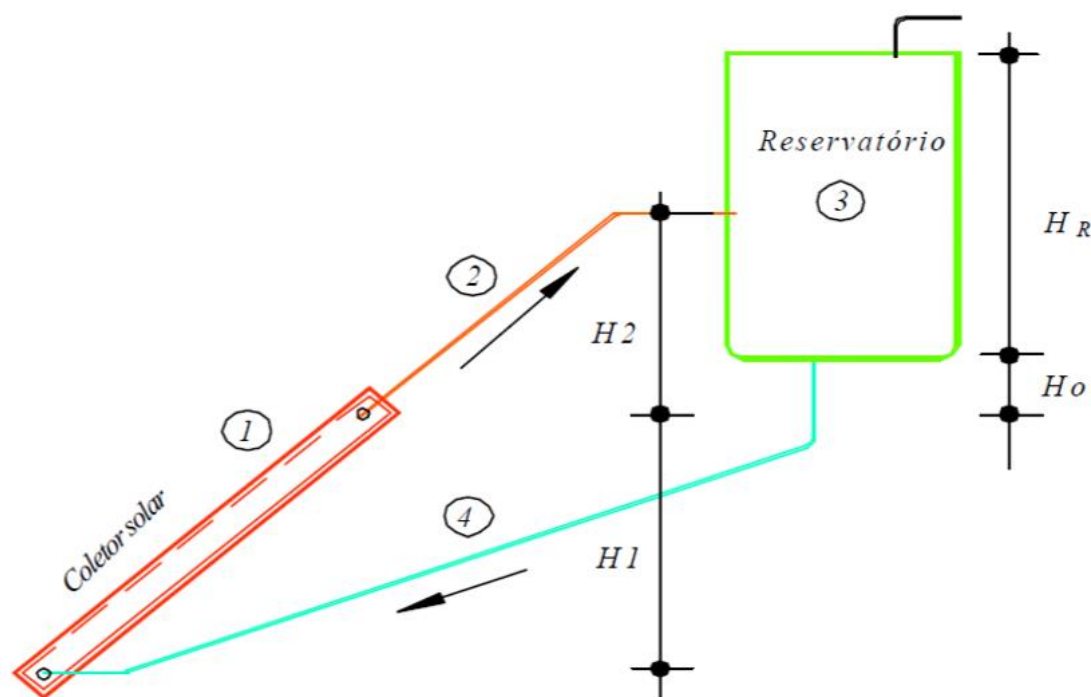


Figura 3-1 Esquema representativo do sistema de aquecimento de água. Fonte: LAERTE, 2004.

O esquema representativo extraído de Laerte (2004) e disposto na Figura 3-1, tem como objetivo ilustrar a disposição dos elementos principais em um sistema desse tipo. Caso o reservatório (3) não esteja cheio, a água proveniente das calhas é transportada até ele através de tubos. Há uma saída no ponto mais baixo do reservatório na qual é acoplado um tubo, de forma a descarregar a água que apresenta menor temperatura e, portanto, permanece na parte de baixo do compartimento. Após percorrer o tubo de saída (4), o líquido frio chega ao coletor solar (1) através de uma entrada em sua parte inferior e, conforme ocorre a transferência de calor, observa-se o fenômeno da termossifonagem, o qual depende de fatores como o gradiente de temperatura e a inclinação do coletor. Após percorrido o sistema de aquecimento, a água sai pela parte superior do coletor e desloca-se através de um tubo (2), quando finalmente retorna ao reservatório pela parte superior deste.

### 3.1 Reservatório

O reservatório é a parte do sistema responsável pelo armazenamento da energia disponível sob a forma de água quente, feito de forma a manter sua temperatura com o auxílio de isolamento térmico. Normalmente essa camada é de poliuretano ou outro polímero isolante como polietileno de baixa densidade, e o reservatório é feito de metal, fibra de vidro ou material plástico.

A abordagem do estudo a respeito do reservatório térmico pode se dar de duas formas: uma, mais conservadora, considera que o líquido se mistura completamente dentro do volume; a outra, mais realista, leva em conta a estratificação da água devido as diferentes densidades, que interfere no rendimento solar do coletor (Arruda, 2004). Devido à diferença de densidade decorrente dos gradientes de temperatura nas regiões do reservatório, é plausível considerar a estratificação da água em seu interior. Esse fenômeno muda, como estudado por Duffie; Beckman (1991), a forma como o rendimento térmico de sistemas de aquecimento solar é tratado, ao passo que possui grande influência no desempenho do equipamento. A abordagem assume que o líquido dentro de um compartimento se distribui em N camadas horizontais, cada qual apresentando uma mistura total com temperatura uniforme, e não leva em conta a transferência de calor das paredes do reservatório nem difusão do líquido, o que provocaria sua desestratificação.



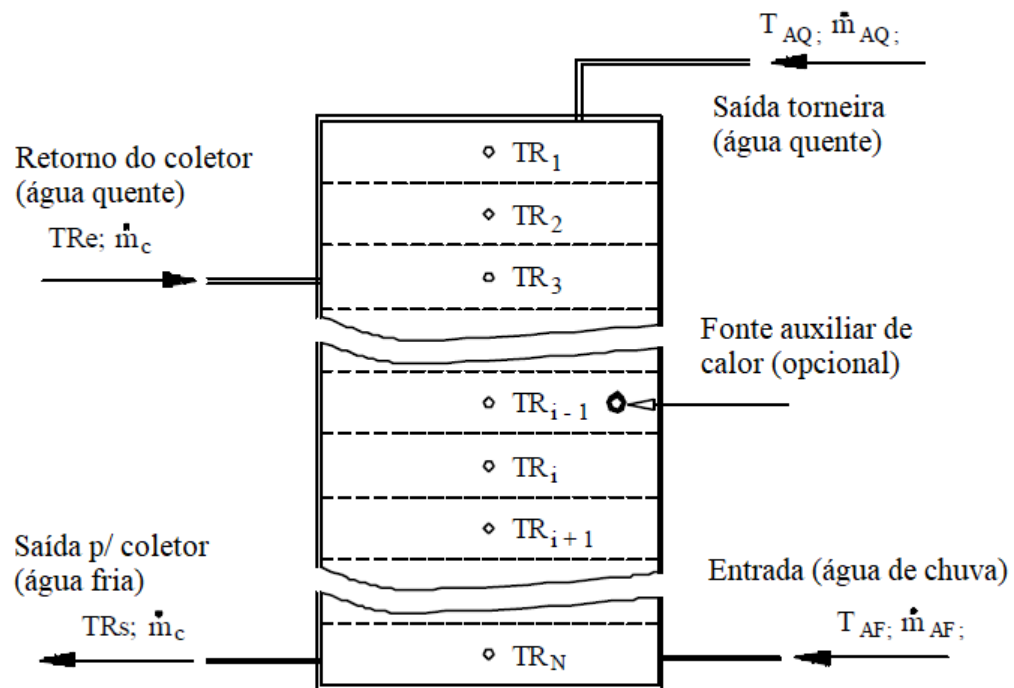


Figura 3-2: Esquema da estratificação do fluido no reservatório (Arruda, 2004).

Em um estudo sobre a influência da estratificação sobre o rendimento térmico do aquecedor solar, Hahne; Chen (1998) analisaram os efeitos térmicos em um reservatório cilíndrico horizontal e concluíram, entre outras, duas coisas: 1) o aumento da velocidade de entrada do líquido no reservatório diminui a eficiência térmica do conjunto para casos em que a temperatura de entrada da água é próxima da temperatura de saída, e 2) se a relação entre a altura e o diâmetro do reservatório for entre um e quatro, um aumento dessa relação promove um aumento de eficácia, sendo indiferente qualquer aumento para valores maiores que quatro.

Esse estudo fornece informações que tornam possível o dimensionamento de um reservatório de forma a otimizar sua estratificação térmica e, assim, resultem em um aumento da eficiência térmica da bancada de aquecimento solar. Mesmo em situações em que não sejam equacionadas as consequências do fenômeno em questão, como é o caso do presente projeto, um cuidado deve ser tomado para que a água que entra no volume do

reservatório não apresente turbulência acentuada, ou seja, não perturbe a distribuição existente entre os líquidos quente e frio.

Além disso, é comum que se adicione uma cobertura interna de um material refletor, como o alumínio, para minimizar a taxa de fuga de energia da água aquecida para a vizinhança do compartimento. Por fim, vale observar que o reservatório não será pintado de preto, pois a transferência de calor das paredes do reservatório pode se tornar muito acentuada e causar uma perturbação no processo de estratificação da água no seu interior, o que pode diminuir o rendimento térmico do conjunto.

### 3.2 Coletor

Em uma pesquisa bibliográfica, são encontrados com frequência dois tipos de coletores, quanto à forma construtiva: os planos e os de foco, sendo este último um grande refletor ou uma lente de Fresnel, capaz de concentrar o calor em uma área reduzida. Optou-se por utilizar um coletor plano, constituído basicamente de uma caixa de madeira, no interior da qual há uma fileira de tubos dispostos em forma de serpentina, por entre os quais a água transita e efetua as trocas de calor. Para realização de balanços energéticos e estudo da eficiência térmica, é o coletor que deve ser estudado.

Como próximo passo no projeto, é feita a escolha dos materiais que constituem o coletor. Para escoamento do fluido são utilizados tubos de PVC, dispostos em forma de malha em uma cama de cobre, como ilustrado na Fig. 3-3 (tube-on-sheet). Atentando-se ao fato de que o painel é didático e, portanto, apresenta um menor porte do que seria utilizado de fato em uma aplicação residencial, é escolhido um diâmetro interno de 3/4" (aproximadamente 19mm) para os canos do coletor, formando 5 fileiras dispostas em forma de serpentina conectadas entre si através de juntas em cotovelo. A forma construtiva, em serpentinas, é representado junto à disposição paralela, na Fig. 3-3.

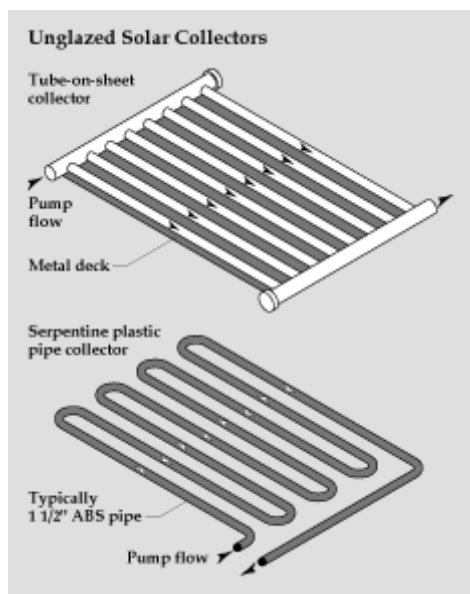


Figura 3-3: Exemplos de disposição dos tubos do coletor. Disponível em [http://www1.eere.energy.gov/solar/sh\\_basics\\_collectors.html](http://www1.eere.energy.gov/solar/sh_basics_collectors.html). Fornecido por US Dept. of Energy. Acessado em 08 de Abril de 2017.

### 3.3 Coleta de águas pluviais

Para que haja um fornecimento adequado e suficiente para repor a água o reservatório, é acoplado ao sistema de aquecimento um conjunto responsável pela coleta de água da chuva. Entre edificações residenciais, em parte prediais, já é possível observar algum tipo de aproveitamento da água proveniente da chuva por meio de um sistema de captação e tratamento, capaz de fornecer um fluxo de água de retorno que pode ser utilizado para determinados fins nas residências, como lavar louças, descarga de vasos sanitários ou limpeza doméstica. A partir da coleta de águas pluviais, o conjunto de aquecimento ganha em retorno ao meio ambiente, diminuindo também o consumo de água nesses locais.

A instalação de um sistema que reaproveite a água da chuva é facilitada nos casos em que a edificação possui um conjunto de redirecionamento de fluxo,

papel normalmente realizado por calhas e dutos. Nessa configuração, o acoplamento é simples, sendo necessário apenas adicionar um tubo à saída da calha, de forma a direcionar a água para o reservatório. Para o local de instalação do sistema no Parque Villa-Lobos, não há a possibilidade de instalar o conjunto de coleta de água, pois o local não apresenta um sistema de calhas que viabilize tal construção.

### 3.4 Filtragem de impurezas

A água proveniente das chuvas pode conter um grande número de impurezas indesejadas, até mesmo quando as atividades a serem realizadas com a água se resumem a banhos e lazer. Portanto, para que a água recolhida possa ser utilizada, é necessário que ela passe por um filtro capaz de remover as impurezas macroscópicas. Através de uma pesquisa de mercado, surgiram vários filtros que cumpririam a função e ainda realizariam a limpeza além do necessário, o que é positivo para o projeto, porém os preços desses dispositivos foram muito além do previsto para projeto.

A melhor opção encontrada foi o uso de um filtro de baixo custo, que seria localizado logo na saída da calha e responsável pela remoção de resíduos sólidos presentes na água coletada, além de ser auto-limpante. A principal vantagem na escolha dessa forma construtiva é que, caso ainda não seja vantajoso adquiri-lo, é possível construí-lo. O mecanismo é simples e consiste de dois tubos de PVC encaixados entre si, entre os quais é posicionada uma tela mosquiteiro com 45° de inclinação, que serve para reter e descarregar as impurezas para fora do tubo conforme a água passa.



Figura 3-3: Filtro de água da chuva de baixo custo. Disponível em:  
<http://www.sempresustentavel.com.br/hidrica/minicisterna/filtro-de-agua-de-chuva.htm>.  
 Acessado em: 01 de Maio de 2017.

Como forma complementar de informação, a Tabela 3-1 traz os critérios utilizados para avaliar se a água pode ser utilizada para fins restritos não potáveis, como vasos sanitários e limpeza de superfícies.

Tabela 3-1: Parâmetros de Qualidade de água pluvial para usos não-potáveis. Fonte: ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

| Parâmetros                                                                         | Análise | Faixa                                                               |
|------------------------------------------------------------------------------------|---------|---------------------------------------------------------------------|
| Coliformes totais                                                                  | Semanal | Ausência em 100 mL                                                  |
| Coliformes termotolerantes                                                         | Semanal | Ausência em 100mL                                                   |
| Cloro residual livre                                                               | Mensal  | 0,5 a 3,0 mg/L                                                      |
| Turbidez                                                                           | Mensal  | < 2,0 uT, para usos menos restritivos < 5,0 uT                      |
| Cor aparente (caso não seja utilizado nenhum corante, ou antes, da sua utilização) | Mensal  | < 15 uH                                                             |
| Deve prever ajuste do pH para proteção das redes de distribuição, caso necessário  | Mensal  | pH de 6,0 a 8,0 no caso de tubulação de aço, carbono ou galvanizado |

NOTA: Para desinfecção, a critério do projetista, pode-se utilizar derivado clorado, raios ultravioleta, ozônio e outros. Em aplicações onde é necessário um residual desinfetante deve ser usado derivado clorado.

### 3.5 Melhorias no rendimento

Após se ter determinado o arranjo básico que constituirá a bancada didática, é conveniente realizar pequenas modificações que visem o aumento da eficiência térmica do sistema. As mudanças na estrutura da bancada foram determinadas após ampla pesquisa sobre diferentes formas de construção de sistemas de aquecimento solar. São destacadas nesta seção as principais

No coletor, como visto, optou-se pelo uso do forro de PVC. Esses tubos apresentam naturalmente uma coloração clara, e a opção mais inteligente e frequentemente adotada em aquecedores é pintar a superfície externa de preto fosco, a fim de maximizar a retenção de calor transferido por meio de radiação para o tubo. Trata-se de um detalhe simples que pode ser responsável por um significativo aumento da temperatura da água e da eficiência térmica do dispositivo.

Ainda a respeito do coletor, optou-se por posicionar papel alumínio abaixo dos tubos de PVC, formando um alojamento refletor em formato de “V” que redireciona os raios provenientes do sol para a linha de centro dos tubos. Dessa forma, espera-se que o rendimento térmico se eleve, pois parte do calor que seria absorvido pelas outras partes do sistema é realocado diretamente para as paredes dos tubos presentes no coletor.

Para otimizar a eficiência térmica do conjunto, comumente são utilizadas uma ou mais fileiras de vidro espaçadas de alguns centímetros, para diminuir perda de calor e aumentar a eficiência térmica. Com essa forma construtiva, cria-se uma espécie de efeito estufa no interior do coletor, em que não há empecilhos para a entrada da radiação solar, mas ela é mantida parcialmente dentro do coletor devido ao vidro.

### 3.6 Arranjo estrutural

Na fase final do projeto, após cada um dos processos de seleção de componentes e discussões com os membros da banca e orientador, buscou-se conciliar as sugestões com a viabilidade de efetuar tais mudanças. O resultado final se baseou na disponibilidade de certos componentes, por exemplo, que são encontrados em tamanhos padronizados, e diversas questões de orçamento, de forma a alinhar o desempenho e os resultados pretendidos com o baixo custo buscado ao longo do projeto.

Coletor: Nas primeiras fases de projeto, a estrutura do coletor se baseava em tubos de PVC interligados em curvas (serpentina), o que posteriormente foi abandonado por uma questão de minimização da perda de carga, e substituído por um arranjo em leito (Fig. 3-3), de forma que os tubos seriam posicionados em linha, postos sobre uma calha fabricada em cobre ou alumínio.

O projeto final do coletor consiste em uma placa alveolar de forro de PVC em substituição aos tubos antes projetados. Essa alteração visa aumentar substancialmente a taxa de transferência de calor através da distribuição mais homogênea da radiação solar: o fluxo agora se dá por entre as várias seções da placa alveolar, que possui 8mm de espessura, tornando a troca de calor mais eficiente. Espera-se que, dessa forma, o aparato como um todo possa apresentar maior rendimento térmico, além de um menor custo de fabricação e de materiais, visto que a fabricação da calha de metal não é mais necessária e o custo do forro de PVC é menor do que o dos tubos. Os parâmetros exatos de preços são dispostos nas Tab. 4-1 e 4-2 da seção “Resultados e Discussões”, em um comparativo de custos.



Figura 3-4: Perfil alveolar do forro de PVC.

Na Fig. 3-4 é possível observar o perfil em alvéolos do forro de PVC, que permite um direcionamento do fluxo de água ao mesmo tempo em que lhe distribui calor ao longo do comprimento da placa. A estrutura formada pelo forro de PVC ligado aos tubos de 32mm de PVC, junto à camada de isolante (8mm de espessura de polietileno expandido) e o vidro, está disposta na Fig. 3-5. A estrutura é pintada internamente com uma tinta preta fosca (esmalte sintético para madeiras e metais, da Coral), e a estrutura de vidro é presa à madeira por meio de 4 parafusos (M10). As imagens são do *software* de desenho “Inventor”. Nas seções de entrada e de saída, há cotovelos de PVC com redução de 32mm para 20mm, o diâmetro da mangueira de conexão entre o coletor e o reservatório.

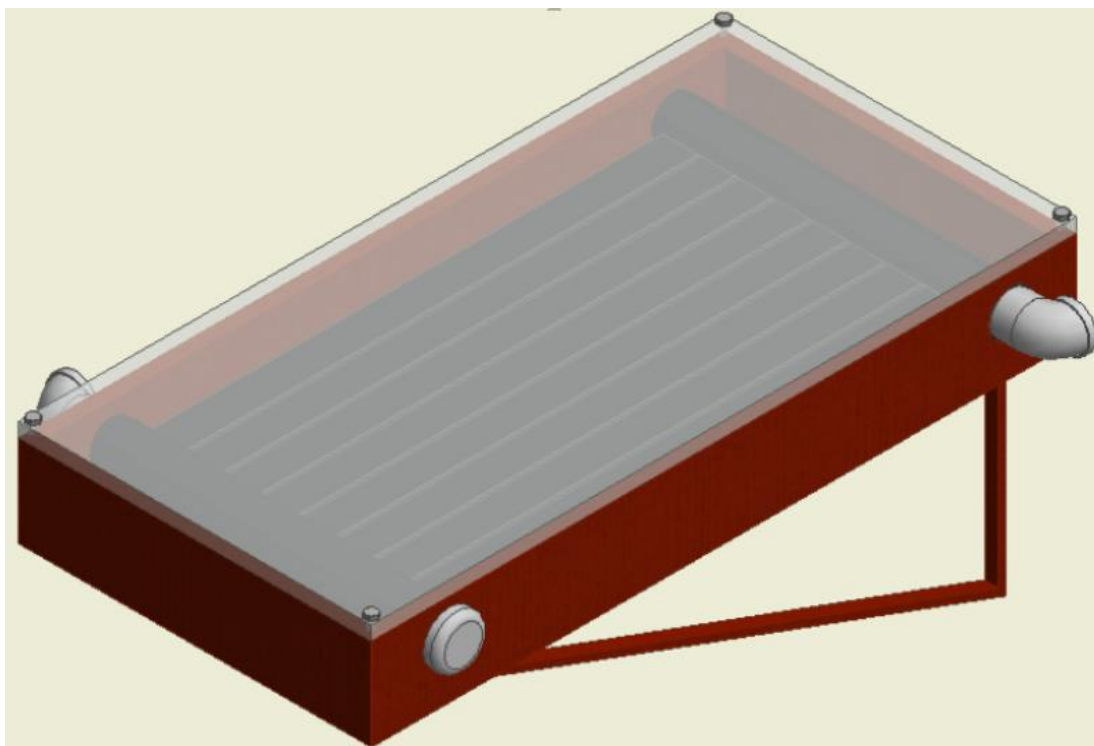


Figura 3-5: Vista isométrica do modelo do coletor solar desenvolvido



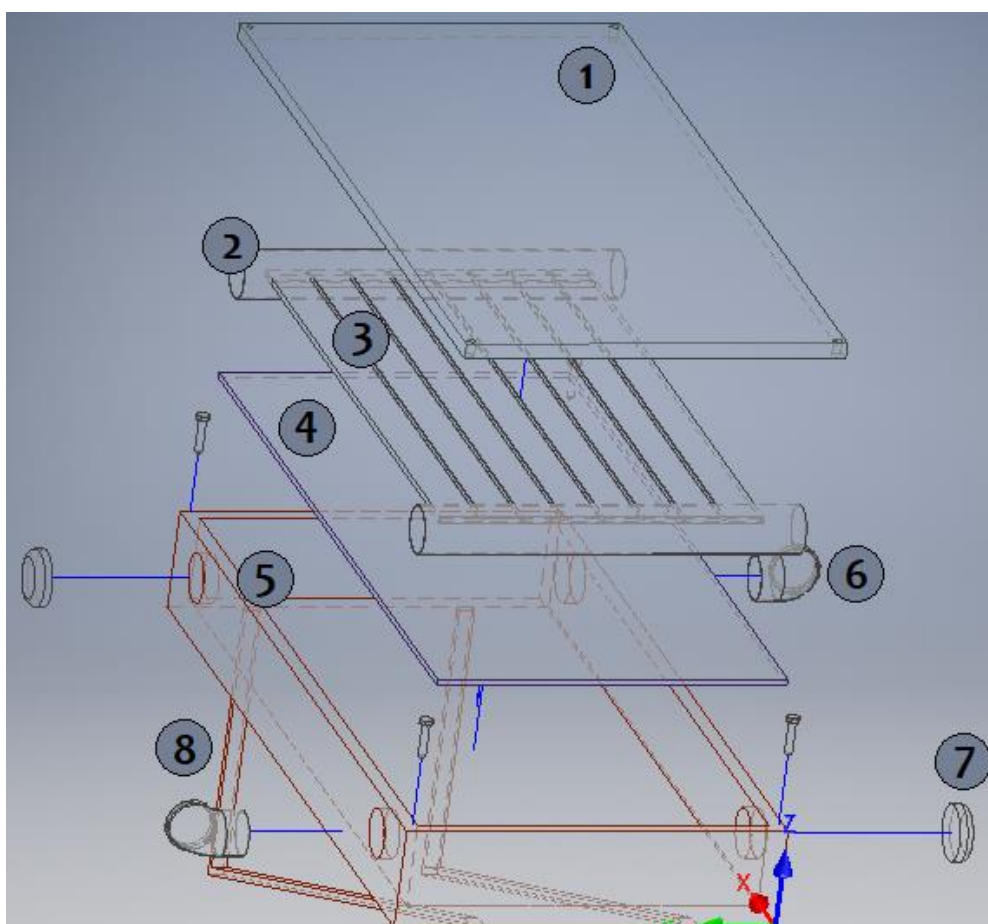


Figura 3-6: Vista explodida do conjunto do coletor

Tabela 3-2: Lista de peças do coletor

| Item | Descrição                                                 |
|------|-----------------------------------------------------------|
| 1    | Placa de vidro 4mm                                        |
| 2    | Tubo de PVC 32 mm                                         |
| 3    | Placa alveolar de forro de PVC 4mm                        |
| 4    | Manta Termica Etaflon 2mm (Isomanta Patch)                |
| 5    | Caixa de compensado naval 20mm                            |
| 6    | Joelho 90° com Bucha Azul PVC Roscável e Soldável 32x20mm |
| 7    | Cap Marrom PVC Soldável 32mm                              |
| 8    | Estrutura de sustentação em MDF 10mm                      |

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Diante do desafio inicial proposto de se obter um sistema de baixo custo que correspondesse às expectativas mínimas de desempenho térmico, foi desenvolvido um modelo que, ao longo das espirais de projeto, foi reestruturado de forma a se compatibilizar às exigências iniciais de custo e eficiência.

Na Tab. 4-1, estão dispostos os resultados da escolha dos materiais e os custos envolvidos na aquisição dos mesmos. Em comparação com os materiais escolhidos na fase anterior do projeto, destaca-se a substituição dos tubos do coletor por uma estrutura formada pela placa alveolar de forro de PVC conectada aos tubos de entrada e saída de água, conforme apresentado na seção anterior. Isso diminuiu consideravelmente os custos do coletor, principalmente por conta dos conectores que seriam adquiridos naquela configuração. Outro fator que influenciou fortemente na diminuição dos custos foi o uso de um galão de polipropileno como reservatório, que foi cedido por uma empresa de distribuição de água mineral potável, frente ao custo de 70 reais relativo à aquisição da opção anterior.

Tabela 4-1: Custos relativos à aquisição de materiais do coletor

| COLETOR                                                               |                 |             |
|-----------------------------------------------------------------------|-----------------|-------------|
| ITEM                                                                  | QUANTIDADE      | PREÇO (R\$) |
| Tubo Marrom de PVC 32mm (Tigre)                                       | 1 m             | 14,95       |
| Forro Rígido de PVC Frisado                                           | 4 m             | 17,5        |
| Joelho 90° com Bucha Azul PVC Roscável e Soldável 32x20mm (Plastilit) | 2               | 9,38        |
| Bucha de Redução Branca PVC Roscável 20x14mm (Plastilit)              | 2               | 1,42        |
| Cap Marrom PVC Soldável 32mm (Tigre)                                  | 2               | 7,58        |
| Caixa de madeira (compensado naval) e lustração em verniz (15mm)      | 1000x500x200 mm | 180         |
| Vidro 3mm e corte em vidro (Leroy Merlin)                             | 1000x500 mm     | 70          |

|                              |                  |          |
|------------------------------|------------------|----------|
| Espuma polietileno expandido | 1 m <sup>2</sup> | (cedido) |
| Estrutura de sustentação     | 2 m              | (cedido) |
| TOTAL                        |                  | 300,83   |

Tabela 4-2: Custos relativos à aquisição de materiais do reservatório

| RESERVATÓRIO                                     |            |             |
|--------------------------------------------------|------------|-------------|
| ITEM                                             | QUANTIDADE | PREÇO (R\$) |
| Adaptador PVC com anel de vedação 25mm (Tigre)   | 2          | 20,38       |
| Engate Rápido Aquastop 1/2" Plástico (Daye)      | 2          | 11,38       |
| Bico para Mangueira 3/4" Plástico (G.F.)         | 2          | 12,18       |
| Manta Termica Etaflon 2mm (Isomanta Patch)       | 1 x 0,5 m  | 5           |
| Adesivo Durepoxi (Loctite)                       | 50 g       | 3,39        |
| Galão de Água Mineral 20 Litros em Polipropileno | 1          | (cedido)    |
| TOTAL                                            |            | 52,33       |

Tabela 4-3: Custos relativos à aquisição de outros materiais

| OUTROS ITENS                                     |            |             |
|--------------------------------------------------|------------|-------------|
| ITEM                                             | QUANTIDADE | PREÇO (R\$) |
| Mangueira Garden Flex 1/2" Azul (AFA)            | 2 m        | 11,98       |
| Veda Rosca Líquida (Mastiflex)                   | 30 g       | 9           |
| Cola PVC Aquatherm (Tigre)                       | 17 g       | 5,9         |
| Silicone Acético Incolor (Flexite)               | 50 g       | 9           |
| Termômetro Espeto à Prova d'Água MV-363 (Minipa) | 1          | (cedido)    |
| TOTAL                                            |            | 35,88       |

A partir da análise da transferência de calor, foi possível obter uma estimativa de qual seria a área necessária para o aquecimento dos 20L de água até 52°C para um dia de radiação intermediária. O cálculo leva em conta a simplificação trazida pela adoção de um regime constante de radiação ao longo do dia, o que na prática traz resultados diferentes por conta das particularidades do dia do ensaio.

O equipamento foi testado no Espaço Verde localizado no Parque Villa-Lobos, que se destaca por apresentar aos seus visitantes diversas informações a

respeito de sustentabilidade e plantio consciente, e cedeu seu espaço para que o teste fosse realizado no dia 24/11/2017.



Figura 4-1: Equipamento montado no Espaço Vida do Pq. Villa-Lobos

O dia de testes apresentou um bom regime de sol de nuvens positivo aos testes, marcado por um período de céu nublado pela manhã até o meio dia e insolação intensa a partir deste horário, com poucos bloqueios de nuvem no resto do dia. Isso proporcionou um patamar de temperatura em grande parte do período da manhã, seguido por um rápido aquecimento da água no período da tarde, fazendo com que a água do reservatório, ao final do dia, apresentasse uma temperatura média de 50,7°C. O ensaio teve fim às 17:30 por conta do horário de funcionamento do Espaço Vida, e os resultados estão apresentados na Tab. 4-4 e na Fig. 4-2.

Tabela 4-4: Dados do ensaio (24/11/2017)

| HORÁRIO | TEMPERATURA DE ENTRADA DA ÁGUA DO COLETOR (°C) | TEMPERATURA DE SAÍDA DA ÁGUA DO COLETOR (°C) | TEMPERATURA AMBIENTE (°C) |
|---------|------------------------------------------------|----------------------------------------------|---------------------------|
| 08:00   | 24,3                                           | 24,3                                         | 22,0                      |
| 09:00   | 24,1                                           | 24,3                                         | 22,4                      |
| 10:00   | 23,9                                           | 24,4                                         | 22,3                      |
| 10:30   | 24,4                                           | 24,7                                         | 23,1                      |
| 11:00   | 24,1                                           | 25,7                                         | 23,4                      |
| 11:30   | 24,8                                           | 29,1                                         | 23,9                      |
| 12:00   | 25,1                                           | 49,3                                         | 28,7                      |
| 12:30   | 30,2                                           | 52,1                                         | 29,1                      |
| 13:00   | 31,5                                           | 63,5                                         | 31,1                      |
| 13:30   | 33,7                                           | 55,7                                         | 31,5                      |
| 14:00   | 37,4                                           | 55,5                                         | 31                        |
| 14:30   | 40,2                                           | 49,6                                         | 28,3                      |
| 15:30   | 44,9                                           | 54,6                                         | 30,7                      |
| 16:30   | 46,9                                           | 56,3                                         | 31,9                      |
| 17:00   | 49,3                                           | 55,5                                         | 31                        |
| 17:30   | 47,6                                           | 54,5                                         | 28,0                      |

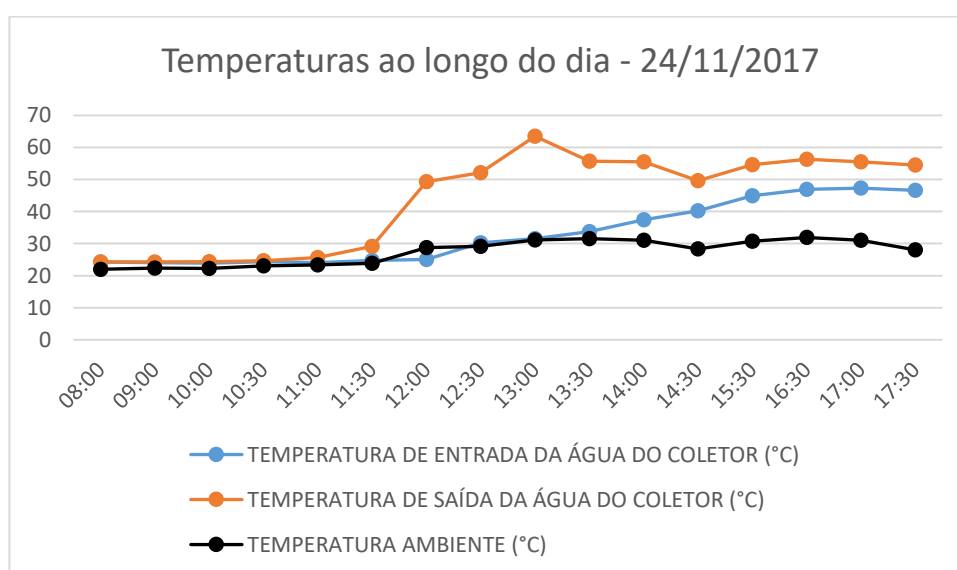


Figura 4-2: Temperaturas ao longo do dia de ensaio (24/11/2017)

## 5. CONCLUSÃO

O projeto de um sistema de aquecimento solar com base em um coletor plano se baseia em vários ciclos de projeto, nos quais se busca a alternativa que atinja uma temperatura superior a 50°C e que utilize materiais comuns, que não necessitem monitoramento regular ou manutenção de dispositivos com frequência. A partir do objetivo principal de redução de custos e uso de componentes acessíveis, desenvolveu-se um coletor que conseguiu contemplar os requisitos, possibilitando que se observem os fenômenos envolvidos no aquecimento da água sem maiores complicações, apenas conectando as mangueiras do coletor nos encaixes do reservatório de água.

Conclui-se que a adição de uma camada de vidro para criar o efeito estufa melhorou o isolamento térmico do coletor de maneira satisfatória e, junto à estrutura de madeira robusta de 20mm de espessura criou um ambiente de troca de calor que tem a capacidade de se manter eficiente mesmo quando há bloqueios temporários de nuvens e presença de ventos com menores temperaturas, quando comparado a coletores similares que não apresentam tal estrutura de proteção.

Quanto aos custos envolvidos, considerou-se que o resultado foi satisfatório, apesar de ainda superior às estimativas iniciais. Isso se explica por conta do preço elevado envolvido no corte e compra do vidro, além da montagem e envernização da caixa de madeira, feita de compensado naval para poder resistir às intempéries climáticas no longo prazo. Na Fig. 5-1 é ilustrado esse desequilíbrio de custos em relação ao resto do modelo.

Por fim, destaca-se que o modelo cumpre seu papel didático na medida em que desperta a curiosidade de pessoas, como ocorreu no dia do ensaio, no qual perguntas sobre o aparato foram realizadas e os visitantes puderam sentir a diferença de temperatura entre os tubos de entrada e saída de água do coletor, representando uma ótima oportunidade para que se entenda o

processo de convecção e como ele torna dispensável o uso de bombas para que haja fluxo de água no sistema.

#### CUSTOS DE PROJETO - POR SUBSISTEMA

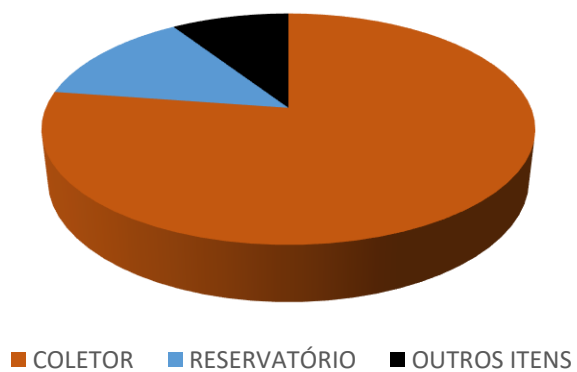


Figura 5-1: Custos do projeto, por subsistema

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARRUDA, L. B. Operação de sistemas de aquecimento solar de água com controle de vazões em coletores planos. 2004. 230 f. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIAS SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE SALVO BRITTO. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata&>. Acesso em 01 de Junho de 2017.

Cisternas: aprenda a aproveitar a água da chuva. Disponível em: <http://blogaecweb.com.br/blog/cisternas-aprenda-a-aproveitar-a-agua-dachuva/>. Acesso em 04 de Outubro de 2016.

DUFFIE, J. A.; BECKMAN, J. Solar engineering of thermal processes. 2.ed. John Wiley & Sons, 1991.

ELETROBRAS. Avaliação do mercado de eficiência energética do Brasil - Pesquisa de posse de equipamentos e hábitos de uso - Ano base 2005. Rio de Janeiro: ELETROBRAS; PROCEL, 2007. 187P.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Anuário Estatístico de Energia Elétrica. Rio de Janeiro, RJ, 2015. p. 57.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Anuário Estatístico de Energia Elétrica. Rio de Janeiro, RJ, 2015. p. 59.

GARCIA, F.; PALMISANO, F. G. Gerador solar de vapor. 2005. Trabalho de formatura – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2005.



HAHNE, E.; CHEN, Y. Numerical study of flow and heat transfer characteristics in hot water stores. Solar energy, v. 64, n. 1-3, p. 9-18, 1998.

INCROPERA, FRANK P. et. al. Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa, 6ª ed. LTC, Rio de Janeiro, RJ, 2008.

INSTITUTO BRASILEIRO DE OPINIÃO PÚBLICA E ESTATÍSTICA. 2ª Pesquisa de Opinião Pública sobre Energia Elétrica. Brasil, 2015.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Logística da Energia. Rio de Janeiro, RJ, 2015.

LITTLEFAIR, P. J. The luminous efficacy of daylight: a review. Lighting Research & Technology, CISBE. v. 17, 1985.

MOMOI, A. Projeto e testes de coletor solar de alta eficiência. Trabalho de Formatura – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2005.

MOREIRA, J. R. S. et. al. Energias renováveis, geração distribuída e eficiência energética, 1ª ed, LTC. Rio de Janeiro , 2017.

SHISHIDO, R. T. Dimensionamento de um sistema de aquecimento de água com energia solar – Método F-Chart. Trabalho de Formatura – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1986.

SOWMY, D. S. Aquecimento solar de água: Metodologia de avaliação da incerteza na medição do desempenho térmico de coletores solares planos utilizando simulador artificial de radiação solar. 2013. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

VAXMAN, M.; SOKOLOV, M. Effects of connecting pipes in thermosyphonic solar systems. Solar energy, v. 37, n. 5, p. 323 - 330, 1986.