

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**

PECE – PROGRAMA DE EDUCAÇÃO CONTINUADA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA USP

TALLES ANTONIO BONATO

Avaliação experimental de um sistema de aquecimento de água por  
energia solar para residência unifamiliar na cidade de Itatiba - SP

São Paulo  
2017

TALLES ANTONIO BONATO

Avaliação experimental de um sistema de aquecimento de água por energia solar para residência unifamiliar na cidade de Itatiba - SP

Trabalho de conclusão do curso de especialização em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Especialista em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética.

Área de concentração: Energia Solar.  
Orientador: Prof. Dr. Cláudio Pacheco.

São Paulo  
2017

#### Catálogo-na-publicação

Bonato, Talles Antonio

Avaliação experimental de um sistema de aquecimento de água por energia solar para residência unifamiliar na cidade de Itatiba - SP / T. Bonato -- São Paulo, 2017.

63 p.

Monografia (Especialização em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

PECE – Programa de Educação Continuada em Engenharia.

1.Energia Solar. 2.Aquecimento de água. 3.Norma brasileira. I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. PECE – Programa de Educação Continuada em Engenharia II.t.

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus familiares, amigos, e em especial a Izabela e a Maia por me apoiarem em mais essa etapa e pela paciência que todos tiveram comigo.

A equipe do PECE que sempre esteve a disposição para esclarecimentos e orientações.

Aos professores e professoras que me ajudaram a conquistar conhecimentos sólidos em uma área relativamente nova e em constante desenvolvimento.

Gostaria de agradecer em especial ao meu orientador Prof. Dr. Cláudio Pacheco que não mediu esforços para o desenvolvimento desse trabalho e sempre esteve disponível para sanar minhas dúvidas.

## **RESUMO**

Essa monografia apresenta um estudo de eficiência térmica em um sistema de aquecimento de água por energia solar. Esse sistema foi dimensionado e instalado por um profissional sem conhecimento técnico na área. Projetos e instalações realizadas por profissionais despreparados tecnicamente são muito comuns na área residencial, pois muitas vezes nem o proprietário do imóvel possui conhecimento sobre o assunto. O trabalho consiste em apresentar a norma brasileira, ABNT NBR 15569, compará-la com a instalação objeto de estudo a fim de verificar sua aderência à norma, levantar e avaliar as informações de temperatura d'água do sistema e energia solar no plano de instalação dos coletores solares e propor melhorias ao mesmo, além de realizar um dimensionamento conforme as etapas sugeridas por uma das metodologias apresentadas pela norma.

Palavras-chave: Energia solar. Aquecimento de água. Norma brasileira.

## **ABSTRACT**

This paper presents a study of thermal efficiency in a solar water heating system. This system was designed and installed by a professional with no technical knowledge in the area. Projects and installations performed by technically unprepared professionals are very common in the residential area, as often the owner of the property does not have knowledge about the subject. The work consists in presenting the Brazilian standard, ABNT NBR 15569, to compare it with the installation object of study in order to verify its adherence to the norm, to collect and evaluate the information of water temperature of the system and solar energy in the installation plan of the solar collectors and propose improvements to it, besides to carry out a dimensioning according to the steps suggested by one of the methodologies presented by the standard.

**Keywords:** Solar energy. Water heating. Brazilian standard.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Orientação dos Coletores Solares .....	13
Figura 2.2 – Inclinação dos Coletores Solares .....	13
Figura 2.3 – Exemplos de Instalação de Sifão.....	15
Figura 2.4 – Posicionamento do Sistema de Aquecimento de Água.....	21
Figura 2.5 – Irradiação Média para Campinas .....	21
Figura 3.1 – Croqui de Instalação do Sistema de Aquecimento de Solar .....	25
Figura 3.2 – Localização do Sistema na Residência (Sem Escala) .....	27
Figura 3.3 – Coletor Solar Sujo e Limpo .....	27
Figura 3.4 – Fixação dos Coletores Solares .....	28
Figura 3.5 – Tubulação sem Estrutura de Apoio e Isolamento Térmico Inoperante.....	28
Figura 3.6 – Sombreamento Proveniente de Construção .....	29
Figura 3.7 – Sombreamento Proveniente de Árvores.....	29
Figura 3.8 – Agravamento do Sombreamento.....	30
Figura 3.9 – Forças sobre o Sistema.....	34
Figura 3.10 – Análise do Azimute da Superfície .....	43
Figura 3.11 – Instrumentação Instalada.....	45
Figura 3.12 – Orientação dos Coletores Solares .....	47

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Relação de Cabeamento e Disjuntores para Resistência Elétrica.....	24
Tabela 3.1 – Legenda do Croqui de Instalação do Sistema.....	26
Tabela 3.2 – Comparação do Sistema Instalado com a Seção 10 da ABNT NBR 15569.....	30
Tabela 3.3 – Comparação do Sistema Instalado com os Requisitos .....	32
Tabela 3.4 - Dados Meteorológicos de Itatiba.....	35
Tabela 3.5 – Dimensionamento do Sistema .....	36
Tabela 3.6 – Dimensionamento do Sistema com Mudança no Coletor.....	36
Tabela 3.7 – Comparação Financeira entre os Dimensionamentos.....	37
Tabela 3.8 – Local de Instalação dos Sensores .....	37
Tabela 3.9 – Especificação da Instrumentação de Medição .....	45
Tabela 3.10 – Temperaturas Médias.....	48
Tabela 3.11 – Energia Absorvida .....	48
Tabela 3.12 – Energia sobre o Plano dos Coletores .....	49
Tabela 3.13 – Temperaturas Hora a Hora.....	49
Tabela 3.14 – Eficiência do Coletor Solar conforme Metodologia 1 .....	50
Tabela 3.15 – Eficiência do Coletor Solar conforme Metodologia 2 .....	50
Tabela 3.16 – Temperaturas Médias.....	52
Tabela 3.17 – Energia Absorvida .....	52
Tabela 3.18 – Energia sobre o Plano dos Coletores .....	52
Tabela 3.19 – Temperaturas Hora a Hora.....	53
Tabela 3.20 – Eficiência do Coletor Solar conforme Metodologia 1 .....	53
Tabela 3.21 – Eficiência do Coletor Solar conforme Metodologia 2 .....	54
Tabela 3.22 – Temperaturas Médias.....	55
Tabela 3.23 – Energia Absorvida .....	55



Tabela 3.24 – Energia sobre o Plano dos Coletores .....	56
Tabela 3.25 – Temperaturas Hora a Hora.....	56
Tabela 3.26 – Eficiência do Coletor Solar conforme Metodologia 1 .....	57
Tabela 3.27 – Eficiência do Coletor Solar conforme Metodologia 2 .....	57
Tabela 3.28 – Resultados das Medições Oficiais e Valores Calculados .....	58

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	10
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	12
2.1	Seção 9 da ABNT NBR 15569.....	12
2.2	Seção 10 da ABNT NBR 15569.....	12
2.3	Anexo B da ABNT NBR 15569 .....	18
2.4	Potencial Solarimétrico em Itatiba.....	20
2.5	Requisitos de um Sistema de Energia Solar operando por termossifão para aquecimento de água .....	22
2.5.1	Localização do Equipamento.....	22
2.5.2	Instalação dos Coletores .....	22
2.5.3	Instalação Hidráulica .....	23
2.5.3.1	Circuito Secundário (Alimentação de Água Fria e Consumo de Água Quente) .....	23
2.5.3.2	Circuito Primário (Tubulações entre o Reservatório Térmico e os Coletores Solares) .....	24
2.5.4	Instalação Elétrica .....	24
3	DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO .....	25
3.1	Descrição do Sistema de Energia Solar Operando por termossifão para aquecimento de água para banho objeto de estudo.....	25
3.2	Avaliação Comparativa do Sistema Instalado com a Seção 10 da ABNT NBR 15569 e com os requisitos para o mesmo.....	30
3.2.1	Análise Mecânica do Sistema de Fixação Utilizado.....	33
3.3	Dimensionamento do Sistema Conforme Anexo B Item B.2 da ABNT NBR 15569.....	35
3.4	Metodologia de Avaliação do Rendimento Térmico do Sistema Coletor Solar operando em termossifão .....	37
3.5	Instrumentação Instalada no Sistema e Procedimentos de Medidas.....	45
3.6	Procedimento e plano para condução dos ensaios .....	46
3.7	Resultados dos ensaios, medições e valores calculados.....	46
3.7.1	Ensaio preliminares .....	46
3.7.2	Medição oficial do dia 17/07/2017 .....	48
3.7.3	Medição oficial do dia 20/07/2017 .....	51
3.7.4	Medição oficial do dia 21/07/2017 .....	54
3.8	Análise dos Resultados.....	58
4	CONCLUSÃO .....	61



## 1 INTRODUÇÃO

Esta monografia realizou uma avaliação experimental de um sistema de energia solar composto por três coletores planos e um reservatório térmico operando por termossifão e destinado a aquecimento de água para banho em uma residência unifamiliar.

O efeito do termossifão consiste em diferença de densidade, isto é, a água do reservatório térmico que está mais fria e, portanto, mais densa, que a água dentro do coletor solar, tende a descer para coletor solar e a água menos densa, do coletor solar, tende a subir para o reservatório térmico. Esse fenômeno não necessita de um sistema de bombeamento, assim evitando gasto com energia elétrica.

A instalação foi realizada, na opinião do proprietário, de forma empírica por um eletricista em janeiro de 2015. O sentimento do proprietário é que este sistema não está funcionando satisfatoriamente.

O objetivo desta monografia foi obter parâmetros de conformidade desta instalação com a norma ABNT NBR 15569 no que diz respeito aos itens de dimensionamento e montagem e medir a eficiência térmica global do sistema e dos coletores solares pelas metodologias aqui propostas.

O trabalho está dividido em três partes. A primeira é a revisão bibliográfica que apresenta os itens de interesse da norma ABNT NBR 15569, o potencial solarimétrico do local de instalação e os requisitos de instalação de um sistema de aquecimento de água conforme a cartilha de um dos maiores fabricantes de equipamento do mercado. A segunda parte é o desenvolvimento que apresenta o sistema objeto de estudo, compara o mesmo com a norma e as diretrizes, apresenta um pré-dimensionamento para a residência, informa os resultados dos testes e medições e os avalia. A terceira parte conclui todo o estudo realizado e apresenta algumas possíveis melhorias para o sistema.

Esta monografia em linhas gerais concluiu que o sistema de aquecimento de água necessita passar por ações corretivas devido à baixa aderência ao item de instalação da norma brasileira e das diretrizes de instalação, além que o mesmo está superdimensionado com relação a demanda térmica da residência. O sistema obteve uma eficiência térmica estimada de 40%, porém constatou que os coletores solares estão em perfeita condições de uso, assim gerando recomendações não invasivas ao sistema, tal como limpeza periódica dos coletores solares e

recomendações invasivas, tal como correções do ângulo de inclinação e da orientação geográfica dos coletores solares.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) é o Foro Nacional de Normalização. A ABNT NBR 15569 normatiza projeto e instalação de um sistema de aquecimento solar de água em circuito direto, não englobando sistema para aquecimento de água de piscina e circuitos indiretos.

Esta Norma contempla os seguintes assuntos: documentação de projeto, concepção, operação, segurança, materiais, circuito hidráulico, dimensionamento e instalação, contemplados em 11 seções e 6 anexos. Este trabalho tem como foco a análise das seções 9 e 10, Dimensionamento e Instalação respectivamente e do Anexo B desta norma.

### **2.1 Seção 9 da ABNT NBR 15569.**

A seção 9 possui apenas o item 9.1, denominado Considerações gerais que informa que o dimensionamento tem como objetivo determinar o volume de armazenamento e a área coletora para uma determinada carga térmica, para tal pode ser utilizado qualquer método reconhecido ou utilizar o método proposto no Anexo B.

### **2.2 Seção 10 da ABNT NBR 15569**

O item 10.1 denominado Análise preliminar, orienta o instalador verificar se as premissas, materiais e equipamentos estabelecidos nas especificações, manual de instalação e projeto possam ser atendidas, além de informar que o Anexo F possui um passo a passo para realizar essa avaliação.

Requisitos gerais é o item 10.2 e há 4 divisões.

A divisão 10.2.1, Vazamentos, orienta verificar, caso haja algum vazamento, meios de escoar a água e a impermeabilização do local onde será instalado.

Na divisão 10.2.2, Integridade dos coletores solares, informa que os coletores solares não podem ser deixados por longos períodos expostos ao sol, com ou sem água, desconectados do reservatório térmico e evitar deixar as entradas e saídas de água sem proteção contra a entrada de poeira e sujeira.

Fixação de componentes é a divisão 10.2.3 e orienta que qualquer modificação na edificação, tal como furação não podem alterar a integridade do local.

A última divisão, Distância da rede elétrica, é a 10.2.4 e observa que o coletor solar deve ser instalado no mínimo 3 metros da rede pública de distribuição de energia elétrica.

O item 10.3, Coletores solares, possui 11 divisões.

Materiais e equipamentos é a divisão 10.3.1, a mesma solicita a verificação da compatibilidade do coletor solar com o seu uso.

A divisão 10.3.2 é denominada Orientação geográfica e sugere, caso não haja informação em projeto ou manual, que a orientação do coletor deve ser feita, com desvio em até  $30^\circ$  para ambos os lados, para o Norte geográfico conforme a Figura 2.1.

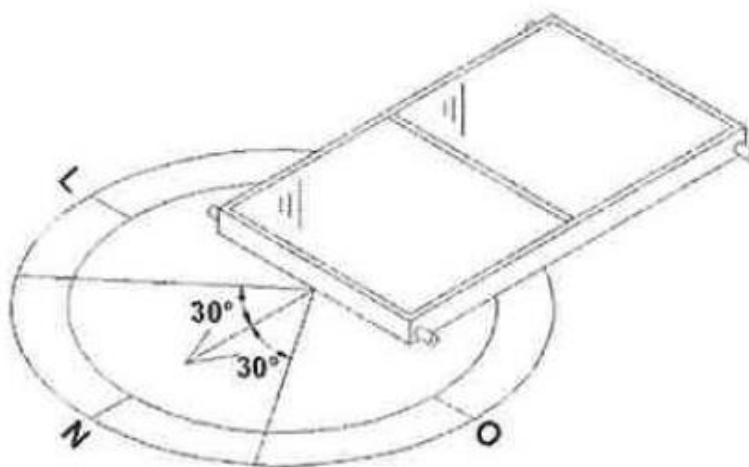


Figura 2.1 – Orientação dos Coletores Solares  
Fonte: ABNT NBR 15569

Na divisão 10.3.3, Ângulo de inclinação, informa caso não haja informação em projeto ou manual, que o ângulo de inclinação do coletor solar seja igual ao da latitude do local, somados mais  $10^\circ$ , conforme Figura 2.2 e não recomenda inclinação inferior a  $15^\circ$ .

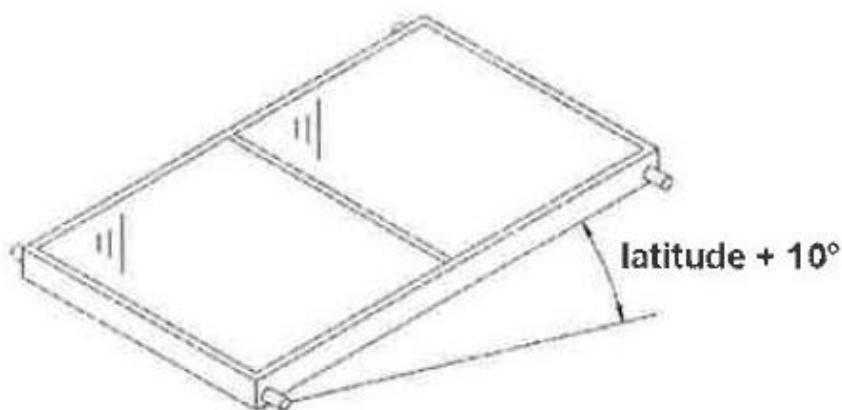


Figura 2.2 – Inclinação dos Coletores Solares  
Fonte: ABNT NBR 15569

A divisão 10.3.4, Requisitos gerais, informa seguir as especificações, manual de instalação e projeto para a instalação dos coletores solares, informa também dois lugares onde podem ser realizadas as instalações, solo ou cobertura, sendo que em cobertura podem ser utilizados diversos tipos de suportes de fixação e que não pode haver nenhuma obstrução das passagens, tanto para acesso e saída como para manutenção dos componentes. A orientação do coletor tem que considerar fatores como, resíduos no ar e vegetação, pois os mesmos influenciam o rendimento e integridade do coletor.

A divisão 10.3.5 é denominada Estrutura de apoio e orienta que se deve isolar o suporte de fixação do coletor caso os mesmos sejam de materiais diferentes para evitar eletrocorrosão, além de informar que os suportes devem ser instalados para resistir às intempéries, cargas do sistema e sem causar danos no coletor solar.

A divisão 10.3.6, Elementos de fixação, informa que todos os elementos de fixação, tais como, chumbadores e elementos roscados, devem ser protegidos contra corrosão e resistir a esforços mecânicos do próprio sistema.

Montagem sobre cobertura é a divisão 10.3.7 e apresenta 3 etapas para tais instalações, sendo as mesmas, localizar os pontos de apoio, fixar os suportes em tais pontos e caso seja necessário realizar impermeabilização nos pontos instalados.

A divisão 10.3.8 denominada Montagem no solo, observa dois cuidados para esse tipo de instalação, sendo os mesmos, sinalizar o local para evitar acidentes e instalar dispositivo de segurança para evitar danos ao sistema instalado.

10.3.9 é a divisão denominada Sombreamento e informa que o local para realizar a instalação dos coletores deve evitar sombra proveniente de qualquer fonte.

Proteção anticongelamento é a divisão 10.3.10 e orienta que alguns locais de instalação do sistema o fluido de trabalho pode congelar e que se deve seguir especificações, manual de instalação e projeto para a instalação de dispositivos de segurança.

A divisão 10.3.11, Providências finais, orienta que para preservar as características originais, os coletores solares devem ser protegidos de radiação quando os mesmos estiverem secos.

O item 10.4 é denominado Reservatório térmico possui 11 divisões.

A primeira divisão, 10.4.1, denominada Local de instalação, orienta que a instalação deve permitir, caso necessário, troca e manutenção do reservatório térmico.

Alimentação de água fria é a divisão 10.4.2 e informa que caso a alimentação do reservatório for realizada por gravidade, o nível superior deve ser abaixo do nível inferior da



tomada d'água fria do reservatório de água fria e que a tubulação de alimentação deve ser exclusiva. Caso a alimentação seja realizada em nível, deve considerar dispositivos específicos para esse fim, além de informar que a tubulação de alimentação não deve ter diâmetro inferior à tubulação de consumo de água quente.

A divisão 10.4.3, Proteção contra retorno de água quente, orienta a instalação de sifão na tubulação de água fria e que o mesmo deve seguir as especificações, manual e projeto, mas que não deve ser inferior a 30 cm de altura, conforme apresentado pelos exemplos da Figura 2.3, orienta também instalar válvula de retenção na alimentação de água fria, caso o reservatório de água fria não seja exclusivo para o sistema de aquecimento de água. Pode instalar também válvula de retenção na alimentação de água fria caso o reservatório térmico não possua respiro, porém deve instalar, no reservatório térmico, sistema de proteção contra pressão positiva e negativa, eliminação de vapor e ar.

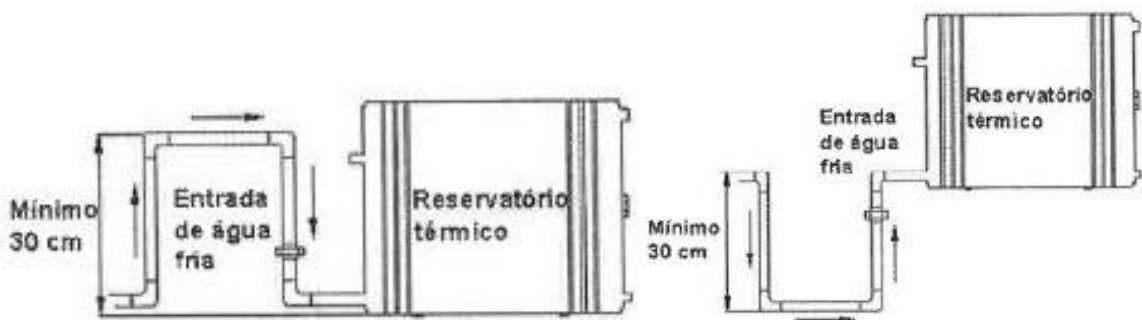


Figura 2.3 – Exemplos de Instalação de Sifão  
Fonte: ABNT NBR 15569 (ADAPTADO)

A divisão 10.4.4 é denominada Aquecedor auxiliar – Carregamento com água atenta que o reservatório térmico deve estar completo de água antes de energizar o aquecedor auxiliar, caso o reservatório possua tal sistema.

Instalação dos reservatórios térmicos é a divisão 10.4.5 e orienta verificar a compatibilidade do reservatório para instalação interna ou ao tempo, além de informar que os suportes e estruturas de apoio onde será realizada a instalação do reservatório devem resistir aos esforços mecânicos quando o sistema estiver em funcionamento ou em manutenção, para última ocasião, devem-se instalar registros nas entradas e saídas de água do reservatório, salvo em saídas para dispositivos de segurança.

A divisão 10.4.6, Proteção contra pressão negativa, acúmulo de ar e excesso de pressão positiva orienta que devem ser instalados sistemas para limitar a pressão e eliminar vapor d'água e ar do reservatório conforme especificação, manual do fabricante ou projeto, além de

atentar que para sistemas com mais de um reservatório térmico, deve ser instalado em cada reservatório válvula para alívio de pressão sem nenhuma obstrução ao mesmo.

Respiro é a divisão 10.4.7 e orienta que, caso o reservatório térmico possua respiro instalado, o mesmo deve atender aos seguintes itens, sendo eles, a tubulação do respiro deve ser instalada no ponto mais alto do reservatório e deve estar em posição ascendente ultrapassando o nível máximo do reservatório de água fria em no mínimo 30 cm e deve ter diâmetro conforme especificação, manual do fabricante ou projeto, não podendo ser inferior a 15 mm.

A divisão 10.4.8, Válvula de alívio de pressão positiva, informa que a tubulação de descarga não deve possuir nenhuma obstrução e deve ter diâmetro conforme especificação, manual do fabricante ou projeto, não menor que 15 mm. A divisão 10.4.9 denominada Válvula de alívio de pressão negativa (quebra vácuo) orienta que a instalação da válvula, caso o dispositivo quebra vácuo esteja separado ou conectado em outra ligação, deva ser conforme especificação, manual do fabricante ou projeto e acima do nível de água do reservatório térmico.

10.4.10 é a divisão denominada Válvula eliminadora de ar e orienta que a instalação da válvula deve ser realizada acima do nível superior do reservatório térmico.

A divisão 10.4.11, Drenagem, informa que o sistema de aquecimento de água deve possuir dispositivo de drenagem e que a tubulação da mesma deve conduzir o fluido para local apropriado. Informa também que para sistema de aquecimento de água sem sistema de respiro, o mesmo deve ter dispositivo instalado acima do nível de água do reservatório térmico com a mesma capacidade de vazão do dispositivo de drenagem para facilitar a entrada de ar.

O item 10.5, Tubulação, possui 4 divisões, porém primeiramente orienta que sejam evitados o uso de sifões e embarrigamentos para o bom funcionamento do sistema. Orienta também que a tubulação e acessórios não devem interferir no funcionamento de portas ou janelas e que a instalação de tubo deve ser conforme Normas Brasileiras. Além de atentar que tubulações enterradas com tráfego sobre as mesmas devem ser capazes de suportar os esforços mecânicos, atenta também que deve realizar isolamento, caso haja uso, entre metais não similares.

A divisão 10.5.1 denominada Conexões de serviço informa que para realização de manutenção do sistema de aquecimento de água, deve haver conexões apropriadas em localização acessível para tal procedimento.

10.5.2 é a divisão denominada Perfuração de coberturas e atenta que seja vedado perfeitamente furos em cobertura para passagem da tubulação.

A divisão 10.5.3, Suportes, orienta a instalação de suportes para fixação das tubulações.

Isolamento térmico é a divisão 10.5.4 e informa que o isolamento térmico deve ser instalado na tubulação de forma que evite acúmulo de umidade e apenas após a realização do ensaio de estanqueidade e limpeza da mesma.

Motobomba é o item 10.6 e orienta que a motobomba deve ser instalada para trabalhar afogada, em local que permita circulação de ar, e que haja registros para eventual substituição da mesma, além de suportar a temperatura máxima do fluido do sistema de aquecimento de água. A instalação deve seguir 3 requisitos, sendo eles, a motobomba deve movimentar a água do reservatório térmico para os coletores e retorná-la para o reservatório, na saída da motobomba deve ser instalado uma válvula de retenção e não deve haver vibração na estrutura da construção e nos elementos do sistema proveniente da motobomba. Deve seguir as especificações, manual do fabricante ou projeto para a instalação dos controles da motobomba. Se o acionamento da motobomba for realizado por controlador diferencial de temperatura, os sensores devem permitir leitura precisa da temperatura e devem ser isolados termicamente.

O item 10.7 denominado Componentes e acessórios possui 4 divisões, mas primeiramente orienta que devem ser protegidos todos os componentes que o sistema de aquecimento de água possua e que seja exposto a ações externas, como por exemplo intempéries.

A divisão 10.7.1, Limpeza de filtros, informa que para limpeza ou substituição de filtros, caso haja, os mesmos devem ser instalados de forma que tenha interrupção mínima no sistema.

10.7.2 é a divisão denominada Controles e dispositivos de segurança e orienta que a instalação desses acessórios deve ser conforme especificação, manual do fabricante ou projeto, além de garantir que qualquer falha de algum componente do sistema não resulte em danos aos usuários do sistema de aquecimento de água. Orienta também que todos os controles e dispositivos, além do quadro de comando quando houver, devem ter identificação de função.

Sensores é a divisão 10.7.3 e informa que todos os sensores de temperatura devem ser instalados conforme especificação, manual do fabricante ou projeto, mas na ausência desses documentos o sensor de temperatura do coletor solar deve ser instalado na tubulação de retorno a no máximo 0,05 m do coletor, e o sensor de temperatura do reservatório térmico deve ser instalado na tubulação de alimentação dos coletores a no máximo 0,2 m do reservatório térmico.

A divisão 10.7.4, Instrumentos, atenta que a instalação dos instrumentos deve permitir fácil leitura dos mesmos.

O item 10.8, Manutenção do SAS, orienta seguir o plano de manutenção entregue pelo instalador. Deve ser possível isolar os circuitos primário e secundário para manutenção ou em caso de emergência sem interromper os outros circuitos hidráulicos inclusive os de segurança.

Orienta também que todas as válvulas e dispositivos de segurança devem ser inspecionados periodicamente e que a superfície dos coletores solares deve ser limpa quando necessário.

Armazenamento e transporte é o item 10.9 e atenta que o transporte e armazenamento de todos os equipamentos do sistema de aquecimento de água devem ser conforme instrução do fabricante. Nunca deve utilizar as pontas dos tubos para o transporte, sendo que no reservatório térmico, deve utilizar a alça de transporte ou o pé e os coletores solares devem ser transportados pela caixa estrutural, atentando-se para os coletores que possuem cobertura de vidro, a fim de evitar acidentes.

### 2.3 Anexo B da ABNT NBR 15569

O Anexo B sugere dois métodos para realizar o dimensionamento do sistema, sendo o item B.1 a Metodologia de cálculo 1 que orienta verificar a metodologia da “Carta F” do livro Solar Heating Design de Duffie & Beckman.

O item B.2 denominado Metodologia de cálculo 2 informa que a metodologia apresentada para o dimensionamento é recomendada para sistemas em residências unifamiliares e que o cálculo apresentado considera uma fração solar de 70% e que não há sombreamento sobre os coletores solares. Este item ainda possui duas divisões. A divisão B.2.1 é: Etapas de dimensionamento e fornece quatro etapas a serem seguidas para o dimensionamento do sistema.

A etapa “a” determina o volume de consumo através da fórmula 2.1.

$$V_{CONSUMO} = \sum (Q_{pu} \times T_u \times \text{frequência de uso}) \quad (2.1)$$

Onde:

$V_{CONSUMO}$  = Volume total de água quente consumido diariamente [m<sup>3</sup>]

$Q_{pu}$  = Vazão da peça de utilização [m<sup>3</sup>/s]

$T_u$  = Tempo médio de uso da peça [s]

*frequência de uso* = Número de vezes de utilização da peça por dia

A etapa “b” determina o volume de armazenamento do sistema através da fórmula 2.2.

$$V_{ARMAZ.} = \frac{V_{CONSUMO} \times (T_{CONSUMO} - T_{AMBIENTE})}{(T_{ARMAZ.} - T_{AMBIENTE})} \quad (2.2)$$

Onde:

$V_{ARMMAZ.}$  = Volume de armazenamento do sistema [ $m^3$  – Sugere que  $V_{ARMMAZ.} \geq 75\% V_{CONSUMO}$ ]

$V_{CONSUMO}$  = Volume total de água quente consumido diariamente [ $m^3$ ]

$T_{CONSUMO}$  = Temperatura de consumo [ $^{\circ}C$  – Sugere que seja adotado  $40^{\circ}C$ ]

$T_{AMBIENTE}$  = Temperatura ambiente média anual do local da instalação [ $^{\circ}C$ ]

$T_{ARMMAZ.}$  = Temperatura de armazenamento da água [ $^{\circ}C$  – Sugere que  $T_{ARMMAZ.} \geq T_{CONSUMO}$ ]

A etapa “c” determina a demanda de energia útil através da fórmula 2.3.

$$E_{\text{útil}} = \frac{V_{ARMMAZ.} \times \rho \times c_p \times (T_{ARMMAZ.} - T_{AMBIENTE})}{3600} \quad (2.3)$$

Onde:

$E_{\text{útil}}$  = Energia útil [kWh/dia]

$V_{ARMMAZ.}$  = Volume de armazenamento do sistema [ $m^3$  – Sugere que  $V_{ARMMAZ.} \geq 75\% V_{CONSUMO}$ ]

$\rho$  = Massa específica da água [ $1000 \text{ kg}/m^3$ ]

$c_p$  = Calor específico [Para água  $4,19 \text{ kJ}/\text{kg}^{\circ}C$ ]

$T_{ARMMAZ.}$  = Temperatura de armazenamento da água [ $^{\circ}C$  – Sugere que  $T_{ARMMAZ.} \geq T_{CONSUMO}$ ]

$T_{AMBIENTE}$  = Temperatura ambiente média anual do local da instalação [ $^{\circ}C$ ]

A etapa “d” determina a área coletora através da fórmula 2.4.

$$A_{\text{coletora}} = \frac{(E_{\text{útil}} + E_{\text{perdas}}) \times FC_{\text{instal}} \times 4,901}{PMDEE \times I_G} \quad (2.4)$$

Onde:

$A_{\text{coletora}}$  = Área coletora [ $m^2$ ]

$E_{\text{útil}}$  = Energia útil [kWh/dia]

$E_{\text{perdas}}$  = Total de perda térmica dos circuitos primário e secundário somados ou calculado por  $0,15 \times E_{\text{útil}}$  [kWh/dia]

$FC_{\text{instal}}$  = Fator de correção para inclinação e orientação do coletor solar

$PMDEE$  = Produção média diária energia específica do coletor solar [kWh/m<sup>2</sup>]

$I_G$  = Irradiação global média para o local de instalação [kWh/m<sup>2</sup>]

A fórmula 2.5 apresenta o fator de correção para inclinação e orientação do coletor solar.

$$FC_{instal} = \frac{1}{1 - [1,2 \times 10^{-4} \times (\beta - \beta_{ótimo})^2 + 3,5 \times 10^{-5} \times \gamma^2]} \quad (2.5)$$

Onde:

(para  $15^\circ < \beta < 90^\circ$ )

$\beta$  = Inclinação do coletor em relação ao plano horizontal [°]

$\beta_{ótimo}$  = Inclinação ótima do coletor [°] – Recomenda-se usar o valor de módulo da latitude +10°

$\gamma$  = Azimute da superfície [°]

A fórmula 2.6 apresenta a produção média de energia específica do coletor solar.

$$PMDEE = 4,901 \times (F_R(\tau\alpha) - 0,0249 \times F_R U_L) \quad (2.6)$$

Onde:

$F_R(\tau\alpha)$  = Coeficiente de ganho do coletor solar

$F_R U_L$  = Coeficiente de perdas do coletor solar

O item B.2.2 apresenta um exemplo de dimensionamento de um sistema utilizando a metodologia acima apresentada.

## 2.4 Potencial Solarimétrico em Itatiba

O sistema de aquecimento de água está instalado em Itatiba – SP sob as coordenadas apresentadas abaixo:

- Latitude: 22°57'32,70''S
- Longitude: 46°45'50,82''O

A Figura 2.4 ilustra o posicionamento.

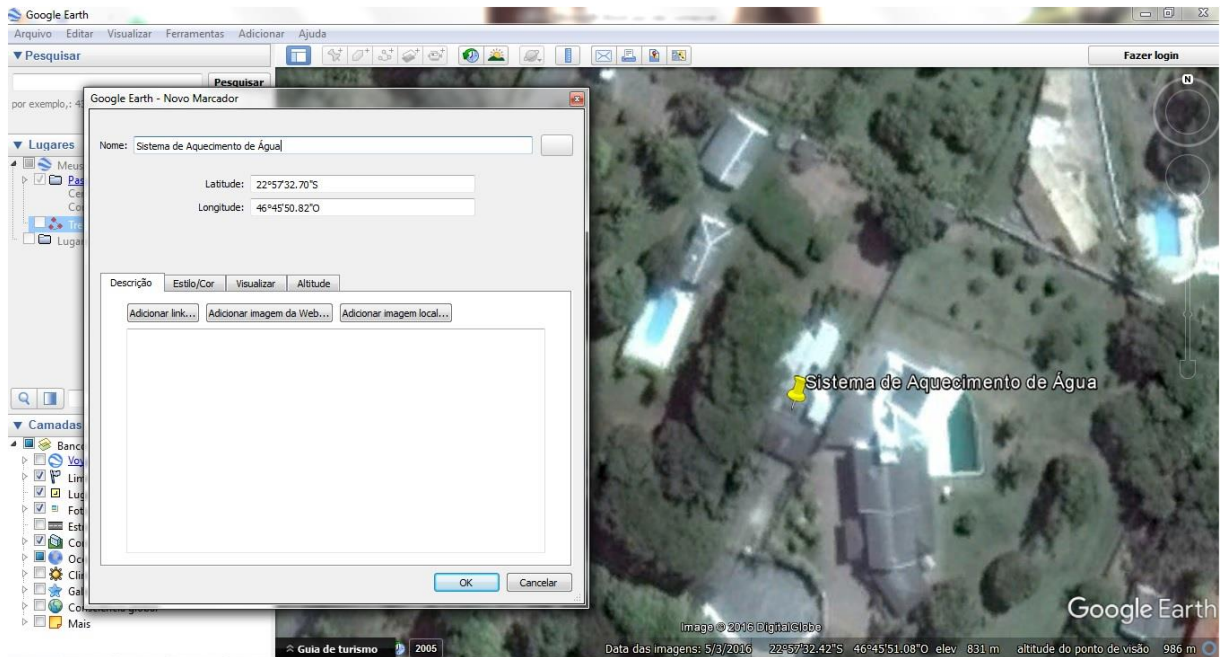


Figura 2.4 – Posicionamento do Sistema de Aquecimento de Água  
Fonte: Google Earth Pro®

O Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito (CRESESB) fornece informações sobre o potencial solar brasileiro. O mesmo utiliza o programa SunDATA para calcular a irradiação solar diária média mensal em qualquer ponto do território nacional. Para as coordenadas do SAS avaliado, o ponto mais próximo é a cidade de Campinas - SP, com as informações apresentadas pela Figura 2.5 abaixo.

Estação: Campinas  
Município: Campinas, SP - BRA  
Latitude: 22,8° S  
Longitude: 47,060833° O  
Distância do ponto de ref. ( 22,959083° S; 46,764117° O ): 35,2 km

#	Ângulo	Inclinação	Irradiação solar diária média mensal [kWh/m <sup>2</sup> .dia]												Média	Delta
			Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez		
✓	Plano Horizontal	0° N	5,33	5,56	5,22	4,53	4,06	3,56	4,19	4,58	4,75	5,58	5,06	5,53	4,90	2,30
✓	Ângulo igual a latitude	23° N	4,83	5,30	5,38	5,15	5,09	4,66	5,47	5,45	5,07	5,45	5,36	4,94	5,18	,81
✓	Maior média anual	23° N	4,83	5,30	5,38	5,15	5,09	4,66	5,47	5,45	5,07	5,45	5,36	4,94	5,18	,81
✓	Maior mínimo mensal	26° N	4,73	5,23	5,35	5,18	5,18	4,76	5,59	5,52	5,06	5,39	5,26	4,83	5,17	,85

Irradiação Solar no Plano Inclinado –Campinas–Campinas, SP-BRA

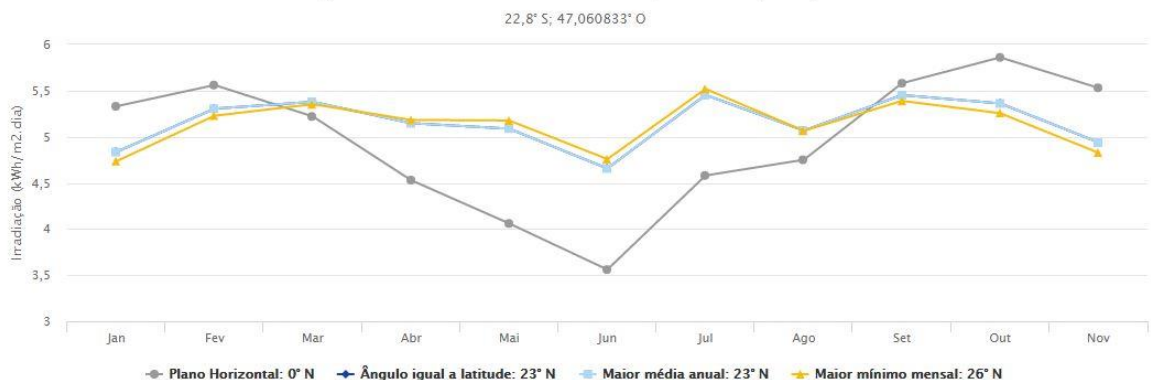


Figura 2.5 – Irradiação Média para Campinas  
Fonte: CRESESB

## **2.5 Requisitos de um Sistema de Energia Solar operando por termossifão para aquecimento de água**

A descrição dos requisitos de um sistema de energia solar operando por termossifão para aquecimento de água conforme a Norma ABNT NBR 15569 é detalhada e exemplificada em diferentes manuais de fabricantes de coletores e componentes. Pode-se dividir a instalação em 4 itens, sendo os mesmos apresentados abaixo.

### **2.5.1 Localização do Equipamento**

O local de instalação deve possuir fácil acesso para inspeções, limpeza e conservação. Para evitar perda térmica, instalar o reservatório térmico e os coletores solares próximo do ponto de consumo e para sistema de circulação natural, respeitar a distância máxima de 5 m entre o reservatório dos coletores solares.

A instalação do reservatório térmico deve ser realizada em base plana e nivelada para que haja distribuição correta de peso, além de possuir sistema de escoamento e impermeabilização para que em uma eventual manutenção ou vazamento a água seja direcionada para local correto de descarte.

### **2.5.2 Instalação dos Coletores**

A orientação dos coletores, para o hemisfério sul, deve ser para o norte geográfico com um desvio máximo de 30° para ambos os lados. A inclinação deve ser o valor da latitude do local mais 10°, mas é comum que a instalação seja realizada diretamente no telhado com inclinação de 17° sem que haja considerável perda de eficiência.

Para instalação realizada diretamente no telhado, assegurar que o coletor solar esteja totalmente apoiado nas telhas. Para fixação, o coletor deve ser amarrado ao telhado por fitas de aço inox perfurado ou fios de cobre, a fixação deve ser realizada nos tubos do coletor.

Instalação em laje o coletor solar deve ser instalado, totalmente apoiado e ficado, em suporte triangular e são necessárias bases de alvenaria para o mesmo. Todos os elementos de fixação e a base devem suportar todos os esforços mecânicos.

Deve instalar os coletores com uma distância mínima entre os mesmos para evitar sombreamento.



### **2.5.3 Instalação Hidráulica**

Não é recomendado que seja realizada a conexão do reservatório térmico diretamente com a rede de água pública, pois as variações de pressão podem danificá-lo, assim deve utilizar caixa d'água fria para alimentação do reservatório térmico.

#### **2.5.3.1 Circuito Secundário (Alimentação de Água Fria e Consumo de Água Quente)**

Para sistema alimento por caixa d'água em baixa pressão, é necessário que haja no mínimo, um desnível de 15 cm entre o topo do reservatório térmico e a base da caixa de água. Deve ser instalado sistema de respiro próximo ao reservatório térmico na tubulação de consumo de água quente para controlar a pressão em seu interior. Nas conexões do reservatório deve ser evitada a aplicação de torque no momento da instalação e nunca carregar o reservatório pelas conexões hidráulicas. A altura máxima entre o topo da caixa d'água fria com a base do reservatório térmico deve ser no máximo 5 m e é necessário que a tubulação para alimentação de água fria seja exclusiva para o reservatório térmico. Toda tubulação deve ter diâmetro igual ou maior que as conexões do reservatório térmico e deve ser em material apropriado para água quente. O isolamento térmico deve ser aplicado apenas na tubulação de consumo de água quente.

Para sistema de alta pressão deve ser instalado manômetro próprio para utilização em água quente, com escala até 6 kgf/cm<sup>2</sup> e com ponta de arraste. Deve haver purgador ou válvula eliminadora de ar. Coletor solar com pintura seletiva não é recomendado em sistema de alta pressão, caso se faça uso, é necessário limitar pressão e temperatura. Deve instalar na tubulação de consumo de água quente e o mais próximo possível do reservatório térmico a válvula de segurança e quebra vácuo. O vaso de expansão deve ter, no mínimo, 4% do volume total do reservatório térmico e o lado do ar deve ser pressurizado com 2 kgf/cm<sup>2</sup>. Se houver uso de pressurizador, a curva do mesmo deve ter seu ponto máximo de pressão até 2 kgf/cm<sup>2</sup> e o dimensionamento, somente poderá ser feito em função da vazão de água, pelo número de pontos de consumo. É necessário que a tubulação para alimentação de água fria seja exclusiva para o reservatório térmico e que toda tubulação deve ter diâmetro igual ou maior que as conexões do reservatório térmico, além de ser em material apropriado para água quente. O isolamento térmico deve ser aplicado apenas na tubulação de consumo de água quente.

### 2.5.3.2 Circuito Primário (Tubulações entre o Reservatório Térmico e os Coletores Solares)

No sistema de circulação por termossifão deve haver uma variação de altura entre a base do reservatório térmico e o topo dos coletores solares de no mínimo 20 cm, caso não haja, deve ser instalado válvula termossifão e respeitar a nova variação de no mínimo 10 cm entre o topo do reservatório térmico com o topo do coletor solar, além de uma distância entre o reservatório térmico e os coletores de no máximo 5 m. Deve haver uma inclinação mínima de 2% na tubulação que interliga os coletores solares e o reservatório térmico. Toda tubulação deve ter diâmetro igual ou maior que as conexões do coletor solar, além de ser em material apropriado para água quente. O isolamento térmico deve ser aplicado em toda a tubulação.

No sistema de circulação forçada, uma bomba provoca a circulação de água entre o reservatório térmico e os coletores. Deve instalar válvula eliminadora de ar adicional no ponto mais alto da tubulação que possuir sifão. Toda tubulação deve ter diâmetro igual ou maior que as conexões do coletor solar.

### 2.5.4 Instalação Elétrica

Se o reservatório térmico possuir resistência elétrica pode-se utilizar a Tabela 2.1 para selecionar corretamente o cabo e disjuntor. A distância informada na tabela é a máxima permitida entre o reservatório térmico e o quadro de distribuição. Deve-se conectar o fio terra em um sistema de aterramento com resistência inferior a 3 ohms.

Tabela 2.1 - Relação de Cabeamento e Disjuntores para Resistência Elétrica

<b>Distância Máxima Recomendada (m)</b>				
<b>Cabo (mm<sup>2</sup>)</b>	<b>2500 W – 220V</b>	<b>5000 W – 220V</b>	<b>1000 W – 3F – 220 V</b>	<b>1500 W – 3F – 220 V</b>
2,5	25	10	Não se Aplica	Não se Aplica
4	50	25	15	10
6	75	40	25	15
10	100	70	40	25
16	200	100	70	40
<b>Disjuntor</b>	<b>Bipolar</b>		<b>Tripolar</b>	
	15 A	30 A	40 A	60 A

Fonte: Manual de instalação e uso – Sistema de Aquecimento Solar – Heliotek (ADAPTADO)

### 3 DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO

Essa seção apresentará o sistema de aquecimento de água objeto de estudo, metodologia para avaliação de rendimento do mesmo e dos coletores solares, dimensionamento conforme Anexo B da ABNT NBR 15569 e análise dos resultados obtidos.

#### 3.1 Descrição do Sistema de Energia Solar Operando por termossifão para aquecimento de água para banho objeto de estudo

Conforme apresentado anteriormente no Item 2.2, o sistema avaliado está instalado na cidade de Itatiba – SP e consiste em um reservatório térmico, três coletores solares, tubulações de cobre e CPVC, uma válvula de esfera na alimentação de água fria do reservatório térmico, uma válvula de anticongelamento e uma válvula de esfera para dreno do sistema. Os coletores possuem uma inclinação de  $14^\circ$ , menor que o mínimo recomendado de  $15^\circ$  pela Divisão 10.3.3 da ABNT NBR 15569. A Figura 3.1 apresenta o croqui de instalação do sistema de aquecimento solar.

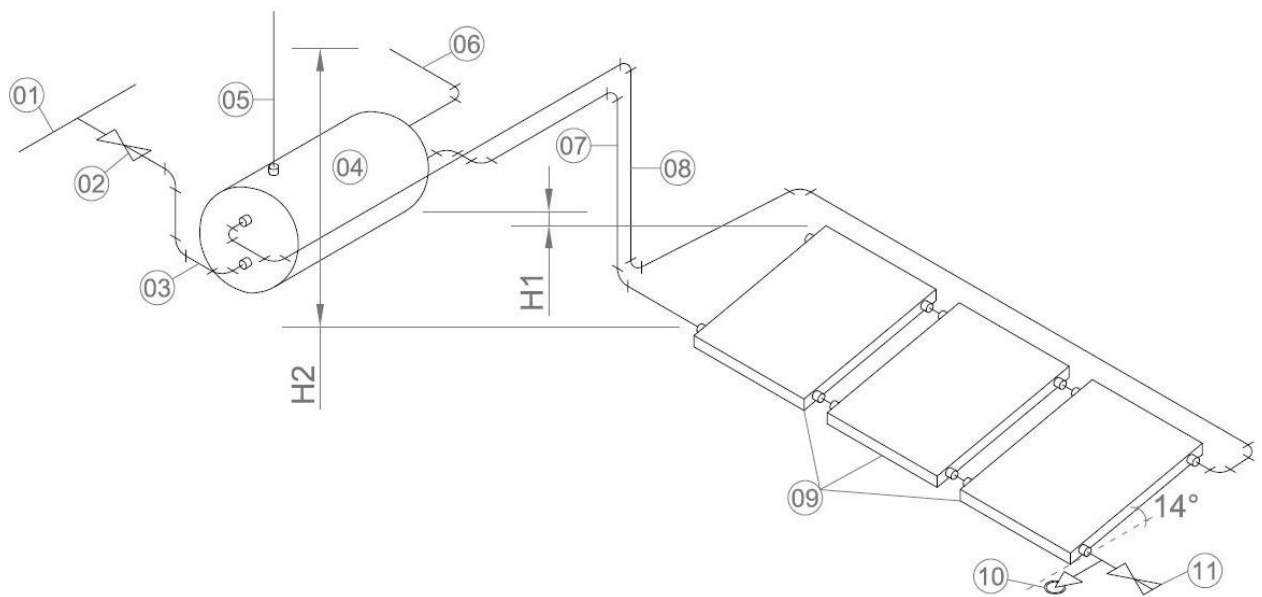


Figura 3.1 – Croqui de Instalação do Sistema de Aquecimento de Solar  
Fonte: Autor

A Tabela 3.1 apresenta a legenda da Figura 3.1, contendo a descrição e as características de cada item.

Tabela 3.1 – Legenda do Croqui de Instalação do Sistema

Legenda do Croqui de Instalação		
Item	Descrição	Característica
01	Tubulação de alimentação principal de água fria	Tubo de PVC de $\varnothing 2''$
02	Válvula de esfera	$\varnothing 3/4''$
03	Circuito secundário: Entrada de água fria	Tubo de cobre de $\varnothing 3/4''$
04	Reservatório térmico	Marca: Cumulus Modelo: BP300 Capacidade: 300 litros Perda específica de energia: 0,21 kWh/mês/l Potência da resistência: 2 kW
05	Respiro	Tubo de cobre de $\varnothing 3/4''$
06	Circuito secundário: Saída para consumo	Tubo de CPVC de $\varnothing 3/4''$
07	Circuito primário: Saída para os coletores	Tubo de cobre de $\varnothing 3/4''$
08	Circuito primário: Retorno dos coletores	Tubo de cobre de $\varnothing 3/4''$ com isolamento térmico
09	Coletor solar	Marca: Rinnai Solar Modelo: RSC-1402V Área: 1,40 m <sup>2</sup> Cobertura: 1 placa de vidro Material da Superfície Absorvedora: Alumínio Eficiência energética: 51,59% (INMETRO) $F_R(\tau\alpha)$ : 0,631 $F_R U_L$ : 4,621 m <sup>2</sup> W/°C
10	Válvula de anticongelamento	$\varnothing 3/4''$
11	Válvula de esfera	$\varnothing 3/4''$ (Dreno do sistema)
H1	Distância entre a base do reservatório térmico e o topo do coletor solar	2,25 cm
H2	Altura manométrica do sistema	2,05 m

Fonte: Autor

O sistema de aquecimento solar possui uma área coletora instalada de 4,20 m<sup>2</sup>. A orientação do telhado onde foi feita a instalação é de 29° do norte geográfico para leste, ou seja, o Azimute de -151° conforme referência Duffie & Beckman. Toda a lateral da residência é composta de árvores e o local construído para abrigar a caixa d'água e o reservatório térmico encontra-se na lateral dos coletores solares. A Figura 3.2 apresenta a localização do sistema no cenário descrito acima.

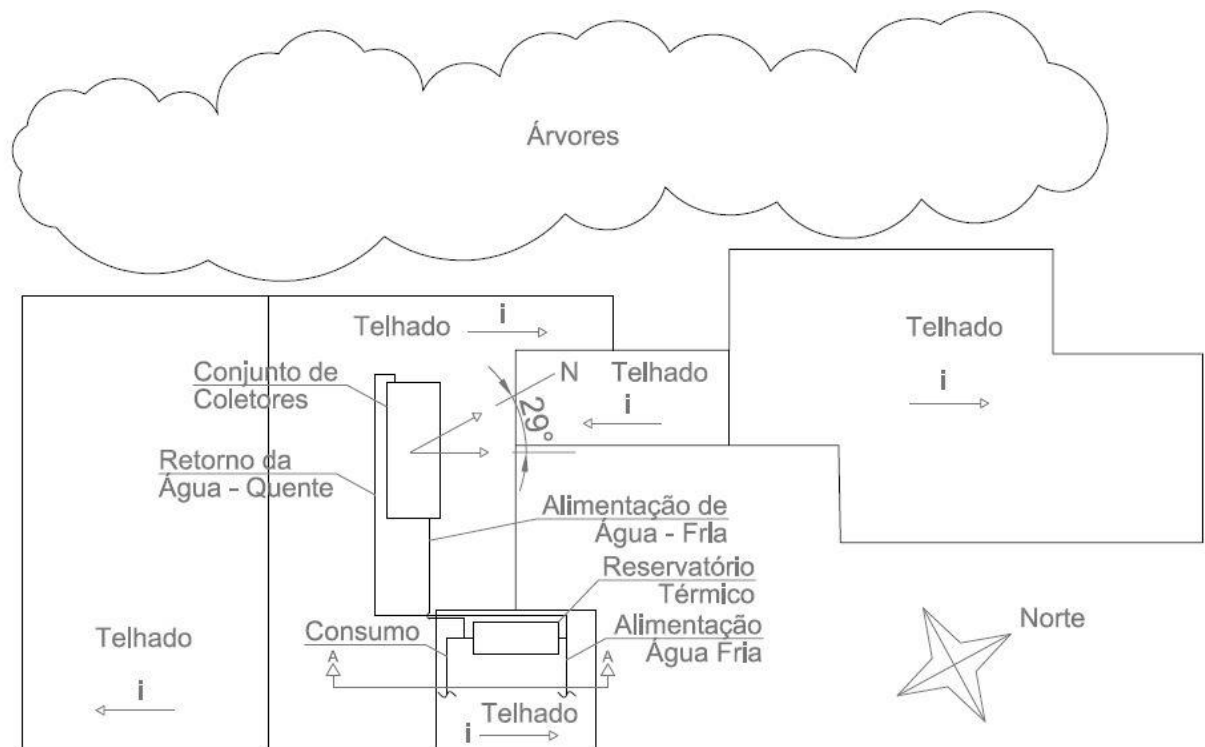


Figura 3.2 – Localização do Sistema na Residência (Sem Escala)

Fonte: Autor

Na inspeção realizada os coletores solares foram encontrados sujos devido à falta de um plano de manutenção e a devida orientação pelo instalador ao usuário. Os mesmos foram lavados para a continuidade desse trabalho. A Figura 3.3 ilustra essas situações.

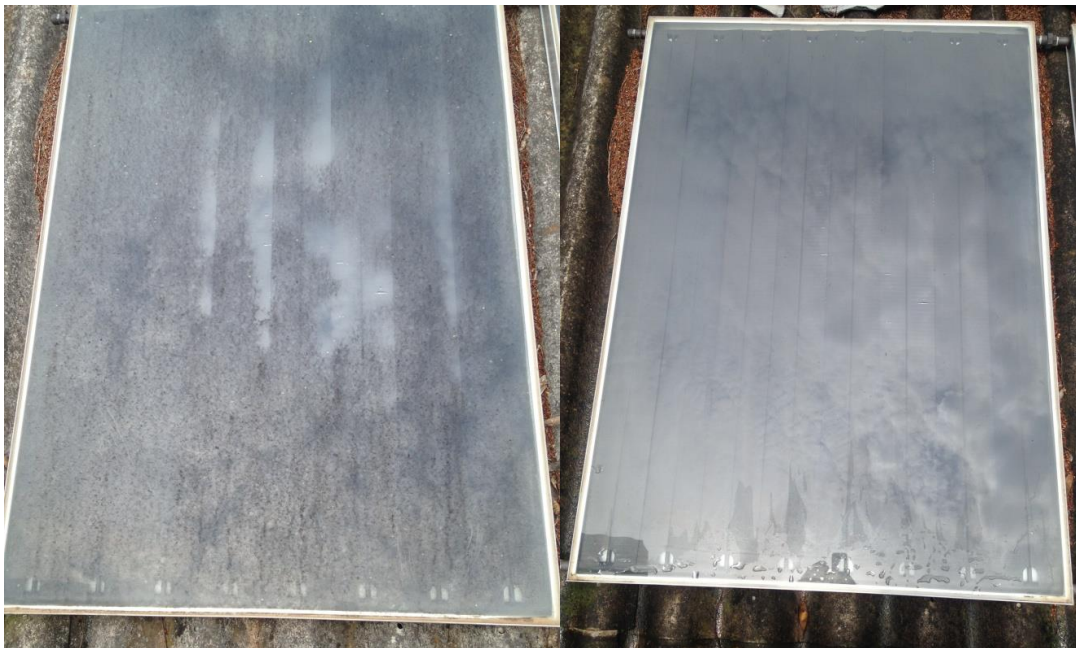


Figura 3.3 – Coletor Solar Sujo e Limpo

Fonte: Autor

A avaliação da fixação dos coletores sobre o telhado foi considerada não atendendo a norma, devido que os coletores solares estão apenas apoiados sobre o telhado, sem nenhuma estrutura sob os mesmos, e todo o esforço de sustentação está em cordões de cobre amarrados em parafusos do telhado e na tubulação dos coletores. A Figura 3.4 ilustra esse método de fixação.



Figura 3.4 – Fixação dos Coletores Solares  
Fonte: Autor

As tubulações não possuem estrutura de apoio em nenhum ponto e o isolamento térmico da tubulação de retorno dos coletores solares foi encontrado em condição inoperante, sendo que em alguns lugares a tubulação está totalmente exposta. A Figura 3.5 apresenta a situação descrita.



Figura 3.5 – Tubulação sem Estrutura de Apoio e Isolamento Térmico Inoperante  
Fonte: Autor

Existe sombreamento no local onde o sistema foi instalado. Conforme apresentado pela Figura 3.2, o próprio local construído para a instalação do reservatório térmico é uma das fontes de sombreamento. A Figura 3.6 apresenta essa situação às 10h do dia 16/03/2017.





Figura 3.6 – Sombreamento Proveniente de Construção  
Fonte: Autor

O mesmo acontece no período da tarde, porém o sombreamento é proveniente de árvores que estão dispostas em toda lateral da residência, a Figura 3.7 ilustra essa situação às 14h30 do dia 16/03/2017.



Figura 3.7 – Sombreamento Proveniente de Árvores  
Fonte: Autor

O problema de sombreamento se agrava com a proximidade do dia 21/06, solstício de inverno, pois é quando a declinação solar é a mais baixa de todo o ano. No dia 04/06 os coletores solares já estão totalmente sombreados às 13h30, conforme é apresentado pela Figura 3.8.



Figura 3.8 – Agravamento do Sombreamento  
Fonte: Autor

### 3.2 Avaliação Comparativa do Sistema Instalado com a Seção 10 da ABNT NBR 15569 e com os requisitos para o mesmo

Conforme apresentado pelos itens 2.1 e 3.1 o sistema de aquecimento de água instado tem aderência de apenas 40% com a seção 10 da ABNT NBR 15569, conforme mostrado pela Tabela 3.2 abaixo.

Tabela 3.2 – Comparação do Sistema Instalado com a Seção 10 da ABNT NBR 15569

ABNT 15569 (Item 10 - Instalação)				
Item	Descrição	Divisão	Instalação de Acordo	Resultado Encontrado
10.1	Análise Preliminar	-	Não Aplicável (*)	-
10.2	Requisitos Gerais	10.2.1	Não	Reservatório térmico instalado em área fechada sem sistema de escoamento de água.
		10.2.2	Sim	-
		10.2.3	Sim	-
		10.2.4	Sim	-
10.3	Coletores Solares	10.3.1	Sim	-
		10.3.2	Sim	-
		10.3.3	Não	Inclinação do telhado é de 14°.
		10.3.4	Não	Coletores solares instalados sem orientação técnica.
		10.3.5	Não	Coletores solares apenas apoiados ao telhado, sem estrutura de apoio.
		10.3.6	Não	Não há elementos de fixação.
		10.3.7	Não	Sistema instalado sem as devidas verificações.



Tabela 3.2 – Comparação do Sistema Instalado com a Seção 10 da ABNT NBR 15569 - Continuação

<b>ABNT 15569 (Item 10 - Instalação)</b>				
<b>Item</b>	<b>Descrição</b>	<b>Divisão</b>	<b>Instalação de Acordo</b>	<b>Resultado Encontrado</b>
10.3	Coletores Solares	10.3.8	Não Aplicável	-
		10.3.9	Não	Sistema instalado entre árvores e torre da caixa d'água.
		10.3.10	Sim	-
		10.3.11	Não Aplicável	-
10.4	Reservatório Térmico	10.4.1	Sim	-
		10.4.2	Sim	-
		10.4.3	Não	Não há sifão instalado para proteção.
		10.4.4	Sim	-
		10.4.5	Não	Não existem válvulas instaladas para procedimento de manutenção.
		10.4.6	Não	Não há válvulas limitadoras de pressão.
		10.4.7	Sim	-
		10.4.8	Não	Não há válvula de alívio de pressão positiva.
		10.4.9	Não	Não há válvula de alívio de pressão negativa.
		10.4.10	Não	Não há válvula eliminadora de ar.
		10.4.11	Sim	-
10.5	Tubulação	10.5	Sim	-
		10.5.1	Não	Não há conexões de serviço.
		10.5.2	Não Aplicável	-
		10.5.3	Não	Não há instalação de suportes.
		10.5.4	Não	Isolamento térmico degradado pelo tempo.
10.6	Motobomba	-	Não Aplicável	-
10.7	Componentes e Acessórios	10.7	Não Aplicável	-
		10.7.1	Não Aplicável	-
		10.7.2	Não	Válvula instalada sem identificação.
		10.7.3	Não Aplicável	-
		10.7.4	Não Aplicável	-
10.8	Manutenção do SAS	-	Não	Não há plano de manutenção.
10.9	Armazenamento e Transporte	-	Não Aplicável	-
<b>Aderência à Norma (**)</b>				<b>40,00%</b>
<b>(*) Sistema já instalado.</b>				
<b>(**) Critério do Autor: (Número de "Sim")/(Número de "Sim" + Número de "Não")</b>				

Fonte: Autor

Em comparação com o item 2.3 o sistema instalado tem aderência de 45,45%, conforme é apresentado pela Tabela 3.3 abaixo.

Tabela 3.3 – Comparação do Sistema Instalado com os Requisitos

Requisitos de Sistema de Energia Solar					
Item		Subitem		Instalação de Acordo	Resultado Encontrado
Nº	Descrição	Nº	Descrição		
1	Localização do Equipamento	1.1	Fácil acesso	Não	Acesso a 4 m de altura
		1.2	Distância máxima entre o reservatório térmico e os coletores de 5 m	Não	Distância da saída dos coletores para o reservatório é de 7,5 m
		1.3	Instalar o reservatório em base plana	Sim	-
		1.4	Sistema de escoamento e impermeabilização	Não	Sem sistema de escoamento e impermeabilização
2	Instalação dos Coletores	2.1	Instalar para o norte geográfico com desvio de no máximo 30° para cada lado	Sim	-
		2.2	Inclinação igual a latitude + 10°	Não	Inclinação de 14°
		2.3	Instalação no telhado, apoiar totalmente o coletor nas telhas	Sim	-
		2.4	Instalação no telhado, amarrar o coletor pela tubulação com fita de aço inox ou fio de cobre	Sim	-
		2.5	Instalação em laje	N/A	-
3	Instalação Hidráulica - Geral	-	Não conectar o reservatório térmico diretamente com a rede de água pública	Sim	-
3.1	Circuito Secundário - Baixa Pressão	3.1.1	Distância mínima entre o topo do reservatório térmico e a base da caixa d'água de 15 cm	Sim	-
		3.1.2	Instalação de respiro	Sim	-
		3.1.3	Distância máxima entre a base do reservatório térmico e o topo da caixa d'água de 5 m	Sim	-
		3.1.4	Tubulação exclusiva para alimentação do reservatório térmico	Não	Tubulação de alimentação é ramal de outra tubulação
		3.1.5	Diâmetro da tubulação igual ao diâmetro das conexões	Não	Conexão de 1" e tubulação de 3/4"
		3.1.6	Instalar isolamento térmico na tubulação de consumo de água quente	Não	Tubulação de CPVC sem isolamento térmico

Fonte: Autor

Tabela 3.3 – Comparação do Sistema Instalado com os Requisitos - Continuação

Requisitos de Sistema de Energia Solar					
Item		Subitem		Instalação de Acordo	Resultado Encontrado
Nº	Descrição	Nº	Descrição		
3.2	Circuito Secundário - Alta Pressão	Não Aplicável			
3.3	Circuito Primário - Termossifão	3.3.1	Distância mínima entre a base do reservatório e o topo do coletor de 20 cm	Não	Distância de 2,25 cm
		3.3.2	Instalação de válvula termossifão e distância de 10 cm	Não	Não há válvula instalada
		3.3.3	Distância máxima entre o reservatório térmico e os coletores de 5 m	Não	Distância da saída dos coletores para o reservatório é de 7,5 m
		3.3.4	Inclinação mínima de 2% na tubulação de retorno do água quente	Não	Existe uma inclinação negativa
		3.3.5	Diâmetro da tubulação igual ao diâmetro das conexões do coletor	Sim	-
		3.3.6	Aplicar isolamento térmico em toda tubulação	Não	Sem isolamento térmico na tubulação de alimentação dos coletores
3.4	Circuito Secundário - Forçado	Não Aplicável			
4	Instalação Elétrica	-	Utilizar a Tabela 2.1 para dimensionar	Sim	-
Aderência à Norma (*)					45,45%
(*) Critério do Autor: (Número de "Sim")/(Número de "Sim" + Número de "Não")					

Fonte: Autor

### 3.2.1 Análise Mecânica do Sistema de Fixação Utilizado

O sistema de aquecimento de água é suportado pela tubulação de saída de água quente dos coletores solares presos em cordões de cobre que são fixados nos parafusos da estrutura do telhado. A Figura 3.4 já apresentou esse método de fixação.

Esse sistema não é sugerido pela ABNT NBR 15569, porém é citado nas cartilhas dos principais fabricantes de coletores e componentes, conforme apresentado pelo item 2.5.2.

A Figura 3.9 apresenta os vetores das forças exercidas sobre o sistema.

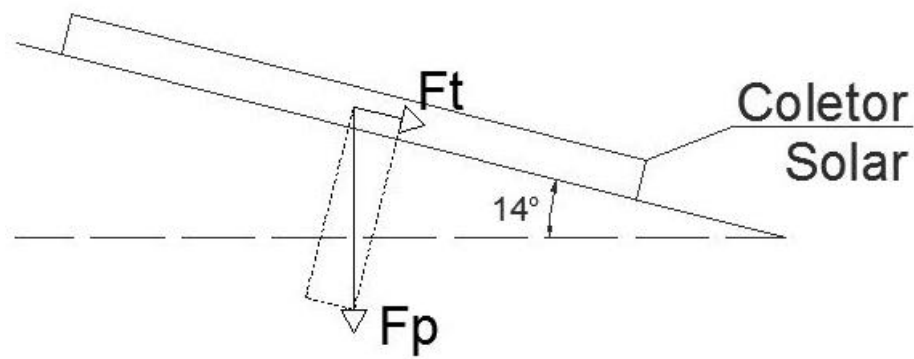


Figura 3.9 – Forças sobre o Sistema

Fonte: Autor

A força peso,  $F_p$ , é dada pela fórmula 3.1.

$$F_p = m \cdot a \quad (3.1)$$

Onde:

$m$  = Massa do conjunto dos coletores solares [kg]

$a$  = Aceleração da gravidade [9,81 m/s<sup>2</sup>]

Conforme catálogo da Rinnai, o coletor possui massa de 18 kg vazio e o volume da tubulação interna do coletor solar é de  $2,2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$ , assim sendo, a massa total do coletor instalado é de 20,2 kg. A força peso do conjunto coletor é de 594 N.

A força de tração,  $F_t$ , que o conjunto dos coletores solares exerce é calculada pela fórmula 3.2. A força de tração,  $F_t$ , é de 144 N.

$$F_t = F_p \sin 14^\circ \quad (3.2)$$

Onde:

$F_p$  = Força peso do conjunto dos coletores solares [N]

Conforme a Termomecânica São Paulo, o limite mínimo de resistência à tração do fio de cobre de 4 mm<sup>2</sup> é de 340 Mpa. A força máxima que o fio de cobre suporta é dada pela fórmula 3.3.

$$F_m = S_0 \cdot \sigma_t \quad (3.3)$$

Onde:

$S_0$  = Área inicial da secção transversal [mm<sup>2</sup>]

$\sigma_t$  = Limite de resistência à tração [MPa]

A força máxima de tração que o fio de cobre de 4 mm<sup>2</sup> suporta é de 1360 N. A força de tração exercida pelos coletores solares é de 144 N, porém são dois pontos de amarração, assim sendo a força de tração em cada fio de cobre é de 72 N.

Esse sistema de fixação não é recomendado pela ABNT NBR 15569, mas no sistema objeto de estudo suporta a carga instalada.

### 3.3 Dimensionamento do Sistema Conforme Anexo B Item B.2 da ABNT NBR 15569

Para a realização do dimensionamento foram adotadas as premissas abaixo:

- Temperatura de consumo de 40°C;
- Temperatura de armazenamento de 50°C;
- 2 pessoas residentes com 1 banho por dia por pessoa;
- Vazão do chuveiro de 4,5l/min;
- Ciclo diário: 10 min/pessoa;
- Utilização dos mesmos fabricantes e modelos dos equipamentos já instalados;
- Irradiação global média de 5,18 kWh/m<sup>2</sup>.dia.

As premissas apresentadas acima atendem à demanda térmica real da residência e os Anexos B e C da ABNT NBR 15569.

A temperatura média anual de Itatiba – SP é de 20,3°C, conforme apresentado pela Tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Dados Meteorológicos de Itatiba

Temperatura do Ar (°C)													
Descrição	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Ano
Mínima Média	17,6	17,8	17,0	14,4	11,6	10,1	9,6	10,8	12,8	14,6	15,5	16,9	14,1
Máxima Média	28,6	28,6	28,3	26,5	24,5	23,4	23,6	25,5	26,6	27,1	27,7	27,8	26,5
Média	23,1	23,2	22,7	20,5	18,1	16,8	16,6	18,2	19,7	20,9	21,6	22,4	20,3

Fonte: CEPAGRI (ADAPTADO)

O volume de consumo de água quente é de 90 litros/dia ou 0,09 m<sup>3</sup>/dia, para tal, conforme fórmula 2.2 o volume de armazenamento é de 60 litros/dia ou 0,06 m<sup>3</sup>/dia, porém esse volume de armazenamento não atende a recomendação de pelo menos 75% do volume de consumo, sendo assim, o volume mínimo de armazenamento é de 67,5 litros/dia ou 0,0675

m<sup>3</sup>/dia. O menor reservatório térmico disponível pela Cumulus possui volume de 200 litros, sendo assim o volume de armazenamento é de 200 litros ou 0,2 m<sup>3</sup>.

A Tabela 3.5 compila as informações acima e apresenta os valores calculados para a energia útil, área coletora, fator de correção da instalação e produção média de energia específica do coletor solar.

Tabela 3.5 – Dimensionamento do Sistema

Dimensionamento do Sistema						
IG (kWh/m <sup>2</sup> .dia)	Vconsumo (m <sup>3</sup> )	Varmaz. (m <sup>3</sup> )	Eútil (kWh)	Acoletora (m <sup>2</sup> )	FCinstal	PMDEE
5,18	0,09	0,20	6,92	3,21	1,08	2,53

Fonte: Autor

A área do coletor instalado é de 1,40 m<sup>2</sup>, sendo assim são necessários 3 coletores para atender a área mínima apresentada pela Tabela 3.5.

Utilizando a mesma marca dos coletores solares, mas o modelo RSC-1400T que possui as características abaixo é possível conseguir uma redução no número de coletores instalados conforme é apresentado pela Tabela 3.6.

Características do coletor solar RSC-1400T:

- Área: 1,40 m<sup>2</sup>;
- Cobertura: 1 placa de vidro;
- Material da Superfície Absorvedora: Alumínio;
- Eficiência energética: 60,29% (INMETRO);
- $F_R(\tau\alpha)$ : 0,700;
- $F_R U_L$ : 3,905 m<sup>2</sup>W/°C.

Tabela 3.6 – Dimensionamento do Sistema com Mudança no Coletor

Dimensionamento do Sistema – Coletor RSC-1400T						
IG (kWh/m <sup>2</sup> .dia)	Vconsumo (m <sup>3</sup> )	Varmaz. (m <sup>3</sup> )	Eútil (kWh)	Acoletora (m <sup>2</sup> )	FCinstal	PMDEE
5,18	0,09	0,20	6,92	2,75	1,08	2,95

Fonte: Autor

Caso fosse instalado o coletor solar modelo RSC-1400T, seria necessários 2 coletores para atender a área mínima apresentada pela Tabela 3.6.

A Tabela 3.7 apresenta os valores totais para aquisição dos equipamentos em três cenários, o Cenário Real que é o objeto de estudo, o Cenário A com reservatório térmico de 200 litros e três coletores solares modelo RSC-1402V e o Cenário B com reservatório térmico

de 200 litros e dois coletores solares modelo RSC-1400T. Os preços finais são válidos para o mês 09/2017.

Tabela 3.7 – Comparação Financeira entre os Dimensionamentos

Comparação Financeira				
Descrição	Equipamento	Real	Cenário A	Cenário B
Reservatório Térmico	200 l	-	1	1
	300 l	1	-	-
Coletor Solar	RSC-1402V	3	3	-
	RSC-1400T	-	-	2
Total (R\$)		3.575,00	3.410,00	2.981,00

Fonte: Autor

É possível perceber que o cenário real é o mais caro dentre os três analisados. A falta de conhecimento e aplicação da metodologia apresentada pela norma para o dimensionamento, fez o cliente investir quase 17% a mais que o necessário.

### 3.4 Metodologia de Avaliação do Rendimento Térmico do Sistema Coletor Solar operando em termossifão

Para a avaliação do sistema instalado, foram coletadas as informações de temperatura d'água e ambiente. Os pontos selecionados para as medições estão apresentados na Tabela 3.8.

Tabela 3.8 – Local de Instalação dos Sensores

Local de Instalação			Nomenclatura
Água	Circuito Secundário	Entrada de água fria do reservatório térmico	Entrada Secundário
		Saída de água quente para o consumo	Saída Secundário
	Circuito Primário	Entrada de água fria do coletor solar	Entrada Primário
		Saída de água quente do coletor solar	Saída Primário
Ambiente	Em local aberto com sombreamento permanente		Ambiente

Fonte: Autor

A eficiência global do sistema de aquecimento de água é dada pela fórmula 3.4.

$$\eta = \frac{Q_{\text{absorvido}}}{Q_{\text{disponível}}} \quad (3.4)$$

Onde:

$Q_{\text{absorvido}}$  = Energia absorvida pelo sistema [kJ]

$Q_{\text{disponível}}$  = Energia disponível no plano do coletor [kJ]

A energia absorvida pelo sistema é dada pela fórmula 3.5.

$$Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (3.5)$$

Onde:

$m$  = Massa de água no reservatório térmico [kg]

$c_p$  = Calor específico [Para água 4,19 kJ/kg°C]

$\Delta T$  = Variação de temperatura na água entre o início e final do período de observação [°C]

A energia disponível no plano do coletor no intervalo de tempo de 1 hora  $I_T$  (MJ/m<sup>2</sup>) é dada pela fórmula 3.6.

$$I_T = I_b R_b + I_d \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + (I_b + I_d) \rho \left( \frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (3.6)$$

Onde:

$I_b$  = Radiação direta [MJ/m<sup>2</sup>]

$R_b$  = Razão entre a radiação direta no plano inclinado e no plano horizontal

$I_d$  = Radiação difusa [MJ/m<sup>2</sup>]

$\beta$  = Inclinação do coletor [°]

$\rho$  = Refletividade do solo [Adotado 0,2 – Vegetação]

A fórmula 3.7 apresenta a razão entre a radiação direta no plano inclinado e no plano horizontal.

$$R_b = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} \quad (3.7)$$

Onde:

$\theta$  = Ângulo de incidência [°]

$\theta_z$  = Ângulo zenital [°]

Ambos calculados para ângulo horário  $\omega$  intermediário do período considerado.

O ângulo de incidência é dado pela fórmula 3.8.



$$\begin{aligned} \cos \theta = \sin \delta \sin \Phi \cos \beta - \sin \delta \cos \Phi \sin \beta \cos \gamma + \cos \delta \cos \Phi \cos \beta \cos \omega \\ + \cos \delta \sin \Phi \sin \beta \cos \gamma \cos \omega + \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin \omega \end{aligned} \quad (3.8)$$

Onde:

$\delta$  = Declinação solar [°]

$\Phi$  = Latitude [°]

$\beta$  = Inclinação do coletor [°]

$\gamma$  = Azimute da superfície [°]

$\omega$  = Ângulo horário intermediário do período considerado [°]

A fórmula 3.9 apresenta o ângulo zenital.

$$\cos \theta_z = \sin \delta \sin \Phi + \cos \delta \cos \Phi \cos \omega \quad (3.9)$$

Onde:

$\delta$  = Declinação solar [°]

$\Phi$  = Latitude [°]

$\omega$  = Ângulo horário intermediário do período considerado [°]

A declinação solar é dada pela fórmula 3.10.

$$\delta = 23,45 \sin \left( \frac{360}{365} (284 + n) \right) \quad (3.10)$$

Onde:

$n$  = Número do dia do ano

O ângulo horário é dado fórmula 3.11.

$$\omega = (HS - 12)15 \quad (3.11)$$

Onde:

$HS$  = Hora solar

A fórmula 3.12 apresenta a radiação horária direta.

$$I_b = I - I_d \quad (3.12)$$

Onde:

$I$  = Irradiação integrada sobre superfície horizontal [MJ/m<sup>2</sup>]

$I_d$  = Radiação difusa [MJ/m<sup>2</sup>]

A radiação horária difusa é apresentada pela fórmula 3.13.

$$I_d = r_d H_d \quad (3.13)$$

Onde:

$r_d$  = Razão entre a radiação difusa sobre a radiação diária horizontal

$H_d$  = Radiação diária difusa no plano horizontal [MJ/m<sup>2</sup>]

A fórmula 3.14 apresenta a razão entre a radiação horária difusa sobre a radiação diária horizontal.

$$r_d = \frac{\pi}{24} \frac{\cos \omega - \cos \omega_s}{\sin \omega_s - \frac{\pi \omega_s}{180} \cos \omega_s} \quad (3.14)$$

Onde:

$\omega$  = Ângulo horário [°]

$\omega_s$  = Ângulo horário do por do sol [°]

O ângulo horário do por do sol é apresentado pela fórmula 3.15.

$$\cos \omega_s = -\tan \Phi \tan \delta \quad (3.15)$$

Onde:

$\Phi$  = Latitude [°]

$\delta$  = Declinação solar [°]

A fórmula 3.16 apresenta a radiação diária difusa no plano horizontal.

$$H_d = (0,775 + 0,00653(\omega_s - 90) - [0,505 + 0,00455(\omega_s - 90)] \cos(115K_T - 103))H \quad (3.16)$$

Onde:

$\omega_s$  = Ângulo horário do por do sol [°]

$K_T$  = Índice de claridade

$H$  = Irradiação integrada diária sobre superfície horizontal [MJ/dia]

A irradiação integrada diária sobre superfície horizontal é informado pelo CRESESB, conforme apresentado pelo Item 2.2. O índice de claridade é apresentado pela fórmula 3.17.

$$K_T = \frac{H}{H_0} \quad (3.17)$$

Onde:

$H$  = Irradiação integrada diária sobre superfície horizontal [MJ/dia]

$H_0$  = Irradiação extraterrestre integrada diária sobre superfície horizontal [MJ/dia]

A fórmula 3.18 apresenta a irradiação extraterrestre integrada diária sobre superfície horizontal.

$$H_0 = \frac{2,75 \cdot 10^4 \cdot 1353 \left(1 + 0,033 \cos\left(\frac{360n}{365}\right)\right) (1,75 \cdot 10^{-2} \omega_s \sin \delta \sin \Phi + \cos \delta \cos \Phi \sin \omega_s)}{1000000} \quad (3.18)$$

Onde:

$n$  = Número do dia do ano

$\omega_s$  = Ângulo horário do por do sol [°]

$\delta$  = Declinação solar [°]

$\Phi$  = Latitude [°]

A irradiação integrada horária sobre superfície horizontal é apresentada pela fórmula 3.19.

$$I = r_T H \quad (3.19)$$

Onde:

$r_T$  = Fração horária da radiação total

$H$  = Irradiação integrada diária sobre superfície horizontal [MJ/dia]

A fórmula 3.20 apresenta fração horária da radiação total.

$$r_T = \frac{\pi}{24} \left( (0,409 + 0,5016 \sin(\omega_s - 60)) + ((0,6609 - 0,4767 \sin(\omega_s - 60)) \cos \omega) \right) \frac{\cos \omega - \cos \omega_s}{\sin \omega_s - \frac{\pi \omega_s}{180} \cos \omega_s} \quad (3.20)$$

Onde:

$\omega_s = \hat{\text{Ângulo horário do por do sol}} [^\circ]$

$\omega = \hat{\text{Ângulo horário}} [^\circ]$

Como mostrado pela fórmula 3.8, a radiação direta no plano inclinado depende do azimute da superfície, porém ainda é necessário analisar em paralelo a influência do ângulo do azimute solar. A fórmula 3.21 apresenta o azimute solar.

$$\gamma_s = \left| \cos^{-1} \left( \frac{\cos \theta_z \cos \Phi - \sin \delta}{\sin \theta_z \cos \Phi} \right) \right| \quad (3.21)$$

Onde:

$\theta_z = \hat{\text{Ângulo zenital}} [^\circ]$

$\Phi = \text{Latitude } [^\circ]$

$\delta = \text{Declinação solar } [^\circ]$

Sinal = Usar sinal  $\omega$

A Figura 3.10 apresenta a decomposição dos ângulos do azimute da superfície do sistema em estudo. Com essa análise é possível determinar o intervalo que o azimute solar influenciará a radiação direta no plano do coletor, esse intervalo é:

- Período da manhã:  $-61^\circ \geq \gamma_s \leq -179,99^\circ$
- Período da tarde:  $119^\circ \geq \gamma_s \leq 180^\circ$

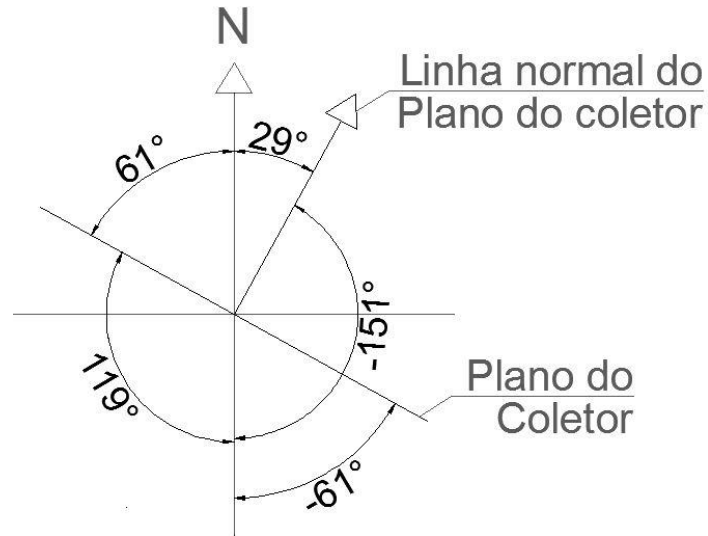


Figura 3.10 – Análise do Azimute da Superfície  
Fonte: Autor

Para a avaliação do rendimento térmico do coletor solar serão apresentadas duas metodologias de cálculo.

A metodologia 1 se baseia no cálculo do rendimento térmico do coletor solar obtido nos dados do INMETRO  $F_R(\tau\alpha)$ : 0,631 e  $F_R U_L$ : 4,621. A primeira parte desta metodologia apresenta a eficiência horária do coletor solar sem levar em consideração o fator do ângulo de incidência, considerado igual a 1, apresentada pela fórmula 3.22.

$$\eta_{ColetorHorária} = [F_R(\tau\alpha)] - [F_R U_L] \frac{(T_i - T_a)}{G} \quad (3.22)$$

Onde:

$F_R(\tau\alpha)$  = Coeficiente de ganho do coletor solar

$F_R U_L$  = Coeficiente de perdas do coletor solar

$T_i$  = Temperatura d'água na entrada do coletor solar [°C]

$T_a$  = Temperatura ambiente [°C]

$G$  = Fluxo de radiação incidente [W/m²]

A segunda parte da metodologia 1 calcula a eficiência térmica diária do coletor solar, conforme é apresentado pela fórmula 3.23.

$$\eta_{ColetorDiária} = \frac{\Sigma (\eta_{ColetorHorária} I_T)}{\Sigma I_T} \quad (3.23)$$

Onde:

$\eta_{ColetorHorária}$  = Eficiência horária do coletor solar [%]

$I_T$  = Energia disponível no plano do coletor [MJ/m<sup>2</sup>] suposta ser a do dia médio registrado pelo CRESESB para a região.

A metodologia 2 é apresentada pela fórmula 3.24. Esta metodologia apresenta a eficiência diária do coletor solar.

$$\eta_{coletor} = \frac{Q_{absorvido} + Perdas}{Q_{disponível}} \quad (3.24)$$

Onde:

$Q_{absorvido}$  = Energia absorvida pelo sistema [kJ]

$Perdas$  = Energia perdida nas tubulações do circuito primário por radiação e convecção [kJ]

$Q_{disponível}$  = Energia incidente no plano do coletor [kJ]

A fórmula 3.25 apresenta a perda de energia na tubulação do circuito primário por radiação.

$$Perda_{radiação} = \frac{\left( \varepsilon A \sigma \left( T_{sup}^4 - (0,0552 T_{amb}^{1,5})^4 \right) \right) 3600}{1000} \quad (3.25)$$

Onde:

$\varepsilon$  = Emissividade da tubulação [Adotado 0,78 – Cobre oxidado]

$A$  = Área da tubulação [m<sup>2</sup>]

$\sigma$  = Constante Stephan-Boltzman [5,6697. 10<sup>-8</sup> W/m<sup>2</sup>]

$T_{sup}$  = Temperatura da tubulação [Adotado a temperatura da água – K]

$T_{amb}$  = Temperatura ambiente [K]

A fórmula 3.26 apresenta a perda de energia na tubulação do circuito primário por convecção.

$$Perda_{convecção} = \frac{\left( h A (T_{sup} - T_{amb}) \right) 3600}{1000} \quad (3.26)$$

Onde:

$h$  = Coeficiente de transferência de calor do ar [Adotado 0,023 – W.m-2.K-1]

$A$  = Área da tubulação [m<sup>2</sup>]

$T_{sup}$  = Temperatura da tubulação [Adotado a temperatura da água – K]

$T_{amb}$  = Temperatura ambiente [K]

### 3.5 Instrumentação Instalada no Sistema e Procedimentos de Medidas

A Figura 3.11 apresenta a instrumentação instalada para a realização das medições.

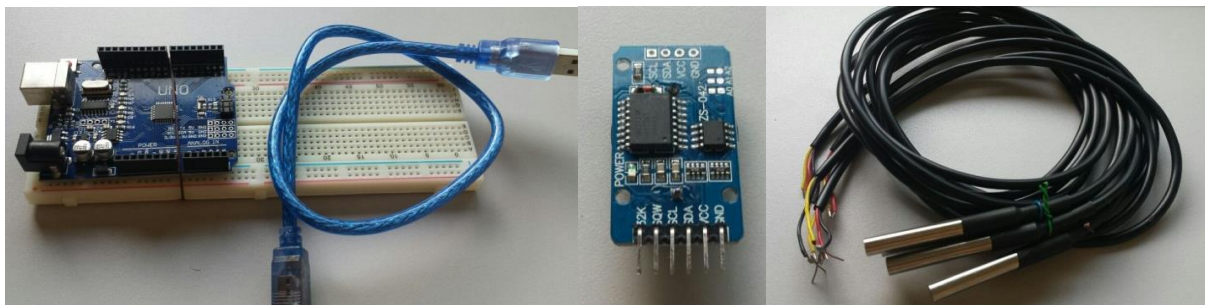


Figura 3.11 – Instrumentação Instalada  
Fonte: Autor

A Tabela 3.9 apresenta a especificação da instrumentação instalada.

Tabela 3.9 – Especificação da Instrumentação de Medição

Item	Descrição	Características
01	Microprocessador Arduino UNO	Microcontrolador: ATmega328 Voltagem Operacional: 5V Voltagem de entrada (recomendada): 7-12V Voltagem de entrada (limites): 6-20V Pinos E/S digitais: 14 Pinos de entrada analógica: 6 Corrente CC por pino E/S: 40 mA Corrente CC para o pino 3,3V: 50 mA Flash Memory: 32 kB SRAM: 2 kB / EEPROM: 1 kB Velocidade de Clock: 16 MHz
02	Módulo Real Time Clock	Modelo: DS3231 Erro max 2min por ano de erro 56 bytes de SRAM Interface Serial Protocolo I2C Tensão / Corrente: 3,3V ~ 5,5V / 1,5mA
03	Sensor de Temperatura	Modelo: DS18B20 Tensão de Operação: 3.0V ~ 5.5V Faixa de Operação: -55°C a +125°C Faixa de Leitura para Erro: ±0.5°C

Fonte: Autor

Para a coleta dos dados das temperaturas foi utilizado um intervalo de 1 minuto entre cada medição.

### 3.6 Procedimento e plano para condução dos ensaios

Os ensaios seguiram os requisitos abaixo, conforme Anexo C da ABNT NBR 15569:

- 2 pessoas residentes com 1 banho por dia por pessoa;
- Vazão do chuveiro de 4,5 l/min;
- Ciclo diário: 10 min/pessoa;

As extrações de água ocorreram às 08h30 e às 09h30. Houve uma extração de água auxiliar às 14h00, por três minutos, para obtenção da temperatura real da água contida no reservatório térmico, pois o sensor foi instalado na tubulação e não dentro do mesmo.

Os dias escolhidos estavam ensolarados, sem nuvens no céu.

### 3.7 Resultados dos ensaios, medições e valores calculados

Nesta seção serão apresentados todos os resultados dos ensaios preliminares e oficiais.

#### 3.7.1 Ensaios preliminares

Esses ensaios tiveram o objetivo de verificar o funcionamento das instalações dos sensores de temperatura e suas conexões com o sistema de monitoramento de dados, porém foi possível também verificar que o SAS não estava funcionando. O Gráfico 3.1 apresenta as temperaturas da medição preliminar do dia 10/07/17.

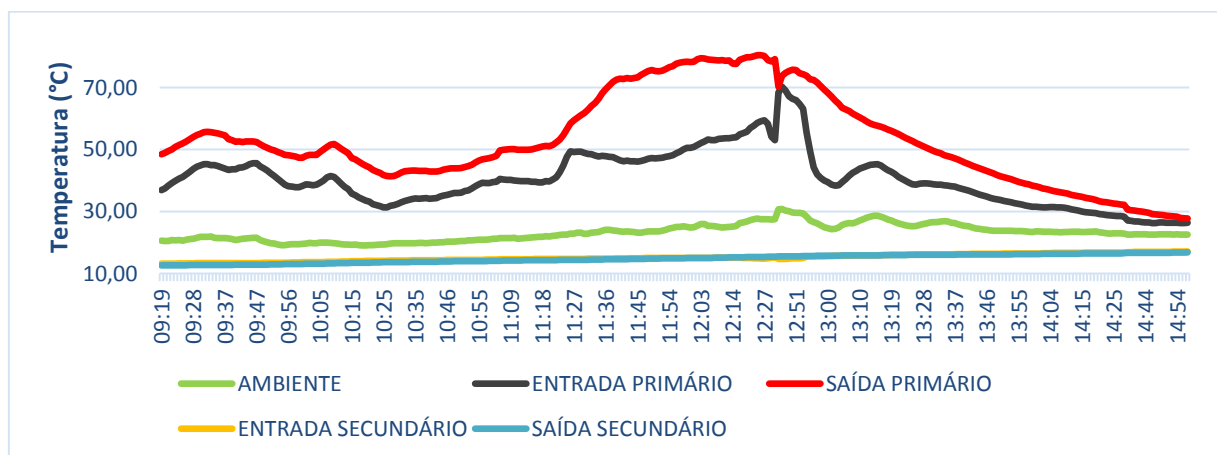


Gráfico 3.1 – Medições Preliminares do dia 10/07/17

Fonte: Autor



Analisando o Gráfico 3.1 é possível perceber que não há interação entre a água contida no circuito primário com a água do circuito secundário. Foram estudadas as possíveis causas desse problema e analisando a instalação do SAS, concluiu-se que havia ar na tubulação do circuito primário, entre a saída dos coletores solares e o reservatório térmico. Neste trecho a tubulação instalada acompanha o nível do telhado, formando assim um pseudo sifão conforme é apresentado pela Figura 3.12.



Figura 3.12 – Orientação dos Coletores Solares  
Fonte: Autor

Após a eliminação de todo ar do sistema através da instalação de uma válvula eliminadora de ar, foram medidas as temperaturas que são apresentadas pelo Gráfico 3.2.

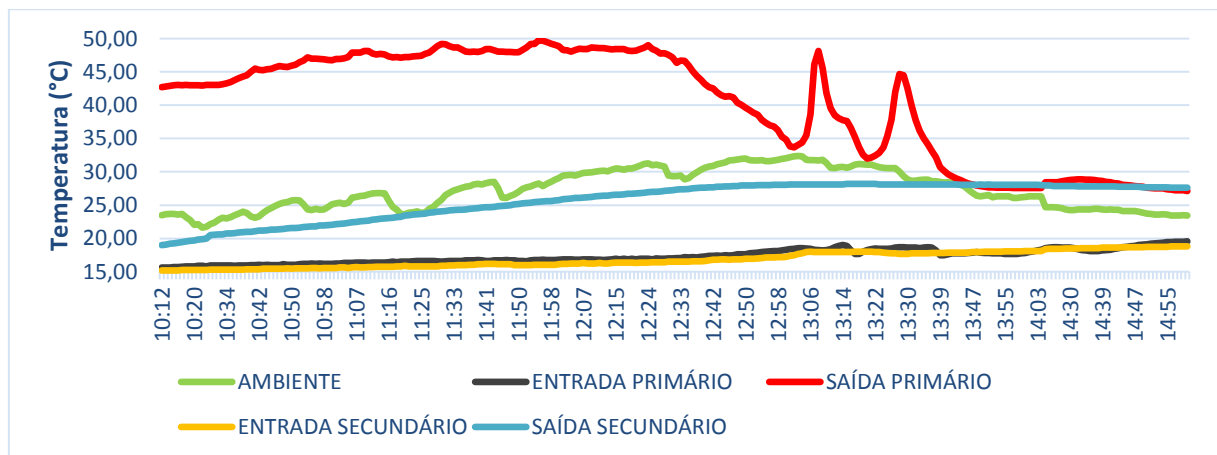


Gráfico 3.2 – Medições Preliminares do dia 13/07/17  
Fonte: Autor

Analisando o Gráfico 3.2 é possível verificar o aumento da temperatura na saída do circuito secundário, isto é, há interação da água entre os circuitos primário e secundário através do efeito de termossifão.

### 3.7.2 Medição oficial do dia 17/07/2017

No dia 17/07/2017 foi realizado o primeiro dia de medições. O Gráfico 3.3 apresenta o comportamento do SAS no decorrer das extrações de água durante o dia.

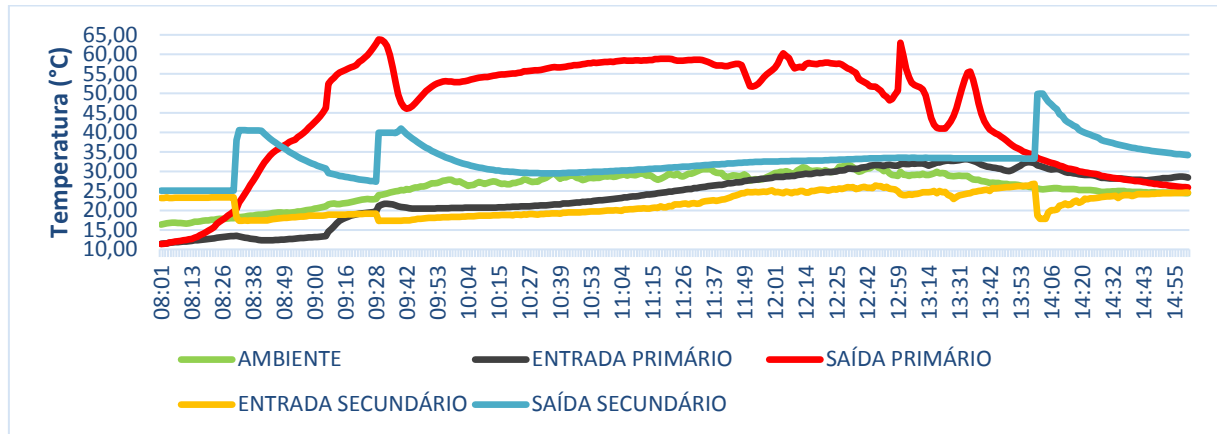


Gráfico 3.3 – Medições Oficiais do dia 17/07/17

Fonte: Autor

A Tabela 3.10 apresenta as temperaturas médias nos pontos de medições durante as extrações de água.

Tabela 3.10 – Temperaturas Médias

Extração de Água	Temperatura Média (°C)				
	Circuito Primário		Circuito Secundário		Ambiente
	Entrada	Saída	Entrada	Saída	
1ª	18,52	25,32	17,50	40,24	18,52
2ª	21,37	57,70	17,36	40,05	24,52
Extra	31,35	33,19	18,10	49,88	25,48

Fonte: Autor

A energia absorvida pelo SAS para este dia foi de 22.473,77 kJ. A Tabela 3.11 apresenta a energia absorvida de acordo com a fórmula 3.2.

Tabela 3.11 – Energia Absorvida

Energia Absorvida		
Item	Descrição	Energia (kJ)
1	1ª Extração de água	4.288,05
2	2ª Extração de água	4.277,78
3	Extração Extra de água	1.797,45
4	Energia Armazenada	12.110,50
5	<b>Total</b>	<b>22.473,77</b>

Fonte: Autor

A energia solar calculada no plano dos coletores foi de 16,89 MJ/m<sup>2</sup>, conforme apresentada pela Tabela 3.12.

Tabela 3.12 – Energia sobre o Plano dos Coletores

Geometria Solar - Plano do Coletor												
HS	$\omega$	$\theta_z$	$\gamma_s$	$r_r$	$r_d$	$I$ (MJ/m <sup>2</sup> )	$I_d$ (MJ/m <sup>2</sup> )	$I_b$ (MJ/m <sup>2</sup> )	$\cos \theta$	$\cos \theta_z$	$R_b$	$I_r$ (MJ/m <sup>2</sup> )
6,5	-82,5	91,66	-112,36	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7,5	-67,5	79,19	-118,71	0,029	0,038	0,442	0,176	0,266	0,3829	0,1876	2,0411	0,718
8,5	-52,5	67,56	-126,84	0,068	0,077	1,029	0,358	0,671	0,5744	0,3817	1,5048	1,365
9,5	-37,5	57,30	-137,58	0,106	0,109	1,606	0,507	1,099	0,7222	0,5402	1,3369	1,973
10,5	-22,5	49,29	-151,92	0,137	0,132	2,067	0,612	1,455	0,8162	0,6523	1,2514	2,430
11,5	-7,5	44,74	-170,04	0,154	0,143	2,323	0,666	1,657	0,8501	0,7103	1,1969	2,646
12,5	7,5	44,74	170,04	0,154	0,143	2,323	0,666	1,657	0,8216	0,7103	1,1567	2,579
13,5	22,5	49,29	151,92	0,137	0,132	2,067	0,612	1,455	0,7325	0,6523	1,1231	2,243
14,5	37,5	57,30	137,58	0,106	0,109	1,606	0,507	1,099	0,5890	0,5402	1,0904	1,702
15,5	52,5	67,56	126,84	0,068	0,077	1,029	0,358	0,671	0,4009	0,3817	1,0502	1,060
16,5	67,5	79,19	118,71	0,029	0,038	0,442	0,176	0,266	0,1808	0,1876	0,0000	0,175
17,5	82,5	91,66	112,36	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Total</b>												<b>16,890</b>

Fonte: Autor

A área dos coletores solares é de 4,20 m<sup>2</sup>, sendo assim, a energia sobre a área dos mesmos foi de 70.940,03 kJ. A eficiência global do sistema para esse dia foi de  $\eta = \frac{22.473,77}{70.940,03} = 31,68\%$ , para uma temperatura média de 43,39°C no interior do reservatório térmico.

Devido aos sombreamentos apresentados no Item 3.1, apenas 69,87% dessa energia está disponível, isto é, apenas 49.563,92 kJ incide sobre os coletores solares.

A Tabela 3.13 apresenta as temperaturas nos pontos de medições hora a hora para a realização da avaliação do rendimento térmico do coletor solar nas duas metodologias apresentadas.

Tabela 3.13 – Temperaturas Hora a Hora

Temperaturas Hora a Hora (°C)						
HS	HL	Ambiente	Entrada Primário	Saída Primário	Entrada Secundário	Saída Secundário
7,5	07:40	13,23	10,51	20,17	17, 19	30,23
8,5	08:40	18,87	12,44	29,87	17,44	40,50
9,5	09:40	25,19	20,87	47,63	17,37	41,00
10,5	10:39	28,06	21,56	56,63	19,19	29,50
11,5	11:40	29,56	26,56	57,13	22,75	31,87
12,5	12:40	30,06	31,00	53,31	25,87	33,19

Tabela 3.13 – Temperaturas Hora a Hora – Continuação

Temperaturas Hora a Hora (°C)						
HS	HL	Ambiente	Entrada Primário	Saída Primário	Entrada Secundário	Saída Secundário
13,5	13:40	27,44	31,44	42,88	25,19	33,38
14,5	14:40	24,69	27,87	27,56	23,94	35,94
15,5	15:40	24,19	26,25	24,44	25,06	32,75
16,5	16:40	23,00	25,50	23,12	25,37	32,00

Fonte: Autor

De acordo com a metodologia 1 a eficiência diária do coletor solar foi de 64,55%. Os resultados das duas etapas dessa metodologia são apresentados pela Tabela 3.14.

Tabela 3.14 – Eficiência do Coletor Solar conforme Metodologia 1

Eficiência do Coletor Solar - Metodologia 1						
HS	HL	R <sub>b</sub>	IT (MJ/m²)	G (W/m²)	η <sub>coletor</sub> horária	η <sub>coletor</sub> diária
6,5	6,66	0,0000	0,000	0,00	-	64,55%
7,5	7,66	0,0000	0,175	48,50	89,01%	
8,5	8,66	0,0000	0,356	98,80	93,17%	
9,5	9,66	1,3369	1,973	548,12	66,74%	
10,5	10,66	1,2514	2,430	674,88	67,55%	
11,5	11,66	1,1969	2,646	734,96	64,99%	
12,5	12,66	1,1567	2,579	716,46	62,49%	
13,5	13,66	0,0000	0,609	169,08	52,17%	
14,5	14,66	0,0000	0,504	139,94	52,60%	
15,5	15,66	0,0000	0,356	98,80	53,46%	
16,5	16,66	0,0000	0,175	48,50	39,28%	
17,5	17,66	0,0000	0,000	0,00	-	

Fonte: Autor

Conforme a metodologia 2 a eficiência diária do coletor solar foi de 50,80%. Os resultados dos cálculos das perdas e a eficiência são apresentados pela Tabela 3.15.

Tabela 3.15 – Eficiência do Coletor Solar conforme Metodologia 2

Eficiência do Coletor Solar - Metodologia 2						
HS	HL	Perdas na Tubulação (kJ)				ηcoletor
		Reservatório ao Coletor		Coletor ao Reservatório		
		Radiação	Convecção	Radiação	Convecção	
6,5	6,66	-	-	-	-	50,80%
7,5	7,66	45,11	-0,94	162,97	5,16	
8,5	8,66	29,84	-2,23	191,06	8,18	
9,5	9,66	30,90	-1,50	288,81	16,68	
10,5	10,66	20,34	-2,25	349,71	21,24	

Tabela 3.15 – Eficiência do Coletor Solar conforme Metodologia 2 - Continuação

Eficiência do Coletor Solar - Metodologia 2						
HS	HL	Perdas na Tubulação (kJ)				ηcoletor
		Reservatório ao Coletor		Coletor ao Reservatório		
		Radiação	Convecção	Radiação	Convecção	
11,5	11,66	30,85	-1,04	339,86	20,49	50,80%
12,5	12,66	44,78	0,33	296,12	17,28	
13,5	13,66	58,65	1,39	223,41	11,48	
14,5	14,66	57,68	1,10	121,18	2,13	
15,5	15,66	54,00	0,71	101,95	0,19	
16,5	16,66	56,41	0,87	102,97	0,09	
17,5	17,66	-	-	-	-	

Fonte: Autor

O cenário da energia incidente sobre os coletores solares se agrava se for comparado com as recomendações da ABNT NBR 15569, que ressalta a importância do azimuth dos planos dos coletores de  $180^\circ$  (N) e a inclinação  $\beta$  de  $33^\circ$ . O plano de coleta da radiação solar desta instalação recebe cerca de 59,93% da energia que estaria disponível para um plano inclinado de  $33^\circ$  voltado para o norte geográfico.

### 3.7.3 Medição oficial do dia 20/07/2017

No dia 20/07/2017 foi realizado o segundo dia de medições. O Gráfico 3.4 apresenta o comportamento do SAS no decorrer das extrações de água durante o dia.

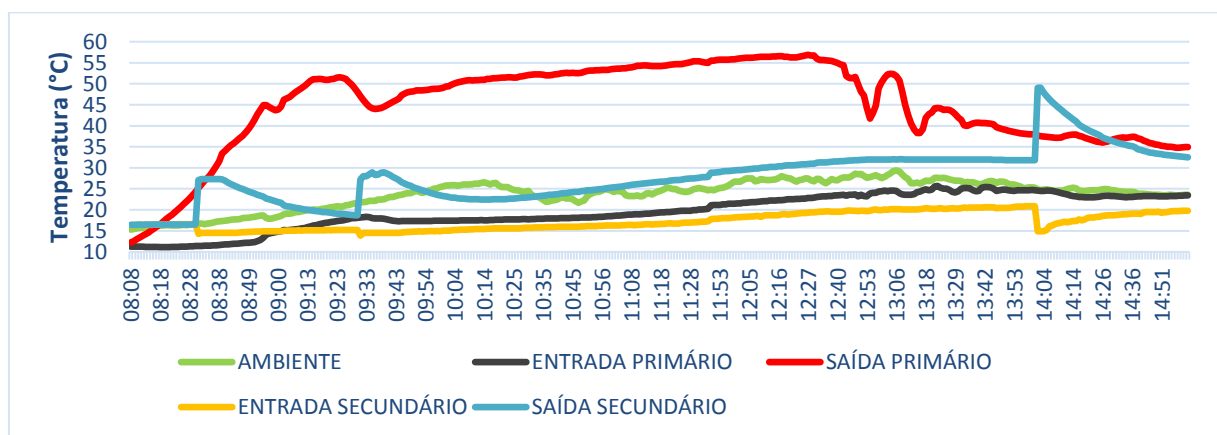


Gráfico 3.4 – Medições Oficiais do dia 20/07/17

Fonte: Autor

A Tabela 3.16 apresenta as temperaturas médias nos pontos de medições durante as extrações de água.

Tabela 3.16 – Temperaturas Médias

Temperatura Média (°C)					
Extração de Água	Circuito Primário		Circuito Secundário		Ambiente
	Entrada	Saída	Entrada	Saída	
1ª	11,54	28,76	14,53	27,28	16,94
2ª	18,05	44,88	14,49	28,38	22,22
Extra	24,53	37,60	14,91	49,03	24,78

Fonte: Autor

A energia absorvida pelo SAS para este dia foi de 34.217,20 kJ. A Tabela 3.17 apresenta a energia absorvida de acordo com a fórmula 3.2.

Tabela 3.17 – Energia Absorvida

Energia Absorvida		
Item	Descrição	Energia (kJ)
1	1ª Extração de água	2.398,28
2	2ª Extração de água	2.613,46
3	Extração Extra de água	1.925,39
4	Energia Armazenada	27.280,07
5	<b>Total</b>	<b>34.217,20</b>

Fonte: Autor

A energia solar calculada no plano dos coletores foi de 16,84 MJ/m², conforme apresentada pela Tabela 3.18.

Tabela 3.18 – Energia sobre o Plano dos Coletores

Geometria Solar - Plano do Coletor												
HS	$\omega$	$\theta_z$	$\gamma_s$	$r_r$	$r_d$	$I$ (MJ/m²)	$I_d$ (MJ/m²)	$I_b$ (MJ/m²)	$\cos \theta$	$\cos \theta_z$	$R_b$	$I_T$ (MJ/m²)
6,5	-82,5	91,51	-112,03									
7,5	-67,5	79,01	-118,40	0,030	0,038	0,446	0,179	0,267	0,3851	0,1907	2,0196	0,717
8,5	-52,5	67,34	-126,53	0,068	0,077	1,031	0,362	0,669	0,5770	0,3852	1,4977	1,361
9,5	-37,5	57,04	-137,30	0,106	0,109	1,605	0,511	1,094	0,7251	0,5441	1,3327	1,966
10,5	-22,5	48,97	-151,70	0,137	0,131	2,064	0,616	1,447	0,8194	0,6564	1,2483	2,420
11,5	-7,5	44,39	-169,96	0,154	0,143	2,318	0,671	1,647	0,8534	0,7146	1,1943	2,635
12,5	7,5	44,39	169,96	0,154	0,143	2,318	0,671	1,647	0,8248	0,7146	1,1542	2,569
13,5	22,5	48,97	151,70	0,137	0,131	2,064	0,616	1,447	0,7355	0,6564	1,1205	2,235
14,5	37,5	57,04	137,30	0,106	0,109	1,605	0,511	1,094	0,5917	0,5441	1,0874	1,698
15,5	52,5	67,34	126,53	0,068	0,077	1,031	0,362	0,669	0,4031	0,3852	1,0462	1,059
16,5	67,5	79,01	118,40	0,030	0,038	0,446	0,179	0,267	0,1825	0,1907	0,0000	0,178
17,5	82,5	91,51	112,03									
<b>Total</b>												<b>16,838</b>

Fonte: Autor

A área dos coletores solares é de 4,20 m<sup>2</sup>, sendo assim, a energia sobre a área dos mesmos foi de 70.721,56 kJ. A eficiência global do sistema para esse dia foi de  $\eta = \frac{34.217,20}{70.721,56} = 48,38\%$ , para uma temperatura média de 34,90°C no interior do reservatório térmico.

Devido aos sombreamentos apresentados no Item 3.1, apenas 69,99% dessa energia está disponível, isto é, apenas 49.500,77 kJ incide sobre os coletores solares.

A Tabela 3.19 apresenta as temperaturas nos pontos de medições hora a hora para a realização da avaliação do rendimento térmico do coletor solar nas duas metodologias apresentadas.

Tabela 3.19 – Temperaturas Hora a Hora

Temperaturas Hora a Hora (°C)						
HS	HL	Ambiente	Entrada Primário	Saída Primário	Entrada Secundário	Saída Secundário
7,5	07:32	12,27	9,83	19,87	14,12	22,17
8,5	08:32	16,75	11,44	25,19	14,31	27,06
9,5	09:32	21,81	18,25	46,13	14,50	28,00
10,5	10:32	23,56	17,81	52,13	15,75	23,06
11,5	11:32	25,19	20,06	55,31	17,12	27,62
12,5	12:32	26,81	22,87	56,69	19,37	31,00
13,5	13:32	26,87	25,00	41,38	20,37	31,94
14,5	14:32	24,37	23,12	37,13	18,87	35,81
15,5	15:32	23,31	23,44	34,81	19,94	32,00
16,5	16:32	21,86	22,15	32,03	18,63	30,18

Fonte: Autor

De acordo com a metodologia 1 a eficiência diária do coletor solar foi de 67,17%. Os resultados das duas etapas dessa metodologia são apresentados pela Tabela 3.20.

Tabela 3.20 – Eficiência do Coletor Solar conforme Metodologia 1

Eficiência do Coletor Solar - Metodologia 1						
HS	HL	R <sub>b</sub>	IT (MJ/m <sup>2</sup> )	G (W/m <sup>2</sup> )	η <sub>coletorhorária</sub>	η <sub>coletordiária</sub>
6,5	6,54	0,0000	0,000	0,00	-	67,17%
7,5	7,54	0,0000	0,178	49,36	85,94%	
8,5	8,54	0,0000	0,359	99,83	87,68%	
9,5	9,54	1,3327	1,966	546,16	66,11%	
10,5	10,54	1,2483	2,420	672,21	67,05%	
11,5	11,54	1,1943	2,635	731,98	66,34%	
12,5	12,54	1,1542	2,569	713,65	65,65%	
13,5	13,54	0,0000	0,613	170,36	68,17%	
14,5	14,54	0,0000	0,508	141,12	67,19%	

Tabela 3.20 – Eficiência do Coletor Solar conforme Metodologia 1 - Continuação

Eficiência do Coletor Solar - Metodologia 1						
HS	HL	R <sub>b</sub>	IT (MJ/m²)	G (W/m²)	η <sub>coletor</sub> horária	η <sub>coletor</sub> diária
15,5	15,54	0,0000	0,359	99,83	62,50%	67,17%
16,5	16,54	0,0000	0,178	49,36	60,38%	
17,5	17,54	0,0000	0,000	0,00	-	

Fonte: Autor

Conforme a metodologia 2 a eficiência diária do coletor solar foi de 75,22%. Os resultados dos cálculos das perdas e a eficiência são apresentados pela Tabela 3.21.

Tabela 3.21 – Eficiência do Coletor Solar conforme Metodologia 2

Eficiência do Coletor Solar - Metodologia 2						
HS	HL	Perdas na Tubulação (kJ)				ηcoletor
		Reservatório ao Coletor		Coletor ao Reservatório		
		Radiação	Convecção	Radiação	Convecção	
6,5	6,54	-	-	-	-	75,22%
7,5	7,54	46,45	-0,85	168,11	5,65	
8,5	8,54	34,96	-1,84	172,29	6,27	
9,5	9,54	36,56	-1,23	305,68	18,08	
10,5	10,54	27,74	-1,99	347,30	21,24	
11,5	11,54	28,16	-1,78	363,92	22,39	
12,5	12,54	30,54	-1,37	362,54	22,21	
13,5	13,54	37,72	-0,65	215,52	10,79	
14,5	14,54	42,19	-0,43	202,17	9,48	
15,5	15,54	47,85	0,05	192,33	8,55	
16,5	16,54	49,48	0,10	182,49	7,56	
17,5	17,54	-	-	-	-	

Fonte: Autor

O cenário da energia incidente sobre os coletores solares se agrava se for comparado com as recomendações da ABNT NBR 15569, que ressalta a importância do azimuth dos planos dos coletores de 180° (N) e a inclinação  $\beta$  de 33°. O plano de coleta da radiação solar desta instalação recebe cerca de 60,24% da energia que estaria disponível para um plano inclinado de 33° voltado para o norte geográfico.

### 3.7.4 Medição oficial do dia 21/07/2017

No dia 21/07/2017 foi realizado o terceiro e último dia de medições. O Gráfico 3.5 apresenta o comportamento do SAS no decorrer das extrações de água durante o dia.



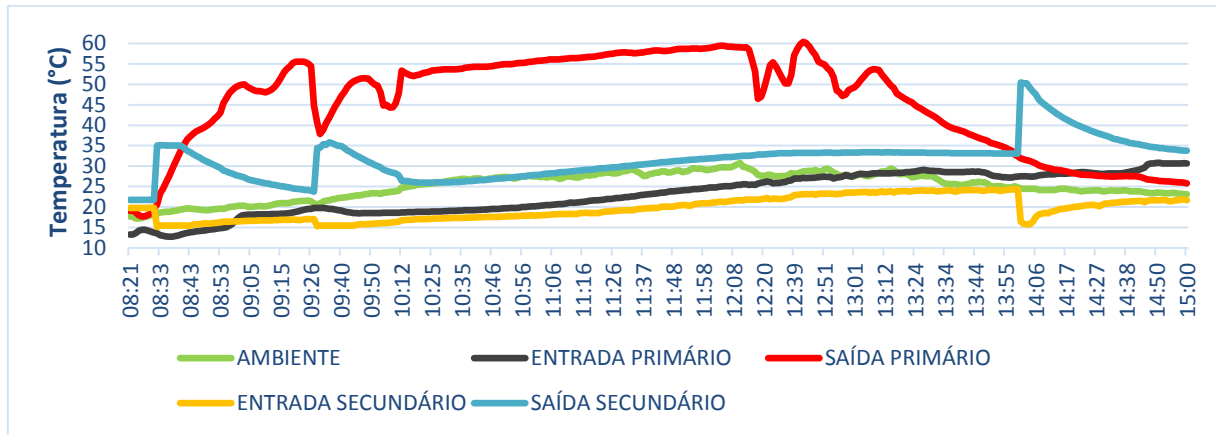


Gráfico 3.5 – Medições Oficiais do dia 21/07/17

Fonte: Autor

A Tabela 3.22 apresenta as temperaturas médias nos pontos de medições durante as extrações de água.

Tabela 3.22 – Temperaturas Médias

Temperatura Média (°C)					
Extração de Água	Circuito Primário		Circuito Secundário		Ambiente
	Entrada	Saída	Entrada	Saída	
1 º	13,02	27,62	15,41	35,04	18,91
2 º	19,55	42,27	15,45	35,11	26,79
Extra	27,54	31,69	16,00	50,33	24,50

Fonte: Autor

A energia absorvida pelo SAS para este dia foi de 28.511,29 kJ. A Tabela 3.23 apresenta a energia absorvida de acordo com a fórmula 3.2.

Tabela 3.23 – Energia Absorvida

Energia Absorvida		
Item	Descrição	Energia (kJ)
1	1ª Extração de água	3.692,40
2	2ª Extração de água	3.698,05
3	Extração Extra de água	1.937,43
4	Energia Armazenada	19.183,41
5	<b>Total</b>	<b>28.511,29</b>

Fonte: Autor

A energia solar calculada no plano dos coletores foi de 16,81 MJ/m², conforme apresentada pela Tabela 3.24.

Tabela 3.24 – Energia sobre o Plano dos Coletores

Geometria Solar - Plano do Coletor												
HS	$\omega$	$\theta_z$	$\gamma_s$	$r_T$	$r_d$	$I$ (MJ/m <sup>2</sup> )	$I_d$ (MJ/m <sup>2</sup> )	$I_b$ (MJ/m <sup>2</sup> )	$\cos \theta$	$\cos \theta_z$	$R_b$	$I_T$ (MJ/m <sup>2</sup> )
6,5	-82,5	91,43	-111,86									
7,5	-67,5	78,91	-118,23	0,030	0,038	0,448	0,181	0,268	0,3862	0,1923	2,0085	0,717
8,5	-52,5	67,23	-126,37	0,068	0,077	1,032	0,364	0,668	0,5784	0,3871	1,4941	1,359
9,5	-37,5	56,90	-137,15	0,106	0,109	1,605	0,513	1,091	0,7267	0,5462	1,3306	1,962
10,5	-22,5	48,80	-151,58	0,137	0,131	2,062	0,619	1,443	0,8211	0,6586	1,2467	2,415
11,5	-7,5	44,20	-169,91	0,154	0,143	2,316	0,674	1,642	0,8551	0,7169	1,1929	2,630
12,5	7,5	44,20	169,91	0,154	0,143	2,316	0,674	1,642	0,8265	0,7169	1,1529	2,564
13,5	22,5	48,80	151,58	0,137	0,131	2,062	0,619	1,443	0,7371	0,6586	1,1191	2,231
14,5	37,5	56,90	137,15	0,106	0,109	1,605	0,513	1,091	0,5931	0,5462	1,0859	1,695
15,5	52,5	67,23	126,37	0,068	0,077	1,032	0,364	0,668	0,4042	0,3871	1,0442	1,059
16,5	67,5	78,91	118,23	0,030	0,038	0,448	0,181	0,268	0,1834	0,1923	0,0000	0,179
17,5	82,5	91,43	111,86									
<b>Total</b>												<b>16,811</b>

Fonte: Autor

A área dos coletores solares é de 4,20 m<sup>2</sup>, sendo assim, a energia sobre a área dos mesmos foi de 70.608,05 kJ. A eficiência global do sistema para esse dia foi de  $\eta = \frac{28.511,29}{70.608,05} = 40,38\%$ , para uma temperatura média de 34,90°C no interior do reservatório térmico.

Devido aos sombreamentos apresentados no Item 3.1, apenas 70,06% dessa energia está disponível, isto é, apenas 49.468,54 kJ incide sobre os coletores solares.

A Tabela 3.25 apresenta as temperaturas nos pontos de medições hora a hora para a realização da avaliação do rendimento térmico do coletor solar nas duas metodologias apresentadas.

Tabela 3.25 – Temperaturas Hora a Hora

Temperaturas Hora a Hora (°C)						
HS	HL	Ambiente	Entrada Primário	Saída Primário	Entrada Secundário	Saída Secundário
7,5	07:52	14,76	11,53	30,89	15,87	28,76
8,5	08:52	19,56	14,75	42,25	16,19	29,87
9,5	09:52	23,37	18,56	50,00	15,94	30,37
10,5	10:52	27,19	19,75	54,94	17,75	27,19
11,5	11:52	28,69	24,12	58,69	20,50	31,44
12,5	12:52	29,37	27,37	53,94	23,31	33,31
13,5	13:52	25,12	27,50	35,25	24,25	33,06
14,5	14:52	23,67	30,69	26,37	21,75	34,38
15,5	15:52	23,02	27,56	26,69	22,50	32,13
16,5	16:52	22,32	25,22	24,89	21,28	30,78

Fonte: Autor

De acordo com a metodologia 1 a eficiência diária do coletor solar foi de 64,52%. Os resultados das duas etapas dessa metodologia são apresentados pela Tabela 3.26.

Tabela 3.26 – Eficiência do Coletor Solar conforme Metodologia 1

Eficiência do Coletor Solar - Metodologia 1						
HS	HL	R <sub>b</sub>	IT (MJ/m <sup>2</sup> )	G (W/m <sup>2</sup> )	$\eta_{\text{coletorhorária}}$	$\eta_{\text{coletordiária}}$
6,5	6,86	0,0000	0,000	0,00	-	64,52%
7,5	7,86	0,0000	0,179	49,81	93,07%	
8,5	8,86	0,0000	0,361	100,38	85,24%	
9,5	9,86	1,3306	1,962	545,13	67,18%	
10,5	10,86	1,2467	2,415	670,82	68,23%	
11,5	11,86	1,1929	2,630	730,43	65,99%	
12,5	12,86	1,1529	2,564	712,19	64,40%	
13,5	13,86	0,0000	0,616	171,04	56,67%	
14,5	14,86	0,0000	0,510	141,75	40,21%	
15,5	15,86	0,0000	0,361	100,38	42,20%	
16,5	16,86	0,0000	0,179	49,81	36,19%	
17,5	17,86	0,0000	0,000	0,00	-	

Fonte: Autor

Conforme a metodologia 2 a eficiência diária do coletor solar foi de 63,65%. Os resultados dos cálculos das perdas e a eficiência são apresentados pela Tabela 3.27.

Tabela 3.27 – Eficiência do Coletor Solar conforme Metodologia 2

Eficiência do Coletor Solar - Metodologia 2						
HS	HL	Perdas na Tubulação (kJ)				ηcoletor
		Reservatório ao Coletor		Coletor ao Reservatório		
		Radiação	Convecção	Radiação	Convecção	
6,5	6,86	-	-	-	-	63,65%
7,5	7,86	42,68	-1,12	232,76	11,99	
8,5	8,86	34,37	-1,67	289,85	16,87	
9,5	9,86	31,03	-1,67	328,29	19,79	
10,5	10,86	18,19	-2,58	341,04	20,63	
11,5	11,86	26,27	-1,59	364,78	22,30	
12,5	12,86	34,67	-0,69	309,40	18,26	
13,5	13,86	54,45	0,83	179,26	7,53	
14,5	14,86	72,49	2,44	121,42	2,01	
15,5	15,86	63,72	1,57	129,81	2,73	
16,5	16,86	58,28	1,01	122,38	1,91	
17,5	17,86	-	-	-	-	

Fonte: Autor

O cenário da energia incidente sobre os coletores solares se agrava se for comparado com as recomendações da ABNT NBR 15569, que ressalta a importância do azimuth dos planos dos coletores de  $180^\circ$  (N) e a inclinação  $\beta$  de  $33^\circ$ . O plano de coleta da radiação solar desta instalação recebe cerca de 60,41% da energia que estaria disponível para um plano inclinado de  $33^\circ$  voltado para o norte geográfico.

### 3.8 Análise dos Resultados

Os resultados das medições oficiais e os valores calculados são apresentados pela Tabela 3.28.

Tabela 3.28 – Resultados das Medições Oficiais e Valores Calculados

Informações Compiladas				
Descrição / Dia		17/jul	20/jul	21/jul
Eficiência Global do Sistema		31,68%	48,38%	40,38%
Eficiência do Coletor Solar - Metodologia 1		64,55%	67,17%	64,52%
Eficiência do Coletor Solar - Metodologia 2		50,80%	75,22%	63,65%
Temperatura Inicial no Reservatório ( $^\circ\text{C}$ )		40,24	27,28	35,04
Temperatura Final no Reservatório ( $^\circ\text{C}$ )		49,88	49,03	50,33
Energia Solar no Plano Sugerido pela ABNT (kJ)		82.700,45	82.166,75	81.889,73
Energia Solar no Plano dos Coletores (kJ)		70.940,03	70.721,56	70.608,05
Energia Solar que Incide nos Coletores (kJ)		49.563,92	49.500,77	49.468,54
Energia Absorvida (kJ)	1ª Extração de Água	4.288,05	2.398,28	3.692,40
	2ª Extração de Água	4.277,78	2.613,46	3.698,05
	Extração Extra de Água	1.797,45	1.925,39	1.937,43
	Energia Armazenada	12.110,50	27.280,07	19.183,41
	Total	22.473,77	34.217,20	28.511,29

Fonte: Autor

A temperatura final e a energia solar sobre os coletores dos três dias de medições ficaram praticamente a mesma, aproximadamente  $50^\circ\text{C}$  e  $49,5 \cdot 10^3$  kJ respectivamente, devido a esse fator a eficiência global do sistema está diretamente ligada a temperatura inicial do SAS. É possível perceber que o dia 20/07/2017 possui a menor temperatura inicial e consequentemente a maior eficiência global dentre os três dias de análise. Essa relação é melhor explicada através da análise da fórmula 3.5 para o período de observação “Energia Armazenada” da Tabela 3.28.

$$Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (3.5)$$

Onde:

$Q$  = Energia absorvida [kJ]

$m$  = Massa de água no reservatório térmico [kg] – Constante nos três dias.

$c_p$  = Calor específico [Para água 4,19 kJ/kg°C]

$\Delta T$  = Variação de temperatura na água entre o início e final do período de observação [°C] – Única variável da equação.

O  $\Delta T$  para dias de medições são:

- 17/07: (49,88 – 40,24) = 09,64°C
- 20/07: (49,03 – 27,28) = 21,75°C
- 21/07: (50,33 – 35,04) = 15,29°C

Como  $m$  e  $c_p$  são constantes, a energia absorvida depende exclusivamente da variação de temperatura, isto é, quanto maior a variação maior a energia absorvida. Porém a absorção de energia pelo sistema se limita pela queda da eficiência térmica do coletor com o aumento da temperatura média da água durante sua operação. Com temperaturas iniciais menores consequentemente tem-se temperaturas médias ao longo do dia também menores que possibilitam eficiências térmicas maiores ao longo dessas horas. Todavia a medida que a temperatura sobe a eficiência tende a diminuir tanto devido ao aumento da temperatura da água quanto a diminuição do fluxo de radiação para as horas tardias fazendo com que nos três experimentos a temperatura final do dia ficasse em torno de 50°C.

Analisando a eficiência diária do coletor solar pelas duas metodologias propostas, nota-se que o mesmo está atingindo níveis de performance excelentes. As altas eficiências se justificam pelo fato de que durante os ensaios a temperatura de entrada do circuito primário se manteve próxima ou inferior a temperatura ambiente. Com os resultados obtidos, pode-se concluir que a baixa eficiência do sistema é devido aos problemas de instalação apresentados.

Um dos problemas mais graves encontrados é o sombreamento, pois se considerarmos o plano de instalação recomendado pela ABNT NBR 15569, que ressalta a importância do azimute dos coletores de 180° (N) e a inclinação  $\beta$  de 33° para esta instalação, como a energia máxima disponível para o sistema que é  $82 \cdot 10^3$  kJ, o desvio de 29° do norte geográfico e a inclinação de apenas 14° resultam apenas em 13,4% de perda, isto é, a energia total disponível é de  $71 \cdot 10^3$  kJ. Agora adotando a energia do plano em que o sistema foi instalado como a energia

máxima disponível, o sombreamento que o sistema sofre resulta em uma perda de 30,3%, isto é, apenas  $49,5 \cdot 10^3$  kJ incide sobre os coletores.

## 4 CONCLUSÃO

Essa monografia teve como objetivo comparar um sistema de aquecimento de água dimensionado e instalado de forma empírica com as seções 9 e 10 da ABNT NBR 15569 e estimar sua eficiência térmica global.

A falta de alguma metodologia tecnicamente reconhecida para o dimensionamento influencia diretamente o sistema, de forma econômica e/ou no desempenho operacional. No exemplo apresentado acarretou acréscimo de quase 17% no valor do investimento dos equipamentos conforme exposto no item 3.3.

A comparação dos requisitos de instalação previstos na seção 10 da referida norma com o observado na instalação objeto de estudo indicou conformidade com 40% dos itens da lista da norma, número este que coloca a instalação como insatisfatória devendo passar por procedimentos corretivos.

Pode-se chegar à conclusão que a baixa eficiência global do sistema é causada pelo sombreamento que o sistema sofre no decorrer do dia, pois os coletores solares estão desempenhando suas funções de acordo com as suas respectivas eficiências calculados por duas metodologias distintas e que devido ao sombreamento, em média, apenas 70% da energia disponível no plano do coletor incide no mesmo.

Abaixo são listadas algumas recomendações para aumentar a eficiência global do sistema:

- Sem intervenção ao sistema:
  - Lavagem dos coletores solares periodicamente;
  - Instalação de isolamento adequada nas tubulações;
  - Poda das árvores ao redor da casa, conforme apresentado pela Figura 3.2.
- Com intervenção ao sistema:
  - Instalação de estrutura para acertar a orientação para o norte geográfico e aumentar a inclinação dos coletores solares para 33°, conforme recomendado pelas divisões 10.3.2 e 10.3.3 respectivamente;
  - Instalação de bomba e periféricos para realizar a circulação de água no circuito primário ou elevação do reservatório térmico acima do ponto mais alto dos coletores solares, devido a nova inclinação dos mesmos.

Não existe uma aderência mínima à seção 10 da norma que indique boa eficiência térmica global, isso acontece porque dentre as 40 divisões dessa seção, apenas 3 tem relação direta com a performance do sistema, sendo elas a divisão 10.3.2 – Orientação Geográfica, 10.3.3 – Ângulo de Inclinação e 10.3.9 - Sombreamento. As demais divisões abordam assuntos como manutenção, operação e segurança do sistema.

É possível observar que alguns erros na instalação podem deixar o sistema inoperante, como por exemplo o erro de instalação apresentado pela Figura 3.12 ou que a falta de orientação do instalador ao usuário pode diminuir a eficiência térmica dos coletores solares como foi apresentado pela Figura 3.3.

A falta de conhecimento técnico dos profissionais que atuam nesta área pode aumentar o preconceito na utilização desse tipo de tecnologia que é muito empregada e disseminada pelo mundo.



## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15569: Sistema de aquecimento solar de água em circuito direto – Projeto e instalação. Rio de Janeiro, 2008.

CENTRO DE PESQUISAS METEOROLÓGICAS E CLIMÁTICAS APLICADAS A AGRICULTURA. Clima dos Municípios Paulistas. Campinas. Disponível em <[http://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima\\_muni\\_270.html](http://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima_muni_270.html)>. Acesso em 18 jul. 2017.

CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO BRITO. Potencial solar – Sundata. Rio de Janeiro, 2015, CEPEL. Disponível em <<http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata&>>. Acesso em 18 jul. 2017.

\_\_\_\_\_. PBE- Coletor Solar aplicação Banho e Piscina. Tabelas de Consumo / Eficiência Energética. Brasília: MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO, INDÚSTRIA E COMÉRCIO EXTERIOR, 2017a. 9p.  
Disponível em <<http://www.inmetro.gov.br/consumidor/pbe/coletores-solares-banhoe-piscina.pdf>>. Acesso em 14 mar. 2017.

DUFFIE, J.A.; BECKMAN, W. A. Solar Heating and Cooling. Science, v.191, n.4223, 1976.

PACHECO, C. R. F.. Fundamentos da Utilização de Energia Solar. In: SIMÕES MOREIRA, J. R. (org).. Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética. 1ª Edição. Rio de Janeiro: LTC, 2017. Capítulo 9, p 187-221

SOWMY, D. S.. Energia Solar – Tecnologia e Aplicações. In: SIMÕES MOREIRA, J. R. (org). Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética. 1ª Edição. Rio de Janeiro: LTC, 2017. Capítulo 10, p 222-234

\_\_\_\_\_.Tabela de Emissividade. CONTEMP: MEDIÇÃO, CONTROLE E MONITORAMENTO DE PROCESSOS INDUSTRIAIS, 2017a. 1p.  
Disponível em < [http://www.contemp.com.br/downloads/pdf/Tabela\\_de\\_Emissividades.pdf](http://www.contemp.com.br/downloads/pdf/Tabela_de_Emissividades.pdf)>. Acessado em 05 set. 2017.

\_\_\_\_\_.Termomecanica São Paulo S.A.. Cobre Eletrolítico , 2017a. 3p.  
Disponível em < [https://www.termomecanica.com.br/EN/download/conteudo\\_tecnico/ficha-110.pdf](https://www.termomecanica.com.br/EN/download/conteudo_tecnico/ficha-110.pdf)>. Acessado em 14 mar. 2017.