



## **PROJETO E ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DE UM SISTEMA SOLAR MISTO DE AQUECIMENTO DE ÁGUA E DE CONDICIONAMENTO TÉRMICO DE EDIFICAÇÕES PARA SANTA MARIA RS**

**Madalena Russi (1); Joaquim C. Pizzutti dos Santos (1); Egon Vettorazzi (1);  
Roberta Mulazzani Doleys Soares (1)**

(1) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental – Universidade Federal de Santa Maria, Brasil. E-mail: madalenarussi@gmail.com; joaquim@smail.ufsm.br; egon.arquiteto@gmail.com; roberta.doleys@gmail.com

### **RESUMO**

O aproveitamento da energia solar em edificações contribui para a melhoria das condições de conforto e a redução do consumo de energia elétrica. O trabalho apresenta um sistema combinado de captação de energia solar no telhado, sendo uma fração dessa carga térmica utilizada para o aquecimento da água de consumo e outra parcela destinada para o condicionamento térmico da edificação nos períodos frios, através de um sistema de calefação dos ambientes pelo insuflamento do ar aquecido. Foi realizado um estudo dos modelos de captação de energia solar existentes, elaborado um pré-projeto do sistema proposto e desenvolvida a modelagem matemática para avaliação da aplicabilidade do sistema para o clima de Santa Maria no Rio Grande do Sul, considerando-se o uso em uma residência modelo e os dados climáticos do mês de Julho, no qual a disponibilidade de radiação solar é mais limitada para a região do estudo. Os resultados obtidos demonstraram que o subsistema de calefação conseguiu elevar a temperatura ar no interior da residência em até 7°C no pico máximo, e durante aproximadamente 30% das horas conseguiu manter a temperatura do ar da edificação em conforto térmico. No subsistema de aquecimento de água, para o mês estudado, a temperatura da água aumentou 5,5°C, enquanto nos meses de Dezembro, Janeiro, Fevereiro e Março a temperatura da água ultrapassa 35°C, podendo-se observar que a demanda de água quente nesses meses será suprida sem o uso de energia elétrica. Constatou-se que no mês mais crítico do inverno, o sistema combinado proposto apresentou resultados positivos, os quais serão superiores nos outros meses do ano, o que leva à conclusão de que o uso desse tipo de sistema deva ser levado em consideração para este clima, principalmente com relação ao seu dimensionamento adequado.

Palavras-chave: Sistema combinado, Aquecimento de água, Calefação, Conforto térmico

### **ABSTRACT**

The use of solar energy in buildings contributes to the improvement of comfort and reduce power consumption. The paper presents a combined system of solar energy on the roof, with a fraction of this thermal load for heating drinking water and another portion allocated for the thermal conditioning of the building in cold periods, through a heating system environments the heated air insufflation. We conducted a study of models of solar energy available, a pre-drawn design of the proposed system and developed a mathematical model to evaluate the applicability of the system to the climate of Santa Maria in Rio Grande do Sul, considering use in a residence model and climate data for the month of July, in which the availability of solar radiance is more limited in the region of study. The results demonstrated that the heating subsystem could raise the temperature of the air inside the house at 7°C for up to a maximum, and for approximately 30% of the time kept the temperature of the air in the building thermal comfort. Subsystem heating water, for the month studied, the water temperature increased by 5,5°C, while in the months of December, January, February and March the water temperature exceeds 35°C, can be observed that the water demand hot in these months will be met without the use of electricity. It was found that in the most critical month of winter, the proposed combined system showed positive results, which will be higher than in other months of the year, which leads to the conclusion that the use of this type of system should be taken into consideration for this climate mainly with respect to its proper sizing.

Keywords: Combined system, Water heating, Heating, Thermal Comfort

## 1. INTRODUÇÃO

No sul e sudeste do Brasil, há uma carência de tecnologias para aquecimento eficiente do interior das edificações, que são necessários para os períodos frios. A utilização da energia solar para aquecimento de água vem sendo bastante utilizada e é considerada uma boa alternativa para economia de energia, porém o alto custo de implantação desses sistemas impede que eles sejam utilizados em larga escala.

De acordo com Pesquisa de Posse de Equipamentos e Hábitos de uso, ano base 2005, os maiores responsáveis pelos gastos com a energia elétrica residencial são os chuveiros elétricos e os sistemas de condicionamento térmico de ambientes (ELETROBRAS/PROCEL, 2007). Nesse contexto, é de grande importância o estudo de um sistema que combine condicionamento térmico de ambientes ao aquecimento da água de consumo, melhorando as condições gerais de conforto ao usuário, sem aumento do consumo de energia elétrica, resultando assim em edificações mais sustentáveis.

Diante disso, desenvolveu-se o subsistema de aquecimento de água que foi pensado visando aproveitar parte da energia coletada para aquecer a água de consumo, sendo que o aquecimento da água do reservatório se dá pela presença de um painel solar inserido no coletor solar, o qual aquece a água que circula no sistema transferindo gradativamente o calor coletado para o reservatório, por isso a própria água que servirá para o consumo irá circular entre o painel e o reservatório fazendo a transferência de calor entre eles, esse sistema é conhecido como sistema aberto. E o subsistema de calefação permitirá que uma parcela da energia solar captada seja utilizada para o condicionamento térmico da edificação, atuando de formas distintas nas diferentes estações climáticas, inverno e verão.

A proposta deste trabalho visa ao desenvolvimento de um sistema combinado de captação de energia solar utilizando a cobertura das edificações, com a finalidade de aquecer água e condicionar termicamente ambientes, buscando disponibilizar soluções que aumentem o conforto do usuário e amenizem os problemas ambientais causados pelo alto dispêndio energético gerado pelos equipamentos tradicionais. Para a realização desse estudo foi considerada a cidade de Santa Maria – RS, situada na região subtropical, Zona Bioclimática 2 Brasileira.

## 2. OBJETIVO

Desenvolver o pré-projeto de um sistema de captação de energia solar na cobertura das edificações, buscando uma forma de aproveitamento simultâneo desta energia para o aquecimento de água de consumo e calefação de edificações.

## 3. METODOLOGIA

Para possibilitar os cálculos de eficiência do sistema, foi necessário o desenvolvimento de um projeto modelo, sendo que este consiste em uma edificação residencial de 87,74m<sup>2</sup> e com características construtivas típicas da região da cidade de Santa Maria – RS, a Tabela 1 apresenta os materiais da edificação modelo e suas características térmicas. Foi considerado no cálculo de fator solar o coeficiente de absorção para pintura em cor clara e intervalo de tempo de 24 horas para o cálculo do atraso térmico. As características térmicas foram calculadas de acordo com a NBR 15220-2.

Tabela 1 - Materiais componentes da edificação e suas características térmicas.

Componente da edificação	Materiais utilizados		Características Térmicas	
	Composição dos materiais	Espessura total (cm)	Transmitância Térmica (W/m <sup>2</sup> .K)	Capacidade Térmica (kJ/(m <sup>2</sup> .K)
Paredes Externas	Tijolo cerâmico 6 furos circulares (10x15x20cm) espessura argamassa de emboço de 2,5cm espessura argamassa de assentamento de 1cm	20	1,92	202
Cobertura	Telha de barro, lâmina de alumínio polido e laje mista espessura da telha de 1cm espessura laje de 12cm	Variável	1,09	113
Paredes Internas	Tijolo cerâmico 6 furos circulares (10x15x20cm) espessura argamassa de emboço de 2,5cm espessura argamassa de assentamento de 1cm	15	2,28	168
Janelas	Vidro simples	0,6	4,7	-
Porta	Madeira maciça	4	2,7	-



Figura 1 – Disposição do sistema combinado proposto na residência.

O projeto do sistema combinado de aquecimento de ambientes e água possui um elemento de captação da energia solar, a qual é utilizada para duas finalidades simultâneas: o condicionamento térmico e aquecimento de água. Finalidades as quais, denominou-se de subsistema de aquecimento de ambientes e subsistema de aquecimento de água de consumo, para as análises consideraram-se os dados climáticos do mês de Julho, no qual a disponibilidade de radiação solar é mais limitada para a região do estudo. A cobertura foi escolhida para captar a energia solar, visto que é o elemento que recebe maior radiação solar, para esta captação de energia solar foi criado um compartimento com cobertura envidraçada, a Figura 1 apresenta de forma esquemática a disposição desses sistemas na edificação.

### 3.1. Captação da energia solar

Escolheu-se o ático do telhado para a captação da energia solar e com o painel voltado para o Norte, este posicionamento permite maior absorção de energia solar, no caso do hemisfério Sul. No coletor, as telhas da cobertura são substituídas por um fechamento em vidro transparente de 8 mm, permitindo que a radiação solar incida diretamente no interior, criando o “efeito estufa” e impedindo as perdas por convecção, que neste caso seriam as perdas de energia mais significativas, devido às correntes de ar externas ao sistema. As características da cobertura e os materiais utilizados no coletor de captação e armazenamento da energia solar estão listados na Tabela 2.

Tabela 2 - Materiais e características da cobertura.

Materiais	Característica/dimensão
Material acumulador de calor	Concreto
Vidro de vedação comum	8mm
Largura da Placa ( $L_{1P}$ )	2m
Comprimento da placa absorvedora (vidro)	10,3 m
Área Coletora nominal ( $A_{1P}$ )	21,4 m <sup>2</sup>
Material isolante térmico	Manta de lã de vidro aluminizada

Para o espaço do coletor solar será utilizado todo o comprimento da edificação (10,70m), com uma largura do vidro de 2 metros, resultando o painel captador com uma área total de 21,4 m<sup>2</sup>, sendo que 2m<sup>2</sup> dessa área são considerados como área de captação para aquecimento de água, ou subsistema de aquecimento de água. O material escolhido para fazer os fechamentos laterais e inferior do coletor é concreto, com acabamento interno em tinta preta fosca para aumentar o coeficiente de absorção e diminuir a porcentagem de reflexão. O fechamento em concreto será revestido, na face aposta à superfície de captação, por isolante térmico (lã de vidro) com acabamento aluminizado, diminuindo assim as perdas térmicas e melhorando a eficiência do sistema.

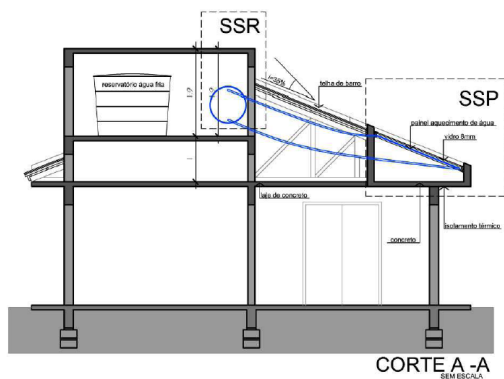


Figura 2 – Corte A-A evidenciando os subsistemas de aquecimento de água.

### 3.2. Subsistema de aquecimento de água

A disposição desse subsistema no telhado é representada na Figura 2, ele é subdividido em subsistema de painel solar (SSP) e pelo subsistema de reservatório térmico (SSR).

As placas utilizadas nos cálculos são da marca Soletrol, sendo do modelo Soletrol Max Mini Cobre®, as características do painel estão listadas na Tabela 3. A tubulação que liga a serpentina do painel coletor ao reservatório térmico, também é em cobre, sendo revestida com material isolante, para diminuir as perdas de energia térmica. As características dessa tubulação estão listadas na Tabela 4.

Tabela 3 - Características do painel coletor solar do subsistema de aquecimento de água.

Característica	Valor
Material da Superfície Coletora	Cobre
Material dos tubos internos	Cobre
Diâmetro interno dos tubos de entrada e saída ( $D_p$ )	1,3 mm
Espessura da tubulação	1,3 mm (interna)
Largura da Placa ( $L_p$ ) x Comprimento da placa	0,992 m x 1,02 m
Área Coletora nominal ( $A_p$ )	1,0 m <sup>2</sup>
Altura da placa	0,05 m
Possui cobertura de vidro	SIM
Comprimento total dos tubos internos ( $C_1$ )	26 m

Tabela 4 – Características da tubulação no trecho entre o painel coletor e o reservatório térmico.

Característica	Valor
Material da tubulação	Cobre
Diâmetro interno da tubulação	$2,5 \cdot 10^{-2}$ m
Espessura da tubulação	$2,0 \cdot 10^{-3}$ m
Material Isolante	Espuma sintética
Espessura do material isolante	$1,0 \cdot 10^{-2}$ m
Comprimento da tubulação	3,81 m

O modelo de reservatório térmico escolhido é o Superboiler Soletrol Max, suas principais características são descritas na Tabela 5.

Tabela 5 – Características do reservatório térmico Modelo Superboiler Soletrol Max®.

Característica	Valor
Volume Interno ( $V_{lr}$ )	200 Litros (0,2 m <sup>3</sup> )
Diâmetro do Reservatório ( $[D]_r$ )	0,65 m
Comprimento do Reservatório ( $L_{lr}$ )	0,9 m
Diâmetro interno dos tubos de entrada e saída	$2,5 \cdot 10^{-2}$ m
Espessura da tubulação	$2,0 \cdot 10^{-3}$ m
Revestimento externo	Alumínio
Corpo interno	Aço Inox
Espessura do revestimento externo	$1,0 \cdot 10^{-2}$ m
Material isolante	Poliuretano
Espessura do material do corpo interno	$2,0 \cdot 10^{-2}$ m
Espessura do material isolante	0,1 m

Fonte: SOLETROL (2011).

Para garantir que a água quente atinja a temperatura adequada, considerou-se o uso de uma ducha com controle eletrônico de temperatura, considerando um menor desperdício de energia elétrica e de água. A resistência elétrica dessa ducha é acionada quando a água está com temperatura abaixo de 30°C do aquecedor ou enquanto a água quente do boiler ainda não chegou ao chuveiro, evitando o desperdício de água no banho.

### 3.3. Subsistema de calefação de ambientes

O subsistema de calefação é subdividido em dois, subsistema de captação de energia (SSCC), e subsistema de armazenamento (SSA), considerado este, como sendo toda a parte interna da residência. Durante o inverno o ar aquecido será insuflado nos cômodos da edificação fazendo a calefação dos ambientes cujo funcionamento é regulado de acordo com a diferença de temperatura do ar através de um sistema automatizado, enquanto no período de verão o ventilador é ligado no sentido reverso, acelerando a retirada do ar aquecido da edificação.

A movimentação e a velocidade do ar no interior do coletor são comandadas pelo uso de um exaustor com base no clima do dia e tendo como parâmetro as temperaturas fixas de conforto térmico. De acordo com a NBR 16401 (ABNT, 2008) no período de verão, para condicionamento artificial, são consideradas confortáveis temperaturas entre 23 a 25°C, já para o inverno as temperaturas devem variar entre 20 a 22°C.

O exaustor é responsável pelo insuflamento do ar aquecido nos cômodos da edificação, como demonstra a Figura 3 e da marca é Tron1/4 HP Bivolt, com as características listadas na Tabela 6.

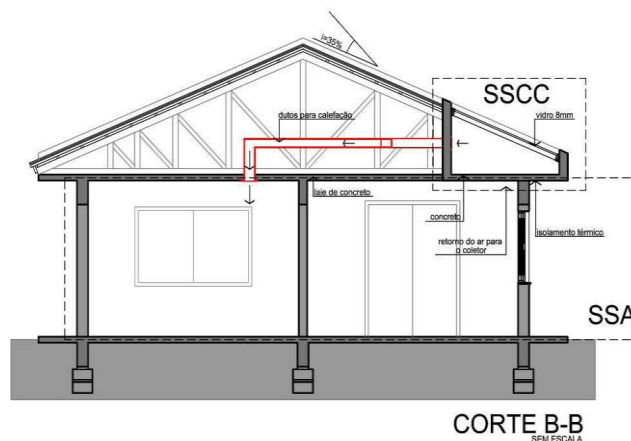


Figura 3 – Corte B-B com os subsistemas da calefação.

Tabela 6 – Características do exaustor utilizado no subsistema de calefação.

Característica	Valor
Potência (w)	¼ HP
Vazão máxima (m³/h)	4200 m³/H
Velocidades	1.700 RPM
Dimensões	Altura: 23,6cm; Diâmetro: 40,5cm
Peso aproximado	7,5kg
Modelo	2654

Consideraram-se dois termostatos operando em conjunto, um deles é colocado na saída da tubulação de ar quente do ático para medir a temperatura do ar aquecido no coletor, o outro se localiza dentro da sala de estar, ambiente considerado de grande circulação de pessoas dentro da edificação. Quando o sistema de automação acusar temperatura dentro dos cômodos maior que a temperatura que sai do ático, a passagem de ar para os ambientes é trancada automaticamente, esse bloqueio ocorrerá em dias nublados e principalmente durante a noite, pois, não havendo ganho de calor, este sistema resfriará.

Se a temperatura interna chegar a 26,5° C, temperatura estabelecida como máxima pela NBR 16401 (ABNT, 2008), o sistema de calefação será bloqueado, impedindo que a temperatura de conforto seja ultrapassada. Nos meses de verão, é aberto um alçapão, que faz a ligação de todo o sistema com uma chaminé, nesse período o ar aquecido dentro das edificações tende a subir por diferença de pressão. Assim, os dutos que levam o ar aquecido aos cômodos nos meses de inverno, começam a funcionar de maneira contrária, de forma passiva, levando o ar aquecido dos ambientes para a chaminé, onde o será eliminado. Pela mesma chaminé, é eliminado também o ar aquecido presente em todo o telhado, devido à diferença de densidade do ar aquecido, cria uma corrente que tende a subir, ao encontrar uma abertura é expulsa da edificação.

O insuflamento pode também ser controlado manualmente no interior de cada ambiente, graduando-se sua vazão de acordo com as necessidades de cada usuário, sendo dessa forma possível deixar o sistema fechado em um determinado ambiente, maximizando o aquecimento nos demais cômodos. Todavia, para o cálculo de rendimento do sistema, o interior da residência foi considerado um acumulador de calor, nomeado como subsistema de armazenamento de energia SSA.

O ar do ático envidraçado é levado aos diferentes ambientes da edificação por meio de uma tubulação de canos de PVC, sendo essa tubulação isolada termicamente, diminuindo perdas de energia térmica até chegar aos cômodos da residência.

### 3.4. Modelagem matemática do sistema de calefação

A modelagem matemática é baseada na aplicação das equações de balanço de energia, balanço de massa e transferência de calor nos subsistemas. A Figura 4 representa os fluxos de calor assumidos entre o coletor solar e a casa.

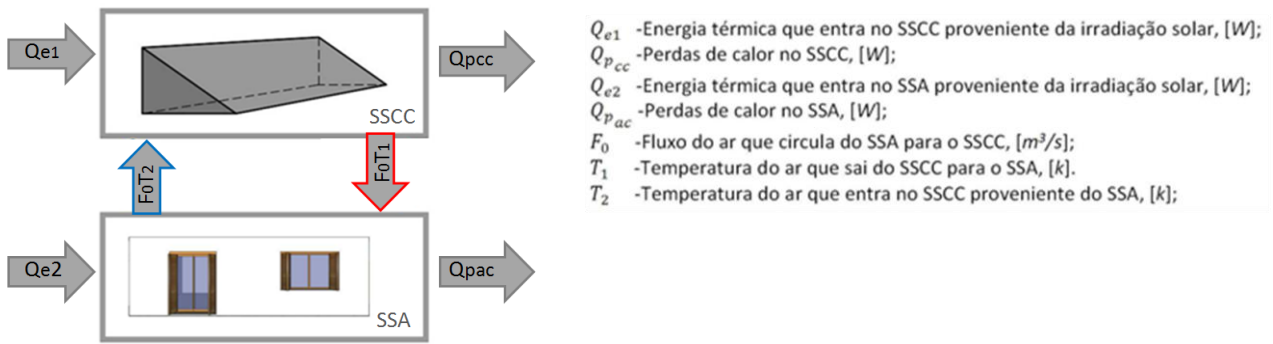


Figura 4 – Representação dos fluxos térmicos que envolvem o sistema de calefação e a casa.

### 3.4.1. Balanço de energia no subsistema de armazenamento (SSA)

Para a modelagem matemática do subsistema de armazenamento de calor foi aplicada a equação de balanço de energia com o volume considerado conforme a Figura 5.

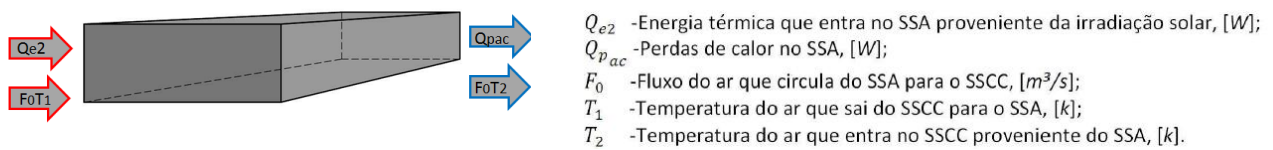


Figura 5 – Representação esquemática do balanço de energia no subsistema de armazenagem de calor – SSA.

Considerações:

- No reservatório está chegando e saindo fluxo de ar a uma vazão denominada  $F_0$ , conforme a lei da conservação de massa, o fluxo que entra é igual ao que sai, visto que o sistema não gera ou acumula fluxos de ar.
- O subsistema de armazenagem de calor não realiza trabalho, ( $W=0$ ).
- A residência recebe calor via incidência solar denominado nesta modelagem  $Q_{e2}$ .
- Ocorrem perdas de calor pelas paredes, denominadas nesta modelagem de  $Q_{pac}$ .
- A variação da energia cinética é desprezível, ( $K=0$  e  $K_0=0$ ).
- A variação da energia potencial é desprezível, ( $\Phi = 0, \Phi_0 = 0$ ).
- Não ocorre reação química, logo não há geração de energia ( $Q_g = 0$ ).
- Todo fluido que se encontra dentro do subsistema de armazenamento está à mesma temperatura (mistura perfeita). O fluxo de ar que entra no subsistema de acumulação é oriundo apenas do subsistema coletor de calor e não há troca térmica por meio da laje, supõe-se um isolante térmico ideal impedindo as trocas térmicas com o meio.

Com as considerações acima descritas, resulta na Equação 1:

$$-F_0\rho U_2 + F_0\rho U_1 - Q_{pac} - F_0P_2 + F_0P_1 + Q_{e2} = \frac{d(UV_{ac}\rho)}{dt} \quad \text{Equação 1}$$

### 3.4.2. Balanço de energia no subsistema de coleta de radiação para calefação (SSCC)

O subsistema de captação de calor (SSCC) é responsável pela absorção da radiação solar. Da carga térmica absorvida, parte serve ao aquecimento do ar e outra fração é perdida para o meio. A Figura 6 demonstra esquematicamente as entradas e saídas de massa e energia no volume do coletor.

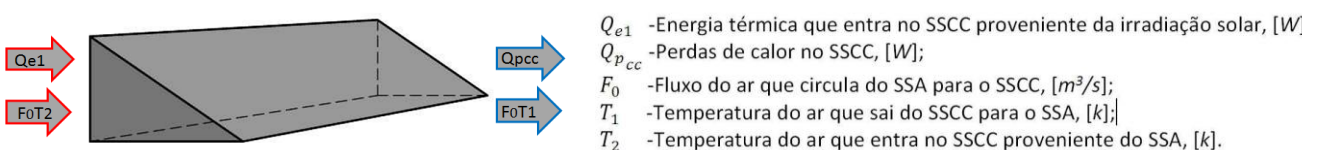


Figura 6 – Representação esquemática do balanço de energia no coletor SSCC.

As considerações iniciais são:

- No sistema de coleta de energia está chegando e saindo fluxo de ar a uma vazão denominada  $F_0$ .
- O SSCC não realiza trabalho ( $W=0$ ).
- O sistema de coleta de calor recebe calor via incidência solar denominado  $Q_{e1}$ .
- Ocorrem perdas de calor pela superfície do vidro, denominadas nesta modelagem  $Q_{pcc}$ .
- A variação da energia cinética e potencial é desprezível, não há reação química e todo o fluido no interior das placas está à mesma temperatura.
- O efeito da sujeira e poeira sobre o vidro será desprezado, devido à ausência de referências que descrevem matematicamente este fenômeno.

Obtendo a Equação 2, que representa o balanço de energia no SSCC:

$$V_{cc}\rho C_p \frac{d(T_1)}{dt} = F_0\rho C_p(T_2 - T_1) + Q_{e1} - Q_{pcc}$$

Equação 2

### 3.5. Modelagem do sistema de aquecimento de água

A modelagem para o aquecimento de água segue o mesmo procedimento da modelagem do sistema de calefação, porém com outros volumes de controle. Para viabilizar o cálculo deste subsistema são

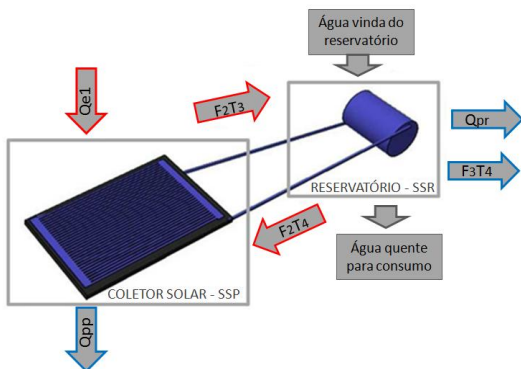
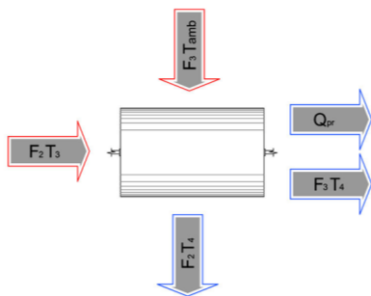


Figura 7 – Representação dos fluxos de calor no subsistema de aquecimento de água.

desprezadas as perdas e ganhos térmicos nas tubulações, essa simplificação é justificável por este volume ser desprezível quando considerado o volume total de água contido no reservatório, além disso, as tubulações possuem isolamento térmico, o que na prática reduz as trocas com o meio. A Figura 7 representa os fluxos de calor assumidos na representação no subsistema de aquecimento de água, onde:  $Q_{e3}$  é a energia absorvida pelo SSP, [W];  $Q_{pp}$  é as perdas de calor no SSP, [W];  $Q_{pr}$  é a perdas de calor no SSR, [W];  $F_2$  é o fluxo de água que circula entre o SSR e o SSP, [m<sup>3</sup>/s];  $F_3$  é o fluxo de água que sai do SSR para o uso [m<sup>3</sup>/s];  $T_3$  é a temperatura de água que entra no SSR após passar pelo SSP, [°C];  $T_4$  é a temperatura que sai do SSR, [°C].

#### 3.5.1. Balanço de energia no reservatório de água quente (SSR)

O reservatório térmico armazena a água que será liberada para o uso, considerando o reservatório como volume de controle, observa-se troca de fluidos a partir de dois fluxos chamados nesta modelagem de  $F_2$  e  $F_3$ . O Fluxo  $F_2$  se refere ao fluxo de água que circula entre o reservatório e as placas coletoras, definido pela vazão da bomba de água selecionada, enquanto  $F_3$  se refere à demanda de água, decorrente da utilização dos usuários. A Figura 8 mostra esquematicamente as entradas e saídas de massa e energia que envolve o reservatório térmico.



- $Q_{pr}$  -Perdas de calor no SSR, [W];
- $F_2$  -Fluxo da água que circula entre o SSR e o SSP, [m<sup>3</sup>/s];
- $F_3$  -Fluxo da água que sai do SSR para o uso (demanda), [m<sup>3</sup>/s];
- $T_3$  -Temperatura da água que entra no SSR após passar pelo SSP, [°C];
- $T_4$  -Temperatura da água que sai do SSR, [°C].

Figura 8 – Representação esquemática do balanço de energia no reservatório térmico – SSR.

As considerações iniciais são:

- O reservatório térmico não realiza trabalho ( $W=0$ ) e não recebe radiação solar direta.
- Ocorrem perdas de calor, denominadas nesta modelagem  $Q_{pr}$ .
- A variação da energia cinética é desprezível, ( $K = 0, K_0 = 0$ ).
- A variação da energia potencial é desprezível, ( $\Phi = 0, \Phi_0 = 0$ ).
- Não ocorre reação química, logo não há geração de energia ( $Q_g = 0$ ).

- Todo fluido que se encontra no interior do reservatório está à mesma temperatura.

Realizando os mesmo passos e considerações, obtém-se a Equação 3.

$$V_r \rho_{h2o} C_{p_{h2o}} \frac{d(T_4)}{dt} = F_2 \rho_{h2o} C_{p_{h2o}} (T_3 - T_4) + F_3 \rho_{h2o} C_{p_{h2o}} (T_{amb} - T_4) - Q_{pr}$$

Equação 3

### 3.5.2. Balanço de energia no painel (SSP)

As placas coletoras (SSP) absorvem energia solar incidente em sua superfície e a transmite para a água que circula em suas aletas, que é levada para o reservatório térmico (SSR) este armazena a água aquecida para posterior consumo. A Figura 9 demonstra esquematicamente as entradas e saídas de massa e energia nas placas coletoras do subsistema de coleta - SSP de energia térmica e transmissão da mesma para a água.

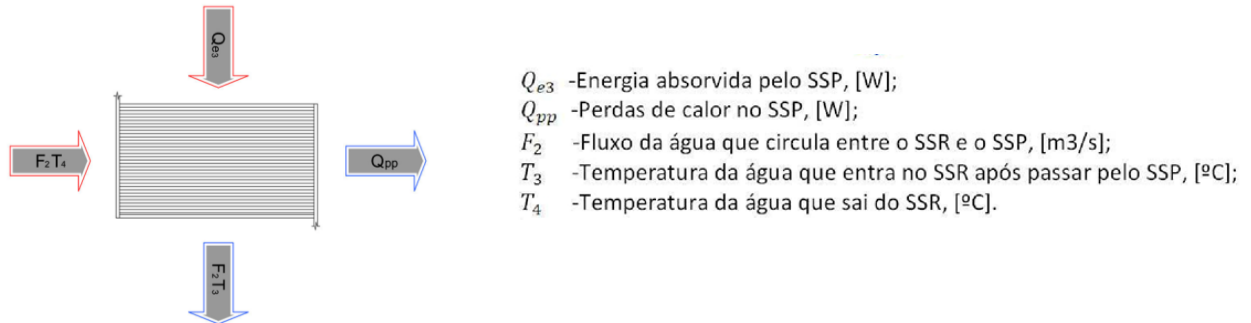


Figura 9 - Representação esquemática do balanço de energia no painel coletor solar - SSP.

As considerações iniciais são:

- As placas coletoras não realizam trabalho ( $W=0$ ).
- As placas recebem energia térmica proveniente do sol, chamadas nessa modelagem de  $Q_{es3}$ .
- Ocorrem perdas de calor, denominadas nesta modelagem  $Q_{pp}$ .
- A variação da energia cinética e potencial é desprezível, não há reação química e todo o fluido no interior das placas está à mesma temperatura.
- Considera-se que a água após o equilíbrio, a temperatura no interior das placas é igual à temperatura externa do vidro.
- A água circula a uma vazão  $F_2$  definida pela bomba.
- Realizando os mesmo passos e considerações, obtém-se a Equação 4:

$$V_{pp} \rho_{h2o} C_{p_{h2o}} \frac{d(T_3)}{dt} = F_2 \rho_{h2o} C_{p_{h2o}} (T_4 - T_3) + Q_{es3} - Q_{pp}$$

Equação 4

- $V_{pp}$  - Volume de água do SSP, [m<sup>3</sup>];
- $F_2$  - Fluxo da água que circula entre o SSR e o SSP, [m<sup>3</sup>/s];
- $C_{p_{h2o}}$  - Calor específico à pressão constante da água no sistema, [J/kg.°C];
- $T_4$  - Temperatura da água entra no SSP proveniente do SSR, [°C];
- $T_3$  - Temperatura da água que sai do SSP, [°C];
- $Q_{pp}$  - Perdas de calor no SSP, [W];
- $Q_{es3}$  - Energia absorvida pelo SSP, [W];
- $\rho_{h2o}$  - Densidade da água no sistema, [kg/m<sup>3</sup>].

### 3.6. O programa computacional e os parâmetros de simulação

As simulações foram realizadas com o programa computacional Simulink®, que é um pacote de dados do programa Matlab®, a simulação dinâmica do sistema de aquecimento de água e calefação residencial deve realizar o cálculo das variáveis de temperatura T1, T2, T3 e T4 baseado nas equações, descritas no item anterior, a cada instante de tempo. Escrevendo as equações, descritas, no formato de diagramas de blocos, com o auxílio da biblioteca de blocos do Simulink®, chega-se as rotinas de simulação. O objetivo do programa de simulação do sistema de calefação é estimar o ganho de temperatura ocasionado pelo sistema. Por isso, foi analisada principalmente a variável T2 em dois testes: com e sem sistema de calefação e para o sistema de aquecimento de água, monitorou-se a variável T4 para descobrir qual o ganho de temperatura da água. Foram utilizados arquivos climáticos TMY (*Typical Meteorological Year*) da cidade de Santa Maria -



RS fornecidos pelo projeto *Solar and Wind Energy Resource Assessment* (SWERA) e dados da radiação solar pelo *software Radiasol* do Laboratório de Energia Solar da UFRGS, que, utiliza como banco de dados os dados do SWERA (VETTORAZZI, 2011). Foram realizadas duas simulações para o sistema de calefação, uma delas com o sistema de calefação atuante sobre a edificação, e outra sem o sistema atuante. Para o sistema de aquecimento de água, foi realizada apenas uma simulação, monitorando a temperatura de saída da água do reservatório térmico, podendo-se assim comparar com a temperatura ambiente e estimar o ganho de temperatura propiciado pelo sistema.

## 4. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

### 4.1. Resultados referentes ao subsistema de calefação de ambientes

O gráfico da Figura 10 possui duas curvas representando a temperatura interna da edificação uma delas representa a temperatura interna sem o uso da calefação e a outra aquecida pelo sistema de calefação. Pode-se verificar na mesma figura, o seu potencial positivo. Logo após o momento que o exaustor entra em operação, observam-se as diferenças de valores entre as linhas do gráfico que representam a temperatura interna sem calefação e com o SSC em funcionamento.

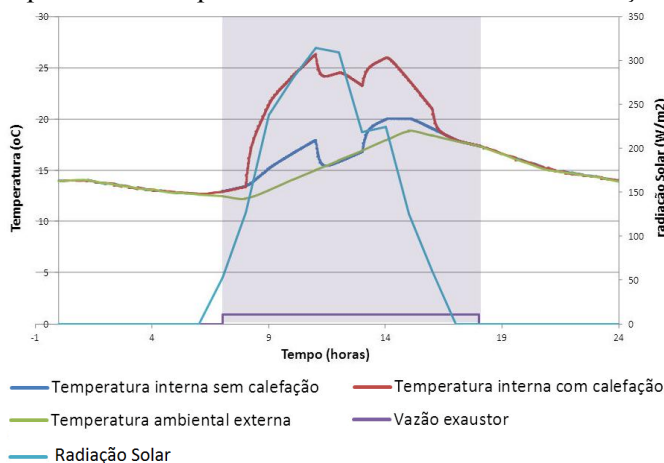


Figura 10 – Variação ao longo do dia da radiação solar e das temperaturas externa e interna sem e com o uso da calefação.

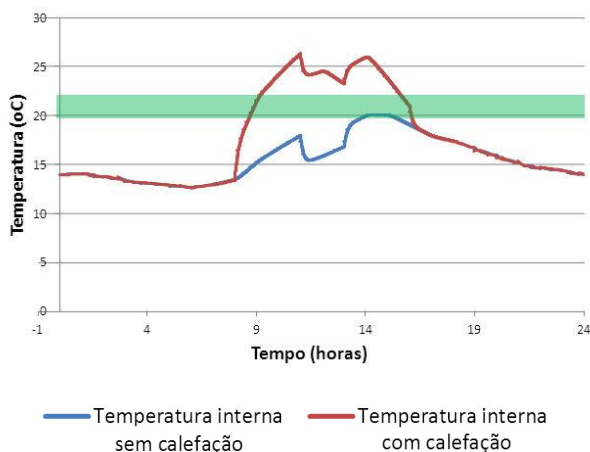


Figura 11 – Relação entre as temperaturas interna sem e com o uso da calefação e os limites de conforto estabelecidos pela NBR 16401 (ABNT, 2008).

Nos momentos de baixa ou nenhuma radiação solar, a casa se mantém aquecida devido à presença de materiais com alta capacidade térmica como as paredes em alvenaria e contra piso em concreto, que atuam como massa térmica, o que mantém a temperatura interna com menores variações.

### 4.2. Resultados referentes ao subsistema de aquecimento de água

O gráfico da Figura 12 apresenta o resultado da simulação para os valores de temperatura da água de consumo, que é aquecida pela radiação solar incidente no subsistema de painel coletor solar SSP, e armazenada para posterior consumo no subsistema de reservatório térmico SSR.

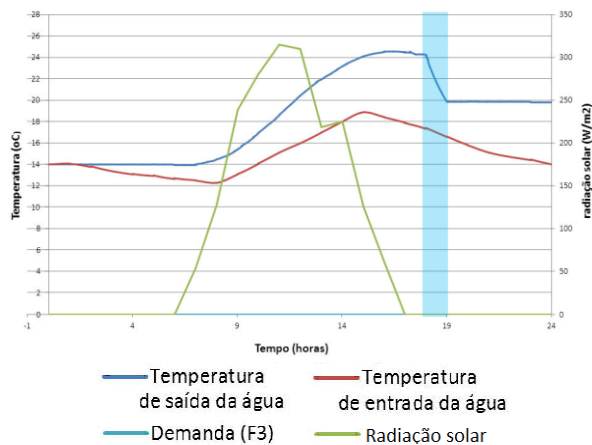


Figura 12 – Relação entre radiação solar e a temperatura da água de consumo sem e com o uso do aquecimento solar.

brusca na temperatura do reservatório no intervalo de tempo das 18 às 19 horas, horários determinados na simulação para a demanda diária do chuveiro, tendo sido considerados 4 banhos de 15 minutos cada. Durante o período de tempo em que não há insolação, o comportamento da temperatura segue o esperado, apresentando uma diminuição suave da temperatura durante todo o período noturno.

## 5. CONCLUSÕES

O desenvolvimento de um anteprojeto e a simulação computacional de um sistema que utiliza energia solar para calefação e aquecimento de água, integrados, demonstrou que é possível utilizar sistemas alternativos para condicionar termicamente ambientes e obter água aquecida nas regiões mais frias, como na região sul do Brasil, proporcionando conforto nas edificações sem agredir o meio ambiente, visando à criação de edificações mais sustentáveis.

Mesmo com a simulação de inverno tendo sido feita para o mês de Julho, período de menor insolação na região estudada, o sistema apresentou resultados satisfatórios para as duas situações requeridas pelo sistema combinado, tanto para o subsistema de calefação de ambientes quanto para o subsistema de aquecimento de água. Com o subsistema de calefação em uso, a temperatura interna da residência atinge um pico de 27°C, enquanto a temperatura máxima sem a utilização do sistema é de 20°C. Observou-se que o subsistema de calefação conseguiu alterar a temperatura de um status de desconforto para um status de conforto ambiental.

No que diz respeito ao subsistema de aquecimento de água para o consumo, o resultado para o mês de julho atingiu a variação de temperatura da água em aproximadamente 5,5°C. Considerando que esse sistema utiliza ducha eletrônica, com regulador de potência, para elevar a temperatura da água a um nível aceitável para o banho, não será necessária um aquecedor auxiliar no reservatório térmico, fato este que se traduz em um não desperdício de energia, pois, somente atingirá altas temperaturas o montante de água que será utilizada. Podemos considerar então que a demanda de energia elétrica será reduzida, pois a água chega pré-aquecida à ducha, fazendo com que a variação e temperatura proporcionada pelo sistema elétrico seja menor.

O projeto resultou em um sistema de certa aplicabilidade nas construções, pois se utiliza de materiais conhecidos, facilmente encontrados e de custo relativamente baixo, além disso, não necessita de mão de obra altamente qualificada para a sua execução. Outro fator relevante foi à manutenção da estética considerada aceitável dentro dos padrões normais das edificações, dessa forma facilitando a aceitação da implementação do uso do sistema pelos possíveis usuários. Portanto, ele evidencia a importância de que o projeto da edificação contemple sistemas e soluções que busquem a melhora da eficiência energética, utilizando estratégias integradas ao projeto arquitetônico que promovam conforto térmico.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 16401-1**: Instalações de ar-condicionado – Sistemas centrais e unitários. Rio de Janeiro, 2008.
- ELETOBRAS – Centrais Elétricas Brasileiras S.A.; PROCEL – **Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica. Pesquisa de Posse de Equipamentos e Hábitos de uso** – Ano Base 2005 – Classe Residencial – Relatório Brasil. Rio de Janeiro: ELETOBRAS/PROCEL, 2007.
- LUYBEN, W. L. **Process modeling, simulation and control for chemical engineers**. 2 ed. Singapore: McGraw-Hill, 1996.
- VETTORAZZI, Egon. **Desenvolvimento de um anteprojeto de sistema de calefação por piso radiante com aproveitamento da energia solar**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011.

Considerando a radiação solar bastante limitada para o mês de Julho, podem-se avaliar os resultados como sendo satisfatórios pela elevação da temperatura de aproximadamente 19°C para 24,5°C, aumentando em até 5,5°C a temperatura final da água de consumo. Embora o sistema de aquecimento de água não tenha atingido os valores requeridos para banho, a temperatura final da água será atingida com o uso de um sistema auxiliar de aquecimento.

O uso de um sistema auxiliar de aquecimento da água tem a função de garantir que a temperatura adequada seja atingida principalmente nos períodos de menor radiação solar. Tendo em vista que o sistema auxiliar receberá a água já em uma temperatura mais alta, a demanda de energia elétrica, para a temperatura para banho seja atingida, será menor.

No Gráfico da Figura 12 é possível observar a queda